



外源褪黑素处理对‘阳光玫瑰’葡萄果实品质的影响

贾润普¹, 王玥¹, 李勃², 李莹男¹, 姚玉新^{1,*}

¹山东农业大学园艺科学与工程学院/作物生物学国家重点实验室山东省果蔬优质高效生产协同创新中心, 山东泰安271018

²山东省葡萄研究院, 济南250100

*通信作者(yaoyx@sdau.edu.cn)

摘要: 以‘阳光玫瑰’葡萄(*Vitis vinifera*)为试材, 研究了不同处理方式(浸果和根施)和不同浓度(5和50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)外源褪黑素处理对葡萄果实品质的影响。结果表明: 与对照组(浸果、根施水处理)相比, 褪黑素浸果和根施均显著增加了果实褪黑素含量, 同一处理方式下50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理效果优于5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 根施褪黑素显著提高了葡萄百粒重、果实中葡萄糖和果糖含量, 5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 根施褪黑素显著降低了苹果酸和酒石酸含量。浸果(50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)和根施(5和50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)大幅度提高了果实香气总量, 增幅在3倍以上, 这主要归因于醛类和醇类物质的增加; 同时显著提高了反式-2-己烯醛、己醛、壬醛、反式-2-己烯醇等特征香气物质含量。4种处理显著提高了果皮硬度和韧性, 处理间差异不显著。主成分分析表明, 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 根施褪黑素处理对葡萄果实品质影响最大, 其次是根施5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素处理。

关键词: 葡萄; 褪黑素; 果实品质; 主成分分析

Effects of exogenous melatonin treatment on quality of ‘Shine Muscat’ grape berries

JIA Runpu¹, WANG Yue¹, LI Bo², LI Yingnan¹, YAO Yuxin^{1,*}

¹College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology, Collaborative Innovation Center of Fruit & Vegetable Quality and Efficient Production of Shandong Province, Taian, Shandong 271018, China

²Shandong Academy of Grape, Jinan 250100, China

*Corresponding author (yaoyx@sdau.edu.cn)

Abstract: ‘Shine Muscat’ grape (*Vitis vinifera*) was used to investigate the influences of 5 and 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ melatonin treatment via soaking berries or watering roots on berry quality. The results showed that compared with the control (pretreated with water via soaking berries or watering roots, both melatonin treatments via soaking and watering increased the endogenous melatonin content in grape berries, and 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ melatonin was more effective than 5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ melatonin at the same treatment manner. Watering roots with 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ melatonin significantly increased the weight per 100 berries, glucose and fructose content, and watering roots with 5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ melatonin significantly decreased contents of malic acid and tartaric acids. Soaking berries with 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ melatonin and watering roots with 5 and 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ melatonin led to more than 3 folds increase in the total content of berry aroma, which was mainly attributed to

收稿 2021-11-19 修定 2022-05-14

资助 国家重点研发计划(2018YFD1000200)、山东省农业良种工程项目(2020LZGC008)和山东省果品产业技术体系(SDAIT-06-03)。

the increase in aldehydes and alcohols; additionally, the contents of characteristic aromas in grapes, such as (E)-2-hexenal, hexanal, nonanal and (E)-2-hexenol, were increased significantly by the above treatments. All of the treatments increased pericarp hardness and toughness, compared to the control, however there was not significant difference between different treatments. The principal component analysis showed that $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ melatonin treatment via watering roots imparted the largest effects on berry quality, followed by $5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ melatonin treatment via watering roots.

Key words: grape (*Vitis vinifera*); melatonin; fruit quality; principal component analysis

褪黑素(melatonin, MT)化学名称为N-乙酰基-5-甲氧基色胺(*N*-acetyl-5-methoxytryptamine), 存在于苹果、樱桃、番茄等多种园艺作物果实中(巩彪和史庆华2017)。褪黑素作为自由基清除剂和抗氧化剂, 保护人、动物和植物在内的有机体免受外在环境威胁以及内在氧化胁迫(Poeggeler等1993; Reiter等2013)。在果树上, 褪黑素可减缓苹果叶片中叶绿素降解速度, 增加叶片抗氧化能力, 从而延缓叶片衰老(Wang等2012); 褪黑素还可通过激活抗氧化能力和增强类黄酮生物合成来延迟猕猴桃叶片衰老(Liang等2018)。

Hernández-Ruiz等(2004)首次研究发现褪黑素具有植物生长调节剂的作用。作为生长调节剂, 褪黑素在提升果实鲜食和储藏品质, 调控果实成熟方面均有效果(Arno和Hernández-Ruiz 2015)。在番茄上, 褪黑素灌根处理能显著提高可溶性固形物、抗坏血酸、番茄红素、柠檬酸等物质的含量(Sun等2016)。杜天浩等(2016)发现褪黑素处理后显著提高了番茄果实中维生素C、胡萝卜素含量, 降低果实中有机酸和硝酸盐含量, 能够提高果实风味, 改善果实品质。褪黑素能够增加梨单果重量, 提升果实中蔗糖、可溶性固形物、山梨醇等物质的含量(Liu等2019a; 刘建龙2019)。Xu等(2017)发现褪黑素处理可以通过乙烯信号调节葡萄果实的多酚含量和抗氧化能力。

葡萄在我国有悠久的栽培历史, 截至2016年, 葡萄在我国的种植面积80.96万 hm^2 , 居世界第二位; 产量高达1 374.5万t, 自2010年后一直居世界首位。鲜食葡萄占我国葡萄产量的80%左右(穆维松等2019)。“阳光玫瑰”为玫瑰香型葡萄, 果肉硬耐贮运, 鲜食品质佳, 随着居民收入水平的提升和消费升级, “阳光玫瑰”的市场需求量不断上升, 栽培面积也在

快速增加, 已逐步成为我国的主栽鲜食葡萄品种之一(陈晶和和史树仁2021; 李小红等2021)。由于贮藏运输以及成本利润等问题导致果实成熟不充分、肥水不到位, 葡萄果实存在糖分、香气物质等积累不足的问题, 影响了果实的品质和口感。本研究旨在研究根施和浸果2种方式下2种浓度(5和 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)褪黑素处理对“阳光玫瑰”葡萄果实品质的影响, 一方面探索褪黑素调控葡萄果实品质的作用, 另一方面探寻提高“阳光玫瑰”果实综合品质的新方法。

