

UV-B照射时长对酿酒葡萄果实品质及类黄酮代谢产物的影响

沈甜, 牛锐敏, 许泽华, 黄小晶, 陈卫平

Effects of UV-B Irradiation Time on Fruit Quality and Flavonoid Metabolites of Wine Grapes

SHEN Tian, NIU Ruimin, XU Zehua, HUANG Xiaojing, and CHEN Weiping

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023090157>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光质对小豆芽苗菜生长和类黄酮的影响及其机理初步探究

Effects of Light Quality on Growth and Flavonoids of Adzuki Bean Sprouts and Its Preliminary Mechanism

食品工业科技. 2019, 40(16): 64-70 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.16.011>

离体培养条件下外源糖对酿酒葡萄‘小味儿多’果实品质的影响

Exogenous Sugar Effects on Fruit Quality in 'Petit Verdot' Grape Berry *in Vitro*

食品工业科技. 2023, 44(21): 119-126 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023020055>

黑老虎果实不同部位次生代谢成分及其富集差异

Analysis of the Secondary Metabolites in *Kadsura coccinea* Fruit and Their Accumulation Difference in Peel, Pulp and Seed Organs

食品工业科技. 2022, 43(12): 27-35 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021100173>

植物类黄酮化合物生物合成调控研究进展

Research Progress on Regulation of Plant Flavonoids Biosynthesis

食品工业科技. 2021, 42(21): 454-463 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020100095>

1-MCP和UV-C处理对采后苹果抗氧化活性的影响

Effect of 1-MCP and UV-C on Antioxidant Capacity in Apple (*Malus pumila* Mil.) Fruit during Storage

食品工业科技. 2019, 40(3): 281-285 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.03.044>

酿酒酵母与非酿酒酵母混合发酵对果酒品质的影响

Effect of Mixed Fermentation of *Saccharomyces cerevisiae* and Non-*Saccharomyces cerevisiae* on Fruit Wine Quality

食品工业科技. 2020, 41(8): 353-359 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.08.057>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

沈甜, 牛锐敏, 许泽华, 等. UV-B 照射时长对酿酒葡萄果实品质及类黄酮代谢产物的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(17): 73–82. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090157

SHEN Tian, NIU Ruimin, XU Zehua, et al. Effects of UV-B Irradiation Time on Fruit Quality and Flavonoid Metabolites of Wine Grapes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(17): 73–82. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090157

· 研究与探讨 ·

UV-B 照射时长对酿酒葡萄果实品质及类黄酮代谢产物的影响

沈 甜, 牛锐敏, 许泽华, 黄小晶, 陈卫平*
(宁夏农林科学院园艺研究所, 宁夏银川 750002)

摘 要: 为探明 UV-B 照射时长对赤霞珠酿酒葡萄果实品质及类黄酮物质的影响, 试验设立 UV-B 每天分别照射 2、4、6、8 h 共 4 个梯度, 以不进行 UV-B 照射为对照 (CK), 对不同 UV-B 照射时长葡萄果实品质及类黄酮物质进行检测分析。结果表明, 短时间的 UV-B 照射会增加果实中可溶性糖含量, UV-B 不同照射时长处理的总酚、单宁、总类黄酮、黄烷-3-醇和总花色苷含量均增加; UV-B 不同照射时长对酿酒葡萄果皮中的类黄酮代谢产物影响显著, 筛选出差异代谢物 13 个, 其中 5 种物质显著上调、8 种物质显著下调; 在类黄酮和次生代谢产物合成通路上分别富集了 7 个差异代谢物, 占代谢物总数的 77.78%。利用主成分对果实品质和果皮类黄酮产物测定值进行综合评价, 得分从高到低依次为 UV-B 照射 2 h>UV-B 照射 8 h>UV-B 照射 4 h>UV-B 照射 6 h>CK。UV-B 照射酿酒葡萄赤霞珠 2 h 时, 果实品质和类黄酮代谢产物表现最佳。

关键词: UV-B, 酿酒葡萄, 果实品质, 类黄酮, 代谢产物

中图分类号: TS262.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)17-0073-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090157

本文网刊:



Effects of UV-B Irradiation Time on Fruit Quality and Flavonoid Metabolites of Wine Grapes

SHEN Tian, NIU Ruimin, XU Zehua, HUANG Xiaojing, CHEN Weiping*

(Horticultural Research Institute, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China)

Abstract: In order to explore the effect of UV-B irradiation time on the fruit quality and flavonoids of Cabernet Sauvignon wine grape, the experiment set up four gradients of UV-B irradiation for 2, 4, 6 and 8 h each day, with no UV-B irradiation as the control (CK). The fruit quality and flavonoids of grapes with different UV-B irradiation time were detected and analyzed. The results showed that short-term UV-B irradiation increased the content of soluble sugar in fruit, and the contents of total phenols, tannins, total flavonoids, flavan-3-ols and total anthocyanins increased under different UV-B irradiation time. Different UV-B irradiation time had a significant effect on flavonoid metabolites in wine grape skin, and 13 differential metabolites were screened out, and 5 substances were significantly up-regulated and 8 substances were significantly down-regulated. Seven differential metabolites were enriched in the flavonoid and secondary metabolite synthesis pathways, accounting for 77.78% of the total metabolites. Comprehensive evaluation of the fruit quality and the measured value of flavonoid products in the peel used principal component analysis. The scores from high to low were UV-B irradiation for 2 h>UV-B irradiation for 8 h>UV-B irradiation for 4 h>UV-B irradiation for 6 h>CK. UV-B irradiation of wine grape Cabernet Sauvignon for 2 h, the fruit quality and flavonoid metabolites were the best.

Key words: UV-B; wine grape; fruit quality; flavonoid; metabolites

收稿日期: 2023-09-14

基金项目: 宁夏回族自治区自然科学基金项目 (2022AAC03446); 宁夏回族自治区现代农业体系专家团队项目; 宁夏农业高质量发展和生态保护科技创新示范项目 (NGSB-2021-4-02); 农业部国家葡萄产业体系贺兰山东麓试验站项目 (CARS-29-28)。

作者简介: 沈甜 (1990-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 葡萄栽培生理研究, E-mail: 1097781520@qq.com。

* 通信作者: 陈卫平 (1970-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 葡萄栽培生理研究, E-mail: nature06chen@163.com。

全球气候变暖已成为大趋势,亚洲中高纬地带变暖最为显著,高温强光等极端天气在贺兰山东麓产区生长季节频繁出现,对葡萄生产造成了逆境伤害。应对气候变化,植物体通过一系列的酶促反应和基因表达来调节植物的生理功能,从而改变了代谢产物。研究表明,高温、强光照对果实造成氧化胁迫,影响结构基因的表达量,诱导果实中的过氧化物酶含量上升,减少果皮中花青素含量^[1]。Reshef等^[2]通过微气象和代谢组学的综合研究,揭示了葡萄黄酮醇-葡萄糖苷、槲皮素和山奈酚对太阳辐射呈对数响应,黄烷-3-醇代谢物对太阳辐射的反应呈阴性,而黄酮醇则呈高度诱导,花色素的整体水平随着日照的增加而降低。

酚类物质由苯丙氨酸途径(phenylpropanoid pathway)和类黄酮生物合成途径(flavonoid biosynthetic pathway)产生,是植物体内重要次生代谢产物之一,广泛参与植物种子传播、紫外线辐射保护、抵御病原菌等生物过程。在过去几十年中,由于臭氧层衰减直接导致地表UV-B(ultraviolet B,中波紫外线)辐射增强。UV-B能量高^[3],植物响应UV-B辐射伤害的有效途径之一就是合成类黄酮等酚类化合物^[4]。UV-B辐射能够增加抗氧化剂的含量和抗氧化酶的活性^[5-6],增强UV-B辐射可以诱导类黄酮途径中基因的表达和吸收紫外线的类黄酮物质的积累^[7]。在UV-B诱导下,蓝莓(*Vaccinium* spp.)^[8]、葡萄(*Vitis vinifera*)^[9]等植物中苯丙氨酸解氨酶(苯丙氨酸代谢阶段起始酶)活性提高^[10]。UV-B辐射通过诱导调控MYB、bHLH、WD40基因表达来调节结构基因,进而影响酚类代谢途径和各种酚类物质含量^[11]。

