

# 果肉着色过程中‘华秀’李果实部分指标的比较及相关性分析

翁文昕, 宣继萍<sup>①</sup>, 王 刚, 张计育, 贾晓东, 郭忠仁<sup>①</sup>

[江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园), 江苏 南京 210014]

**摘要:**以‘华秀’李(*Prunus salicina* ‘Huaxiu’)果实为实验材料,对不同果肉着色期(黄色期、橙色期和红色期)的果实品质指标[果实硬度、可溶性固形物(SS)含量、可滴定酸(TA)含量和固酸比(SS/TA)]、色素[叶绿素(Chl)、类胡萝卜素(Car)和花青苷(Ant)]含量、抗氧化指标(类黄酮含量、总酚含量和DPPH·清除力)和内源激素[吲哚乙酸(IAA)、玉米素(ZT)、脱落酸(ABA)和赤霉素(GA<sub>3</sub>)]含量进行了比较,并对这些指标进行了相关性分析。结果表明:随着果肉着色进程,果实硬度及TA和Chl含量不断下降,SS/TA、DPPH·清除力及Car、Ant、类黄酮和IAA含量不断上升,但SS和ZT含量先上升后下降,而总酚、ABA和GA<sub>3</sub>含量先下降后上升。其中,果实硬度和SS含量在果肉由黄色期向橙色期转变过程中变化显著( $P < 0.05$ ),Car及上述色素和内源激素含量在果肉由橙色期向红色期转变过程中变化显著,而TA、Chl和Ant含量及SS/TA在不同着色期差异显著。并且,随着果肉着色进程,Chl和Car含量所占比例不断下降,而Ant含量所占比例不断上升,且Chl和Ant含量所占比例变化明显。相关性分析结果表明:Car含量与类黄酮、总酚和IAA含量呈显著正相关;Ant含量与类黄酮和IAA含量呈显著正相关,与DPPH·清除力呈极显著( $P < 0.01$ )正相关;类黄酮含量与DPPH·清除力呈显著正相关,与IAA含量呈极显著正相关;DPPH·清除力与IAA含量呈显著正相关;ZT含量与ABA含量呈显著负相关。研究结果显示:在果肉着色过程中,‘华秀’李果实硬度下降,酸味减少,甜味增加,色泽变艳,抗氧化能力增强;其果肉颜色是叶绿素、类胡萝卜素和花青苷综合作用的结果,且其果肉颜色与其抗氧化能力关系密切,因此,可通过果肉颜色判断‘华秀’李果实的抗氧化能力。

**关键词:**‘华秀’李; 果肉着色; 果实品质; 色素; 抗氧化能力; 内源激素; 相关性分析

中图分类号: Q945.6<sup>+</sup>5; S662.3 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2018)02-0039-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2018.02.06

**Comparison and correlation analysis on some indexes of *Prunus salicina* ‘Huaxiu’ fruit during flesh coloring progress** WENG Wenxin, XUAN Jiping<sup>①</sup>, WANG Gang, ZHANG Jiyu, JIA Xiaodong, GUO Zhongren<sup>①</sup> (Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2018, 27(2): 39-45

**Abstract:** Taking *Prunus salicina* ‘Huaxiu’ fruit as experimental material, fruit quality indexes [fruit firmness, soluble solid (SS) content, titratable acid (TA) content, and soluble solid/titratable acid ratio (SS/TA)], pigment [chlorophyll (Chl), carotenoid (Car) and anthocyanin (Ant)] contents, antioxidant indexes (flavonoid content, total phenols content, and DPPH· scavenging ability) and endogenous hormone [indole acetic acid (IAA), zeatin (ZT), abscisic acid (ABA), and gibberellin (GA<sub>3</sub>)] contents were compared at different flesh coloring stages (yellow stage, orange stage, and red stage), and correlation analysis among these indexes was analyzed. The results show that with the process of flesh coloring, fruit firmness, and TA and Chl contents decrease gradually, SS/TA, DPPH· scavenging ability, and Car, Ant, flavonoid and IAA contents increase gradually, but SS and ZT contents increase firstly and then decrease, while total phenols, ABA and GA<sub>3</sub> contents decrease firstly and then

收稿日期: 2017-10-24

基金项目: 国家科学技术部“十二五”农村领域国家科技计划项目(2014BAD16B04)