1 材料与方法

1.1 材料与处理

本实验选取五年生欧美种鲜食葡萄(*Vitis vinifera* L.) “阳光玫瑰”为试材, 于2019年7—9月山东省泰安市祝阳镇中青葡萄园($36^{\circ}17'36.90''\text{N}$, $117^{\circ}22'15.51''\text{E}$)进行。行距2 m, 株距1 m, 平棚架“H”型整形, 避雨栽培。选取长势一致的葡萄植株进行5和 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素浸果处理(J5和J50)、5和 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素根施处理(G5和G50), 对照为浸果0.05%的表面活性剂和根施水处理(J0和G0)。每个处理设置3组生物学重复, 每组重复包含10棵葡萄, 约100穗果。

浸果处理: 将葡萄果袋摘下, 将整穗葡萄果实浸泡于含有表面活性剂(Triton X-100, 0.05%)的褪黑素溶液中, 浸泡时间约30 s, 待果面干燥后套回果袋。根施处理: 于植株基部左右30 cm处开沟, 深40 cm, 将20 L褪黑素溶液浇至沟内。浸果处理对照为0.05%的表面活性剂, 根施处理对照为水。其余植株栽培管理方式保持一致, 处理时间为2019年7月3日, 果实处于转色期。

取样时间为2019年9月3日, 果实进入成熟期,

刨除因受病害影响等原因发育不良的果实, 每组重复取样60穗果, -40°C 保存。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 可溶性固形物(total soluble solids, TSS)和可滴定酸的测定

取葡萄果实, 研磨过滤, 取滤液测定糖酸含量。用数显糖度计(上海精密科学仪器有限公司, WZB45)测定TSS, 重复3次; 参照国家标准《食品中总酸的测定》(GB/T 12456—2008)测定可滴定酸含量, 样品滤液用 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH溶液滴定至pH 8.10, 重复3次。

1.2.2 百粒重的测定

采用以百分之一精度的电子天平(上海舜宇恒平科学仪器有限公司, FB224)测量果实的百粒重。将果穗上果粒用剪刀剪下, 随机选择100粒, 测百粒重, 重复3次。

1.2.3 果实质地指标的测定

使用质构仪(Stable Micro Systems, TA.XT plus, UK)测定果实质地, 采用P/2n ($d=2\text{ mm}$)针状探头, 测前速度为 $2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 贯入速度 $1\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 脱离速度 $10\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 穿刺深度 7 mm , 最小感知力 5 g 。每份样品随机取50粒新鲜果实, 进行整果穿刺实验, 选择果实侧部中心为穿刺点, 根据果实成熟度和硬度调节下降距离为 $7.0\sim 8.5\text{ mm}$, 避开种核(金仲鑫2017)。感应力值的最高值代表果皮硬度, 破皮前力值的上升斜率为果实脆度, 破皮前力值的积分面积为果实韧性, 破皮之后的平均力值为果肉硬度。用质构仪自带软件Texture Exponent 32自动完成数据分析与计算。

1.2.4 可溶性糖、有机酸组分及含量的测定

有机糖和有机酸的提取方法参照Keutgen和Pawelzik (2007)文献, 取 1.0 g 葡萄果肉, 定容于 10 mL 的离心管中, 40°C 水浴 30 min , 然后 $16\ 000\times g$ 离心 15 min , 取上清用 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 微孔滤膜进行过滤, 根据果实成熟度进行2~10倍稀释, 超声波振荡 5 min 消除气泡, 消泡后的稀释液用毛细管电泳系统(BeckmanP/ACE, USA)进行分析。

毛细管电泳(Beckman)检测有机酸的电泳分离条件: 未涂层的石英毛细管 80 cm (有效长度 70 cm) $\times 75\text{ }\mu\text{m.i.D.}$, 分离电压 -9 kV , 检测波长 200 nm , 缓冲液为 $700\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硼酸、 $90\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷酸钠(pH=

7.5)和 $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 十六烷基三甲基溴化铵(hexadecyl trimethyl ammonium Bromide, CTAB), 进样压力 0.5 Psi , 进样时间 18 s , 直接检测。

毛细管电泳(Beckman)检测糖的电泳分离条件: 未涂层的石英毛细管 $20\text{ cm}\times 75\text{ }\mu\text{m.i.D.}$, 分离电压 -8 kV , 检测波长 254 nm , 缓冲液为 $4\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 山梨酸钾、 $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷酸钠、 $30\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氢氧化钠和 $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ CTAB, 进样压力 0.5 Psi , 进样时间 3 s , 间接检测。

1.2.5 果实香气组分及含量的测定

取 20 g 去籽葡萄样品粉末(液氮冷冻, -80°C 冰箱保存), 转移至 50 mL 三角瓶中, 加入 0.5 g NaCl粉末、 0.5 g 交联聚乙烯吡咯烷酮(crosslinked polyvinylpyrrolidone, PVPP)、 0.5 g D-葡萄糖酸内酯、 $3\text{ }\mu\text{L}$ 浓度为 $0.822\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 2-辛醇内标和磁力转子, 迅速用锡箔纸密封好。采用气相色谱-质谱联用仪(日本岛津公司, GC-MSQP2010Plus; 手动SPME进样器, 固相微萃取装置)测定香气组分及含量, 将完成活化或热解析过的萃取头(supelco, $50/30\text{ }\mu\text{m}$ DVB/CAR/PDMS, USA)插入样品瓶, 在 40°C 、 200 rpm 加热搅拌条件下, 吸附 40 min , 取出萃取头插入气相色谱进样口, 250°C 热解析 5 min 。

GC-MS分析条件: 所用色谱柱为Rtx-5MS ($60\text{ m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.25\text{ }\mu\text{m}$)毛细管柱; 载气为高纯氦气, 流速为 $1.27\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。固相微萃取手动进样, 采用不分流模式。进样口温度 250°C 。柱温升温程序: 初始 40°C , 保持 2 min , 以每分钟 5°C 的速度升温到 230°C , 保持 5 min 。质谱接口温度 250°C , 离子源温度 230°C , 电离方式EI, 电子能量 70 eV , 全扫描模式, 扫描范围: $30\sim 450\text{ U}$ 。