虽然有研究指出类黄酮合成基因受UV-B辐射诱导,但是UV-B照射不同时间下酿酒葡萄类黄酮代谢产物的含量变化尚未清楚。本试验设立不同时间段照射UV-B,采用代谢组学解析不同UV-B照射时长对酿酒葡萄果皮类黄酮代谢物质的影响。研究结果将有助于揭示不同长时的UV-B照射下的酿酒葡萄类黄酮的代谢差异,为后期果实品质调控提供一定的理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

葡萄 银川市西夏区芦花台宁夏农科院现代农业综合试验基地酿酒葡萄资源圃;无水乙醇、甲醇、无水碳酸钠、氢氧化钠(粒)、氯化钾、三水合乙酸钠、亚硝酸钠、磷酸、磷钼酸 天津市大茂化学试剂厂;浓硫酸、浓盐酸 成都市科隆化学品有限公司;蒽酮 上海广诺化学科技有限公司;福林酚 上海瑞永生物科技有限公司,冰醋酸 天津市北联精细化学品开发有限公司;儿茶素 上海源叶生物科技有限公司;对二甲氨基肉桂醛 上海麦克林生化科技有限公司;六水三氯化铝 天津市致远化学试剂有限公司;钨酸钠 天津市凯通化学试剂有限公司,以上试

剂均为国产分析纯。甲醇、乙腈 Merck 公司;甲酸 Sigma-Aldrich 公司,均为色谱纯;标准品大于98%,MCE(70% 甲醇配制,10 mmol/L)。

RRH-100 型高速多功能粉碎机 上海缘沃工贸有限公司;ME204 分析天平 梅特勒-托利多国际贸易(上海)有限公司;KQ-500DE 超声波清洗机 昆山市超声仪器有限公司;KQ5200E 型超声清洗仪 昆山舒美;MIX-200 型多管涡旋振荡器 上海净信;MM400 型球磨仪 Retsch;AS 60/220.R2 型电子天平 RADWAG;5424R 型离心机 Eppendorf;QTRAP 6500+型三重串联液质联用仪 SCIEX;UV2600 紫外分光光度计 上海天美科学仪器有限公司;1580R 高速冷冻台式离心机 基因(美国)有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 试验设计及采样 试验区位于银川市西夏区芦花台宁夏农科院现代农业综合试验基地酿酒葡萄资源圃内,东经106°8'42"—106°8'45" 北纬38°38'48"—38°38'57"。试验园地四周空旷、地形平坦,地下水位较浅,土壤属于灌淤潮土,表层沙壤,土壤肥力较高,pH8.1~8.3。年平均气温9℃,降雨量200 mm左右,年蒸发量1400 mm以上,日照时数3000 h以上。采用直立龙干形整形,南北行向定植,株行距0.8 m×3.0 m,冬剪以短梢修剪为主。

试验设立5个处理,果实膨大末期(7月29日)开始处理,果实成熟期(9月29日)结束,参考前人研究结果^[12-13]做出调整设计调整,T1:UV-B照射2 h/d,照射时间于8:00~9:00,17:00~18:00;T2:UV-B照射4 h/d,照射时间于8:00~10:00,16:00~18:00;T3:UV-B照射6 h/d,照射时间于8:00~11:00,15:00~18:00;T4:UV-B照射8 h/d,照射时间于8:00~12:00,14:00~18:00;CK:不进行UV-B照射。UV-B强度100 μm,照射距离主干1 m。其他栽培管理措施一致。在处理25 d时开始采集果穗,平均每隔15 d取样一次,采集3次,在果实成熟末期采集1次果穗,共采集4次,处理后25 d为果实转色期,处理后40 d为果实成熟初期,处理后55 d处于果实成熟中期,处理后60 d处于果实成熟末期。将果穗放入冰盒带回实验室,用液氮速冻后将果粒用粉碎机粉碎后放入-80℃冰箱保存测定果实基本品质指标,在果实转色期采集整个果穗后,随机取下果粒剥皮用液氮速冻带回实验室测定类黄酮代谢物质,基于类黄酮主要在果皮中合成^[14],所以测定了果皮中的类黄酮代谢产物,果实品质指标则是综合测定整个果粒。

1.2.2 指标测定

1.2.2.1 可溶性总糖测定 取0.5 g粉碎机处理的葡萄果实样品于加有2.5 mL 80%乙醇溶液的研钵中研磨成匀浆,用7.5 mL 80%乙醇溶液冲洗研钵一并转入离心管中,重复3次,80℃水浴30 min,取出冷却,3500 r/min离心10 min,取上清液定容至100 mL。取1 mL提取液,5 mL蒽酮硫酸溶液,摇匀,100℃

水浴 10 min, 取出后在 620 nm 波长下测定吸光值^[15]。

标准曲线制作: 称取分析纯葡萄糖(预先于 80 °C 下烘干至恒重)100 mg, 溶于蒸馏水中, 定容至 100 mL, 即为 1 mg/mL 标准原液, 稀释 10 倍, 即为 100 μg/mL 标准液。分别吸取 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mL 的标准葡萄糖溶液于试管中, 然后分别加入蒸馏水, 使总体积达到 2 mL, 依次加入 5 mL 萘酚硫酸溶液, 摇匀, 沸水浴 10 min, 取出后在 620 nm 波长下测定吸光值。标准曲线: $y=3.0518x+0.162$, $R^2=0.9994$ 。

1.2.2.2 可滴定酸测定 称取 1 g 液氮粉碎的葡萄果实样品, 重复 3 次, 用 5 mL 蒸馏水研磨至匀浆并转入试管中, 再加 15 mL 蒸馏水清洗研钵后, 液体全部转入试管中, 80 °C 水浴中提取 30 min。取出冷却、过滤、定容至 50 mL。取 20 mL 样液用 0.05 mol/L NaOH 溶液滴定, 记录消耗 NaOH 体积^[15]。

1.2.2.3 酚类物质测定 样品提取: 取-80 °C 中保存的葡萄果粒用液氮粉碎至沙粒状储藏于-80 °C 冰箱备用。称取 0.3 g 葡萄粉末于 15 mL 离心管中, 加入 10 mL 盐酸甲醇(60% 甲醇, 0.1% 盐酸), 在 40 Hz 功率下超声辅助提取 30 min, 温度控制在 30 °C, 取出后放入离心机中在 4 °C, 10000 r/min 下离心 10 min, 收集上清液, 按以上步骤再提取 2 次, 收集 3 次所有上清提取液于 50 mL 离心管丝口瓶中, 贮藏于-80 °C 用于测定果实中总酚、单宁、总花色苷、总类黄酮和总黄烷-3-醇含量。

a. 总酚测定: 提取液 100 μL 与 0.9 mL 水依次加入 20 mL 的玻璃试管中, 加 5.0 mL 水, 摇匀, 再加入 0.2 mL 福林肖卡试剂, 充分摇匀, 2 min 之后, 加入 20% 碳酸钠溶液 2.0 mL, 混匀, 最后避光反应 60 min 后, 于 765 nm 波长下比色, 以蒸馏水调零测定吸光度, 每个处理重复三次, 结果以没食子酸计^[16]。

标准曲线制作: 配制 0.1 mg/mL 没食子酸标准溶液。分别设置 50、100、150、200、250、300 μL 六个梯度加入到试管中, 依次加蒸馏水使总体积达到 1 mL。再分别加 5.0 mL 蒸馏水。摇匀, 再加 0.2 mL 福林肖卡试剂, 充分摇匀, 2 min 之后加入 20% 碳酸钠溶液 2.0 mL, 充分混匀, 最后再加入 0.9 mL 水。避光反应 60 min 后, 于 765 nm 波长下比色, 以蒸馏水调零测定吸光度。标准曲线: $y=0.0128x-0.0078$, $R^2=0.9993$ 。

b. 单宁测定: 提取液 0.1 mL 与 0.9 mL 水依次加入 20 mL 的玻璃试管中, 摇匀, 再加 0.2 mL 福林丹尼斯试剂, 充分摇匀, 2 min 之后加入 20% 碳酸钠溶液 5.0 mL, 充分混匀。避光反应 30 min 后, 于 760 nm 波长下比色, 以蒸馏水调零测定吸光度, 每个处理重复三次, 结果以单宁酸计^[17]。

