

UV-B 对不同发育时期离体蓝莓主要果实品质及相关酶活性的影响

杨 乐^{1,2}, 杨俊枫¹, 侯智霞^{1*}, 官中志¹, 王 冲¹, 史文君¹

(1 北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 蓝莓研究与发展中心, 北京 100083; 2 信阳农林学院, 河南信阳 464000)

摘 要: 该研究以幼果期、白果期、转色期的离体‘北陆’蓝莓果实为试材, 设置 0(CK)、5、10、15 min 紫外光辐照处理, 24 h 后取样分析蓝莓果实中可溶性糖、总酚、类黄酮和花青苷含量, 以及苯丙氨酸裂解酶(PAL)和查尔酮异构酶(CHI)活性的变化, 探究 UV-B 紫外照射处理对不同发育时期蓝莓主要果实品质及相关酶活的影响。结果显示: (1) 对于幼果期蓝莓, 5 min UV-B 处理可显著增加果实内可溶性糖含量; 10 min UV-B 处理果实 PAL 活性增加效果最为显著; 15 min UV-B 处理对果实总酚和花青苷积累的促进作用最大, 但显著降低了类黄酮含量和 CHI 活性。(2) 对于白果期蓝莓, 5 min UV-B 处理显著增加了果实类黄酮含量和 CHI 活性, 10 min 处理使果实可溶性糖和总酚含量较对照分别增加 25% 和 18%; 15 min 处理对果实花青苷含量和 PAL 活性影响作用最大。(3) 对于转色期蓝莓, 各处理除果实可溶性糖及类黄酮含量降低外, 其余物质含量均显著增加。(4) UV-B 处理并未改变果实发育过程中可溶性糖、总酚、类黄酮和花青苷含量及 PAL、CHI 酶活性的积累规律。(5) 蓝莓果内 PAL 活性与其可溶性糖、总酚和类黄酮的积累呈极显著正相关关系, 而 CHI 活性仅与其可溶性糖呈极显著正相关。研究表明, UV-B 辐照处理促进了幼果期和白果期可溶性糖的积累, 也能促进不同发育时期蓝莓果实总酚和花青苷及白果期类黄酮的积累, 对蓝莓果实主要品质能够产生积极的影响。

关键词: 蓝莓; UV-B 辐照; 可溶性糖; 总酚; 类黄酮; PAL 活性; CHI 活性

中图分类号: Q945.6⁺5

文献标志码: A

Effects of UV-B Treatment on the Major Quality of Blueberry and Related Enzyme Activities in Different Developmental Stages

YANG Le^{1,2}, YANG Junfeng¹, HOU Zhixia^{1*}, GONG Zhongzhi¹, WANG Chong¹, SHI Wenjun¹

(1 Key Laboratory for Silviculture and Conservation Attached to China Ministry of Education, Blueberry Research and Development Center, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2 Xinyang College of Agriculture and Forestry, Xinyang, He'nan 464000, China)

Abstract: To explore the UV-B ultraviolet irradiation treatment on the major fruit quality and related enzyme activities in different developmental stages of blueberry, we chose Northland as plant material. The radiation time was 5 min, 10 min and 15 min, respectively, and taking no irradiation as control. The result shows that: (1) with UV-B treated young fruit of blueberries, the soluble sugar content significantly increased 47% compared with control by 5 min treatment. The PAL activity increased the most significantly by 10 min treatment. The total phenols and anthocyanin accumulation increased 36% and 31% comparing with the control by 15 min treatment, but flavonoid content and CHI activity reduced significantly. (2) With UV-B treatment ginkgo blueberry, the flavonoids and CHI activity increased significantly by 5 min treat-

收稿日期: 2015-06-02; 修改稿收到日期: 2015-12-07

基金项目: 中央高校基本科研业务专项资金(YX2013-12)

作者简介: 杨 乐(1990—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事森林培育经济林栽培研究。E-mail: yangle34@sina.com

