

外源油菜素内酯对霞多丽和黑比诺葡萄品质的影响

蒋娅萍¹, 方艳¹, 王海霞¹, 杨学山^{1,2}, 祝霞^{1,2*}(甘肃农业大学食品科学与工程学院, 兰州 730070; ²甘肃省葡萄与葡萄酒工程学重点实验室, 兰州 730070)

摘要:【目的】探讨外源油菜素内酯(BR)对酿酒葡萄品质的影响, 以为栽培实践提供理论依据。【方法】以霞多丽和黑比诺葡萄为试材, 于E-L35(转色初期)及7 d后2次外源喷施0.04、0.06、0.08 mg·L⁻¹ BR, 测定E-L36(转色末期)、E-L37(成熟中期)、E-L38(采收期)的果实基本品质指标, 利用顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱(HS-SPME/GC-MS)联用技术分析果实中的挥发性化合物种类及含量, 并对葡萄品质指标进行综合评价。【结果】与对照组(0 mg·L⁻¹ BR)相比, 0.04、0.06、0.08 mg·L⁻¹ BR处理组霞多丽与黑比诺葡萄的可溶性固形物、还原糖、总酚、总游离氨基酸含量以及pH均有提高, 可滴定酸含量降低。在糖酸比基本一致的情况下, BR处理对霞多丽果实总酚、总游离氨基酸含量的积极影响高于黑比诺。香气物质检测表明, 在果实发育成熟期, BR处理对霞多丽与黑比诺果实中挥发性化合物含量、变化趋势以及作用效果均存在差异。外源喷施0.06 mg·L⁻¹ BR处理能够显著促进霞多丽果实中氨基酸衍生物以及异戊二烯类衍生物的合成($p < 0.05$), 且作用效果好于黑比诺。在采收期时, 0.06 mg·L⁻¹ BR处理组霞多丽葡萄中直链酯类、萜烯类、降异戊二烯类、苯衍生物、支链脂肪族类化合物含量分别为对照组的1.28、1.83、1.68、1.48和1.95倍, 黑比诺葡萄分别是对照组的1.28、1.46、1.42、1.45和1.28倍。主成分综合分析结果表明, 霞多丽果实品质主要与氨基酸衍生物含量、pH和可溶性固形物含量呈显著正相关; 黑比诺果实品质主要与还原糖、异戊二烯类衍生物、氨基酸衍生物含量和糖酸比呈显著正相关。【结论】外源喷施0.06 mg·L⁻¹ BR处理有利于提高酿酒葡萄的挥发性香气化合物含量, 改善果实综合品质。

关键词: 葡萄; 霞多丽; 黑比诺; 油菜素内酯; 品质

中图分类号: S663.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2023)12-2574-17

Effects of exogenous brassinolide on flavor quality of Chardonnay and Pinot Noir grape

JIANG Yaping¹, FANG Yan¹, WANG Haixia¹, YANG Xueshan^{1,2}, ZHU Xia^{1,2*}¹College of Food Science and Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; ²Gansu Key Lab of Viticulture and Enology, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: 【Objective】Due to unique natural terroir condition and a long history of wine grape cultivation, Hexi Corridor region of Gansu province has the potential to produce high-quality grape wine. As the main cultivars in the local area, the quality of Chardonnay and Pinot Noir are affected by some factors in the growing process, such as ecological conditions, extreme weather and cultivation management practices, which results in a weak varietal aroma profile and unstable flavor quality, and consequently, the loss of commercial value of wine grape. It has been shown that exogenous application of natural or synthetic inducers including abscisic acid, auxin and methyl jasmonate can promote the accumulation of anthocyanins and aroma compounds in grapes and improve fruit quality. As the most biologically active endogenous hormone among the oleuropein sterols, brassinolide is known to improve certain plant growth, development and the formation of secondary metabolite in fruits, but the regulation of this elicitor on flavor-related metabolite accumulation in wine grapes is still poorly understood.