标准曲线制作: 配制 0.1 mg/mL 单宁酸标准溶液。分别设置 50、100、150、200、250、300 μL 六个

梯度加入到试管中, 依次加蒸馏水使总体积达到 1 mL。摇匀, 再加 0.2 mL 福林丹尼斯试剂, 充分摇匀, 2 min 之后加入 20% 碳酸钠溶液 5.0 mL, 充分混匀。避光反应 30 min 后, 于 760 nm 波长下比色, 以蒸馏水调零测定吸光度。标准曲线: $y=0.006x+0.0189$, $R^2=0.9987$ 。

c. 总花色苷测定: 分别取 1 mL 提取液于两支试管中, 分别用 pH 为 1.0 的 KCl 和 pH 为 4.5 的醋酸钠缓冲溶液定容至 5 mL, 避光稳定 15~20 min, 于分光光度计 520、700 nm 下在 23~40 min 内测定吸光度。结果以二甲花翠素葡萄糖苷计^[18]。计算公式:

$$A = (A_{520} - A_{700})_{pH1.0} - (A_{520} - A_{700})_{pH4.5}$$

$$\text{提取液花色苷含量 } W(\text{mg/L}) = (A \times M_w \times DF) / \epsilon$$

$$\text{花色苷含量}(\text{mg/g}) = W \times V / m$$

式中, M_w : 二甲花翠素葡萄糖苷分子量 493.5, DF : 稀释倍数; ϵ : 二甲花翠素葡萄糖苷的消光系数 28000; V : 提取液体积, L; m : 称取葡萄果粒粉末质量, g。

d. 总类黄酮测定: 提取液 0.3 mL, 加入 30% 甲醇 2.7 mL, 摇匀, 加入 0.5 mol/L 的亚硝酸钠溶液 0.2 mL, 摇匀, 再加入 0.3 mol/L 氯化铝溶液 0.2 mL, 振荡摇匀, 静置 5 min。加入 1 mol/L 的氢氧化钠溶液 1 mL, 摇匀, 静置 10 min 后, 在 510 nm 处测定吸光度。结果以芦丁计^[19]。

标准曲线制作: 配制 1.0 mg/mL 芦丁标准甲醇溶液(甲醇定容), 然后分别设置 50、100、150、200、250、300 μL 六个梯度加入到试管中依次, 依次加甲醇使总体积达到 1 mL。加入 30% 甲醇溶液 2.7 mL, 摇匀, 加入 0.5 mol/L 的亚硝酸钠溶液 0.2 mL, 摇匀, 再加入 0.3 mol/L 氯化铝溶液 0.2 mL, 振荡摇匀静置 5 min。加入 1 mol/L 的氢氧化钠溶液 1 mL, 摇匀静置 10 min 后, 在 510 nm 处以蒸馏水调零测定吸光度。标准曲线: $y=0.0012x+0.0104$, $R^2=0.9992$ 。

e. 黄烷-3-醇测定: 提取液 0.1 mL 与 0.1% p-DMACA 的 1 mol/L 的盐酸甲醇溶液 3.0 mL 加入到 10 mL 试管中, 振荡混匀后, 室温条件下反应 10 min, 在 640 nm 处以蒸馏水调零测定吸光度。结果以(+)-儿茶素计^[20]。

标准曲线制作: 将 200 mg/L 的(+)-儿茶素母液(甲醇定容)依次稀释成 12.5、25.0、50.0、100.0、200.0 mg/L 系列梯度的标准溶液。取(+)-儿茶素标准溶液 0.1 mL 与 0.1% p-DMACA 的 1 mol/L 的盐酸甲醇溶液 3.0 mL 分别加入到 10 mL 试管中, 振荡混匀后, 室温条件下反应 10 min, 在 640 nm 处以蒸馏水调零测定吸光度。标准曲线: $y=0.0041x+0.0648$, $R^2=0.9978$ 。

1.2.2.4 类黄酮代谢物质测定 液相条件: 色谱柱: Waters ACQUITY UPLC HSS T3 C₁₈ 柱(1.8 μm,

100 mm×2.1 mm i.d.); 流动相: A 相为超纯水(加入 0.05% 的甲酸), B 相为乙腈(加入 0.05% 的甲酸); 流速 0.35 mL/min; 柱温 40 °C; 进样量 2 μ L; 洗脱梯度: 0 min A/B 为 90:10(V/V), 1 min A/B 为 80:20(V/V), 9 min 为 30:70(V/V), 12.5 min A/B 为 5:95(V/V), 13.5 min 为 5:95(V/V), 13.6 min 为 90:10(V/V), 15 min 为 90:10(V/V)。

质谱条件: 电喷雾离子源(Electrospray Ionization, ESI)温度 550 °C, 正离子模式下质谱电压 5500 V, 负离子模式下质谱电压-4500 V, 气帘气(Curtain Gas, CUR)35 psi。在 Q-Trap 6500+中, 每个离子对根据优化的去簇电压(Declustering Potential, DP)和碰撞能(Collision Energy, CE)进行扫描检测^[21-23]。

1.3 数据处理

利用 Excel 2007 软件进行数据处理与作图, 使用 SPSS 23.0 软件进行显著性和主成分分析, R 语言工具绘制主成分分析图、热图和差异代谢物 KEGG 分类图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对果实可溶性总糖的影响

不同时长的紫外光处理果实可溶性总糖含量变化如图 1 所示。由图 1 可知, UV-B 照射对果实中的可溶性总糖的积累没有显著性影响($P>0.05$), 在处理 55~60 d, UV-B 照射 2 h 处理的可溶性总糖含量最高, 在处理 60 d 时比 CK 高了 1.86%。在果实成熟末期, 短时间的 UV-B 照射会增加果实中可溶性糖含量, 当 UV-B 照射超过 4 h 后, 果实中的可溶性总糖含量开始下降。

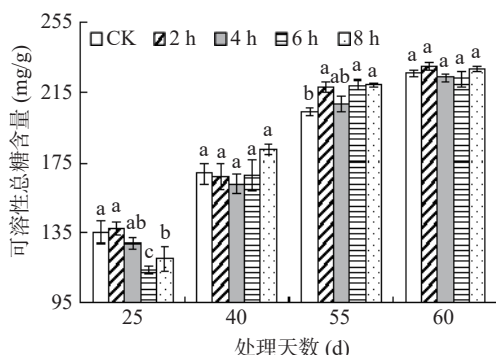


图 1 不同处理对果实中的可溶性总糖含量的影响

Fig.1 Effects of different treatments on the contents of total soluble sugar in fruits

注: 不同字母表示不同处理间差异达到显著性水平($P<0.05$); 图 2~图 3, 表 1 同。

2.2 不同处理对果实可滴定酸的影响

在开始处理后 25 d 开始监测不同处理果实可滴定酸含量变化, 结果如图 2 所示。由图 2 可知, 除成熟末期, 随着 UV-B 照射时长的增加, 其他阶段均是 UV-B 照射 4 h 和 6 h 果实中的可滴定酸含量显著高于其他处理($P<0.05$)。在开始处理后 25、40、55、

60 d 时, UV-B 照射 6 h 分别比 CK 组高 13.52%、5.74%、14.11%、0.31%。

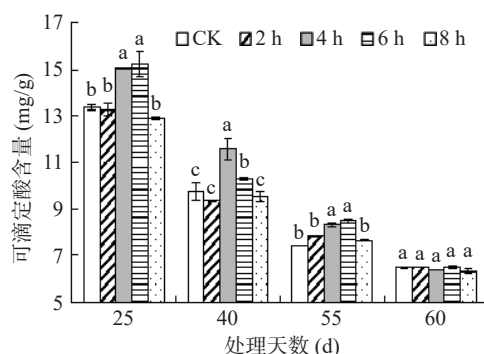


图 2 不同处理对果实中的可滴定酸含量的影响

Fig.2 Effects of different treatments on the contents of titratable acid in fruits