* 通信作者: 侯智霞, 副教授, 主要从事森林培育经济林栽培方向的研究。E-mail: hzx2004@163.com

ment. The soluble sugar and total phenolic contents increased 25% and 18% than the control by 10 min treatment. The anthocyanin and PAL activity increased the most significantly by 15 min treatment reaching at 48% and 151% comparing with the control. (3) With UV-B treated verarison blueberries 10 min, the soluble sugar and flavonoid contents decreased and the other material content increased significantly. (4) UV-B treatment did not change the regularization during the fruit development of the contents of soluble sugar, total phenols, flavonoids, anthocyanins, and PAL, CHI. (5) The activity of PAL was positively correlated to soluble sugar, total phenolic and flavonoid accumulation. But the activity of CHI was only positively correlated to soluble sugar. Research shows UV-B treatment made soluble sugar content increase at low dose and decrease at high dose. UV-B irradiation could promote the accumulation of total phenols, anthocyanin and flavonoids during ginkgo blueberries, decrease the CHI activity in young fruit, increase the PAL and CHI activities in ginkgo and verarison fruit, also could make positive influence about the major quality of blueberry.

Key words: Blueberry; UV-B ultraviolet irradiation; soluble sugar; total phenolics; flavonoid; PAL activity; CHI activity

蓝莓(*Vaccinium* spp.)果实中含有丰富的酚类化合物,能有效清除超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$)、1,1-二苯基-2-苦基肼(DPPH $\cdot$)、羟基自由基($OH\cdot$)等多种自由基^[1],具有极高的保健价值。其中包括类黄酮物质尤其是花青苷备受关注,研究显示花青苷消除自由基的能力是 V_E 的 50 倍, V_C 的 20 倍^[2]。

酚类化合物是糖酵解产生的一类次生代谢产物,合成途径中大体有三类调控酶:第一类酶与合成前体相关,如苯丙氨酸裂解酶(phenylalanine ammonia-lyase, PAL)催化苯丙氨酸生成香豆酸,催化糖类物质酵解产物合成第一个酚类化合物^[3];第二类酶与类黄酮物质合成相关,查尔酮合成酶(CHS)、查尔酮异构酶(CHI)是该阶段中的关键酶,香豆酰辅酶 A 与丙二酰辅酶 A 在 CHS 的作用下缩合形成查尔酮,后经由 CHI 催化形成柚皮素,植物内 CHI 的催化活性非常高,能瞬间催化该反应;第三类酶与黄酮改性相关,如类黄酮-3-葡萄糖基转移酶(UFGT)^[4]等。

酚类代谢产物属于对紫外较敏感的一类化合物^[5]。目前已有大量研究结果表明 UV-B 辐射能对植物糖代谢、酚类物质代谢^[6]等产生影响。如 UV-B 辐射能使葡萄果实中的还原糖、可溶性固形物含量降低^[7],酚类物质含量增加,并能诱导类黄酮途径中隐花色素还原酶活性增加^[8];紫外辐照能增加蓝莓中总酚、类黄酮及花青苷的含量^[9]等。但是 UV-B 对蓝莓发育过程中果实糖类、酚类化合物积累对紫外辐照的响应机制尚不明确。本研究通过增强 UV-B 照射幼果期、白果期、转色期三种发育状态离体蓝莓果实,探究 UV-B 照射对蓝莓果实生长发育过程中糖类、酚类物质合成和积累的作用,以期为人

1 材料和方法

1.1 取样及处理

田间试验于 2014 年 4 月至 7 月间进行。植物材料选用定植于北京凤凰岭蓝莓基地果期发育正常的蓝莓果实,品种为半高丛蓝莓‘北陆’。该基地为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候,位于北京市海淀区聂各庄乡境内。年平均气温 12.0℃,最高气温 39.6℃,最低气温 -19.5℃,10℃ 以上有效积温达 4 100℃,年均降雨量 643 mm。年平均日照时数为 2 769 h,植物生长期 222 d,无霜期 180 d。