作者简介: 翁文昕(1993—),女,江苏南京人,硕士研究生,主要从事果树种质资源及果实品质方面的研究工作。

<sup>①</sup>通信作者 E-mail: xuanjiping@cnbg.net; zhongrenguo@aliyun.com

increase. In which, changes of fruit firmness and SS content are significant ( $P < 0.05$ ) during flesh transforming period from yellow stage to orange stage, and those of Car, above pigment and endogenous hormone contents are significant during flesh transforming period from orange stage to red stage, while the differences in TA, Chl and Ant contents and SS/TA at different coloring stages are significant. Besides, with the process of flesh coloring, the proportions of Chl and Car contents decrease gradually, while that of Ant content increases gradually, and those of Chl and Ant contents change obviously. The correlation analysis results show that there are significantly positive correlations of Car content with flavonoid, total phenolic and IAA contents, significantly positive correlations of Ant content with flavonoid and IAA contents and an extremely significantly ( $P < 0.01$ ) positive correlation with DPPH· scavenging ability, a significantly positive correlation of flavonoid content with DPPH· scavenging ability and an extremely significantly positive correlation with IAA content, a significantly positive correlation of DPPH· scavenging ability with IAA content, and a significantly negative correlation of ZT content with ABA content. It is suggested that during flesh coloring process, fruit firmness of *P. salicina* 'Huaxiu' decreases, sour taste reduces, sweet taste increases, color is brightening, and antioxidant ability enhances; its flesh color is the result of comprehensive effect of chlorophyll, carotenoid, and anthocyanin, and its flesh color is closely related to its antioxidant ability. Therefore, the antioxidant ability of *P. salicina* 'Huaxiu' fruit can be judged by flesh color.

**Key words:** *Prunus salicina* 'Huaxiu'; flesh coloring; fruit quality; pigment; antioxidant ability; endogenous hormone; correlation analysis

李(*Prunus salicina* Lindl.)又称中国李,隶属于蔷薇科(Rosaceae)李属(*Prunus* Linn.),果实美味多汁,营养丰富,不仅可鲜食,还可用于食品加工,是深受人们喜爱的传统水果之一。中国是李的起源中心,栽培历史悠久,种植范围广阔,品种资源丰富。根据联合国粮食及农业组织(FAO)2013年统计数据,中国李的种植面积和产量均位居世界首位,但出口价格与进口价格的比值却低于世界平均水平,且进口价格一直高于出口价格<sup>[1]</sup>,国产李果实的品质总体欠佳是造成这一现状的重要原因之一,因此,亟待开展李果实品质改良研究,以提升国产李的国际竞争力。

果实色泽是评价水果品质的一项重要指标,红肉果实不仅在外观上更加吸引人,而且具有更高的营养价值。李果实色泽丰富,果皮颜色分为紫红色、红色、橙黄色、紫黑色、粉红色和蓝黑色6种类型,果肉颜色分为淡黄色、黄色、红色、黄绿色、橙黄色、紫红色、绿色和乳白色8种类型,国产李的果皮颜色以紫红色为主,果肉颜色以黄色最多、紫红色较少。郁香荷等<sup>[2]</sup>认为,红色和紫红色果肉可作为选育赏食两用李品种的重要指标。

'华秀'('Huaxiu')李是'秋姬'('Qiuji')李的芽变品种,果皮呈紫黑色,果肉完全成熟时呈紫红色,具有生长势强、早熟和高产等优点<sup>[3]</sup>,是选育赏食两用李品种的重要材料。为了明确李果实的呈色机制,以不同果肉着色期'华秀'李果实为研究材料,对不

同果肉着色期果实的品质指标、色素含量、抗氧化指标和内源激素含量进行了比较,并对这些指标进行了相关性分析,以期明确'华秀'李果实在果肉着色过程中的生理变化,为探究李果实呈色机制提供理论依据,并为李果实品质改良育种提供研究方向。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

供试'华秀'李果实于2016年7月20日采自江苏省东海县牛山果树综合试验场。在2007年发现的'秋姬'李芽变母株的芽变枝条上选取处于不同果肉着色期的果实,按照果肉颜色分为黄色、橙色和红色3组,分别对应果肉的黄色期、橙色期和红色期。每组10枚果实,共30枚果实。采集的鲜果直接用于果实硬度和可溶性固形物含量测定;随后,将果实去皮,果肉切片,放入液氮中速冻,用锡纸严密包裹后置于-80℃超低温冰箱中保存,用于可滴定酸含量、色素(包括叶绿素、类胡萝卜素和花青苷)含量、抗氧化指标(包括类黄酮含量、总酚含量和DPPH·清除力)和内源激素[包括吲哚乙酸(IAA)、玉米素(ZT)、脱落酸(ABA)和赤霉素(GA<sub>3</sub>)]含量测定。