2.3 不同处理对果实酚类物质的影响

图 3 为不同 UV-B 时长照射处理果实中的酚类物质含量随果实发育的含量测定值。由图 3 可知, 除 UV-B 照射开始后的 25 d, 随着果实成熟, UV-B 不同照射时长处理的总酚、单宁、总类黄酮、黄烷-3-醇和总花色苷含量均增加, 但在 UV-B 开始处理后的 25 d 时, 4 h 处理的总酚、单宁、总类黄酮、黄烷-3-醇均是最高, 比 CK 分别高 5.97%、5.47%、17.14%、26.76%。在成熟采收时, 以 2 h 处理的果实中的总酚、单宁、总类黄酮、黄烷-3-醇和总花色苷含量最高, 分别比 CK 增加了 17.08%、10.90%、25.68%、39.58%、7.93%。UV-B 照射 4 h 果实中的单宁含量随着果实成熟逐渐降低, 而其他处理则是在果实成熟末期开始积累。

2.4 不同处理对果皮黄酮代谢的影响

2.4.1 不同处理果皮黄酮代谢产物的差异性分析
为了更加清楚地了解不同 UV-B 照射时长中类黄酮代谢产物的差异, 通过 UPLC-MS 平台广泛在葡萄转色完成后测定了不同处理果皮的类黄酮代谢产物, 结果如表 1 所示。由表 1 可知, 共检测出 62 种类黄酮化合物, 其中包括 17 种黄酮醇、14 种黄酮、7 种黄烷醇、6 种查尔酮、6 种黄烷酮、5 种二氢黄酮醇、3 种异黄酮、1 种原花青素、1 种酚酸、1 种口山酮、1 个茶黄素。

不同处理的黄烷酮类的橙皮素仅在 2 h 紫外线照射中检测出, 含量为 0.002 nmol/g, 证明短时间的 UV-B 照射可诱导其积累。不同处理果皮中的黄酮类中的川陈皮素、羟基芫花素、柑橘黄酮 3 种化合物存在显著差异($P<0.05$), 其中川陈皮素仅在 CK 和 UV-B 照射 8 h 中检测到, 且 T4 处理果皮中的川陈皮素比 CK 高 16.55%; 羟基芫花素在 T1 和 T2 中未检出, 但 T3 和 T4 处理中的分别比 CK 高 130%、244%; 柑橘黄酮随着 UV-B 照射时长的增加, 逐渐被抑制, 在 T2、T3、T4 处理中未检出, T1 处理比 CK 低了 83.72%。黄烷醇类中的银槲苷随着短时间

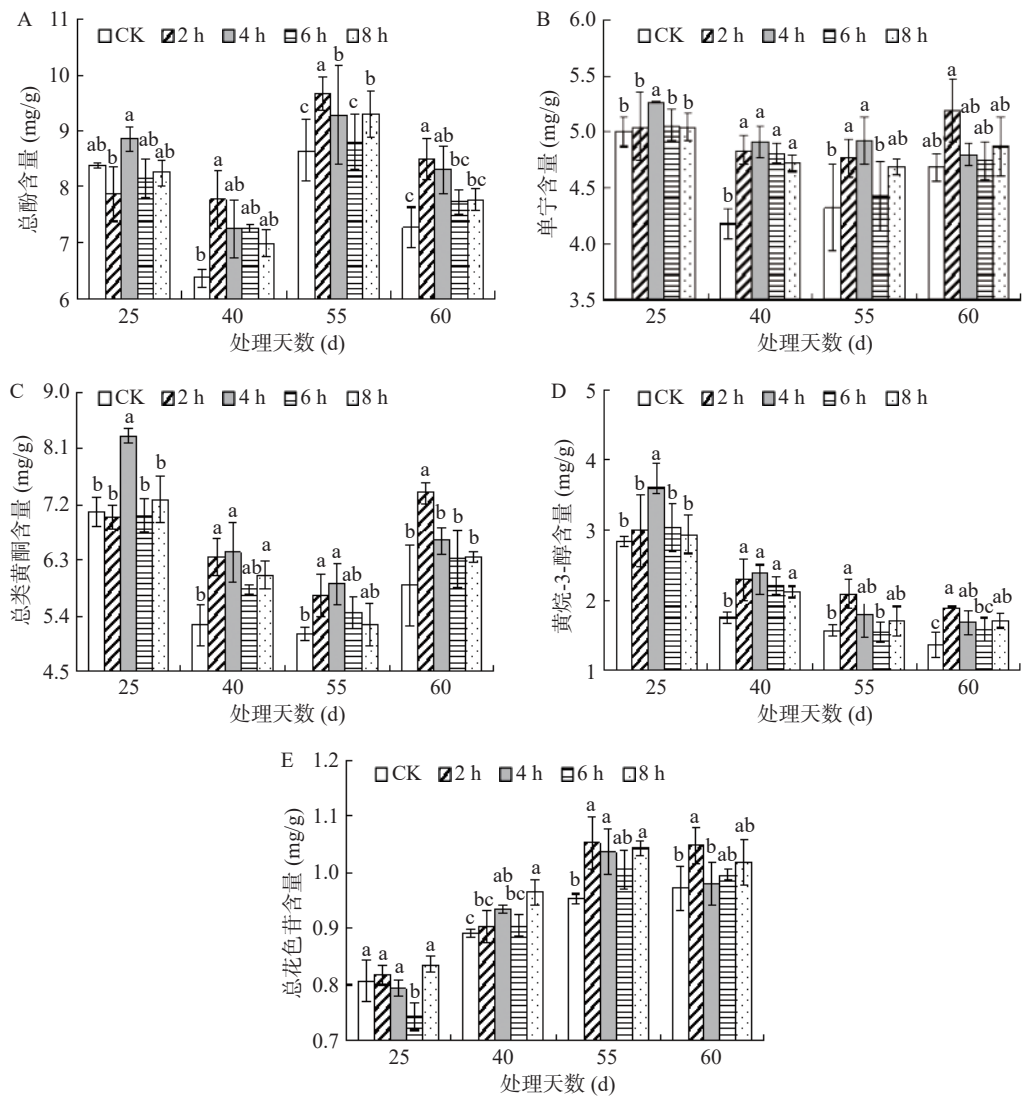


图 3 不同处理对果实中酚类物质含量的影响

Fig.3 Effects of different treatments on the content of phenolic substances in fruits

表 1 不同处理果皮中类黄酮代谢产物的含量(nmol/g)

Table 1 Contents of flavonoid metabolites in different treatments of pericarp (nmol/g)

分类	产物	CK	2 h	4 h	6 h	8 h
原花青素	茶黄素	21.98±2.03 ^a	15.79±0.76 ^b	17.91±1.50 ^b	20.37±0.33 ^a	21.71±0.83 ^a
	原花青素B2	13.94±0.87 ^b	14.76±1.59 ^b	17.17±1.09 ^a	15.88±0.45 ^{ab}	14.59±0.94 ^b
	蓝筛朴毒蛋白	0.50±0.02 ^b	0.38±0.06 ^c	0.49±0.03 ^b	0.55±0.04 ^{ab}	0.58±0.03 ^b
	三羟苯酚丙酮	0.38±0.01 ^c	0.40±0.01 ^b	0.50±0.02 ^a	0.33±0.00 ^d	0.42±0.01 ^b
查尔酮类	三叶苷	0.60±0.04 ^b	0.49±0.03 ^{cd}	0.53±0.01 ^c	0.45±0.01 ^d	0.66±0.01 ^a
	新橙皮甙二氢查尔酮	0.05±0.01 ^{ab}	0.05±0.00 ^a	0.04±0.00 ^c	0.04±0.00 ^{bc}	0.05±0.00 ^a
	根皮甙	26.23±1.09 ^b	23.95±0.58 ^c	24.39±0.37 ^c	24.75±0.06 ^c	28.54±0.46 ^a
	柚皮素查尔酮	0.88±0.03 ^a	0.87±0.03 ^a	0.75±0.04 ^b	0.58±0.01 ^c	0.78±0.05 ^b
黄烷醇类	没食子儿茶素	349.84±4.92 ^d	364.10±5.91 ^c	359.94±6.32 ^{cd}	375.24±4.73 ^b	419.02±6.25 ^a
	儿茶素没食子酸酯	3.12±0.10 ^d	4.61±0.57 ^b	10.67±0.11 ^a	4.01±0.17 ^c	4.31±0.05 ^{bc}
	阿福豆素	0.31±0.02 ^a	0.14±0.01 ^c	0.14±0.02 ^c	0.23±0.00 ^b	0.15±0.03 ^c
	表儿茶素	86.11±2.79 ^c	89.72±2.32 ^c	97.41±5.05 ^{ab}	101.10±2.84 ^a	91.80±1.49 ^{bc}
黄烷酮类	表焙儿茶素	96.42±1.58 ^b	101.59±1.75 ^b	119.95±8.03 ^a	126.68±2.37 ^a	100.92±3.45 ^b
	儿茶素	54.52±0.99 ^c	53.41±2.21 ^c	62.88±1.91 ^{ab}	61.53±1.81 ^b	65.17±1.65 ^a
	没食子儿茶素没食子酸酯	5.17±0.20 ^c	4.68±0.05 ^d	6.16±0.03 ^a	5.59±0.30 ^b	6.26±0.13 ^a
	橙皮素	/	0.002±0.01	/	/	/
黄烷酮类	柚皮素7-O-葡萄糖苷	1.70±0.06 ^b	1.30±0.02 ^c	1.68±0.04 ^b	1.73±0.20 ^b	2.27±0.08 ^a
	芸香柚皮苷	0.05±0.01 ^{ab}	0.07±0.01 ^a	0.07±0.01 ^a	0.04±0.01 ^b	0.07±0.01 ^a