利用质谱全离子扫描(Scan)的图谱, 结合NIST17和WILEY7比对结果及相关文献的参考对香气物质进行定性; 采用面积归一化法定量, 取3次重复平均值作为香气物质的相对含量(刘孟龙等2021)。

1.2.6 褪黑素含量的测定

果实样品液氮速冻后, 置于冷冻干燥机(北京博医康试验仪器有限公司, FD-1A-50)冷冻干燥 48 h , 在液氮冷却下磨成冻干粉, 加甲醇提取 24 h , 4°C 、 $16\ 000\times g$ 离心 15 min , 收集上清液并用 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 有机滤膜进行过滤。用氮吹仪(杭州米欧仪器有限公司,

WT-12A)浓缩(不超过40℃, 避光)。经C18固相萃取柱(Agilent, 20 pcs, USA)萃取, 收集。采用三重四极杆高效液相色谱-质谱联用仪(DIONEX, Ulti-Mate 3000; Thermo, TSQ Quantum Access max, USA)检测。

MT检测参数: 激发波长 λ_{ex} =288 nm, 发射波长 λ_{em} =333 nm; 流动相: 乙腈:水=25%:75%; 流速: 0.5 mL·min⁻¹; 柱温: 22℃; 上样量: 10 μ L (Erland等2016)。

1.3 主成分分析方法

主成分分析及综合得分评价方法参考荆瑞勇等(2020)和高琦等(2018)文献。根据主成分特征向量和方差贡献率得出葡萄果实品质综合评价模型。

主成分因子得分计算公式如下:

$$F_1=0.314X_1+0.273X_2+0.338X_3+0.34X_4+0.338X_5+0.333X_6-0.197X_7-0.013X_8+0.04X_9+0.071X_{10}+0.268X_{11}+0.147X_{12}+0.049X_{13}+0.189X_{14}-0.105X_{15}$$

$$F_2=0.18X_1+0.308X_2+0.056X_3+0.058X_4+0.068X_5+0.057X_6+0.01X_7+0.523X_8+0.53X_9+0.425X_{10}+0.205X_{11}+0.401X_{12}+0.122X_{13}+0.414X_{14}-0.081X_{15}$$

$$F_3=0.047X_1-0.114X_2-0.065X_3-0.016X_4-0.055X_5-0.014X_6+0.334X_7+0.031X_8+0.061X_9-0.138X_{10}-0.22X_{11}+0.286X_{12}+0.505X_{13}+0.072X_{14}+0.482X_{15}$$

其中, F_1 、 F_2 、 F_3 表示PC1、PC2、PC3的主成分因子得分, $X_1 \sim X_{15}$ 表示15个葡萄果实品质指标, 与 $X_1 \sim X_{15}$ 作积的数值为该品质指标在该主成分因子上的特征向量。

以各主成分的方差贡献率为权重, 构建不同外源褪黑素处理下葡萄果实品质指标的综合评价得分函数, 公式如下:

$$F=56.676F_1+22.138F_2+12.907F_3$$

其中, F 表示不同外源褪黑素处理下葡萄果实品质指标的综合评价得分, 与 F_{1-3} 作积的数值为该主成分因子的方差贡献率。

1.4 数据分析

应用SPSS 23.0、Microsoft Excel 2010和Origin 2018软件进行数据统计、柱状图、箱式图制作; 采用SPSS 23.0软件进行方差、主成分分析, 得出主成分特征值及特征向量; 采用邓肯氏新复极差法进行显著性差异分析($P<0.05$)。

2 实验结果

2.1 外源褪黑素处理对葡萄果实褪黑素含量的影响

由图1可知, 外源褪黑素处理大都显著提高了葡萄果实中褪黑素含量, 且根施处理效果要优于浸果处理。与对照J0相比, J5和J50处理的果实内源褪黑素含量提高了38.33%和74.26%; 与G0相比, G5和G50处理的果实内源褪黑素含量提高了45.01%和86.75%。在同一处理方式下, 高浓度的褪黑素处理产生了更好的效果。总的来看, G50处理对果实内源褪黑素含量的提高作用最大。

2.2 外源褪黑素处理对葡萄果实重量的影响

由图2可知, 与对照J0相比, J5和J50处理提高了百粒重, 但未达到显著水平。与对照G0相比, G5处理对百粒重未产生显著影响, G50显著提高了百

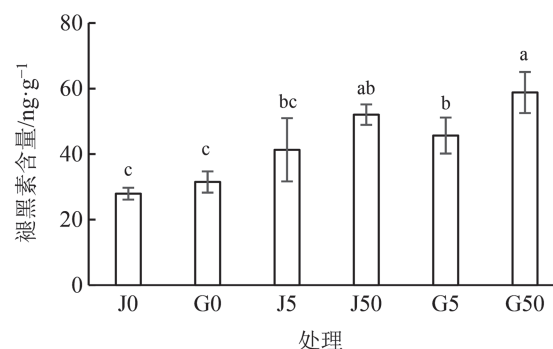


图1 外源褪黑素处理下葡萄果实内源褪黑素的含量
Fig. 1 Endogenous melatonin content in grape fruits treated with exogenous melatonin

小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$), 下同。

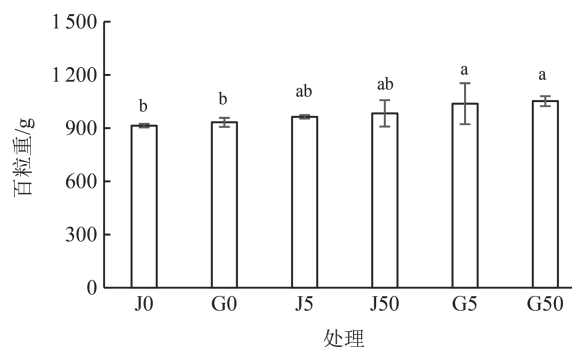


图2 外源褪黑素处理对葡萄果实重量的影响
Fig. 2 Effects of melatonin treatment on weight of grape berries

