



不同生长阶段欧李叶片酚类物质含量 及其抗氧化性

邵郅胜,杨 波,朱 成,李东方,郭金丽*

(内蒙古农业大学 园艺与植物保护学院,呼和浩特 010018)

摘要:以4年生‘蒙原’欧李为试验材料,对不同生长阶段欧李叶片中多酚类物质(总酚、总黄酮、原花青素、花青素、黄酮醇)含量及其抗氧化活性(总抗氧化活性、铁离子还原力、DPPH·清除率、·OH清除率)进行了比较分析,为欧李叶片的进一步研究和开发利用提供理论依据。结果表明:(1)欧李叶片各酚类物质含量随着生长期均表现为先增加后降低的变化规律,并均于果实着色膨大期达到最大。(2)各酚类物质的抗氧化活性均表现出与各酚类物质类似的变化规律,除个别有差异外,基本也均于果实着色膨大期达到最高。(3)在果实着色膨大期,欧李叶片各酚类物质含量及其抗氧化活性均表现为总酚最高,总黄酮和原花青素次之,黄酮醇和花青素最低。研究发现,欧李叶片各酚类物质含量与其抗氧化活性存在着明显的协同变化关系,抗氧化活性随着各酚类物质含量的增加或降低而升高或降低;除原花青素和花青素外,着色膨大期是欧李叶片酚类物质含量积累高峰期,同时也是总抗氧化力最高的时期。

关键词:欧李;叶片;酚类物质;抗氧化活性

中图分类号:Q946.82; S662.3 **文献标志码:**A

Phenolic Content and Antioxidant Activity in Leaves of *Cerasus humilis* at Different Growth Stages

SHAO Zhisheng, YANG Bo, ZHU Cheng, LI Dongfang, GUO Jinli*

(College of Horticulture and Plant Protection, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: Weih 4-year-old ‘Mengyuan’ *Cerasus humilis* was used as the test material, this experiment conducted to explore the phenolic contents (total phenol, total flavonoids, proanthocyanidins, anthocyanin and flavonol) and antioxidant activities (total antioxidant, iron ion reduce power, DPPH·-clearance rate and ·OH-clearance rate) of leaves in different growing stages of *C. humilis*, so as to provide theoretical basis for the further development and application of *C. humilis* leaves resources. The results show that: (1) the contents of phenolic substances in leaves of *C. humilis* increased firstly and then decreased, and reached the maximum at the pigmentation expansion stage. (2) The antioxidant activities of phenolic compounds were similar to that of phenolic compounds, and reached the maximum at the pigmentation expansion stage, except for individual differences. (3) During the pigmentation expansion stage, the contents of phenolic substances and their antioxidant activities in leaves of *C. humilis* were the highest, followed by total flavonoids and procyanidins, and flavonols and anthocyanins. In conclusion, the contents of phenolic compounds in leaves of *C. humilis* had obvious synergistic change relationship with its antioxidant activity, and the antioxidant activity increased or decreased with the increase or decrease of the contents of phenolic compounds. Apart from proanthocyanidin and anthocyanins, the accumulation peak of phenolic substances and total antioxidant

收稿日期:2022-03-11;修改稿收到日期:2022-07-22

基金项目:内蒙古科技成果转化专项(2019CG067);新品种选育专项(YZGC2017019)

作者简介:邵郅胜(1998—),男,在读硕士研究生,研究方向为果树生理。E-mail:1309750685@qq.com

*通信作者:郭金丽,博士,教授,博士生导师,现主要从事寒旱地区特色优质果树资源创新与开发利用研究。E-mail:guojinli111@163.com

capacity of *C. humilis* leaves reached the highest in the pigmentation expansion stage.

Key words: *Cerasus humilis*; leaves; phenolics; antioxidant activity

欧李(*Cerasus humilis*)为蔷薇科樱桃属矮生灌木果树,是中国特有的野生果树资源,主要分布于中国山西、内蒙古、辽宁、河北、河南等省区。欧李具有极强的抗旱、抗寒、耐瘠薄能力,综合适应性强。欧李果实酸甜适口,具有独特的香气和风味;果实营养种类及含量丰富,尤其是钙、铁含量极高,因此享有“钙果”和“绿色天然钙粉”的美称^[1]。欧李作为第三代水果,其果实可鲜食,亦可深加工成各类产品;种仁是中药郁李仁的主要成份^[2],果皮可用于化妆品、保健品,叶可开发为茶类饮品等^[3]。可见欧李具有独特的风味、广泛的用途、显著的保健食疗价值,开发利用前景广阔。

酚类物质是广泛存在于植物组织中的一种重要次生代谢物质,与植物的品质风味、色泽等特质息息相关,对植物的生长发育、基因表达、水果褐变、生物固氮^[4-5]等也有影响。酚类物质更是重要的天然抗氧化物质,可以清除机体内自由基、供氢质子或电子、螯合金属离子,有抗炎、延缓衰老^[6]的作用,亦可软化血管、促进消化、降血脂、利尿、增加免疫力和防止动脉硬化和血栓的形成,还具有抑制细菌与癌细胞生长的作用^[7-8],更有研究发现其在抑制人体肝癌、结肠癌及胃癌细胞增殖方面有显著效果^[9]。