主要仪器有GY-1果实硬度计(西安唯信机电设备有限公司)、WZ-112手持数显糖度计(北京万成北增精密仪器有限公司)、Aglient 1290超高效液相色谱

仪(美国 Agilent 公司)和 AB SCIEX QTRAPR 6500 LC-MS/MS系统(美国 AB SCIEX 公司)。芦丁和没食子酸标准品购自南京春秋生物工程有限公司,纯度大于等于 98%;Trolox 标准品购自东京化成工业株式会社,纯度大于等于 99.7%;IAA、ZT、ABA 和  $GA_3$  标准品购自美国 Sigma 公司,色谱纯级。

## 1.2 方法

1.2.1 果实品质指标测定 每组选取 5 枚果实,削去果皮,使用 GY-1 果实硬度计测定果实硬度;取少量果肉组织,挤出果汁,使用 WZ-112 手持数显糖度计测定可溶性固形物含量。每组称量 3 份果肉样品,每份 5.0 g,参照 GB/T 12293—90 中的方法测定可滴定酸含量。根据可溶性固形物含量和可滴定酸含量计算固酸比。

1.2.2 色素含量测定 每组称量 3 份果肉样品,每份 2.5 g,参照李合生<sup>[4]</sup>的方法测定叶绿素和类胡萝卜素含量;每组称量 3 份果肉样品,每份 1.0 g,采用 pH 示差法<sup>[5]</sup><sup>15</sup>测定花青苷含量。根据测定结果计算各色素含量所占比例。

1.2.3 抗氧化指标测定 使用芦丁标准品绘制标准曲线,每组称量 3 份果肉样品,每份 1.0 g,采用硝酸铝显色法<sup>[5]</sup><sup>16</sup>测定类黄酮含量;使用没食子酸标准品绘制标准曲线,每组称量 3 份果肉样品,每份 1.0 g,采用 Folin-Ciocalteu 法<sup>[6]</sup>测定总酚含量;使用 Trolox 标准品绘制标准曲线,每组称量 3 份果肉样品,每份 1.0 g,参照 Brand-Williams 等<sup>[7]</sup>的方法测定 DPPH·清除力(用 Trolox 当量表示)。

1.2.4 内源激素含量测定 每组称量 3 份果肉样品,每份 1.0 g,使用 10 mL 异丙醇-盐酸缓冲液进行提取,使用吲哚乙酸 (IAA)、玉米素 (ZT)、脱落酸 (ABA) 和赤霉素 ( $GA_3$ ) 标准品绘制标准曲线,进行 HPLC-MS/MS 分析。

色谱条件: Poroshell 120 SB-C<sub>18</sub> 反相色谱柱 (2.1 mm×150 mm, 2.7 μm); 柱温 30 ℃; 流动相 A 为

V(甲酸):V(甲醇)=1:10 混合溶液,流动相 B 为体积分数 0.1% 甲酸溶液;洗脱梯度程序为 0.0~2.0 min, 20% A; 2.0~4.0 min, 递增至 50% A; 4.0~10.0 min, 递增至 80% A; 10.0~11.0 min, 80% A; 11.0~11.1 min, 递减至 20% A; 11.1~15.0 min, 20% A; 进样量 2 μL。

质谱条件: 气帘气压 103.425 kPa, 喷雾电压 4 500 V, 雾化气压 448.175 kPa, 雾化温度 400 ℃, 辅助气压 482.650 kPa。

## 1.3 数据统计及分析

利用 SPSS 19.0 统计分析软件对相关数据进行单因素方差分析和相关性分析。

## 2 结果和分析

### 2.1 不同果肉着色期‘华秀’李果实品质指标的比较

不同果肉着色期‘华秀’李果实品质指标的比较见表 1。从表 1 可见:随着果肉着色进程,‘华秀’李的果实硬度不断减小,其中,黄色期的果实硬度最大 (4.29 kg·cm<sup>-2</sup>),显著 ( $P<0.05$ ) 高于橙色期和红色期;红色期的果实硬度最小 (1.72 kg·cm<sup>-2</sup>),但与橙色期果实硬度差异不显著。