试验分别于盛花后 20、40、60 d 随机采摘大小均一、生长状态良好的幼果期、白果期、转色期(图 1)的蓝莓果实,采后当天带回实验室进行辐照处理。各时期的蓝莓果实样品均使用 UV-B(40 W, 308 nm, 北京电光源研究所)灯管照射。依据预试验结果,本试验取幼果期、白果期和转色期果实各设不进行 UV-B 照射(CK, 对照)和 UV-B 照射 5 min(1.14 kJ/m²)、10 min(2.28 kJ/m²)、15 min(3.42 kJ/m²)等 4 个处理。UV-B 处理时将果实一字排列于聚丙烯托盘内,以上每个处理均重复 3 次,约 25 g 果实,

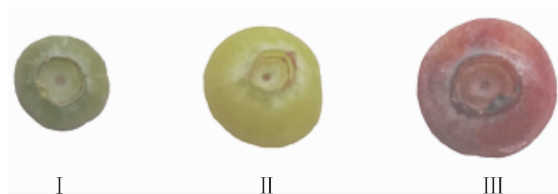


图 1 不同发育时期蓝莓果实

I. 幼果期; II. 白果期; III. 转色期; 下同

Fig. 1 Blueberry fruits at different maturity stages

I. Young fruit; II. Ginkgo fruit; III. Verarison fruit;

The same as below

紫外灯管距果实 30 cm 处照射,且每隔 1 min 翻一面。处理后避光贮存于人工气候箱(23 ℃,RH 95%),24 h 后取样,液氮速冻,-80 ℃保存备用。

1.2 测定指标及方法

可溶性糖含量测定采用王文浩^[10]的方法,根据糖与蒽酮-硫酸溶液反应产生蓝绿色物质的特性测定。总酚和类黄酮的提取参照 Pastrana^[11]的方法,以没食子酸为标准品绘制标准曲线,用紫外分光光度计检测 765 nm 处的吸光值,测算总酚的含量。以儿茶素为标准品绘制标准曲线,用紫外分光光度计检测 510 nm 处的吸光值,测算类黄酮的含量。花青苷的提取和检测参照骆军^[12]的 HPLC 方法略作改动,RP-HPLC 系统:岛津 LC-M20A,检测器 SPD-M20A,柱子 Zorbax SB C-18 250 mm×4.6 mm。HPLC 检测波长为 520 nm,时间为 50 min。苯丙氨酸解氨酶(PAL)、查尔酮异构酶(CHI)的活性测定参照 Lister 等^[3]的方法略作修改。

1.3 数据分析

试验数据用 SPSS 20.0、Excel 2010 分析并绘图。

2 结果与分析

2.1 UV-B 照射对不同发育时期蓝莓果实可溶性糖积累的影响

图 2 显示,UV-B 处理对不同发育期蓝莓果实可溶性糖含量的影响不同。幼果期,果实可溶性糖含量随 UV-B 辐照时间的增加有逐渐下降趋势,并以 UV-B 照射 5 min 处理的含量最高,比对照增加 47%,但各处理与对照间差异均不显著($P>0.05$)。白果期,各 UV-B 照射处理果实的可溶性糖含量均比对照显著上升($P<0.05$),但照射 5、10 和 15 min 处理的增幅分别达到 23%、25%和 24%,辐照处理间无显著差异。转色期,UV-B 处理使蓝莓果实可溶性糖含量比对照显著降低,且随辐照时间的增长呈逐渐下降的趋势。同时,随着果实的逐渐成熟,其中的可溶性糖含量也明显逐渐增加,这种趋势并没有受到 UV-B 辐照处理影响,如转色期果实的可溶性糖含量虽然比同期对照显著降低,但仍与白果期辐照处理果实相近。说明增强 UV-B 辐照使离体蓝莓果实的可溶性糖含量在白果期显著增加,却在转色期显著降低,而在幼果期无显著影响,但却没有改变果实可溶性糖随生育期累积增加的基本规律。