欧李富含酚类物质,前人已对欧李酚类物质的种类及含量进行了初步的研究。欧李作为高酚植物,其总酚、总黄酮、黄酮醇含量高于黑莓、蓝莓等高酚类水果,其原花青素和花青素含量也高于蔓越莓、荔枝等。现有研究结果初步显示欧李酚类物质对DPPH自由基(DPPH⁺)、ABTS自由基(ABTS⁺)、OH自由基(·OH)均有良好的清除能力,还原力更是和维生素C(Vc)效果相当^[10];更有研究发现浆果类植物的叶片中酚类化合物含量明显高于果实,且具有更高的抗氧化活性^[11-12]。而目前对欧李酚类物质及抗氧化活性的研究主要集中于果实,对叶片酚类物质的探究鲜有报道,因此进行欧李叶片酚类物质及其抗氧化活性的相关研究极有必要。目前,本研究课题组已对欧李果实酚类物质含量、贮藏过程中酚类物质含量变化、不同资源果实酚类物质含量比较等进行了探究,本试验将对不同生长阶段的欧李叶片酚类物质及其抗氧化活性进行比较,以期了解欧李叶片酚类物质含量及其抗氧化能力在生育期内的变化规律,为欧李的进一步开发利用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料及样品采集

本试验以内蒙古农业大学欧李科研基地的4年生‘蒙原’欧李作为试验材料。选择生长正常无病虫害的欧李植株,分别于果实硬核期(采样2次,硬核Ⅰ期、硬核Ⅱ期)、着色膨大期、采后期以及叶片变色期(以上5个时期分别以T₁、T₂、T₃、T₄、T₅表示)进行叶片采集。试验共选取60株进行标记,从每株的东南西北四个方向各选取1个枝条进行标记,20株为1次重复,重复3次。每次采样时分别于枝条的上、中、下部各采集1片正常叶片组成样本,采集的叶片样品清洗干净,于60℃条件下烘干,粉碎后过60目筛后进行试验指标测定。

1.2 欧李叶片酚类物质提取

欧李叶片样品粉碎过筛后称取1g放入研钵,以0.1%盐酸的40%乙醇水溶液做提取液,加25mL提取液磨碎,在25℃下用超声处理提取1h,过滤并定容到50mL量瓶中,然后以5000r/min转速离心10min,上清液即为酚类物质提取液,储存在-20℃,用于测定酚类物质含量和抗氧化活性。

1.3 欧李叶片酚类物质含量的测定

欧李叶片中多酚类物质总酚、总黄酮、原花青素、花青素、黄酮醇含量的测定均使用紫外分光光度法测定,参照莫愁^[13]的方法,稍加修改,设置3个重复。

1.3.1 总酚含量 取0.1mL提取液,加入0.2mL FC试剂,于10mL量瓶中混匀,室温下静置3min后,加入1.0mL的Na₂CO₃溶液(10%),蒸馏水定容至10mL并摇匀,置于35℃恒温水浴中反应1h,以蒸馏水代替样品做空白,在760nm波长下测定吸光度。标准曲线以没食子酸标准溶液绘制,分别精密吸取1.0043mg/mL没食子酸标准液30、60、90、120、150、180μL于10mL量瓶中,制成标准系列溶液,分别测定吸光值,做标准曲线,得回归方程:y=49.786x+0.0054,R²=0.9987。根据标准曲线计算总酚含量,以每g鲜样中含有的没食子酸mg数计。

1.3.2 总黄酮含量 取0.3mL提取液、0.3mL NaNO₂溶液(5%)、0.3mL Al(NO₃)₃溶液(10%)于10mL量瓶中,摇匀室温下静置6min,加入4mL NaOH溶液(1mol/L)以50%的乙醇定容至10mL,混匀静置10min。以蒸馏水代替样品做空白,在510

nm 处测定吸光值。标准曲线以芦丁标准溶液绘制,分别精密吸取 1.048 mg/mL 芦丁标准液 100、120、150、180、200 和 250 μL 于 10 mL 量瓶中,制成标准系列溶液,测定其吸光值,做标准曲线,得回归方程: $y = 1.584x - 0.0026, R^2 = 0.9981$ 。根据标准曲线计算总黄酮含量,以每 g 鲜样中含有的芦丁 mg 数表示。

1.3.3 原花青素含量 取 0.5 mL 提取液,加入 3.0 mL 香草醛甲醇液(0.04 g/mL)混合均匀,加入 1.5 mL 浓盐酸混匀,于 30 ℃ 水浴 20 min,在 500 nm 波长处测吸光度值,以蒸馏水代替样品做空白。标准曲线以儿茶素标准溶液绘制,精密吸取 0.3300 mg/mL 儿茶素标准液 0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5 mL 于试管中,蒸馏水定容至 0.5 mL,配制成标准系列溶液,测定其吸光值,做标准曲线,得回归方程: $y = 1.5591x + 0.0561, R^2 = 0.9920$ 。根据标准曲线计算原花青素含量,结果以每 g 鲜样中含有的儿茶素 mg 数表示。

1.3.4 花青素含量 用 pH 示差法测定。取两支试管分别加入 2.0 mL 提取液,一支中加入 3.0 mL pH 1.0 的氯化钾缓冲液,另一支中加入 3.0 mL pH 4.5 的醋酸钠缓冲液。混匀后静置 15 min。以蒸馏水做试剂空白,分别在 520 和 700 nm 波长下测量吸光度 A_{520} 和 A_{700} ,通过公式计算最终吸光度(A)和总花青素含量(CGE),总花青素含量结果以每 g 鲜样中矢车菊-3-葡萄糖苷 mg 数表示。

$$A = (A_{520} - A_{700})_{\text{pH}1.0} - (A_{520} - A_{700})_{\text{pH}4.5}$$

$$\text{CGE}(\text{mg/g}) = A \times M_w \times DF \times V \times 1000 / \epsilon / M$$

式中: M_w 为矢车菊素-3-葡萄糖苷相对分子量(449), DF 为稀释倍数, ϵ 为摩尔吸光系数(29 600), V 为提取液总体积, M 为欧李果实用样质量。