从表 1 还可见:随着果肉着色进程,‘华秀’李果实的可溶性固形物含量先上升后下降,其中,黄色期果实的可溶性固形物含量最低 (11.83%),显著低于橙色期和红色期;橙色期果实的可溶性固形物含量最高 (14.17%);红色期果实的可溶性固形物含量略低于橙色期,为 13.64%。随着果肉着色进程,果实的可滴定酸含量显著下降,其中,黄色期果实的可滴定酸含量最高 (1.18%),红色期果实的可滴定酸含量最低 (0.68%)。随着果肉着色进程,果实的固酸比显著上升,其中,黄色期果实的固酸比最小 (10.02),红色期果实的固酸比最大 (20.09)。上述研究结果表明:在

表 1 不同果肉着色期‘华秀’李果实品质指标的比较 ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 1 Comparison on fruit quality indexes of *Prunus salicina* ‘Huaxiu’ at different flesh coloring stages ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

果肉着色期 Flesh coloring stage	果实硬度/kg·cm <sup>-2</sup> Fruit firmness	可溶性固形物含量/% Soluble solid content	可滴定酸含量/% Titratable acid content	固酸比 Soluble solid/titratable acid ratio
黄色期 Yellow stage	4.29±1.43a	11.83±1.43b	1.18±0.05a	10.02c
橙色期 Orange stage	2.32±0.47b	14.17±0.67a	0.97±0.05b	14.56b
红色期 Red stage	1.72±0.51b	13.64±1.17a	0.68±0.08c	20.09a

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ( $P<0.05$ ).

‘华秀’李果肉着色过程中,果实的甜味不断增加,酸味不断减少。

## 2.2 不同果肉着色期‘华秀’李果实色素含量的比较

不同果肉着色期‘华秀’李果实色素含量的比较见表2。从表2可见:随着果肉着色进程,‘华秀’李果实的叶绿素含量显著( $P<0.05$ )下降,其中,黄色期果实的叶绿素含量最高( $8.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),红色期果实的叶绿素含量最低( $5.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。随着果肉着色进程,果实的类胡萝卜素含量不断上升,其中,黄色期果实的类胡萝卜素含量最低( $2.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),略低于橙色期;红色期果实的类胡萝卜素含量最高( $5.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),显著高于黄色期和橙色期。随着果肉着色进程,果实的花青苷含量显著上升,其中,黄色期果实的花青苷含量最低( $2.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),红色期果实的花青苷含量最高( $45.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。值得注意的是,红色期果实的花青苷含量分别为橙色期和黄色期的5.93和16.38倍。

从表2还可见:黄色期‘华秀’李果实的叶绿素含量所占比例最高(63.49%),而类胡萝卜素和花青苷含量所占比例较低(分别为16.97%和19.53%);

橙色期果实的叶绿素和花青苷含量所占比例均较高(分别为44.12%和42.18%),而类胡萝卜素含量所占比例最低(13.71%);红色期果实的花青苷含量所占比例最高(80.36%),而叶绿素和类胡萝卜素含量所占比例较低(分别为9.63%和10.01%)。

## 2.3 不同果肉着色期‘华秀’李果实抗氧化指标的比较

不同果肉着色期‘华秀’李果实抗氧化指标的比较见表3。从表3可见:随着果肉着色进程,‘华秀’李果实的类黄酮含量不断上升,其中,黄色期果实的类黄酮含量最低( $1.59 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ),略低于橙色期;红色期果实的类黄酮含量最高( $3.79 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ),显著( $P<0.05$ )高于黄色期和橙色期。随着果肉着色进程,果实的总酚含量先下降后上升,其中,橙色期果实的总酚含量最低( $0.48 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ),略低于黄色期;红色期果实的总酚含量最高( $1.12 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ),显著高于黄色期和橙色期。随着果肉着色进程,果实的DPPH·清除力不断上升,其中,黄色期果实的DPPH·清除力最小( $0.61 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ),略低于橙色期;红色期果实的DPPH·清除力最大( $1.15 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ),显著高于黄色期和橙色期。

表2 不同果肉着色期‘华秀’李果实色素含量的比较( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Comparison on pigment contents in fruit of *Prunus salicina* ‘Huaxiu’ at different flesh coloring stages ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

果肉着色期 Flesh coloring stage	叶绿素含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Chlorophyll content	类胡萝卜素含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Carotenoid content	花青苷含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Anthocyanin content
黄色期 Yellow stage	$8.94 \pm 0.19\text{a}$ (63.49%)	$2.39 \pm 0.19\text{b}$ (16.97%)	$2.75 \pm 0.22\text{c}$ (19.53%)
橙色期 Orange stage	$7.95 \pm 0.64\text{b}$ (44.12%)	$2.47 \pm 0.05\text{b}$ (13.71%)	$7.60 \pm 0.77\text{b}$ (42.18%)
红色期 Red stage	$5.40 \pm 0.19\text{c}$ (9.63%)	$5.61 \pm 0.09\text{a}$ (10.01%)	$45.04 \pm 2.98\text{a}$ (80.36%)

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ( $P<0.05$ ). 括号内百分数为色素含量所占比例 Percentages in the brackets are proportions of pigment contents.