2.2 UV-B 照射对不同发育时期蓝莓果实总酚、类黄酮积累的影响

在幼果期,总酚的积累随辐照时间的增加呈上

升趋势,UV-B 照射 15 min 对总酚积累的促进作用最大,比对照增加 36%,但紫外照射 5 和 10 min 处理果实内总酚含量与对照差异不显著;在白果期,蓝莓果实内总酚含量随 UV-B 照射时间的增长先增高再降低,各处理均较对照显著增高,照射 10 min 总酚含量增加最为显著,较对照增加了 18%;转色期,UV-B 各处理均使果实总酚含量显著增加,且随辐照时间的增长呈上升趋势,照射 15 min 总酚含量增幅达到 50%(图 3)。同时,UV-B 照射对同时期蓝莓果实内类黄酮含量的影响效果也不同(图 3)。幼果期,果实内类黄酮含量随 UV-B 照射时间的增长而降低,照射 15 min 后类黄酮含量仅为对照的 83.70%。白果期,UV-B 照射使蓝莓果实内类黄酮含量均与对照差异显著,且各处理间差异不显著,但照射 5 min 对蓝

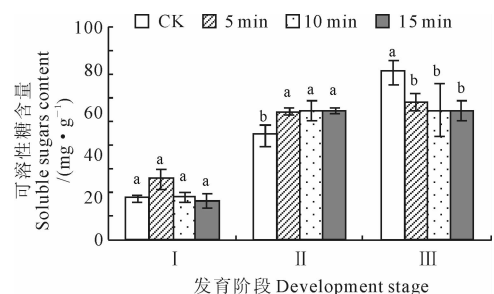


图 2 UV-B 照射对蓝莓类可溶性糖含量的影响
同期不同小写字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异;下同

Fig. 2 Effect of UV-B irradiation on the content of soluble sugar in blueberry
The different normal letters within same stage indicate significant difference among treatments at the 0.05 level; The same as below

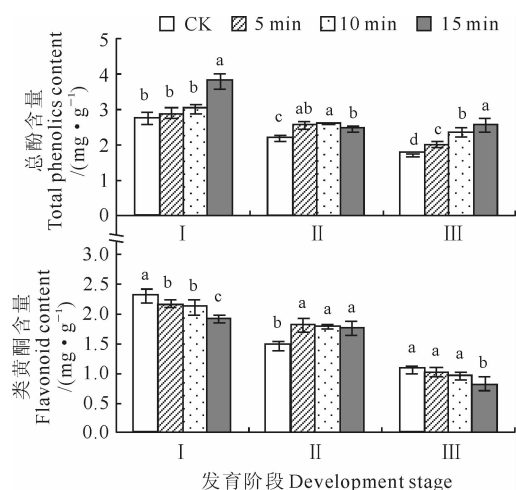


图 3 UV-B 照射对蓝莓类总酚和类黄酮含量的影响
Fig. 3 Effect of UV-B irradiation on the contents of total phenolics and flavonoid in blueberry

萜类黄酮积累的促进作用最明显。转色期,UV-B 处理使类黄酮含量较对照降低,但除照射 15 min 差异显著,其余处理均与对照差异不显著。

随着果实的逐渐成熟,总酚和类黄酮含量均呈下降趋势,UV-B 辐照处理并未改变其规律。以上结果说明增强 UV-B 辐照使离体蓝莓果实的总酚含量在各时期含量均增加,使类黄酮含量在幼果期和转色期显著降低,在白果期显著升高,但没有改变果实总酚和类黄酮随生育期累积增加的基本规律。

2.3 UV-B 照射对不同发育时期蓝莓果实花青苷积累的影响

UV-B 照射也不同程度提高了花青苷的含量(图 4)。幼果期,UV-B 照射对花青苷积累的促进作用不大,但花青苷含量随 UV-B 照射时间的增长而增加,照射 15 min 花青苷含量较对照显著增加 31%;白果期,UV-B 照射使蓝莓花青苷含量均显著增加,且随辐照时间的增长呈上升的趋势,UV-B 照射 15 min 时,花青苷含量增加 151%;转色期,UV-B 处理使花青苷含量显著增加,也随辐照时间的增长呈上升的趋势,UV-B 照射 15 min 时,花青苷含量增加 42%。蓝莓的白果期,果实颜色较浅,花青苷含量较幼果期有所下降,转色期花青苷迅速积累,达到 3.09 mg/g,较幼果期增加了近 70 倍。以上结果说明增强 UV-B 辐照使离体蓝莓果实的花青苷含量在各时期含量均增加,且白果期和转色期显著增加。