1.3.5 黄酮醇含量 取 2 mL 提取液,加入 3.5 mL 盐酸(2%),测定其在 360 nm 波长处的吸光度,以蒸馏水代替样品做空白。标准曲线以槲皮素标准溶液绘制,依次精密吸取 0.980 0 mg/mL 槲皮素标准液 10、20、30、40 和 50 μL 于试管中,蒸馏水定容至 2 mL,配制成标准系列溶液,测定吸光值,做标准曲线,得回归方程: $y = 53.878x + 0.0544, R^2 = 0.9932$,根据标准曲线计算黄酮醇含量。

1.4 欧李叶片酚类物质抗氧化活性的测定

欧李叶片中多酚类物质分离纯化参考宋丹丹^[14]的方法,抗氧化活性的测定参照李欧^[15]的方法,稍加修改。

1.4.1 总抗氧化活性 取 1 mL 提取液、6 mL FRAP 工作液、0.6 mL 蒸馏水,混合摇匀后于 37 ℃ 水浴 20 min。在 593 nm 处,用无水乙醇调零,测吸

光度。标准曲线以 FeSO₄ 溶液制作,用无水乙醇配制 FeSO₄ 溶液(浓度梯度 200~6 000 μg/mL),测定标准系列溶液的吸光值,做标准曲线,以无水乙醇代替样品做空白,根据吸光值,求得相应 Fe²⁺ 当量定义 FRAP 值。

$$\text{FRAP} = CVN / 1000M$$

式中: C 为样品减去空白吸光度代入 Fe²⁺ 当量(μmol/L), V 为待测液总体积(L), N 为样品稀释倍数, M 为样品质量(g)。

1.4.2 铁离子还原力 取 0.2 mL 提取液、5 mL 磷酸盐缓冲液(0.2 mol/L, pH 7.0)、5 mL 铁氰化钾溶液(30.37 mmol/L)混合摇匀,于 50 ℃ 恒温水浴锅中保温 20 min,加入 5 mL 三氯醋酸溶液(0.61 mol/L)以终止反应。取 5 mL 上清液,加 5 mL 蒸馏水,摇匀后再加入 1 mL FeCl₃ 溶液(3.70 mmol/L),反应 15 min,以蒸馏水代替提取液作空白并调零,在 700 nm 波长处测定吸光值,计算酚类物质提取液还原力。

$$\text{还原力} = (A_{\text{样}} - A_{\text{空}}) / A_{\text{样}}$$

1.4.3 DPPH[·] 清除率 取 40 μL 提取液、0.4 mL DPPH(1,1-二苯基-2-三硝基苯肼)甲醇溶液(0.5 mmol/L),混合摇匀后加甲醇定容至 5 mL,在黑暗条件下反应 45 min。甲醇代替提取液作对照,以蒸馏水调零,在 517 nm 波长处测吸光值,计算酚类物质提取液对 DPPH[·] 的清除率(%)。

$$\text{DPPH}^{\cdot} \text{ 的清除率} (\%) = (A_{\text{对照}} - A_{\text{样}}) / A_{\text{对照}} \times 100\%$$

1.4.4 ·OH 清除率 取 0.4 mL 的提取液、1 mL FeSO₄(9 mmol/L)混合摇匀,再加入 1 mL 水杨酸溶液(9 mmol/L)、2 mL H₂O₂(8.8 mmol/L)和 4.6 mL 蒸馏水,混合摇匀后于 37 ℃ 恒温水浴锅中保温 55 min,反应结束后,取出冷却。蒸馏水代替提取液做空白组,蒸馏水代替水杨酸作为对照组,用蒸馏水调零,在 510 nm 处测定吸光值,计算酚类物质提取液对 ·OH 的清除率(%)。

$$\cdot\text{OH} \text{ 的清除率} (\%) = [A_{\text{空白}} - (A_{\text{样}} - A_{\text{对照}})] / A_{\text{空白}} \times 100\%$$

1.5 数据处理与分析

使用 Excel 2010 处理和分析数据,使用 SPSS 18.0 软件进行显著性差异分析。

2 结果与分析

2.1 不同生长阶段欧李叶片总酚含量及其抗氧化活性

在整个生长期中,欧李叶片的总酚含量呈先升高后降低的变化趋势,并在果实着色膨大期(T₃)达

到最大值(14.54 mg/g),且各时期含量之间均差异显著(图1,A)。同时,欧李叶片总酚的总抗氧化活性、铁离子还原力、·OH清除率与总酚含量的变化趋势相同,均表现为先升高后降低,并在果实着色膨大期达到最大值(图1)。其中,欧李叶片总酚的总抗氧化活性T₁期最低,并与其他4个时期有显著差异,而后4个时期基本维持稳定;叶片总酚的铁离子还原力在T₃期最高,且与其余各时期均有显著差异;叶片总酚的·OH清除率同样在T₃时期达到最高值,且显著高于T₁、T₂、T₅时期,而其余时期无显著差异(图1,B,C,E)。叶片总酚的DPPH·清除率随生长期的进程而逐渐升高,在前3个时期均显著较低,并基本保持稳定,从果实采后时期(T₄)开始显著增加,在叶片变色期(T₅)达到最高(44.4%),且与其他时期均有显著差异(图1,D)。可见,在欧李生长期中,欧李叶片的总酚含量在果实着色期时最高,相应的总酚总抗氧化活性、铁离子还原力、·OH清除率也在该时期最高,而其DPPH·清除率则在叶片变色期达到最高。