表3 不同果肉着色期‘华秀’李果实抗氧化指标的比较( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 3 Comparison on antioxidant indexes of fruit of *Prunus salicina* ‘Huaxiu’ at different flesh coloring stages ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

果肉着色期 Flesh coloring stage	类黄酮含量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ Flavonoid content	总酚含量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ Total phenols content	DPPH·清除力/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ DPPH·scavenging ability
黄色期 Yellow stage	$1.59 \pm 0.04\text{b}$	$0.50 \pm 0.04\text{b}$	$0.61 \pm 0.05\text{b}$
橙色期 Orange stage	$1.76 \pm 0.19\text{b}$	$0.48 \pm 0.05\text{b}$	$0.67 \pm 0.06\text{b}$
红色期 Red stage	$3.79 \pm 0.32\text{a}$	$1.12 \pm 0.03\text{a}$	$1.15 \pm 0.10\text{a}$

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ( $P<0.05$ ).

## 2.4 不同果肉着色期‘华秀’李果实内源激素含量的比较

不同果肉着色期‘华秀’李果实内源激素含量的比较见表4。从表4可见:随着果肉着色进程,‘华秀’

李果实的吲哚乙酸(IAA)含量不断上升,其中,黄色期果实的IAA含量最低( $1.67 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ),略低于橙色期;红色期果实的IAA含量最高( $9.27 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ),显著( $P<0.05$ )高于黄色期和橙色期。随着果肉着色进程,果实

的玉米素(ZT)含量先上升后下降,其中,橙色期果实的ZT含量最高( $119.47 \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),略高于黄色期;红色期果实的ZT含量最低( $77.24 \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),显著低于黄色期和橙色期。随着果肉着色进程,果实的脱落酸(ABA)和赤霉素( $\text{GA}_3$ )含量均先下降后上升,其中,橙色期果实的ABA和 $\text{GA}_3$ 含量均最低(分别为 $45.82 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $8.06 \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),略低于黄色期;红色期果实的ABA和 $\text{GA}_3$ 含量均最高(分别为 $93.21 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $36.97 \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),显著高于黄色期和橙色期。

## 2.5 ‘华秀’李果实部分指标的相关性分析

‘华秀’李果实色素含量、抗氧化指标和内源激

素含量间的相关性分析结果见表5。从表5可见:类胡萝卜素含量与类黄酮含量、总酚含量和吲哚乙酸(IAA)含量呈显著( $P < 0.05$ )正相关;花青苷含量与类黄酮含量和IAA含量呈显著正相关,与DPPH·清除力呈极显著( $P < 0.01$ )正相关;类黄酮含量与DPPH·清除力呈显著正相关,与IAA含量呈极显著正相关;DPPH·清除力与IAA含量呈显著正相关;玉米素(ZT)含量与脱落酸(ABA)含量呈显著负相关;其余指标间的相关性均不显著,其中,叶绿素含量与ZT含量呈正相关,但这2个指标与其他8个指标均呈负相关。

表4 不同果肉着色期‘华秀’李果实内源激素含量的比较( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 4 Comparison on endogenous hormone contents in fruit of *Prunus salicina* ‘Huaxiu’ at different flesh coloring stages ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

果肉着色期 Flesh coloring stage	吲哚乙酸含量/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ Indole acetic acid content	玉米素含量/ $\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ Zeatin content	脱落酸含量/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ Abscisic acid content	赤霉素含量/ $\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ Gibberellin content
黄色期 Yellow stage	$1.67 \pm 0.20\text{b}$	$109.63 \pm 10.87\text{a}$	$58.54 \pm 5.36\text{b}$	$12.11 \pm 2.35\text{b}$
橙色期 Orange stage	$2.20 \pm 0.07\text{b}$	$119.47 \pm 13.32\text{a}$	$45.82 \pm 6.23\text{b}$	$8.06 \pm 0.26\text{b}$
红色期 Red stage	$9.27 \pm 0.94\text{a}$	$77.24 \pm 4.77\text{b}$	$93.21 \pm 6.59\text{a}$	$36.97 \pm 6.14\text{a}$

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ( $P < 0.05$ ).