粒重。同一处理方式下处理浓度越高,提升效果越明显;就不同处理方式而言,同浓度根施对百粒重的影响优于浸果。

2.3 外源褪黑素处理对葡萄果实糖酸含量的影响

4种处理下, J50和G50处理显著提高了葡萄糖含量,增幅为25.59%和43.7%,且G50处理显著提高了果糖含量,增幅达52.72%。同浓度处理下,根施

和浸果处理对果实糖含量的影响无显著差异(图3-A)。就酸组分而言,4种处理对3种有机酸产生了不同影响。与对照相比,除G5和G50处理显著提高了柠檬酸含量外,根施和浸果处理均不同程度降低了有机酸含量,以G5处理效果最为显著,使苹果酸含量下降33.48%,使酒石酸含量下降22.70%。同浓度处理下,根施和浸果对有机酸含量的影响无

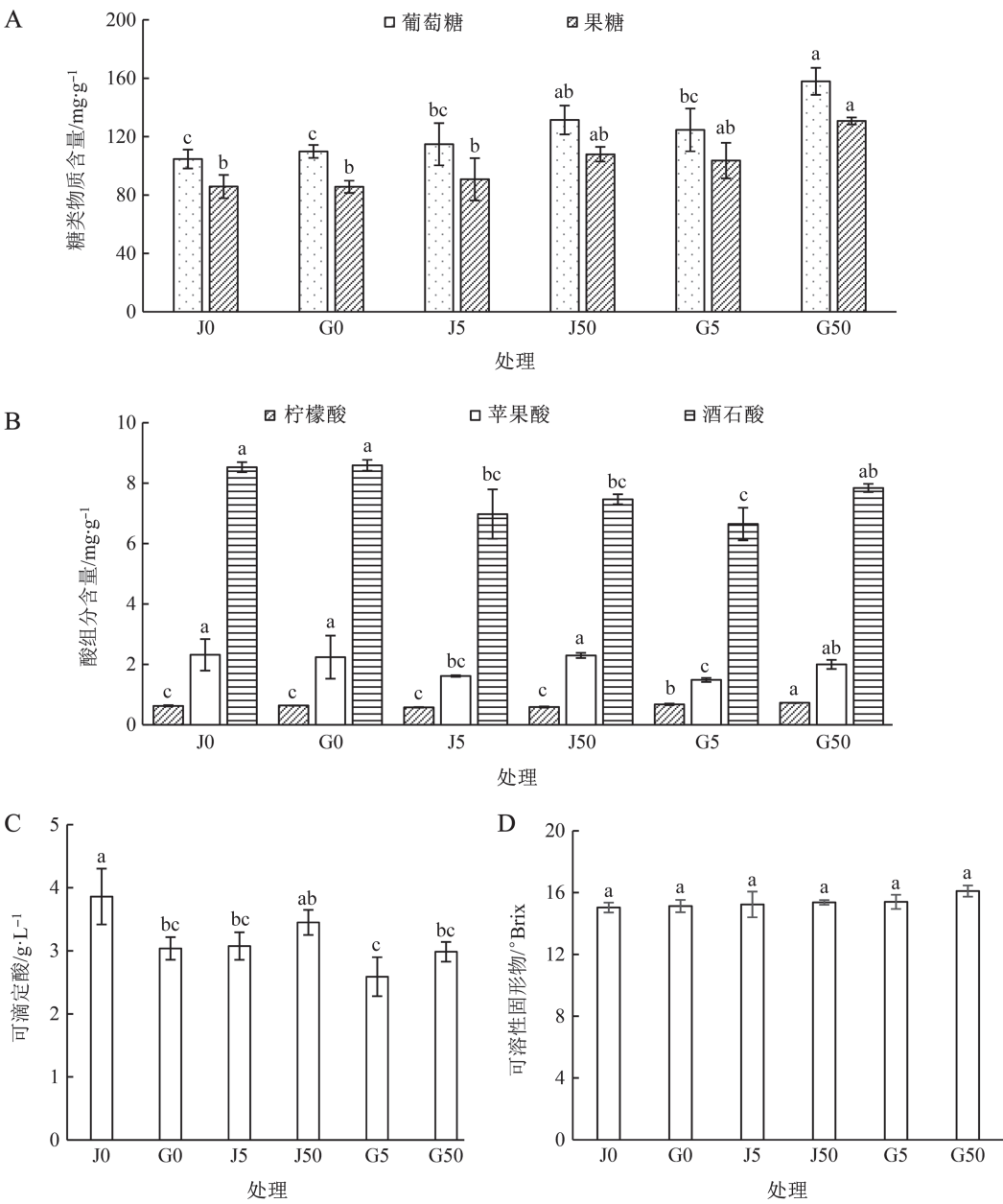


图3 外源褪黑素处理下葡萄果实糖酸组分含量变化

Fig. 3 Changes in content of sugar and acid components in grape fruits treated by exogenous melatonin

显著差异(图3-B)。

与对照J0相比, J5、J50处理显著降低了可滴定酸的含量; 与对照G0相比, G5、G50处理对可滴定酸含量无显著影响(图3-C)。与对照J0和G0相比, 4种处理均提高了TSS含量, G50处理效果最好, 但均未达到显著性差异水平(图3-D)。

2.4 外源褪黑素处理对果实香气物质含量的影响

根据官能团不同, 将香气物质分为醛类、醇类、萜烯类、酯类和酚类, 醛类和醇类为‘阳光玫瑰’的主要香气类型。由表1可见, 与对照J0相比, J50处理大幅提高了香气物质总含量, 为对照的4倍, 主要归因于醛类和醇类物质的增加; J5处理对香气物质总含量无显著影响, 但大幅提高了醇类物质含量, 为对照的3.3倍。G5和G50处理均大幅提高了香气物质总含量, 为对照G0的3.1和3.2倍, 主要归因于醛、醇类物质的大幅增加。同浓度处理下, 根施效果优于浸果, 其中与J5处理相比, G5总含量差异达到显著水平, 为3.6倍。