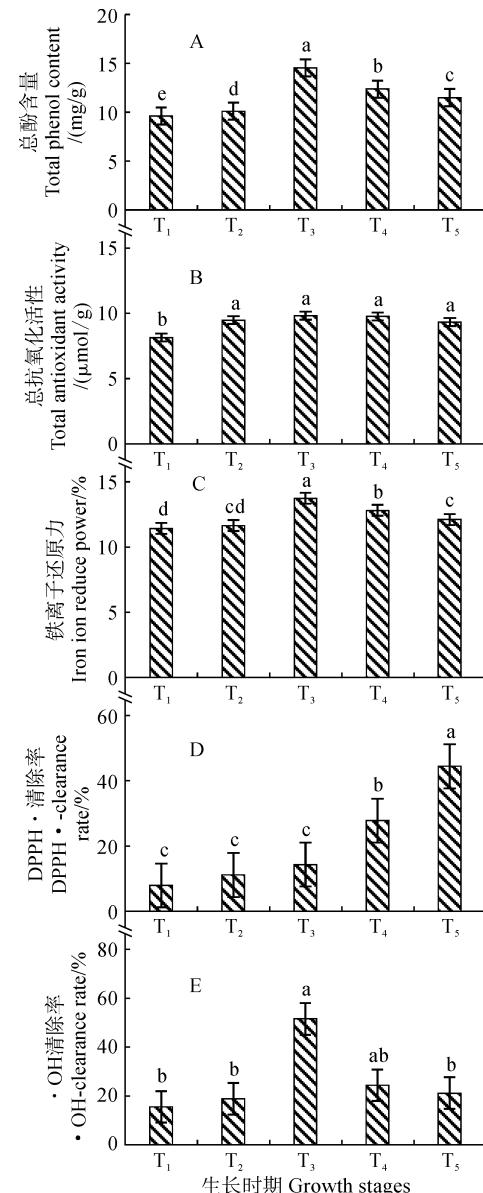
2.2 不同生长阶段欧李叶片总黄酮含量及其抗氧化活性

欧李叶片的总黄酮含量随着生长期先升高后降低,同样在果实着色膨大期(T₃)达到最大值(11.84 mg/g),显著高于T₄以外的其余时期,增幅在8.09%~50.19%之间(图2,A)。同时,叶片总黄酮的总抗氧化活性、铁离子还原力、DPPH·清除率、·OH清除率随生长期的变化趋势与总黄酮含量相同,均呈现为先升高后降低,且均在着色膨大期达到最大值(图2)。其中,欧李果实着色膨大期叶片总黄酮的总抗氧化活性、铁离子还原力、·OH清除率均与其他各个时期差异显著(图2,B,C,E),而其DPPH·清除率仅与果实硬核期差异显著(图2,D)。由此可见,欧李叶片的总黄酮含量及其总抗氧化活性、铁离子还原力、·OH清除率、DPPH·清除率随生长期的变化趋势相同,均在果实着色膨大期达到最高,各指标间存在非常密切关系。

2.3 不同生长阶段欧李叶片原花青素含量及其抗氧化活性

欧李叶片的原花青素含量在生长期呈先升高后降低的变化趋势,仍在果实着色膨大期(T₃)达到最大值(4.32 mg/g),并显著高于其他时期,增幅在8.08%~39.42%之间(图3,A)。同时,叶片原花青素的铁离子还原力、DPPH·清除率、·OH清除率与原花青素含量的变化趋势相同,也均表现为先升

高后降低,同样在果实着色膨大期达到最大值(图3)。其中T₃时期的铁离子还原力和·OH清除率与其余各时期之间均差异显著(图3,C,E),而其DPPH·清除率与各时期之间无显著差异(图3,D)。另外,叶片原花青素的总抗氧化活性随着生长期整体呈逐渐升高趋势,但在前4个时期内无显著变化,直至T₅期达到最高,且显著高于T₁时期(图3,B)。可见,欧李叶片的原花青素含量及其铁离子还原力、·OH



T₁、T₂、T₃、T₄、T₅ 分别代表果实硬核Ⅰ期、硬核Ⅱ期、着色膨大期、采后期以及叶片变色期,下同

图1 不同生长阶段欧李叶片总酚含量及其抗氧化活性

T₁, T₂, T₃, T₄ and T₅ represent the fruit hard-core stage I, hard-core stage II, pigmentation stage, post-harvest stage and leaf discoloration stage, the same as below

Fig. 1 The content and antioxidant activities of total phenolic in leaves of *Cerasus humilis* at different growth stages

清除率、DPPH·清除率变化趋势相同,且在果实着色膨大期均不同程度地高于其他4时期,而其总抗氧化活性则表现为逐渐增加的趋势。

2.4 不同生长阶段欧李叶片花青素含量及其抗氧化活性

欧李叶片的花青素含量在生长期中呈先升高后降低的变化规律,并在果实着色膨大期(T_3)达到最大值(0.35 mg/g),显著高于其他时期,增幅在30.25%~76.20%之间(图4,A)。同时,叶片花青素的铁离子还原力、DPPH·清除率、 $\cdot\text{OH}$ 清除率均表现出与花青素含量相同的先升高后降低的变化