表5 ‘华秀’李果实色素含量、抗氧化指标和内源激素含量间的相关性分析<sup>1)</sup>

Table 5 Correlation analysis on pigment contents, antioxidant indexes, and endogenous hormone contents in fruit of *Prunus salicina* ‘Huaxiu’<sup>1)</sup>

指标 Index	相关系数 Correlation coefficient									
	$C_{\text{Chl}}$	$C_{\text{Car}}$	$C_{\text{Ant}}$	$C_{\text{F}}$	$C_{\text{TP}}$	DPPH·	$C_{\text{IAA}}$	$C_{\text{ZT}}$	$C_{\text{ABA}}$	$C_{\text{GA}_3}$
$C_{\text{Chl}}$	1.000									
$C_{\text{Car}}$	-0.968	1.000								
$C_{\text{Ant}}$	-0.986	0.997	1.000							
$C_{\text{F}}$	-0.979	0.999*	0.999*	1.000						
$C_{\text{TP}}$	-0.955	0.999*	0.991	0.995	1.000					
DPPH·	-0.985	0.997	1.000**	0.999*	0.992	1.000				
$C_{\text{IAA}}$	-0.978	0.999*	0.999*	1.000**	0.996	0.999*	1.000			
$C_{\text{ZT}}$	0.878	-0.970	-0.946	-0.957	-0.980	-0.947	-0.959	1.000		
$C_{\text{ABA}}$	-0.859	0.960	0.933	0.945	0.973	0.935	0.948	-0.999*	1.000	
$C_{\text{GA}_3}$	-0.920	0.989	0.973	0.981	0.995	0.974	0.982	-0.995	0.991	1.000

<sup>1)</sup>  $C_{\text{Chl}}$ : 叶绿素含量 Chlorophyll content;  $C_{\text{Car}}$ : 类胡萝卜素含量 Carotenoid content;  $C_{\text{Ant}}$ : 花青苷含量 Anthocyanin content;  $C_{\text{F}}$ : 类黄酮含量 Flavonoid content;  $C_{\text{TP}}$ : 总酚含量 Total phenols content; DPPH·: DPPH·清除力 DPPH· scavenging ability;  $C_{\text{IAA}}$ : 吲哚乙酸含量 Indole acetic acid content;  $C_{\text{ZT}}$ : 玉米素含量 Zeatin content;  $C_{\text{ABA}}$ : 脱落酸含量 Abscisic acid content;  $C_{\text{GA}_3}$ : 赤霉素含量 Gibberellin content. \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ .

## 3 讨论和结论

### 3.1 果肉着色期‘华秀’李的果实品质及生理变化

果实硬度是判断果实品质的主要指标,也是评价果实成熟和衰老的直观标准<sup>[8]</sup>;植物果实的可溶性

固形物包括单糖、双糖和多糖,是评价果实风味的重要指标,能够反映果实的甜度;可滴定酸也是评价果实风味的重要指标,能够反映果实的酸度;固酸比也用来衡量果实风味,其数值越高果实越甜,数值越低果实越酸。在‘华秀’李果肉着色过程中,其果实硬度和可滴定酸含量不断下降,固酸比不断上升,与实

际感官结果一致。本研究结果表明:‘华秀’李果实硬度下降和可溶性固形物含量上升主要发生在果肉由黄色期向橙色期转变的过程中,而在果肉由橙色期向红色期转变的过程中变化不明显,但可溶性固形物含量在果肉由橙色期向红色期转变的过程中下降,这可能是由红色期果肉含水量升高所致;类胡萝卜素、类黄酮、总酚、吲哚乙酸(IAA)、脱落酸(ABA)和赤霉素( $GA_3$ )含量及DPPH·清除力上升主要发生在果肉由橙色期向红色期转变的过程中。

比较而言,黄色期‘华秀’李的果实硬度最大,耐储运性能较好,为采收和运输的最佳时期。红色期‘华秀’李果实的可溶性固形物含量为13.64%,可滴定酸含量为0.68%,固酸比为20.09,与中国南方李主栽品种‘红心’(‘Hongxin’)李、‘芙蓉’(‘Furong’)李、‘三华’(‘Sanhua’)李、‘黑宝石’(‘Friar’)李和‘携李’(‘Zuili’)等<sup>[9]</sup>相比,‘华秀’李果实偏甜。花青苷含量较高的商业李品种果实的花青苷含量为5~177 mg·kg<sup>-1</sup><sup>[10]</sup>,其中,红肉品种‘Black Diamond’和紫肉品种‘Queen Garnet’果实的花青苷含量分别较商业李品种果实花青苷含量的最高值<sup>[10]</sup>高1.6和6.0倍。本研究中,不同果肉着色期‘华秀’李果实的花青苷含量为2.75~45.04 mg·kg<sup>-1</sup>,基本上低于商业李品种果实花青苷含量的最低值<sup>[10]</sup>,说明‘华秀’李的果实品质需要进一步改良。