续表 1

分类	产物	CK	2 h	4 h	6 h	8 h
黄烷酮类	松属素	0.03±0.04 ^a	0.01±0.01 ^a	0.02±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a
	异樱花亭	0.04±0.01 ^b	0.19±0.05 ^a	0.07±0.04 ^b	0.05±0.02 ^b	0.05±0.01 ^b
	毛茛草酚	0.43±0.01 ^b	0.37±0.05 ^{bc}	0.54±0.10 ^a	0.25±0.03 ^d	0.32±0.04 ^{cd}
	黄杞苷	17.41±0.26 ^b	4.19±0.10 ^d	6.72±0.14 ^c	21.64±0.15 ^a	17.28±0.24 ^b
二氢黄酮醇类	落新妇苷	90.50±2.91 ^b	39.81±0.68 ^d	62.42±0.39 ^c	99.33±4.60 ^a	92.49±1.71 ^b
	二氢山奈酚	0.33±0.01 ^b	0.30±0.01 ^b	0.40±0.02 ^a	0.26±0.01 ^c	0.32±0.02 ^b
	花旗松素	1.69±0.06 ^{cd}	2.10±0.06 ^a	1.81±0.25 ^{bc}	1.50±0.03 ^d	1.95±0.13 ^{ab}
	二氢杨梅素	9.66±0.27 ^a	7.52±0.34 ^b	6.39±0.12 ^c	6.69±0.10 ^c	9.46±0.73 ^a
黄酮类	柠檬黄素	1.99±0.07 ^a	1.96±0.12 ^a	1.69±0.07 ^b	2.03±0.14 ^a	1.96±0.11 ^a
	五羟黄酮	0.40±0.06 ^{bc}	0.40±0.03 ^{bc}	0.35±0.03 ^c	0.47±0.06 ^b	0.55±0.01 ^a
	棕矢车菊素	0.06±0.00 ^a	0.05±0.00 ^a	0.05±0.00 ^a	0.06±0.00 ^a	0.06±0.00 ^a
	木犀草苷	0.80±0.03 ^c	1.48±0.11 ^a	1.46±0.03 ^a	1.16±0.06 ^b	1.19±0.06 ^b
	樱花素	0.01±0.01 ^b	0.07±0.04 ^a	0.04±0.04 ^{ab}	0.01±0.01 ^b	0.02±0.01 ^b
	木犀草素	0.016±0.01 ^{bc}	0.017±0.01 ^b	0.023±0.01 ^a	0.013±0.01 ^c	0.017±0.01 ^{bc}
	烟花甙	31.30±0.65 ^b	34.43±0.30 ^a	28.05±0.36 ^c	26.39±0.67 ^d	33.85±1.41 ^a
	地奥司明	77.63±4.62 ^b	86.78±2.37 ^a	72.88±1.00 ^b	76.43±1.78 ^b	87.15±1.63 ^a
	芹菜素-7-葡萄糖苷	0.88±0.31 ^b	0.74±0.30 ^b	0.70±0.17 ^b	2.15±0.91 ^a	0.97±0.35 ^b
	水仙苷	62.82±0.83 ^{ab}	63.92±1.37 ^a	54.33±0.47 ^c	57.16±1.87 ^c	60.40±2.86 ^b
	苜蓿素	0.09±0.01 ^a	0.09±0.02 ^a	0.08±0.01 ^a	0.09±0.01 ^a	0.09±0.01 ^a
	川陈皮素	0.00027±0.00	/	/	/	0.00031±0.00
	羟基芑花素	0.01±0.00 ^c	/	/	0.02±0.00 ^b	0.03±0.00 ^a
	柑橘黄酮	0.00098±0.00	0.00016±0.00	/	/	/
	槲皮素-3-O-葡萄糖醛酸苷	735.54±20.54 ^a	504.07±7.19 ^c	562.03±14.44 ^b	748.31±6.52 ^a	757.73±7.43 ^a
黄酮醇类	槲皮苷	13.52±0.64 ^a	0.85±0.03 ^d	2.15±0.10 ^c	13.85±0.50 ^a	11.30±0.45 ^b
	银槲苷	0.034±0.01 ^a	/	/	0.027±0.01 ^a	0.026±0.01 ^a
	杨梅素	97.90±12.49 ^b	84.60±1.90 ^{bc}	74.25±2.31 ^c	91.23±9.64 ^b	131.40±4.33 ^a
	异鼠李素	0.14±0.02 ^a	0.12±0.01 ^{bc}	0.11±0.01 ^c	0.13±0.01 ^{ab}	0.14±0.01 ^a
	山柰黄酮醇	0.22±0.05 ^b	0.11±0.01 ^c	0.05±0.01 ^d	0.19±0.02 ^b	0.28±0.01 ^a
	西伯利亚落叶松黄酮	0.33±0.05 ^{bc}	0.28±0.01 ^{cd}	0.27±0.01 ^d	0.34±0.02 ^b	0.45±0.02 ^a
	杨梅苷	0.54±0.01 ^b	0.26±0.04 ^d	0.36±0.07 ^c	0.75±0.07 ^a	0.55±0.05 ^b
	白麻苷	5.42±0.12 ^a	4.88±0.08 ^b	2.99±0.11 ^c	5.05±0.33 ^b	5.03±0.10 ^b
	紫云英苷	59.38±0.24 ^a	6.51±0.62 ^c	8.54±0.60 ^c	53.84±2.05 ^b	53.13±3.65 ^b
	芦丁	195.81±2.68 ^a	166.69±0.94 ^c	135.02±4.74 ^d	189.67±2.54 ^b	187.02±2.21 ^b
	堪非醇-3-新橙皮糖苷	4.03±0.26 ^{ab}	3.73±0.31 ^{bc}	3.41±0.20 ^{cd}	3.01±0.42 ^d	4.42±0.21 ^a
	槲皮素	1.66±0.26 ^b	1.20±0.08 ^c	0.81±0.06 ^d	1.26±0.11 ^c	2.24±0.09 ^a
	异鼠李素-3-O-葡萄糖苷	80.44±2.91 ^b	20.11±1.38 ^d	21.14±1.12 ^d	71.43±1.33 ^c	88.43±2.18 ^a
	槲皮素-7-O-β-D-葡萄糖苷	6.55±0.20 ^a	3.06±0.24 ^c	2.94±0.27 ^c	5.41±0.21 ^b	6.62±0.34 ^a
	金丝桃苷	146.97±11.18 ^a	31.63±0.67 ^c	36.22±1.27 ^c	126.43±10.61 ^b	132.40±5.07 ^b
异黄酮类	阿福豆苷	0.29±0.01 ^a	0.01±0.00 ^d	0.02±0.01 ^d	0.27±0.01 ^b	0.21±0.02 ^c
	芒柄花苷	0.02±0.01 ^a	0.03±0.01 ^a	0.03±0.01 ^a	0.03±0.01 ^a	0.03±0.01 ^a
	黄豆黄苷	0.38±0.01 ^c	0.39±0.03 ^c	0.74±0.02 ^a	0.33±0.01 ^d	0.66±0.03 ^b
	染料木苷	0.58±0.02 ^{bc}	0.53±0.01 ^c	0.65±0.05 ^b	0.67±0.11 ^{ab}	0.78±0.06 ^a
酚酸类	女贞苷	0.07±0.01 ^a	0.04±0.01 ^b	0.04±0.01 ^b	0.06±0.01 ^a	0.06±0.01 ^a
呋山酮类	异芒果苷	0.02±0.00 ^b	0.01±0.00 ^c	0.03±0.00 ^a	0.02±0.00 ^c	0.03±0.00 ^a