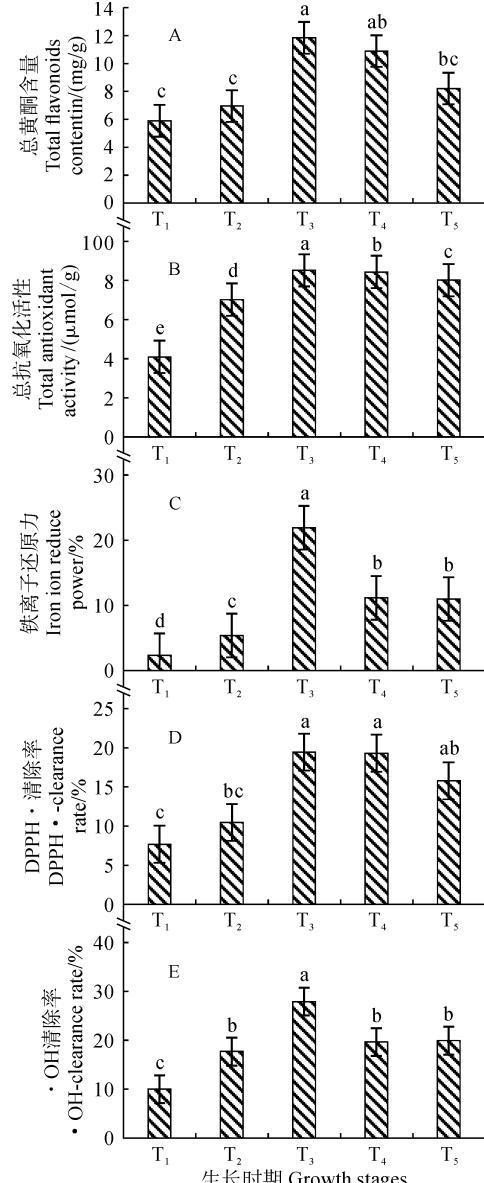


图2 不同生长阶段欧李叶片总黄酮含量及其抗氧化活性

Fig. 2 The content and antioxidant activities of total flavonoids in leaves of *C. humilis* at different growth stages

趋势,并均在着色膨大期达到最大值(图4)。其中, T_3 时期叶片花青素的铁离子还原力与其余各时期间差异显著(图4,C),其DPPH·清除率显著高于 T_1 、 T_2 和 T_5 时期(图4,D),其 $\cdot\text{OH}$ 清除率显著高于 T_1 时期(图4,E)。另外,叶片花青素的总抗氧化活性整体基本呈升高趋势,在 T_1 时最低(0.27 $\mu\text{mol/g}$),在 T_5 时最高(3.55 $\mu\text{mol/g}$),且各个时期之间均差异显著(图4,B)。可见,欧李叶片的花青素含量及其铁离子还原力、DPPH·清除率、 $\cdot\text{OH}$ 清除率呈现出先增高后降低的相同变化趋势,并在果实着色期均不同程度地高于其他时期;而其花青素

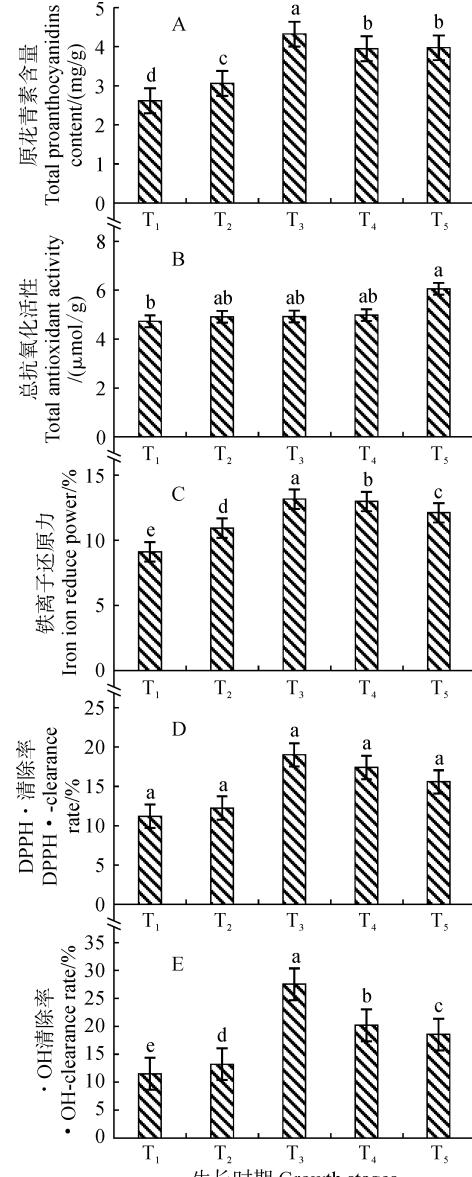


图3 不同生长阶段欧李叶片原花青素含量及其抗氧化活性

Fig. 3 The content and antioxidant activities of proanthocyanidin in leaves of *C. humilis* at different growth stages

的总抗氧化活性则逐渐升高,于叶片变色期达到最高值并与其余时期差异显著。

2.5 不同生长阶段欧李叶片黄酮醇含量及其抗氧化活性

在欧李生长期中,叶片黄酮醇含量呈先升高后降低的趋势,在果实着色膨大期达到最大值(0.35 mg/g),显著高于其他各个时期,增幅在40.05%~85.35%之间(图5,A)。同时,欧李叶片黄酮醇的总抗氧化活性、铁离子还原力、·OH清除率与黄酮醇含量的变化趋势相同,且均在果实着色膨大期(T_3)达到最大值(图5)。其中, T_3 时期叶片黄酮醇的总抗氧化活性和铁离子还原力均显著高于其他各个时

期(图5,B,C),其·OH清除率显著高于 T_1 、 T_2 和 T_5 时期(图5,E)。另外,欧李叶片黄酮醇的DPPH·清除率呈现出升降-升的波动变化规律,但仍在 T_3 时达到最高值(18.8%),并与果实硬核期差异显著(图5,D)。可见,欧李叶片黄酮醇含量及其总抗氧化活性、铁离子还原力、·OH清除率、DPPH·清除率总体上均呈先升高后降低的规律,并均在果实着色期达到最高,且多与其他时期差异显著。