2.4 UV-B 照射对不同发育时期蓝莓果实 PAL 和 CHI 活性的影响

各处理均使不同发育阶段蓝莓果实内 PAL 酶活性增加(图 5)。幼果期,UV-B 照射各处理间差异不显著,但照射 10 min 与对照间差异显著,增幅达 47%,照射 5 min 和 15 min 后 PAL 酶活性与对照差异不显著;白果期,蓝莓果实内 PAL 酶活性随辐照时间的增长呈上升趋势,UV-B 照射各处理间也差异不显著,但照射 15 min 较对照显著增加了 PAL 酶活性,增幅达 48%,UV-B 照射 5 和 10 min, PAL 酶活性较对照也有所增加,但与对照差异不显著;转色期,紫外处理使 PAL 酶活性显著增加,照射 15 min PAL 酶活性较对照增加了 83%。

UV-B 照射也对不同生育期蓝莓果实 CHI 活性有显著的影响(图 5)。在幼果期,UV-B 照射后 CHI 酶活性均显著降低,随照射时间的增长 CHI 酶活性逐渐降低,但处理间差异不显著,UV-B 处理 15 min CHI 酶活性仅为对照的 65.43%;白果期,UV-

B 照射后各处理均较对照提高了 CHI 酶活性,其中照射 5 和 10 min 后活性较对照增加显著,分别增加 56%和 46%;转色期,紫外处理均使 CHI 酶活性显著增加,UV-B 照射 5 min 增加幅度高达 82%,之后随照射时间的增长 CHI 酶活性逐渐降低。

同时,随着果实的逐渐成熟,PAL 酶活性逐渐降低,CHI 酶活性先降低后升高,这种趋势并没有受到 UV-B 辐照处理影响,如幼果期果实的 CHI 酶活性随比同期对照显著降低,但仍较白果期辐照处理果实高。以上结果说明增强 UV-B 辐照使离体蓝莓果实各时期的 PAL 酶活性增加,使幼果期 CHI 酶活性显著降低,而在白果期和转色期均升高,且没有改变果实 PAL、CHI 酶活性随生育期累积增加的基本规律。

2.5 UV-B 照射后果实 PAL、CHI 活性与其他物质含量的关系

由表 1 可知,UV-B 照射后蓝莓的糖类物质含量变化均与 PAL 和 CHI 酶活性相关。可溶性糖含

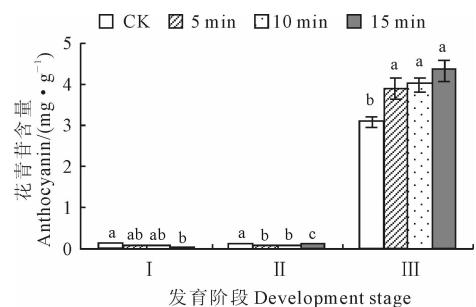


图 4 UV-B 照射对蓝莓花青苷含量的影响
Fig. 4 Effect of UV-B irradiation on the content of anthocyanin in blueberry

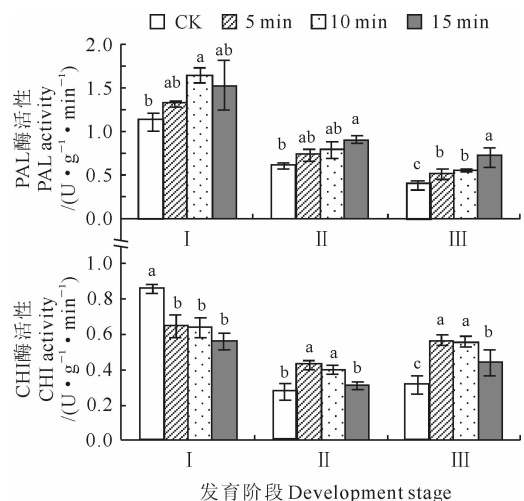


图 5 UV-B 照射对蓝莓 PAL 和 CHI 酶活性的影响
Fig. 5 Effect of UV-B irradiation on the PAL and CHI activities in blueberry

表 1 UV-B 照射后蓝莓各物质含量的相关性分析

Table 1 Correlation of phenolic and sugar contents with PAL and CHI activities in blueberry after UV-B treatment

相关系数 Correlation coefficient	可溶性糖 Soluble sugar	总酚 Total phenolics	类黄酮 Flavonoid	花青苷 Anthocyanin
PAL	-0.906 **	0.886 **	0.779 **	-0.615
CHI	-0.708 **	0.479	0.474	-0.098

注: * 为 0.05 显著水平; ** 为 0.01 极显著水平。

Note: * indicated significance at the 0.05 level; ** indicated significance at the 0.01 level.