就‘阳光玫瑰’特征香气(满坤2020)而言(表1), 反式-2-己烯醛是‘阳光玫瑰’含量最高的成分。与

J0、G0相比, 除J5外的其他三种处理均显著提高了反式-2-己烯醛、己醛和反式-2-己烯醇的含量, 其中, G50对反式-2-己烯醛、己醛的提升幅度最高, 为G0的4倍、4.3倍; G5对反式-2-己烯醇的提升幅度最高, 为G0的21.1倍。4种处理下均检测到了壬醛, J50、G5处理下检测到了癸醛, 此两种物质均为J50处理下含量最高; 仅在G5处理下检测到了橙花醇; 相比之下, 在对照中均未检测到以上三种物质。

2.5 外源褪黑素处理对葡萄果实质地的影响

与J0、G0相比, 4种处理均显著提高了果实的果皮硬度和韧性; G5对果皮韧性的影响最大, 提高幅度为36.92% (图4-A和C)。并且, J5处理还显著增加了果实的脆度, 与J0对照相比增幅为25.36% (图4-B)。4种处理对果肉硬度均无显著影响(图4-D)。此外, 除果实的脆度外, 同浓度根施和浸果处理效果差异不显著。

2.6 外源褪黑素处理下葡萄果实品质各项指标的主成分分析

将以上15个测定指标进行主成分分析, 由表2可知, 主成分分析可提取出三个PC, 累计方差贡献

表1 外源褪黑素处理对葡萄果实香气种类、特征香气物质的影响
Table 1 Effects of exogenous melatonin treatment on the aroma types and contents of characteristic aromas in grape fruits

处理	香气种类含量/ng·g ⁻¹					
	醛类	醇类	萜烯类	酯类	酚类	总量
J0	160.71±30.72 ^b	35.24±13.06 ^c	1.51±0.24 ^c	0.28±0.16 ^c	—	197.74±44.13 ^b
G0	223.84±45.21 ^b	47.92±8.84 ^c	1.47±0.31 ^c	0.31±0.19 ^c	—	273.54±54.55 ^b
J5	127.43±13.90 ^b	117.42±17.22 ^a	0.92±0.13 ^c	0.59±0.47 ^{bc}	0.34±0.23 ^a	229.93±18.83 ^b
J50	701.90±40.21 ^a	81.93±15.34 ^b	6.38±0.75 ^a	3.39±0.53 ^a	1.45±0.27 ^a	788.82±55.03 ^a
G5	706.10±23.46 ^a	130.57±2.42 ^a	6.48±0.86 ^a	2.91±0.09 ^a	—	836.03±23.81 ^a
G50	770.80±3.50 ^a	77.74±4.58 ^b	2.91±0.57 ^b	1.77±0.49 ^b	—	861.19±16.06 ^a
处理	香气物质含量/ng·g ⁻¹					
	反式-2-己烯醛	己醛	壬醛	癸醛	反式-2-己烯醇	橙花醇
J0	129.41±10.31 ^b	46.26±6.17 ^{bc}	—	—	1.17±0.16 ^c	—
G0	141.09±12.94 ^b	50.67±3.15 ^{bc}	—	—	1.21±0.13 ^c	—
J5	101.81±11.47 ^b	24.98±3.55 ^c	0.97±0.17 ^b	—	3.12±0.91 ^c	—
J50	549.73±26.06 ^a	147.68±17.73 ^b	3.62±1.75 ^a	1.30±0.07 ^a	12.84±5.00 ^b	—
G5	512.36±4.44 ^a	189.52±11.2 ^b	3.40±0.67 ^a	1.24±0.27 ^a	25.49±2.51 ^a	0.67±0.3 ^a
G50	560.28±13.65 ^a	218.61±6.67 ^a	2.43±1.59 ^a	—	8.18±2.35 ^{bc}	—

“—”表示未检测出。

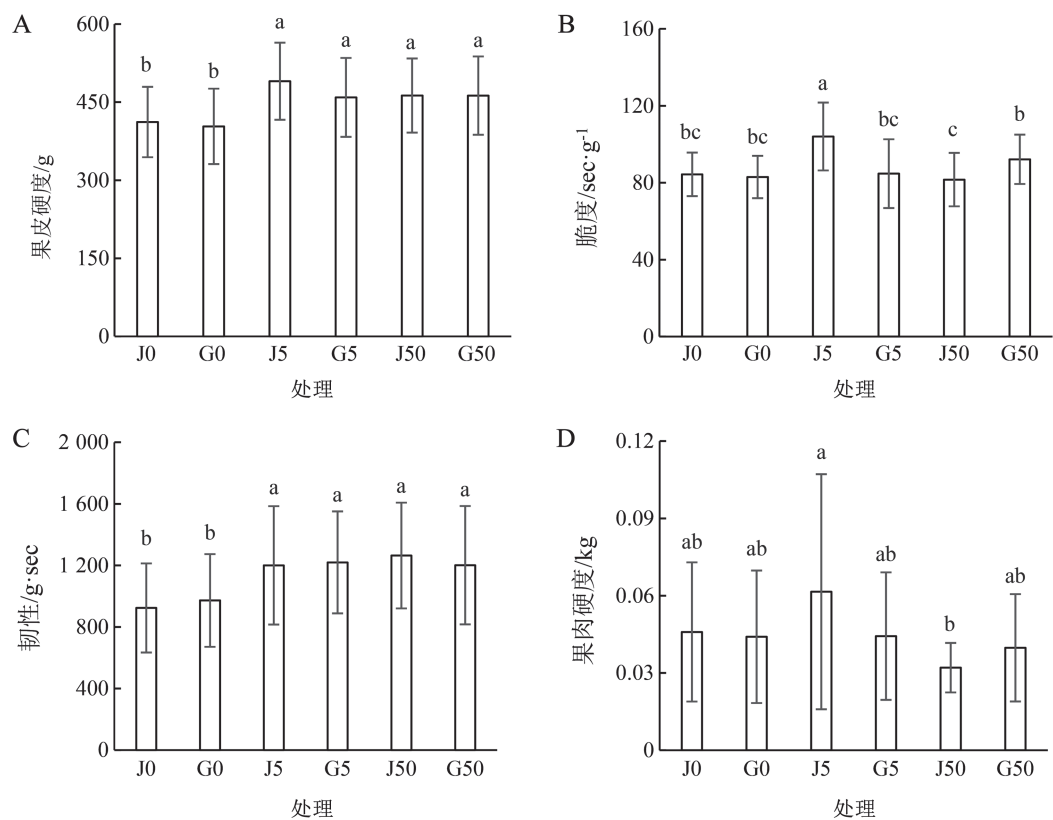


图4 外源褪黑素处理对葡萄果实质地的影响
Fig. 4 Effects of exogenous melatonin treatment on fruit texture in grape