2.6 欧李叶片酚类物质含量及其抗氧化性比较

上述结果表明,欧李叶片多数酚类物质含量及其抗氧化性均于果实着色膨大期达到最高值,说明欧李果实着色膨大期是其叶片酚类物质含量积累高

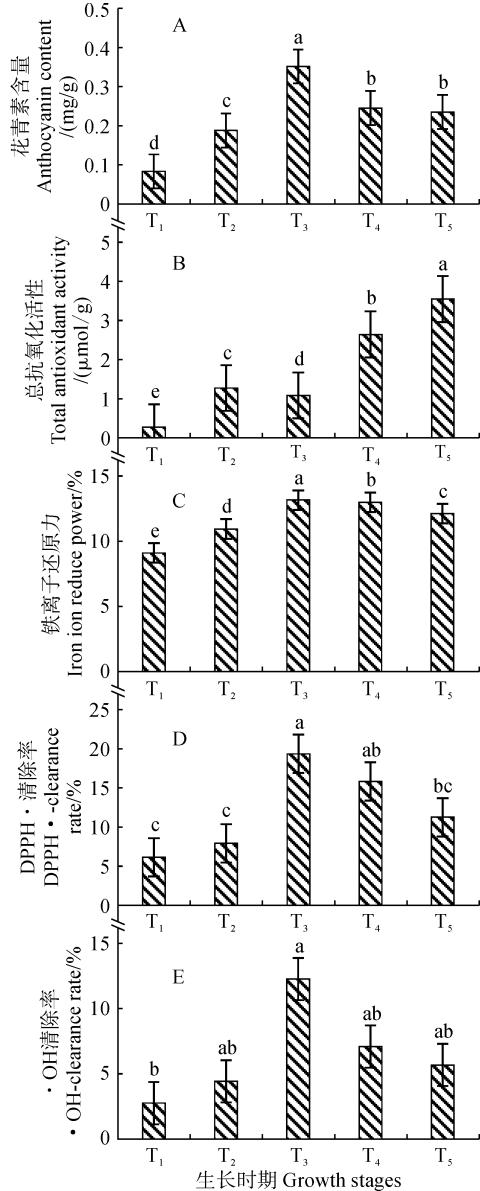


图4 不同生长阶段欧李叶片花青素含量及其抗氧化活性

Fig. 4 The content and antioxidant activities of anthocyanin in leaves of *C. humilis* at different growth stages

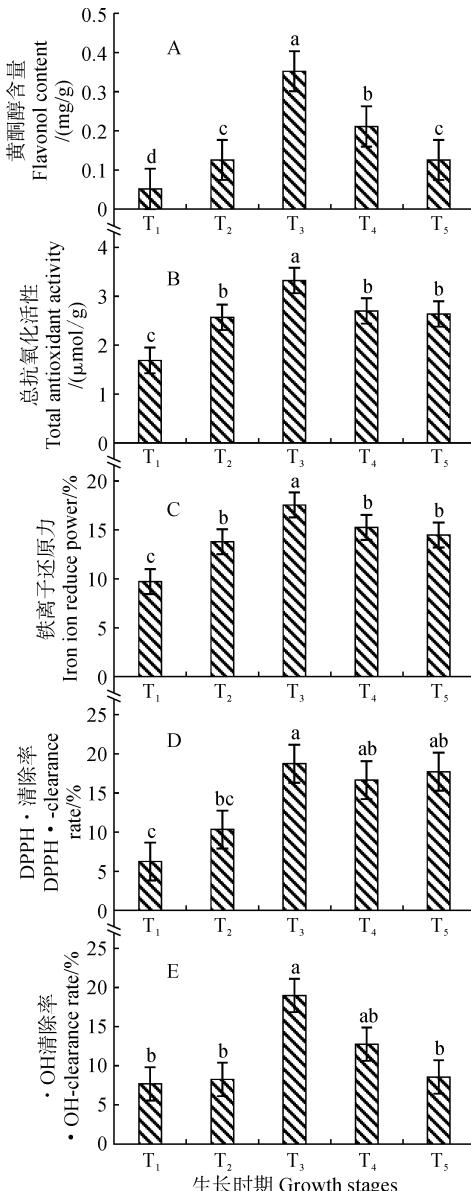
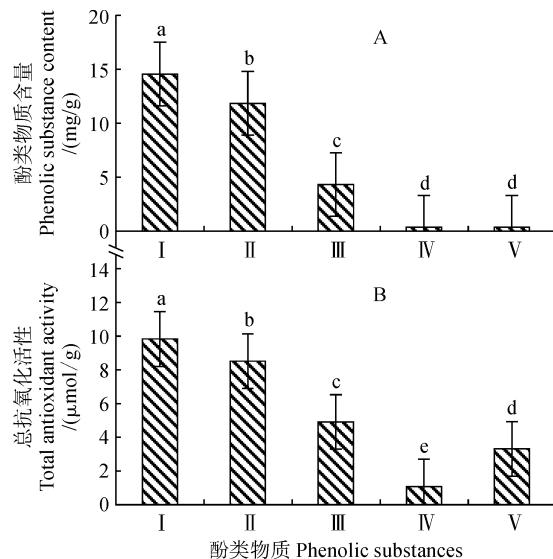


图5 不同生长阶段欧李叶片黄酮醇含量及其抗氧化活性

Fig. 5 The content and antioxidant activities of flavonol in leaves of *C. humilis* at different growth stages