### 3.2 色素含量对‘华秀’李果肉着色的影响

果实色泽是叶绿素、类胡萝卜素和花青苷等呈色物质综合作用的结果<sup>[11]</sup>,叶绿素使果实呈绿色,类胡萝卜素使果实呈黄色或橙色,花青苷使果实呈红色、紫色或蓝色,其中,花青苷对果肉颜色有决定作用,而类胡萝卜素和叶绿素则在果肉着色过程中起辅助作用<sup>[12]</sup>。在‘华秀’李果肉着色过程中,果实中的叶绿素降解,花青苷大量合成,类胡萝卜素在果肉由橙色期向红色期转变的过程中明显增加。黄色期果肉的叶绿素含量所占比例最高(63.49%),花青苷含量所占比例较低(仅19.53%);橙色期果实的叶绿素和花青苷含量所占比例均较高,分别为44.12%和42.18%;红色期果实的花青苷含量所占比例远高于叶绿素和类胡萝卜素含量所占比例,达到80.36%。随着果肉着色进程,虽然果实的类胡萝卜素含量增加,但其所占比例却不断下降,且所占比例小于叶绿素和花青苷含量所占比例,而花青苷含量所占比例不

断增大,叶绿素含量所占比例不断减小,说明‘华秀’李果肉颜色变化主要是叶绿素降解和花青苷累积共同作用的结果,类胡萝卜素在果肉着色方面仅起辅助作用。随着果肉着色进程,果实中的叶绿素不断降解,促使果肉表现出花青苷和类胡萝卜素的颜色,这2种色素综合表现为橙色,随后,花青苷大量合成,类胡萝卜素的颜色被花青苷掩盖,致使果肉呈现红色。

### 3.3 ‘华秀’李果肉颜色与DPPH·清除力的关系

大量研究表明:果实的抗氧化能力与酚类含量有关,例如:Abeysinghe等<sup>[13]</sup>认为,杨梅(*Myrica rubra* Sieb. et Zucc.)等7种水果的水溶性抗氧化成分与酚类含量呈显著正相关,并且,花青苷和类胡萝卜素是红色水果的主要抗氧化成分;陈冠林等<sup>[14]</sup>认为,苹果(*Malus pumila* Mill.)等33种水果的总酚含量与果实的抗氧化能力存在较强线性关系;周丹蓉等<sup>[15]</sup>认为,李果实的抗氧化能力与花青苷和类胡萝卜素含量呈极显著相关性;Vizzotto等<sup>[16]</sup>认为,李的总酚含量与抗氧化能力的相关性最显著,并且,红肉李和紫肉李较浅肉李具有更高的总酚含量和更强的抗氧化活性。本研究中,黄色期和橙色期‘华秀’李果实的DPPH·清除力分别为0.61和0.67 mg·g<sup>-1</sup>,且二者间差异不显著,而红色期果实的DPPH·清除力为1.15 mg·g<sup>-1</sup>,显著高于黄色期和橙色期,说明红肉李较黄肉李和橙肉李具有更强的抗氧化能力,因此,可根据果实颜色评价李果实的抗氧化能力。相关性分析结果表明:DPPH·清除力与花青苷含量呈极显著正相关,与类黄酮含量呈显著正相关,表明‘华秀’李果实具有很强的抗氧化活性。

### 3.4 ‘华秀’李果肉着色机制分析

花青苷是调控果肉着色的主要色素之一,为类黄酮代谢途径的分支产物之一。王华等<sup>[17]</sup>认为,花青苷合成受到光、温度、糖和激素等多种内在因子和外界因子的共同影响和调控,且调控过程十分复杂。在‘华秀’李果肉由黄色期向橙色期转变的过程中,叶绿素含量显著下降,可溶性固形物含量显著上升,其花青苷含量增幅明显小于由橙色期向红色期转变的过程。相关研究结果表明:叶绿素能够吸收大量的红光,降低光敏素的作用<sup>[18]</sup>,而花青苷的大量合成通常发生在叶绿素降解开始或降解完成后,且糖是花青苷合成的重要原料,只有果实的糖分含量达到一定浓度时果肉才能着色<sup>[19]</sup>,这可能是‘华秀’李果肉着色的主要机制。