的 UV-B 照射抑制其合成,但随着 UV-B 长时间照射其合成受阻,含量降低,T3 和 T4 处理分别比 CK 降低了 19.91%、21.66%。

UV-B 照射显著影响了葡萄果皮中的类黄酮代谢产物,相较于 CK,UV-B 照射明显上调的物质有没食子酸儿茶素、儿茶素没食子酸酯、表儿茶素、表焙儿茶素、儿茶素,明显下调的物质有柚皮素查尔酮、阿福豆素、二氢杨梅素、异鼠李素、黄酮醇类中的白麻苷、芦丁、金丝桃苷、阿福豆苷。随着 UV-B 照射

时长的增加,先显著下调后显著增加的物质是根皮甙、没食子儿茶素没食子酸酯、柚皮素 7-O-葡萄糖苷、槲皮素-3-O-葡萄糖醛酸苷、杨梅素、山柰黄酮醇、西伯利亚落叶松黄酮、槲皮素、异鼠李素-3-O-葡萄糖苷,其中根皮甙、没食子儿茶素没食子酸酯、柚皮素 7-O-葡萄糖苷、槲皮素-3-O-葡萄糖醛酸苷和异鼠李素-3-O-葡萄糖苷以 T1 处理含量最低,分别比 CK 降低了 8.69%、9.48%、23.53%、31.47%、75.00%;其中杨梅素、山柰黄酮醇、西伯利亚落叶松黄酮、槲

皮素以 T2 处理含量最低, 分别比 CK 降低了 24.16%、77.27%、18.18%、51.20%; 以上先显著下调后显著增加的 9 种物质均是 T4 处理含量最高, 分别比 CK 增加了 8.81%、4.16%、2.17%、84.60%、127.72%、0.23%、0.46%、2.21%、30.46%。

2.4.2 不同处理果皮类黄酮代谢产物主成分分析

不同处理果皮类黄酮代谢产物主成分分析结果如图 4 所示。由图 4 可知, 第一主成分(PC1)可以解释原始数据集的 41.53% 特征, 从第一主成分可以发现 UV-B 照射 2 h 和 4 h 与其他处理发生了分离, 而和 8 h 处理在第二主成分上与其他处理发生了分离, 该主成分解释原始数据集的 19.27% 的特征。

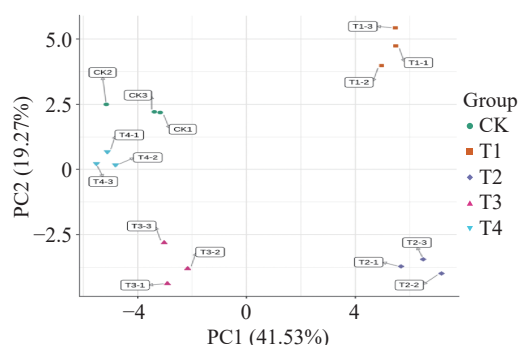


图 4 不同处理果皮黄酮代谢产物主成分分析

Fig.4 Principal component analysis of flavonoids metabolites in different treatments of pericarp

2.4.3 不同处理果皮类黄酮代谢产物的热图分析

不同处理果皮类黄酮代谢产物热图分析结果如图 5 所示。由图 5 可知, 不同处理中类黄酮代谢物不同处理的差异大于组内差异, 其中, UV-B 照射 8 h 的黄酮醇类代谢物含量平均最高, UV-B 照射 2 h 和

4 h 处理的平均低于 CK; 在黄烷醇、异黄酮、原花色素、酚酸和山口酮及部分二氢黄酮醇中, 随着 UV-B 照射时间的增长代谢物平均含量是先降低再增加, 以 UV-B 照射 8 h 的平均含量最高, 2 h 的最低; 在黄酮类中, 短时间的 UV-B 照射增加了其代谢含量, 随着照射时间的增加其代谢物平均含量逐渐降低, 但在 8 h 时黄酮类代谢物显著增加, 且平均含量高于 CK; 随着 UV-B 照射时间的增加, 黄烷醇类代谢物平均含量呈先增加后降低的趋势, UV-B 照射 6 h 平均含量最高。

2.4.4 不同处理差异代谢物 KEGG 分类 应用正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA), 获得多变量分析 OPLS-DA 模型的变量重要性投影(variable importance in projection, VIP), 采取差异倍数、P-value 值、OPLS-DA 模型的 VIP 值相结合的方法筛选出差异代谢物 13 个, 其中 5 种物质显著上调、8 种物质显著下调。将所有处理的差异代谢物匹配 KEGG 的数据库以获得代谢物参与的通路信息, 对差异显著代谢物 KEGG 的注释结果按照 KEGG 中通路类型进行分类, 结果如图 6 所示。由图 6 可知, 所有处理的差异代谢物主要注释和富集在异黄酮合成通路、黄酮和黄酮醇合成通路及的合成通路。在类黄酮和次生代谢产物合成通路上均富集了 7 个差异代谢物, 占代谢物总数的 77.78%。

2.5 果实品质综合分析

基于全部测定指标进行降维因子分析, 共提取 4 个主成分, 贡献率分别是 42.714%、25.335%、17.057%、14.894%, 累积贡献率为 100%, 即这 4 个主成分已经代表了处理的品质特性指标的全部信息, 因此选择提取 4 个主成分适宜。根据各指标因子的

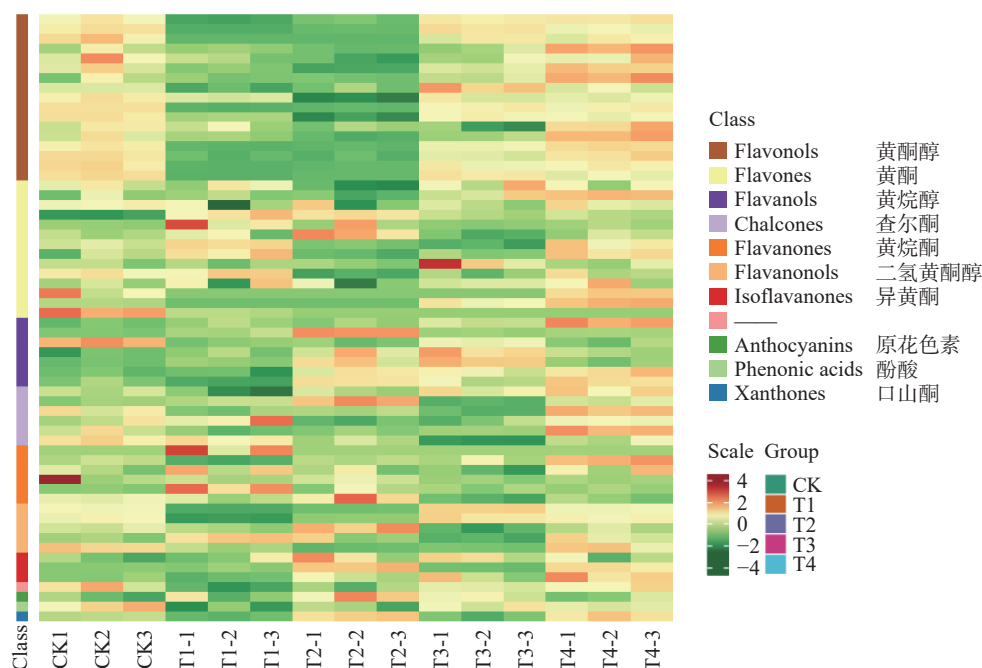


图 5 不同处理果皮黄酮代谢产物的热图

Fig.5 Heat maps of flavonoids metabolites in peel under different treatments

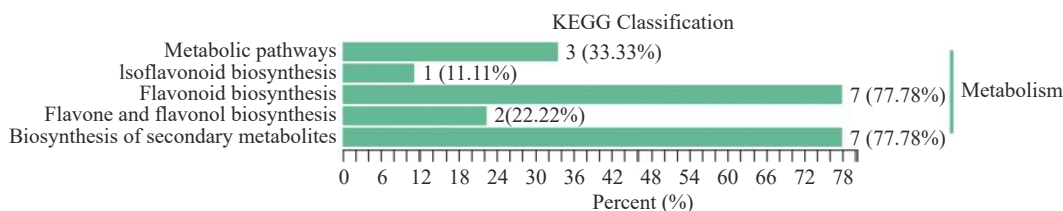


图6 所有处理的差异代谢物 KEGG 分类

Fig.6 KEGG classification of all treated differential metabolites

成分矩阵和 PC 初始特征值, 确定 PC 对应不同因子的权重, 建立得分模型, 再结合 PC 贡献率最终得到不同 UV-B 时长照射处理下果实品质的综合得分(表 2)。