I. 总酚; II. 总黄酮; III. 原花青素; IV. 花青素; V. 黄酮醇

图 6 欧李着色膨大期叶片的酚类物质含量

及其总抗氧化活性

I. Total phenol; II. Total flavonoids; III. Total proanthocyanidins;
IV. Anthocyanin; V. Flavonol

Fig. 6 The content and antioxidant activities of phenolic substances in leaves of *C. humilis* during pigmentation stage

峰及抗氧化活性最高的时期。进一步在果实着色膨大期比较欧李叶片各酚类物质含量及其总抗氧化性,发现酚类物质含量及其总抗氧化性呈现出相似的规律(图 6)。其中,叶片总酚含量及其总抗氧化性均为最高,分别为 14.54 mg/g 和 9.83 μmol/g,并与其他各酚类物质差异显著;其次为总黄酮和原花青素含量(分别为 11.84 和 4.32 mg/g)及其总抗氧化性(分别为 8.52 和 4.92 μmol/g);最低为黄酮醇和花青素含量(分别为 0.35 和 0.35 mg/g)及其总抗氧化性(分别为 3.32 和 1.09 μmol/g)。由此可知,欧李叶片各酚类物质含量与其总抗氧化性存在密切关系,总抗氧化活性随着酚类物质的含量而变化,含量越高抗氧化活性越强。

3 讨 论

许启鹏研究发现,绚丽海棠在生长发育过程中,叶片的酚类物质含量呈先上升后下降的变化趋势,并推测这种变化与温度相关^[16];张欢等^[17]在杜梨上也发现了相同的规律,叶片酚类物质在生长期内在存在先升高后降低的变化规律;在磨盘柿叶片上也有类似规律^[18]。本试验结果显示,‘蒙原’欧李叶片各酚类物质含量随着生长期整体呈现为先升高后降低,叶片总酚、总黄酮、原花青素、花青素、黄酮醇含量均从果实硬核期起呈上升趋势,到果实膨大期各

酚类物质含量达到最高值,之后逐渐降低,经历果实采后期,于叶片变色期达到最低值,说明果实着色膨大期是欧李叶片酚类物质含量的积累高峰时期,此期也是应用叶片酚类物质的最佳时期。同时,进一步对欧李着色膨大期叶片各酚类物质含量的比较发现,叶片中总酚含量最高,总黄酮和原花青素含量次之,黄酮醇和花青素含量最低;其中总酚含量最高为 14.54 mg/g,是花青素含量的 41 倍,与李欧^[15]在欧李果实中的研究结果相同。

周广志等研究发现刺梨叶片的总抗氧化活性、铁离子还原力、DPPH·清除率等抗氧化活性均显示为成熟叶片>幼叶>老叶^[19];李晓英等^[20]在蓝莓中也发现了相同的规律。本试验研究结果与前人研究结论基本相同。欧李叶片总酚的总抗氧化活性、铁离子还原力及·OH 清除率均显示出相同的规律,抗氧化能力从硬核期至着色膨大期呈上升趋势,在着色膨大期达到最高点,随后开始下降,经历果实采后期在叶片变色期降至最低。欧李叶片总黄酮的总抗氧化活性、铁离子还原力、DPPH·清除率、·OH 清除率均在果实着色期前呈上升趋势,于着色膨大期达到最高值,在着色期后呈下降趋势。欧李叶片原花青素和花青素的抗氧化活性变化规律总体相同,其铁离子还原力、DPPH·清除率、·OH 清除率呈先升高后降低的规律,在着色膨大期达到最大值;而总抗氧化活性整体呈上升趋势,在叶片变色期达到最高。欧李叶片黄酮醇的总抗氧化活性、铁离子还原力、·OH 清除率均先升高后降低,并在着色膨大期达到最高值。可见,欧李叶片各酚类物质在着色膨大期的抗氧化能力最高,而着色膨大期又以总酚的总抗氧化能力最强,总黄酮和原花青素次之,黄酮醇和花青素最低。综合以上欧李叶片各酚类物质含量与其抗氧化性的结果,各酚类物质的抗氧化活性与其含量表现出相同的变化规律,抗氧化活性随着酚类物质含量的增加而增强,这与朱美蓉^[21]关于野生刺葡萄的相关研究结果相同。

综上所述,欧李叶片的各酚类物质含量随着生长期均呈现先升高后降低的趋势,均于着色膨大期达到最高;各酚类物质的抗氧化性与其含量表现出相似的变化规律,基本均于着色膨大期达到最高。各酚类物质的抗氧化活性随着相应酚类物质含量的增加或降低而升高或降低,与酚类物质含量呈现出密切的正相关关系。着色膨大期是欧李叶片酚类物质含量积累高峰及其抗氧化力最高的时期,此期应是应用欧李叶片酚类物质抗氧化性的适宜时期。

参考文献:

- [1] 刘保东,孙井山,杜 鹏,等.西部特有野生树种欧李优良类型选择研究[J]. 内蒙古林业科技, 2008, **34**(4): 33-35.
- LIU B D, SUN J S, DU J, et al. Choice of good variety of unique wild *Cerasus humili* in West China[J]. *Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology*, 2008, **34**(4): 33-35.
- [2] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典—一部 2015 年版[M]. 北京:中国医药科技出版社, 2015: 207.
- [3] 李卫东,李 欧,胡 琰,等.欧李资源的综合开发价值与可持续利用建议[C] //中华中医药学会第十届中药鉴定学术会议暨 WHO 中药材鉴定方法和技术研讨会论文集. 西安, 2010: 26-30.
- [4] 刘思凡,刘子雨,李 萍,等.欧山种葡萄果实成熟期酚类物质含量及其合成相关基因表达量的比较[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, **47**(1): 30-34.
- LIU S F, LIU Z Y, LI P, et al. Comparison of the content of phenolic compounds and the expression levels of their biosynthesis related genes in ripening stage of *Vitis vinifera* × *Vitis amurensis* red grape[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2021, **47**(1): 30-34.
- [5] 陈国刚,王祯丽,童军茂.库尔勒香梨采后果实褐变与多酚氧化酶、酚类物质及细胞膜结构的关系[J]. 中国农学通报, 2005, **21**(8): 83-85.
- CHEN G G, WANG Z L, TONG J M. Relationship among postharvest browning of *Pyrus bretschneideri* Rehd, polyphenol oxidase, phenolics compound, cell membrane structure[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, **21**(8): 83-85.
- [6] 朱 洁,王红宝,孔佳君,等.梨幼果多酚的纯化及其抗氧化性[J]. 食品科学, 2017, **38**(5): 14-20.
- ZHU J, WANG H B, KONG J J, et al. Purification and antioxidant activity of polyphenols from young pear fruits[J]. *Food Science*, 2017, **38**(5): 14-20.
- [7] 李宗朔,吴大勇,顾金瑞,等.中国特有植物欧李不同种质果肉中多酚含量和总抗氧化活性差异及其聚类分析[J]. 中国野生植物资源, 2018, **37**(5): 10-15.
- LI Z S, WU D Y, GU J R, et al. Differences of polyphenols content and total antioxidant activity as well as their cluster analysis in flesh of Chinese dwarf cherry germplasm endemic plant in China [J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2018, **37**(5): 10-15.
- [8] 左 玉,冯丽霞,朱瑞涛,等.欧李红色素在复杂体系中的抗氧化作用[J]. 食品与发酵工业, 2015, **41**(5): 150-156.
- ZUO Y, FENG L X, ZHU R T, et al. Study on antioxidant activities of the red pigments extracted from *Cerasus humilis* in complicated systems[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2015, **41**(5): 150-156.
- [9] 郑 斌,赵巧丽,文定青,等.提取方法对芒果核仁多酚提取得率及抗氧化活性的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, **41**(9): 76-87.
- ZHENG B, ZHAO Q L, WEN D Q, et al. Effects of different extraction methods on the extraction yield and antioxidation of polyphenols from mango kernel [J]. *Food Research and Development*, 2020, **41**(9): 76-87.
- [10] 刘皓涵,钟迪颖,张润光,等.欧李多酚提取纯化及抗氧化性研究[J]. 农业工程学报, 2020, **36**(22): 324-332.
- LIU H H, ZHONG D Y, ZHANG R G, et al. Extraction and purification of polyphenols and determination of antioxidant activity[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(22): 324-332.
- [11] TELESZKO M, WOJDYŁO A. Comparison of phenolic compounds and antioxidant potential between selected edible fruits and their leaves[J]. *Journal of Functional Foods*, 2015, **14**: 736-746.
- [12] FENG C Y, WANG W W, YE J F, et al. Polyphenol profile and antioxidant activity of the fruit and leaf of *Vaccinium glaucoalbum* from the Tibetan Himalayas[J]. *Food Chemistry*, 2017, **219**: 490-495.
- [13] 莫 愁.基于糖酸和酚类物质的欧李种质资源果实品质评价研究[D]. 北京: 中医药大学, 2015.
- [14] 宋丹丹.芹菜叶酚类物质的分离纯化、鉴定及抗氧化活性研究[D]. 江苏扬州: 扬州大学, 2017.
- [15] 李 欧.种质与产地对欧李果实品质及其抗氧化活性的影响[D]. 北京: 北京中医药大学, 2013.
- [16] 徐启鹏.绚丽海棠叶片生长发育过程中酚类物质含量的变化[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2018.
- [17] 张 欢,任婷婷,杨英杰,等.杜梨生长期韧皮部和叶片酚类物质含量变化及其相关性分析[J]. 山东农业科学, 2015, **47**(9): 27-30.
- ZHANG H, REN T T, YANG Y J, et al. Changes and correlation analysis of polyphenol contents in phloem and leaves of *Pyrus betulaefolia* during growth period[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2015, **47**(9): 27-30.
- [18] 卫永乐,扈惠灵,陶 磅,等.磨盘柿叶片、果实及萼片中酚类物质的动态变化初报[J]. 中国农学通报, 2006, **22**(6): 227-229.
- WEI Y L, HU H L, TAO P, et al. A study on the dynamic changes of phenolic compounds in leaves, fruit, and Calyx of mopan persimmon (*Diospyros kaki* L. f. cv. mopan)[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, **22**(6): 227-229.
- [19] 周广志,鲁 敏,安华明.刺梨及其近缘种质叶片主要活性物质含量及抗氧化性分析[J]. 核农学报, 2019, **33**(8): 1 658-1 665.
- ZHOU G Z, LU M, AN H M. Analysis of main active substances and antioxidant activities in leaves of *Rosa roxburghii* and the two related species[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, **33**(8): 1 658-1 665.
- [20] 李晓英,薛 梅,樊汶樵,等.不同生长期蓝莓叶多酚物质含量及抗氧化活性研究[J]. 经济林研究, 2018, **36**(4): 40-46.
- LI X Y, XUE M, FAN W Q, et al. Study on phenolic contents and antioxidant activity in blueberry leaves during different growth periods [J]. *Non-Wood Forest Research*, 2018, **36**(4): 40-46.
- [21] 朱芙蓉.江西野生刺葡萄叶片酚类物质、抗氧化活性的研究及其加工利用[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2016.