率达到了91.721%, 综合了葡萄果实品质指标的大部分信息, 因此可以用此三个PC涵盖全部15个葡萄果实品质指标, 进而对不同外源褪黑素处理下葡萄果实品质进行评价。

由表2和图5可知, PC1的方差贡献率为56.676%, 主要代表了褪黑素含量、百粒重、单穗重、葡萄糖、果糖、TSS、香气总含量; PC2的方差贡献率为22.138%, 主要代表了苹果酸、酒石酸、可滴定酸、果皮硬度、韧性; PC3的方差贡献率为12.907%, 主

表2 PC的特征值、贡献率和累计贡献率
Table 2 Eigenvalues of PC and their contributions and cumulative contributions to total variance

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	8.501	56.676	56.676
2	3.321	22.138	78.814
3	1.936	12.907	91.721

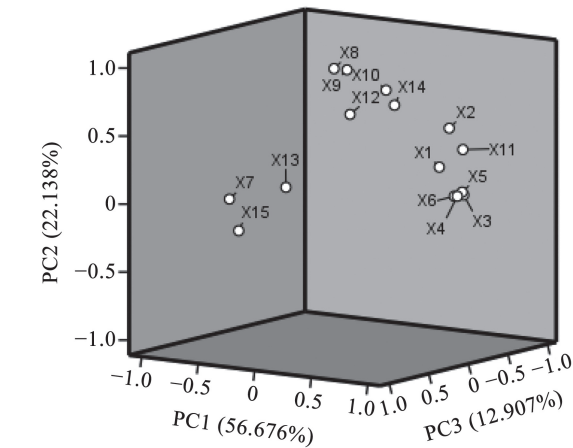


图5 PCA图
Fig. 5 PCA plot
X₁: 褪黑素; X₂: 百粒重; X₃: 单穗重; X₄: 葡萄糖; X₅: 果糖; X₆: TSS; X₇: 柠檬酸; X₈: 苹果酸; X₉: 酒石酸; X₁₀: 可滴定酸; X₁₁: 香气总含量; X₁₂: 果皮硬度; X₁₃: 脆度; X₁₄: 韧性; X₁₅: 果肉硬度, 下同。

表3 前三个主成分的特征向量与载荷矩阵
Table 3 Eigenvectors and loading matrix of the first three principal components

品质指标	PC1		PC2		PC3	
	特征向量	载荷	特征向量	载荷	特征向量	载荷
X_1	0.314	0.915	0.180	0.328	0.047	0.085
X_2	0.273	0.797	0.308	0.560	-0.114	-0.207
X_3	0.338	0.987	0.056	0.101	-0.065	-0.119
X_4	0.340	0.993	0.058	0.106	-0.016	-0.030
X_5	0.338	0.986	0.068	0.125	-0.055	-0.101
X_6	0.333	0.970	0.057	0.104	-0.014	-0.025
X_7	-0.197	-0.576	0.010	0.018	0.334	0.608
X_8	-0.013	-0.038	0.523	0.952	0.031	0.056
X_9	0.040	0.116	0.530	0.966	0.061	0.111
X_{10}	0.071	0.208	0.425	0.774	-0.138	-0.251
X_{11}	0.268	0.782	0.205	0.374	-0.220	-0.401
X_{12}	0.147	0.429	0.401	0.730	0.286	0.520
X_{13}	0.049	0.142	0.122	0.223	0.505	0.920
X_{14}	0.189	0.551	0.414	0.754	0.072	0.132
X_{15}	-0.105	-0.305	-0.081	-0.148	0.482	0.878

要代表了柠檬酸、脆度、果肉硬度。

将标准化处理后的品质指标数值代入公式,得到主成分因子得分和综合评价得分,按 F 值大小进行排名, F 值越大,表示该种处理葡萄果实品质影响越大(表4)。由表4可知, F_1 得分最高的是G50处理,说明G50处理对褪黑素含量、百粒重、单穗重、葡萄糖、果糖、TSS、香气总含量影响最大; F_2 得分最高的是G5处理,说明G5处理对苹果酸、酒石酸、可滴定酸、果皮硬度、韧性影响最大; F_3 得分最高的是J5处理,说明J5处理柠檬酸、脆度、果肉硬度影响最大。综合得分最高的是G50处理,说明G50处理对葡萄果实品质的整体提升最大。

表4 成分得分和综合得分
Table 4 Factor scores and comprehensive scores

处理	F_1	F_2	F_3	F	排名
J0	-2.77	-3.64	-0.34	-241.96	6
G0	-2.32	-2.78	-0.13	-194.71	5
J5	-1.07	1.39	2.89	7.43	4
J50	0.82	0.13	-0.04	48.84	3
G5	1.36	3.29	-1.47	130.94	2
G50	3.98	1.61	-0.91	249.47	1

3 讨论

褪黑素作为一种强的生物活性物质,研究表明,体外补充褪黑素,可使体内的褪黑素水平维持在年轻状态,调整和恢复昼夜节律,加深睡眠,提高睡眠质量;调节细胞免疫和体液免疫,还可以调节多种细胞因子的活动;调节人体心血管系统、呼吸系统、消化系统以及泌尿系统,改善整个身体的机能状态,提高生活质量,延缓衰老进程(赵瑛2004)。基于此,褪黑素作为一种营养保健物质提高了葡萄的价值。本研究发现,5和50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的褪黑素处理均提升了果实褪黑素含量。相似的,外源褪黑素处理‘摩尔多瓦’等葡萄,能显著提升果实内源褪黑素含量,并且显著提升褪黑素合成前体物质5-羟色胺以及褪黑素的主要代谢产物2-羟基褪黑素的含量(许丽丽等2017;卞凤娥等2018)。因此,合理运用褪黑素处理可以实现提高葡萄果实保健营养价值。