表2 不同处理测定品质指标的主成分分析综合分值及排序

Table 2 Comprehensive score and ranking of principal component analysis for quality indexes determined by different treatments

处理	第1主成分 F1	第2主成分 F2	第3主成分 F3	第4主成分 F4	综合分值 F	综合 排序
CK	-2.23	-7.00	-3.82	0.33	-3.33	5
T1	8.27	3.00	-2.67	-2.83	3.42	1
T2	2.38	-3.03	6.35	-86	1.21	3
T3	-8.74	3.92	0.18	-2.78	-3.12	4
T4	0.32	3.11	-05	6.13	1.83	2

由表 2 可知, 不同 UV-B 照射时长处理的‘赤霞珠’果实综合品质表现为 T1(UV-B 照射 2 h)>T4(UV-B 照射 8 h)>T2(UV-B 照射 4 h)>T3(UV-B 照射 6 h)>CK(未做处理)。结果表明, 短时间的 UV-B 照射激发果实酚类物质的合成, 随着 UV-B 照射时间的增加, 对酿酒葡萄发育造成了胁迫, 有利于促进果实成熟及次生代谢物的合成和积累^[24]。

3 讨论

全球气候变暖导致世界优质酿酒葡萄栽培区发生空间位移, 可能导致高纬度区域变为更适宜葡萄生长和葡萄酒生产, 并对酒种和品种布局也产生较大影响。UV-B 辐射同其他胁迫一样可以刺激植物对环境改变做出响应, 从而激发一系列对自身有益的调节反馈机制, 使植物在一定条件下逐渐适应胁迫环境^[25]。在葡萄中, 黄酮类物质的含量通常被作为植株对 UV-B 辐射耐受性的衡量标准^[26-27]。研究指出, 长时间、高强度 UV-B 辐射致使叶绿体结构被破坏, 以致光合速率下降, 光合产物积累减少, 还原糖含量降低, 从而合成酚类前体物质减少, 最后直接影响植物酚类化合物的积累^[28]。本试验中, 在果实成熟末期, 短时间的 UV-B 照射会增加果实中可溶性糖含量, 当 UV-B 每天照射超过 4 h 后, 果实中的可溶性总糖含量开始下降。在本研究中, 除 UV-B 照射开始处理后的 25 d, 均是随着果实成熟, UV-B 不同照射时长处理的总酚、单宁、总类黄酮、黄烷-3-醇和总花色苷含量均增加, 在成熟末期时, 以 2 h 果实中的总酚、单宁、总类黄酮、黄烷-3-醇和总花色苷含量最

高, 分别比 CK 增加了 17.08%、10.90%、25.68%、39.58%、7.93%, 印证了上述前人研究结果。

近几年研究发现 UV-B 辐射增强对类黄酮化合物合成有显著影响^[29-30], UV-B 辐射的持续时间直接影响了植物的生理反应程度。类黄酮在 UV-B 条件下的积累与苯丙素的生物合成途径有关^[31-32], 植物通过增加 PAL 活性, 诱导类黄酮等紫外吸收物质合成, 以抵御 UV-B 辐射对植物的伤害^[3]。植物对 UV-B 的响应程度取决于其胁迫强度, 本研究中, UV-B 不同照射时长显著影响了葡萄果皮中的类黄酮代谢产物, 通过 UV-B 照射显著上调的物质有没食子酸儿茶素、儿茶素没食子酸酯、表儿茶素、表儿茶素、儿茶素, 显著下调的物质有柚皮素查尔酮、阿福豆素、二氢杨梅素、异鼠李素、黄酮醇类中的白麻苷、芦丁、金丝桃苷、阿福豆苷。本试验结果得出, 在类黄酮和次生代谢产物合成通路上均富集了 7 个差异代谢物, 占代谢物总数的 77.78%。UV-B 照射酿酒葡萄‘赤霞珠’2 h 时, 果实综合品质表现最佳。研究指出^[33], UV-B 辐射增强对酚类合成作用表现为低强度促进、高强度抑制, 本试验研究结果是每天进行短时间 UV-B 照射显著提高果实品质, 促进类黄酮积累, 果实综合品质随着 UV-B 照射时间的增加表现出先降低后提高。

类黄酮合成基因受 UV-B 辐射诱导, 在植物细胞壁、液泡、叶绿体、腺体等一些特殊部位积累^[3]。UV-B 通过 U-VR8 光感受器, 介导 UV-B 诱导的光形态建成, 介导一系列重要的 UV 防御基因的表达^[31]。在高通量下, UV-B 辐射产生活性氧(reactive oxygen species, ROS)氧化脂质和蛋白质, 对生物膜、DNA 造成损伤^[34]。本试验中, 仅研究了果皮类黄酮类代谢物质对不同 UV-B 照射时长的响应结果, 未从调控基因表达上解析其影响机制, 今后将在贺兰山东麓产区继续开展增加 UV-B 照射对类黄酮相关基因合成表达的研究, 以探究促进葡萄抵抗非生物胁迫的次级代谢物质的合成机制, 为应对紫外辐射增强引起的酿酒葡萄品质变化有一定的理论支撑。