量与 PAL($r=-0.906^{**}$)、CHI($r=-0.708^{**}$)酶活性呈极显著负相关。蓝莓的总酚含量变化与 PAL 酶活性变化呈极显著正相关($r=0.886^{**}$)与 CHI 酶活性变化无显著相关性。蓝莓类黄酮含量与 PAL 酶活性呈极显著正相关($r=0.779^{**}$)与 CHI 酶活性无显著正相关性。花青苷含量变化与 PAL 和 CHI 酶活性均无显著相关性。

3 讨 论

本研究结果表明,UV-B 处理,幼果期蓝莓可溶性糖含量表现出低剂量促进,高剂量抑制的现象,转色期蓝莓 UV-B 处理可溶性糖含量较对照显著降低。有研究认为,紫外辐照引起的糖含量的变化^[13-15]。糖类物质为酚类物质尤其是花青苷的合成和积累的前体物质,可能幼果期和白果期花青苷含量增幅不大,而转色期蓝莓花青苷含量显著增加,导致糖类物质含量有所下降。在蓝莓果实中,有研究显示抗氧化能力与总酚含量存在明显的正相关性^[16],因此,紫外处理能增强蓝莓的抗氧化能力。UV-B 处理,不同发育时期蓝莓果实总酚的含量均增加,但 UV-B 处理幼果期和转色期蓝莓果实内类黄酮含量较对照有所降低,可能这两个时期紫外处理能刺激类黄酮外其他酚类物质的合成。Kim 等^[17]认为当植物暴露于较高剂量的紫外辐射中,为了应对伤害,高等植物已经进化出在植物角质层和表皮迅速积累酚类化合物的保护机制。紫外辐照导致酚类化合物含量迅速变化,能够诱导促进芦柑^[18]、葡萄^[8]、苹果^[19]、草莓^[20]等果实总酚等物质的积累。本研究结果与前人在其他植物上的研究结果一致,这表明蓝莓对 UV-B 处理可以产生积极的响应,增加了果实内抗氧化物质的含量。

UV-B 处理,不同发育时期蓝莓果实花青苷含量均增加。转色期花青苷经紫外照射后含量增幅较大,可能幼果期白果期蓝莓体内花青苷合成途径中

其他支路占优势有关。有研究显示,UV-B 能调控苹果^[21]、草莓^[22]、甘蓝^[23]等植物花青苷的积累,而半高丛蓝莓品种‘北陆’中提取的花青素,在低剂量(0.345 mg/mL)条件下,就能清除 50% 以上的超氧阴离子及羟基自由基,其花青素的抗氧化能力比葡萄籽和 VC 高,对脂质过氧化物有明显的抑制还原作用^[24],因此 UV-B 处理增加了蓝莓的营养成分。

本研究结果表明,UV-B 紫外光处理,不同发育时期蓝莓果实 PAL 酶活性均有所增加,但幼果期蓝莓果实 CHI 酶活性显著下降外,其他各时期 CHI 酶的活性均增加。这可能跟不同时期植物体内代谢途径不同有关。有研究表明,高温逆境^[25]、外源水杨酸^[26]等逆境胁迫均能诱导 PAL 酶活性增加,可能 UV-B 处理以对蓝莓果实产生胁迫作用,但是关于 CHI 酶活性变化的报道较少。幼果期类黄酮含量增加不显著,可能与 CHI 酶活性的下降有关,也可能是紫外辐照时间相对幼果期蓝莓过长,对果实的伤害程度已经超过了其自身的防御能力。