收稿日期: 2023-06-21 接受日期: 2023-09-04

基金项目: 国家自然科学基金地区基金项目(32060581); 甘肃省自然科学基金项目(20JR10RA527); 甘肃省葡萄酒产业发展基金项目(20180820-08、20180820-07、GJCJ-2019-125-1)

作者简介: 蒋娅萍, 女, 在读硕士研究生, 研究方向为酿酒葡萄与葡萄酒风味调控。E-mail: 3021896299@qq.com

*通信作者 Author for correspondence. E-mail: zhux@gsau.edu.cn

Therefore, the objective of this study was to evaluate the effects of preharvest application of brassinolide on the physicochemical parameters, aroma and overall quality of wine grapes. The present study will establish a foundation for flavor improvement in grape berries by exogenous application of brassinolide. **【Methods】**Chardonnay and Pinot Noir grapes were used as experimental materials and brassinolide at the concentration of 0.4, 0.6 and 0.8 mg · L⁻¹ was sprayed twice at the E-L35 (onset of veraison) stage and 7 days later, respectively. Grape samples were collected at the E-L36 (post-veraison), E-L37 (middle maturation) and E-L38 (harvest time) phenological stages respectively for the determination of basic physicochemical parameters. Headspace solid phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME/GC-MS) technology was used to detect volatile compounds, and the evolution regulation of these compounds during fruit maturation was analyzed. Principal component integrated analysis method was employed to screen important quality indexes and the optimum brassinolide treatment concentration. **【Results】**At harvest, the contents of total soluble solids and reducing sugar, as well as pH value in 0.6 mg · L⁻¹ brassinolide-treated Chardonnay grapes increased by 5.03%, 4.34% and 7.96%, respectively, while the titratable acid content decreased by 36.42% compared with the control. In addition, the level of total soluble solids, reducing sugar and pH in mature Pinot Noir berries were 19.11%, 11.22% and 1.94% higher than those in the control respectively, and the content of titratable acid was 19.31% lower compared to the control. By contrast, preharvest brassinolide treatment tended to promote the accumulation of total phenols and total free amino acids in Chardonnay grapes, and increased the concentration of yeast assimilable nitrogen (YAN) in Pinot Noir. Notably, the accumulation of species and content of aroma substances showed specific dynamic trends during the berry development and maturation. At three sampling times, a total of 36 volatile compounds were identified in Chardonnay grapes, whereas 49 volatile compounds were identified in Pinot Noir berries. At E-L38 stage, (2*E*, 6*E*)-nona-2, 6-dienal and nerol were only detected in 0.6 mg · L⁻¹ and 0.8 mg · L⁻¹ brassinolide-treated Chardonnay berries. Dodecaldehyde and nerol were not detected in control grapes, while they were found in Pinot Noir berries treated with brassinolide. Compared with the control, preharvest brassinolide application at the concentration of 0.6 mg · L⁻¹ significantly promoted the synthesis of amino acid derivatives and isoprene derivatives in both varieties ($p < 0.05$), and had a better modification effect on these compounds in Chardonnay than that in Pinot Noir. At harvest, the content of straight-chain esters, terpenoids, norisoprenes, benzene derivatives and branched-chain aliphatic compounds in Chardonnay grapes treated with 0.6 mg · L⁻¹ brassinolide was 1.28, 1.83, 1.68, 1.48 and 1.95 times higher than that in the control respectively. In addition, the content of characteristic aroma substances such as hexanol, farnesol, β -damascenone, phenylethyl alcohol, benzyl alcohol and phenylethyl aldehyde in 0.6 mg · L⁻¹ brassinolide-treated Chardonnay berries were 2.46, 35.75, 2.39, 2.42, 1.32, and 1.64 times more than the control. Pinot Noir grapes that received 0.6 mg · L⁻¹ brassinolide were characterized with higher concentration of straight-chain esters, terpenoids and branched-chain fatty compounds, as well as the content of characteristic aroma substances including (*E*)-2-hexen-1-ol, dodecanol, and phenylethanol than those in the control. These findings showed that the improvement effect of preharvest brassinolide treatment on wine grape quality is dose and variety dependent. The results of principal component analysis and evaluation of aroma characteristics showed that 0.6 mg · L⁻¹ brassinolide treatment promoted the biosynthesis of reduced isoprenoids, terpenoids, benzene derivatives and straight chain esters in the berries of both varieties. Notably, 0.6 mg · L⁻¹ brassinolide efficiently enhanced the accumulation of most amino acid derivatives, which was conducive to improving the floral and fruit aroma in the berries. **【Conclusion】** Preharvest brassinolide application at both onset of veraison and one week later could in-