对玫瑰香型鲜食葡萄而言,特征香气物质的种类与含量是评判果实品质的重要指标。在生产中,由于追求提早上市所带来的高收益,果实采收时成熟不充分,口感不良,香味寡淡的现象普遍存在。研

究发现,过早采收会导致果实香气物质含量积累不足,过迟采收则会造成果实硬度、特征香气物质含量等显著降低,果实品质下降(李海燕2017)。目前,有研究表明应用植物生长调节剂GA₃和CPPU可以改变葡萄果实中香气物质的种类与含量(李海燕2017),关于运用外源褪黑素调节果实香气物质积累的研究较少。在本研究中,外源褪黑素处理能显著提高果实香气物质含量,表明褪黑素对葡萄香气物质合成的合成起到了重要的调节作用。Sun等(2016)发现,番茄果实经褪黑素处理后,参与芳香性物质的关键基因显著上调,这说明外源褪黑素促进了果实内部香气物质合成。Liu等(2019b)发现褪黑素影响了梨果实中C6芳香化合物的产生,诱导编码脂氧合酶、氢过氧化物裂解酶以及醇酰基转移酶的基因表达。因此,褪黑素可以通过提高香气代谢关键酶的活性,增强芳香类物质的代谢,促进果实中香气物质的合成与积累,合理运用外源褪黑素,可以为调节葡萄果实香气物质积累提供新的方法。

在本研究中,外源褪黑素处理提高了葡萄果实的各项品质指标,但褪黑素的感受和信号传导途径尚不清楚。有研究表明,乙烯介导褪黑素诱导的果实成熟,外源褪黑素处理改变了果实乙烯生物合成和信号转导,且该途径是褪黑素影响的主要途径之一;外源褪黑素处理促进了葡萄果实可溶性固形物与葡萄糖的积累,提高了相关基因的表达(Xu等2017)。也有研究发现乙烯参与调控葡萄果实成熟与多酚代谢,用乙烯处理葡萄果实能提高对应葡萄酒的黄酮醇类、花青素类、黄酮-3-醇类和芪类等酚类物质含量;采后乙烯处理可以激活葡萄果肉中苯丙氨酸途径相关基因的表达(Becatti等2014)。这与本研究中外源褪黑素处理对葡萄果实可溶性固形物、葡萄糖含量的影响一致,说明乙烯可能是褪黑素处理提高果实品质的参与因子之一。此外,研究表明,褪黑素处理对脱落酸(abscisic acid, ABA)具有调控效应,褪黑素处理增加了多叶老芒麦叶片ABA含量,但ABA处理并未影响到内源褪黑素的含量(Fu等2017)。ABA在葡萄果实成熟中具有重要调控作用,且ABA处理能诱导果实中乙烯的释放(Pilati等2017; Sun等2010),因此,褪黑素可能通过ABA

等其他激素来行使调节功能,并参与乙烯的合成,提高果实品质。综上,褪黑素处理可能通过与ABA、乙烯等其他激素的互作调控果实成熟,提高果实品质,乙烯是褪黑素提高果实品质的重要影响因子。

参考文献(References)

- Arnao MB, Hernández-Ruiz J (2015). Functions of melatonin in plants: a review. *J Pineal Res*, 59 (2): 133–150
- Becatti E, Genova G, Ranieri A, et al (2014). Postharvest treatments with ethylene on *Vitis vinifera* (cv Saugiovese) grapes affect berry metabolism and wine composition. *Food Chem*, 159: 257–266
- Bian FE, Xiao QH, Hao GM, et al (2018). Effect of root-applied melatonin on endogenous melatonin and chlorophyll fluorescence characteristics in grapevine under NaCl stress. *Sci Agric Sin*, 51 (5): 952–963 (in Chinese with English abstract) [卞凤娥, 肖秋红, 郝桂梅等(2018). 根施褪黑素对NaCl胁迫下葡萄内源褪黑素及叶绿素荧光特性的影响. *中国农业科学*, 51 (5): 952–963]
- Chen JH, Shi SR (2021). The introduction of Shine Muscat grape in Huainan and the cultivation techniques. *Deciduous Fruits*, 53 (1): 41–44 (in Chinese with English abstract) [陈晶和, 史树仁 (2021). 阳光玫瑰葡萄在淮南的引种表现及栽培技术. *落叶果树*, 53 (1): 41–44]
- Du TH, Zhou XT, Zhu LY, et al (2016). Effect of melatonin treatment on tomato fruit quality and volatile compounds under salt stress. *Food Sci*, 37 (15): 69–76 (in Chinese with English abstract) [杜天浩, 周小婷, 朱兰英等(2016). 褪黑素处理对盐胁迫下番茄果实品质及挥发性物质的影响. *食品科学*, 37 (15): 69–76]
- Erland LA, Chattopadhyay A, Jones AM, et al (2016). Melatonin in plants and plant culture systems: variability, stability and efficient quantification. *Front Plant Sci*, 7: 1721
- Fu J, Wu Y, Miao Y, et al (2017). Improved cold tolerance in *Elymus nutans* by exogenous application of melatonin may involve ABA-dependent and ABA-independent pathways. *Sci Rep*, 7: 39865–39875
- Gao Q, Zhang JC, Chen JN, et al (2018). Comprehensive evaluation of the effect of four drying methods on the aroma quality of Chinese yam chips based on principal component analysis. *Food Sci*, 39 (20): 175–181 (in Chinese with English abstract) [高琦, 张建超, 陈佳男等(2018). 基于主成分分析法综合评价4种干燥方式对山药脆片香气品质的影响. *食品科学*, 39 (20): 175–181]
- Gong B, Shi QH (2017). Review of melatonin in horticultur-