UV-B 处理后,PAL 酶活性和 CHI 酶活性均与可溶性糖呈极显著负相关性,说明这两种酶活性与糖类物质的合成代谢关系密切,有研究显示糖作为信号转导分子,能激活一些基因的表达。也有研究显示,类黄酮途径中如 PAL、CHS、DFR、UGFT 等大部分基因均受糖调控^[27]。糖类物质为酚类物质尤其是花青苷的合成提供前体物质,PAL 和 CHI 是催化酚类物质合成的关键酶,因而存在显著的负相关性。PAL 酶活性与总酚和类黄酮的形成存在极显著正相关性,但 CHI 与总酚和类黄酮的合成关系不显著。PAL 和 CHI 酶活性均与花青苷的合成无显著相关性,可能这两种酶属于花青苷合成的上游酶,之后还有许多分支,途径中还存在其他相关调控酶,其活性的变化有待进一步研究。

在蓝莓果实中抗氧化物质的含量已成为评价其果实品质及营养的重要指标,抗氧化能力与总酚含量尤其是类黄酮和花青苷的含量存在显著的正相关性,而糖类物质不仅为酚类物质的合成提供前体,也决定了蓝莓的口感。本研究对不同发育时期的离体蓝莓采用三个不同处理时间,上述结果表明,UV-B 处理能够有效地诱导蓝莓发生积极的响应,使果实内可溶性糖含量表现出短时间促进,长时间抑制的现象,能促进不同发育时期蓝莓果实总酚和花青苷及白果期类黄酮的积累,显著降低幼果 CHI 酶活性,增加其余发育时期果实的 PAL 及 CHI 酶活性。PAL 酶活性与可溶性糖、总酚和类黄酮的积累呈极