4 结论

增加 UV-B 照射会提升‘赤霞珠’酿酒葡萄综合品质, 且以短时间的 UV-B 照射其果皮酚类物质积累为最优, 随着照射时间的增加果皮酚类物质积累受阻。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] HASELGROVE L, BOTTING D, HEESWIJCK R, et al. Canopy microclimate and berry composition: the effect of bunch exposure on the phenolic composition of *Vitis vinifera* L. cv. Shiraz grape berries[J]. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 2000, 6(2): 141–149.
- [2] RESHEF N, WALBAUM N, AGAM N. Sunlight modulates fruit metabolic profile and shapes the spatial pattern of compound accumulation within the grape cluster[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 70.
- [3] 周应娜, 李想, 盛建军, 等. 植物酚类化合物对 UV-B 辐射增强的响应[J]. *植物生理学报*, 2020, 56(6): 1155–1164. [ZHOU Y Y, LI X, SHENG J J, et al. Response of plant phenolic compounds to enhanced UV-B radiation[J]. *Plant Physiology Journal*, 2020, 56(6): 1155–1164.]
- [4] SEKOWSKI S, TEREBKA M, VEIKO A, et al. Epigallocatechin gallate (EGCG) activity against UV light-induced photo damages in erythrocytes and serum albumin-Theoretical and experimental studies[J]. *J Photochem Photobiol B*, 2018, 356: 379–388.
- [5] 王璐. *GbHY5* 转录因子响应 UV-B 调控银杏类黄酮合成的分子机制[D]. 扬州: 扬州大学, 2022. [WANG L. Molecular mechanism of *GbHY5* transcription factor regulating flavonoid synthesis in *Ginkgo biloba* in response to UV-B[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.]
- [6] YANNARELLI G G, NORIEGA G O, BATLLE A, et al. Heme oxygenase up-regulation in ultraviolet-B irradiated soybean plants involves reactive oxygen species[J]. *Planta*, 2006, 224(5): 1154–1162.
- [7] 贺军民, 余小平, 王瑞斌, 等. UV-B 辐射增强对 NaCl 胁迫下小麦幼苗生理生态的影响[J]. *西北植物学报*, 2004, 10: 1810–1815. [HE J M, SHE X P, WANG R B, et al. Physiological and ecological effects of enhanced UV-B radiation on wheat seedling under NaCl stress condition[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, 10: 1810–1815.]
- [8] 杨乐, 杨俊枫, 侯智霞, 等. 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[J]. *西北植物学报*, 2015, 35(12): 2477–2482. [YANG L, YANG J F, HOU Z X, et al. Effects of UV-B treatment on the major quality of blueberry and related enzyme activities in different developmental stages[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, 35(12): 2477–2482.]
- [9] 李昌亨, 贾杨超, 张伟, 等. 采后 UV-B 对葡萄果实中多酚及 PAL 活性的影响[J]. *中国园艺文摘*, 2014, 5: 10–12. [LI C H, JIA Y C, ZHANG W, et al. Effects of UV-B radiation on the content of polyphenols and the activity of PAL in the postharvest berries of grapevine cv. Cabernet Sauvignon[J]. *Chinese Horticulture Abstracts*, 2014, 5: 10–12.]
- [10] 盛建军, 李想, 何永美, 等. UV-B 辐射对花青素合成代谢的影响及分子机理[J]. *植物生理学报*, 2019, 55(7): 949–958. [SHENG J J, LI X, HE Y M, et al. Effect of UV-B radiation on anthocyanin anabolism and its molecular mechanism[J]. *Plant Physiology Journal* 2019, 55(7): 949–958.]
- [11] 马宗恒. 光照强度对葡萄果实品质及花青苷合成的调控机理研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019. [MA Z H. Regulation mechanism of light intensity on fruit quality and anthocyanin synthesis in grape (*V. vinifera* L.) berry[J]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019.]
- [12] 李晨, 刘建廷, 樊永信, 等. UV-B 对设施桃叶片光合功能及叶绿体超微结构的影响[J]. *植物学报*, 2022, 57(4): 434–443. [LI C, LIU J T, FAN Y X, et al. Effects of UV-B on photosynthetic function and chloroplast ultrastructure of peach leaves grown in greenhouse[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2022, 57(4): 434–443.]
- [13] 张艺, 于存浩, 马晓红, 等. UV-B 处理对大豆异黄酮合成影响及 *GmUVR8* 基因克隆与表达分析[J]. *大豆科学*, 2022, 41(1): 28–35. [ZHANG Y, YU C H, MA X H, et al. Analysis of isoflavone synthesis influenced by UV-B treatment and cloning of *GmUVR8* gene in soybean[J]. *Soybean Science*, 2022, 41(1): 28–35.]
- [14] 卢素文, 郑暄昂, 王佳洋, 等. 葡萄类黄酮代谢研究进展[J]. *园艺学报*, 2021, 48(12): 2506–2524. [LU S W, ZHENG X A, WANG J Y, et al. Research progress on the metabolism of flavonoids in grape[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2021, 48(12): 2506–2524.]
- [15] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 145–163. [GAO J F. Experimental techniques in plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 145–163.]
- [16] JAYAPRASHA G K, SINGH R, SAKARIAH K. Antioxidant activity of grape seed (*Vitis vinifera*) extracts on peroxidation models *in vitro*[J]. *Food Chemistry*, 2001, 73(3): 285–290.
- [17] 王华. 葡萄与葡萄酒实验技术操作规范[M]. 西安: 西安地图出版社, 1999. [WANG H. Grape and wine experimental technical practice code[M]. Xi'an: Xi'an Map Publishing House, 1999.]
- [18] LIU Y X, PAN Q H, YAN G L, et al. Changes of flavan-3-ols with different degrees of polymerization in seeds of 'Shiraz', 'Cabernet Sauvignon' and 'Marselan' grapes after veraison[J]. *Molecules*, 2010, 15(11): 7763–7774.
- [19] PEINADO J, LERMA N L, MORENO J, et al. Antioxidant activity of different phenolics fractions isolated in must from Pedro Ximenez grapes at different stages of the off-vine drying process[J]. *Food Chemistry*, 2009, 114(3): 1050–1055.
- [20] LI Y G, TANNER G, LARKIN P. The DMACA-HCl protocol and the threshold proanthocyanidin content for bloat safely in forage legumes[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1996, 70(1): 89–101.
- [21] WANG X, ZHANG X C, HOU H X, et al. Metabolomics and gene expression analysis reveal the accumulation patterns of phenylpropanoids and flavonoids in different colored-grain wheats (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Food Research International*, 2020, 138: 109711.
- [22] DONG R F, SU J, NIAN H, et al. Chemical fingerprint and quantitative analysis of flavonoids for quality control of sea buckthorn leaves by HPLC and UHPLC-ESI-OTOF-MS[J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 37: 513–522.
- [23] LI X Y, SONG H, YAO S, et al. Quantitative analysis and recovery optimisation of flavonoids and anthocyanins in sugar-making process of sugarcane industry[J]. *Food Chemistry*, 2011, 125(1): 150–157.
- [24] 唐天睿. UV-B 辐射增强对特早熟柑橘果实品质变化及色素积累影响[D]. 昆明: 云南农业大学, 2022. [TANG T R. Effects of enhanced UV-B radiation on fruit quality and pigment accumulation of early maturing citrus[J]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2022.]
- [25] 刘一诺, 敖曼, 李波, 等. UV-B 辐射对植物生长发育的影响

- 及其应用价值[J]. *土壤与作物*, 2020, 9(2): 191–202. [LIU Yinuo, AO Man, LI Bo, et al. Effect of ultraviolet-B(UV-B) radiation on plant growth and development and its application value[J]. *Soils and Crops*, 2020, 9(2): 191–202.]
- [26] 杨博涵, 欧阳亚南, 闵卓, 等. UV-B 辐射对葡萄叶片中酚类物质含量及显微结构的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(5): 59–66. [YANG B H, OUYANG Y N, MIN Z, et al. Effects of UV-B radiation on contents of phenols and sub-cellular structure of grape leaves[J]. *Journal of Northwest A& F University*, 2019, 47(5): 59–66.]
- [27] MARGARITA C, AVELINAFERNADEZ G, PETER B, et al. Extraction of anthocyanins from grape skins assisted by high hydrostatic pressure[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 90(4): 415–421.
- [28] ÁLVAREZ G F, KORBEE N, FIGUEROA F L. Effects of UV radiation on photosynthesis, antioxidant capacity and the accumulation of bioactive compounds in *Gracilaria longissima*, *Hydropuntia cornea* and *Halopithys incurva* (Rhodophyta)[J]. *J Phycol*, 2019, 55(6): 1258–1273.
- [29] NEUGART S, TOBLER M, BARNES P W. Different irradiances of UV and PAR in the same ratios alter the flavonoid profiles of *Arabidopsis thaliana* wild types and UV-signalling pathway mutants[J]. *Photochem Photobiol Sci*, 2019, 18(7): 1685–1699.
- [30] JI H, TANG W, ZHOU X, et al. Combined effects of blue and ultraviolet lights on the accumulation of flavonoids in tartary buckwheat sprouts[J]. *Pol J Food Nutr Sci*, 2016, 66(2): 93–98.
- [31] 刘佳钰, 王蓉, 张弛, 等. UV-B 辐射与植物次级代谢产物变化的研究进展[J]. *基因组学与应用生物学*, 2017, 36(8): 3157–3166. [LIU J Y, WANG R, ZHANG C, et al. Research progress on the influence of UV-B radiation on changes of secondary metabolites in plant[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2017, 36(8): 3157–3166.]
- [32] LI Y Y, MAO K, ZHAO C, et al. *MdCOP1* ubiquitin E3 ligases interact with *MdMYB1* to regulate light-induced anthocyanin biosynthesis and red fruit coloration in apple[J]. *Plant Physiol*, 2012, 160(2): 1011–1022.
- [33] 周应娜, 李想, 凌成婷, 等. UV-B 辐射对元阳红米籽粒酚类含量及其抗氧化能力的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(1): 10–18. [ZHOU Y Y, LI X, LING C T, et al. Effects of UV-B radiation on phenolic content and antioxidant capacity of Yuanyang red rice seeds[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(1): 10–18.]
- [34] 张琳, 王修蘋, 李祖然, 等. 植物响应 UV-B 辐射的表观遗传调控和胁迫记忆研究进展[J]. *植物生理学报*, 2023, 59(7): 1195–1210. [ZHANG L, WANG X P, LI Z R, et al. Research progress on the epigenetic regulation and stress memory of plant to UV-B radiation responses[J]. *Plant Physiology Journal*, 2023, 59(7): 1195–1210.]