- al crops. *Sci Agric Sin*, 50 (12): 2326–2337 (in Chinese with English abstract) [巩彪, 史庆华(2017). 园艺作物褪黑素的研究进展. *中国农业科学*, 50 (12): 2326–2337]
- Hernández-Ruiz J, Cano A, Arnao MB (2004). Melatonin: A growth-stimulating compound present in lupin tissues. *Planta*, 220 (1): 140–144
- Jin ZX (2017). Modifications of grape berry quality as affected by the rootstocks and preliminary exploration on the underlying mechanism (dissertation). Taian, Shandong: Shandong Agricultural University (in Chinese with English abstract) [金仲鑫(2017). 不同砧木对葡萄果实品质的影响及机理初探(学位论文). 山东泰安: 山东农业大学]
- Jing RY, Wei JQ, Wang LY, et al (2020). Comprehensive quality evaluation of different rice varieties based on principal component analysis. *Food Sci*, 41 (24): 179–184 (in Chinese with English abstract) [荆瑞勇, 卫佳琪, 王丽艳等(2020). 基于主成分分析的不同水稻品种品质综合评价. *食品科学*, 41 (24): 179–184]
- Keutgen AJ, Pawelzik E (2007). Modifications of strawberry fruit antioxidant pools and fruit quality under NaCl stress. *J Agric Food Chem*, 55 (10): 4066–4072
- Li HY (2017). The research of the volatile aroma accumulation and regulation of ‘Shine Muscat’ grape (dissertation). Hangzhou: Zhejiang University (in Chinese with English abstract) [李海燕(2017). ‘阳光玫瑰’葡萄香气物质积累规律及其调控研究(学位论文). 杭州: 浙江大学]
- Li XH, Li YJ, Ma XQ, et al (2021). Current situation and prospect of grape industry development in China. *South China Fruits*, 50 (5): 161–166 (in Chinese) [李小红, 李运景, 马晓青等(2021). 我国葡萄产业发展现状与展望. *中国南方果树*, 50 (5): 161–166]
- Liang D, Shen YQ, Ni ZY, et al (2018). Exogenous melatonin application delays senescence of kiwifruit leaves by regulating the antioxidant capacity and biosynthesis of flavonoids. *Front Plant Sci*, 9: 426
- Liu J, Yang J, Zhang H, et al (2019a). Melatonin inhibits ethylene synthesis via nitric oxide regulation to delay post-harvest senescence in pears. *J Agric Food Chem*, 67 (8): 2279–2288
- Liu J, Yue R, Si M, et al (2019b). Effects of exogenous application of melatonin on quality and sugar metabolism in ‘Zaosu’ pear fruit. *J Plant Growth Regul*, 38 (3): 1161–1169
- Liu JL (2019). Regulatory function of exogenous melatonin on fruit development, postharvest fruit quality and ring rot disease resistance in pears (dissertation). Yangling, Shaanxi: Northwest Agriculture & Forestry University (in Chinese with English abstract) [刘建龙(2019). 外源褪黑素对梨果实发育、采后品质和抗轮纹病的影响及其调控机制研究(学位论文). 陕西杨凌: 西北农林科技大学]
- Liu ML, Yu M, Wang WX, et al (2021). The aroma difference of ‘Muscat’ grape in Penglai, Pingdu and Dongying of Shandong province. *China Fruits*, (2): 13–19 (in Chinese with English abstract) [刘孟龙, 于梦, 王文霞等(2021). 山东蓬莱、平度及东营‘玫瑰香’葡萄香气比较. *中国果树*, (2): 13–19]
- Man K (2020). Effect of different light quality on aroma components and flavor of ‘Shine Muscat’ grape (dissertation). Hangzhou: Zhejiang University (in Chinese with English abstract) [满坤(2020). 不同光质对‘阳光玫瑰’葡萄香气组分及风味的影响(学位论文). 杭州: 浙江大学]
- Mu WS, Feng JY, Tian D, et al (2019). The international trade and domestic demand of the table grape industry in China. *China Fruits*, (2): 5–10 (in Chinese with English abstract) [穆维松, 冯建英, 田东等(2019). 我国鲜食葡萄产业的国际贸易与国内需求形势. *中国果树*, (2): 5–10]
- Pilati S, Bagagli G, Sonogo P, et al (2017). Absciscic acid is a major regulator of grape berry ripening onset: new insights into ABA signaling network. *Front Plant Sci*, 8: 1093–1108
- Poeggeler B, Reiter R, Tan DX, et al (1993). Melatonin, hydroxyl radical-mediated oxidative damage, and aging: a hypothesis. *J Pineal Res*, 14 (4): 151–168
- Reiter R, Tan DX, Rosales-Corral S, et al (2013). The universal nature, unequal distribution and antioxidant functions of melatonin and its derivatives. *Mini Rev Med Chem*, 13 (3): 373–384
- Sun L, Zhang M, Ren J, et al (2010). Reciprocity between abscisic acid and ethylene at the onset of berry ripening and after harvest. *BMC Plant Biol*, 10 (1): 257–268
- Sun Q, Zhang N, Wang JF, et al (2016). A label-free differential proteomics analysis reveals the effect of melatonin on promoting fruit ripening and anthocyanin accumulation upon postharvest in tomato. *J Pineal Res*, 61 (2): 138–153
- Wang P, Sun X, Li C, et al (2012). Long-term exogenous application of melatonin delays drought-induced leaf senescence in apple. *J Pineal Res*, 54 (3): 292–302

- Xu LL, Yue QY, Bian FE, et al (2017). Effects of melatonin treatment on grape berry ripening and contents of ethylene and ABA. *Plant Physiol J*, 53 (12): 2181–2188 (in Chinese with English abstract) [许丽丽, 岳倩宇, 卞凤娥等(2017). 褪黑素对葡萄果实成熟及乙烯和ABA含量的影响. *植物生理学报*, 53 (12): 2181–2188]
- Xu LL, Yue QY, Bian FE, et al (2017). Melatonin enhances phenolics accumulation partially via ethylene signaling and resulted in high antioxidant capacity in grape berries. *Front Plant Sci*, 8: 1426
- Zhao Y (2004). *Pineal Gland and Melatonin*. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Press, 5–161 (in Chinese) [赵瑛(2004). 松果体及褪黑素. 上海: 上海科学技术文献出版社, 5–161]