植物激素对植物生长发育具有重要的调节作用,多种激素相互协调作用可促使果实在质地、风味和色泽等方面发生变化,从而调控果实的成熟和衰老过程。乙烯和 ABA 能够促进果实成熟,而 IAA、玉米素(ZT)和  $GA_3$  能够延缓果实成熟。‘华秀’李果肉的 IAA、ZT、ABA 和  $GA_3$  含量在果肉由黄色期向橙色期转变的过程中无明显变化,而在果肉由橙色期向红色期转变的过程中,IAA、ABA 和  $GA_3$  含量显著上升,而 ZT 含量显著下降;并且,IAA 含量与类胡萝卜素和花青苷含量呈显著正相关,说明 IAA 可能通过调控类黄酮代谢途径中的转录因子和结构基因来调控花青苷的合成,进而调控果肉颜色。然而,关于植物激素调控花青苷合成的具体机制尚未明确,有待进一步的深入研究。

### 3.5 结论

在‘华秀’李果肉的着色过程中,果实硬度降低,酸味减少,甜味增加,色泽变艳,抗氧化能力增强;果肉颜色是叶绿素、类胡萝卜素和花青苷综合作用的结果,花青苷是使果肉呈现红色的主要色素;果肉颜色与其抗氧化能力密切相关,可通过果肉颜色判断果实的抗氧化能力。

### 参考文献:

- [1] 王 刚, 宣继萍, 张计育, 等. 中国李产业发展、贸易与国际竞争力分析[J]. 中国农学通报, 2016, 32(13): 191-199.
- [2] 郁香荷, 章秋平, 刘威生, 等. 中国李种质资源形态性状和农艺性状的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2011, 12(3): 402-407.
- [3] 季余金, 周文波, 周立勤. 华秀李的性状表现及栽培技术要点[J]. 落叶果树, 2015, 47(3): 25-27.
- [4] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 134-137.
- [5] 张圣仓. 杏果实着色的生理生化特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学生命科学院, 2012.
- [6] 吴晓青, 陈 丹, 邱红鑫, 等. 芙蓉李中总多酚含量测定方法的优选[J]. 中国中医药科技, 2011, 18(2): 131-133.
- [7] 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.
- [8] PUERTA-GOMEZ A F, CISNEROS-ZEVALLOS L. Postharvest studies beyond fresh market eating quality: phytochemical antioxidant changes in peach and plum fruit during ripening and advanced senescence [J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 60(3): 220-224.
- [9] 贾展慧, 张计育, 宣继萍, 等. 11 个‘桃李’品系鲜果主要经济性状分析与评价[J]. 植物资源与环境学报, 2014, 23(4): 105-107.
- [10] BOBRICH A, FANNING K J, RYCHLIK M, et al. Phytochemicals in Japanese plums: impact of maturity and bioaccessibility[J]. Food Research International, 2014, 65 (Part A): 20-26.
- [11] 雷 琴. 苹果成熟过程中品质变化特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学园艺学院, 2006: 3.
- [12] 赵玉辉, 郭印山, 李作轩. 果实花青素研究进展[J]. 北方园艺, 2006(3): 46-47.
- [13] ABEYSINGHE D C, LI X, SUN C, et al. Pigment contents and their relationship with hydrophilic and lipophilic antioxidant capacities in seven fruit species[J]. 果树学报, 2008, 25(6): 790-796.
- [14] 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.
- [15] 周丹蓉, 方智振, 廖汝玉, 等. 李果皮花色苷、类黄酮和类胡萝卜素含量及抗氧化性研究[J]. 营养学报, 2013, 35(6): 571-576.
- [16] VIZZOTTO M, CISNEROS-ZEVALLOS L, BYRNE D H, et al. Total phenolic, carotenoid, and anthocyanin content and antioxidant activity of peach and plum genotypes [J]. Acta Horticulturae, 2006, 713: 453-455.
- [17] 王 华, 李茂福, 杨 媛, 等. 果实花青素生物合成分子机制研究进展[J]. 植物生理学报, 2015, 51(1): 29-43.
- [18] SAURE M C. External control of anthocyanin formation in apple [J]. Scientia Horticulturae, 1990, 42(3): 181-218.
- [19] 耿玉韬. 果实着色的理论与实践[J]. 生物学通报, 1989(10): 6-8.

(责任编辑: 佟金凤)