显著正相关,CHI 酶活性仅与可溶性糖呈极显著正相关。UV-B 处理能增加蓝莓果实的抗氧化物质的含量,但 UV-B 处理对其代谢的作用机制及对活体蓝莓果实品质的影响还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] CHEN J F(陈介甫),LI Y D(李亚东),XU ZH(徐哲). Chemical principles and bioactivities of blueberry[J]. *Acta Pharmaceutica Sinica* (药学报),2010,**45**(4):422—429(in Chinese).
- [2] BAKOWSKA A,KUCHARSKA A Z,OSZMIAŃSKI J. The effects of heating,UV irradiation,and storage on stability of the anthocyanin-polyphenol copigment complex[J]. *Food Chemistry*,2003,**81**(3):349—355.
- [3] LISTER C E,LANCASTER J E. Developmental changes in enzymes of flavonoid biosynthesis in the skins of red and green apple cultivars[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*,1996,**71**(3):313—330.
- [4] 孙莹. 蓝莓花青苷合成及对生长调节剂的响应[D]. 北京:北京林业大学,2013.
- [5] SUN M,GU X,FU H,et al. Change of secondary metabolites in leaves of *Ginkgo biloba* L. in response to UV-B induction[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*,2010,**11**(4):672—676.
- [6] RODOV V,TIETEL Z,VINOKUR Y,et al. Ultraviolet light stimulates flavonol accumulation in peeled onions and controls microorganisms on their surface[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*,2010,**58**(16):9 071—9 076.
- [7] SUN Y(孙莹),ZHANG ZH W(张振文),ZHANG J Y(张景昱),et al. Effects of enhanced UV-B radiation on the quality of grape fruits[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究),2010,**28**(1):165—167(in Chinese).
- [8] WEN P F(温鹏飞),XING Y F(邢延富),NIU T Q(牛铁泉). Effect of UV-C on the fruit quality and the accumulation of polyphenol during the grape berry development[J]. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学),2012,**45**(21):4 428—4 436(in Chinese).
- [9] HUYSKENS-KEIL S,EICHHOLZ I,KROH L W,et al. UV-B induced changes of phenol composition and antioxidant activity in black currant fruit (*Ribes nigrum* L.)[J]. *Journal of Applied Botany and Food Quality*,2012,**81**(2):140—144.
- [10] 王文浩. 中国黄连木雌雄同株资源的发现及生物特性研究[D]. 北京:北京林业大学,2014.
- [11] PASTRANA-BOILLA E,AKOH C C,SELLAPPAN S,et al. Phenolic content and antioxidant capacity of muscadine grapes[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*,2003,**51**(18):5 497—5 503.
- [12] LUO J(骆军),ZHANG X Y(张学英),LI G P(李光平). Determination of anthocyanin content in fruits by HPLC[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*,2006,**22**(3):25—27(in Chinese).
- [13] SAVITCH L V,POCOCK T,KROL M,et al. Effects of growth under UV-A radiation on CO₂ assimilation,carbon partitioning,PS II photochemistry and resistance to UV-B radiation in *Brassica napus* cv. topas[J]. *Functional Plant Biology*,2001,**28**(3):203—212.
- [14] HAN X X(韩晓旭),LIU CH H(刘长虹),CAI L Y(蔡路昀),et al. Effects of postharvest UV-C treatment on disease reisease resistance and quality in mandarin fruit[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*,2012,**12**(7):127—133(in Chinese).
- [15] RONG R F(荣瑞芬),GUO K(郭堃),LIU J P(刘京萍),et al. Effects on disease resistance and quality in harvested peach by UV-C treatment[J]. *Food Science and Technology*,2008,**33**(1):230—233(in Chinese).
- [16] ZHENG Y H,WANG C Y,WANG S Y,et al. Effect of high-oxygen atmospheres on blueberry phenolics,anthocyanins,and antioxidant capacity[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*,2003,**51**:7 162—7 169.
- [17] KIM B,RODRIGO L. An *Arabidopsis* mutant tolerant to lethal ultraviolet-B levels shows constitutively elevated accumulation of flavonoids and other phenolic[J]. *Plant Physiology*,2001,**126**(3):1 105—1 115.
- [18] EDO C,SAMIR D,CHARLES L,et al. UV-induced resistance to postharvest diseases of citrus fruit[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B-Biology*,1992,**15**(4):367—371.
- [19] UBI B E,HONDA C,BESSHO H,et al. Expression analysis of anthocyanin biosynthetic genes in apple skin;effect of UV-B and temperature[J]. *Plant Science*,2006,**170**(3):571—578.
- [20] YANG ZH F(杨震峰),WANG J R(王吉如),WANG SH SH(王珊珊),et al. Effect of UV-C treatment on fruit decay and antioxidant activity of strawberry[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences* (核农学报),2012,**26**(5):775—780(in Chinese).
- [21] DONG Y H,BEUNING L,DAVIES K,et al. Expression of pigmentation genes and photo-regulation of anthocyanin biosynthesis in developing Royal Gala apple flowers[J]. *Functional Plant Biology*,1998,**25**(2):245—252.
- [22] ERKAN M,WANG S Y,WANG C Y. Effect of UV treatment on antioxidant capacity,antioxidant enzyme activity and decay in strawberry fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*,2008,**48**(2):163—171.
- [23] QI Y(齐艳),XING Y X(邢燕霞),ZHENG H(郑禾),et al. UV-A and UV-B involved in induction and regulation of anthocyanin biosynthesis in cabbage[J]. *Journal of China Agricultural University*,2014,**19**(2):86—94(in Chinese).
- [24] WANG R J(王荣姣),LI ZH H(李昭华),HUANG H L(黄红林),et al. Antioxidative activity of anthocyanins from Northland[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学),2011,**39**(12):7 061—7 063(in Chinese).
- [25] WEN P F,CHEN J Y,WAN S B,et al. Salicylic acid activates phenylalanine ammonialyase in grape berry in response to high temperature stress[J]. *Plant Growth Regulation*,2008,**55**(1):1—10.
- [26] WEN P F,CHEN J Y,KONG W F,et al. Salicylic acid induced the expression of phenylalanine ammonialyase gene in grape berry[J]. *Plant Science*,2005,**169**(5):928—934.
- [27] SOLFANELLI C,POGGI A,LORETI E,et al. Sucrose-specific induction of the anthocyanin biosynthetic pathway in *Arabidopsis*[J]. *Plant Physiology*,2006,**140**(2):637—646.

(编辑:裴阿卫)