crease the content of total phenols, total free amino acid and yeast assimilable nitrogen of Chardonnay and Pinot Noir grapes and significantly promote the synthesis of amino acid-derived aroma compounds.

Key words: Grape; Chardonnay; Pinot Noir; Brassinolide; Quality

酿酒葡萄的糖分、有机酸、酚类、氨基酸、香气化合物等组分的种类和含量,对葡萄及葡萄酒风味品质具有决定性作用^[1]。尤其是浆果转色期开始转化和积累的萜烯类、C₁₃-降异戊二烯类、醇类、酯类、醛类、酸类和甲氧基吡嗪类等挥发性化合物,决定了葡萄与葡萄酒的品种香气典型性^[1]。萜烯类化合物的合成底物为异戊烯基焦磷酸(IPP)和二甲基烯丙基焦磷酸(DMAPP),C₁₃-降异戊二烯类化合物以类胡萝卜素为前体合成,二者均属异戊二烯类代谢途径的主要衍生物^[2];直链脂肪醇类、醛类、酸类、酯类等脂肪酸衍生物主要通过亚麻酸(C18:3)或亚油酸(C18:2)途径氧化裂解产生^[2];支链氨基酸、芳香族氨基酸以及含硫氨基酸通过脱氨、脱羧等一系列反应生成支链酯类、支链醇类、支链醛类、苯衍生物、甲氧基吡嗪类等氨基酸衍生物^[2]。

甘肃省河西走廊地区自然生态及气候风土条件独特,具有悠久的酿酒葡萄栽培历史。霞多丽和黑比诺作为产区的主栽酿酒葡萄品种,具备酿造高品质葡萄酒的良好生产潜力,但在种植过程中受地域局部生境^[3]、极端天气^[4]、栽培管理措施^[5]等因素的影响,导致采收期的葡萄原料存在风味物质不突出、香气品质不一致等问题,进而影响其商业价值。已有研究表明,通过外源性喷施天然或合成诱导物,如脱落酸^[6]、生长素^[7]、茉莉酸甲酯^[8]等,可以促进葡萄果实花青素和香气化合物积累,提高果实品质。

油菜素内酯(brassinolide, BR)、油菜素类固醇(brassinosteroids, BRs)和2,4-表油菜素内酯(2,4-epibrassinolide, EBR)等油菜素甾醇类化合物,属于高效、广谱、无毒的植物生长调节剂^[9]。已有研究表明,BRs可通过诱导草莓内源BRs水平和BRs受体基因的mRNA表达水平,改善成熟果实品质^[10]。同时,BRs也具有改善红地球葡萄色泽^[11]与赤霞珠葡萄风味品质^[12]的潜力。而EBR可通过调节赤霞珠果实内源脱落酸水平,促进浆果成熟^[13]。BR作为油菜素甾醇类化合物中生物活性最强的内源性激素,对番茄^[14]、猕猴桃^[15]、草莓^[10]等外源喷施处理应用研究表明,适宜浓度条件下可以有效调控植物果实的生长发育及次级代谢产物积累,但目前关于其对酿

酒葡萄果实品质的研究还十分欠缺。

笔者以霞多丽(Chardonnay)和黑比诺(Pinot Noir)酿酒葡萄为试材,在转色初期及7 d后2次外源喷施不同质量浓度的BR,分析其对成熟期葡萄果实的理化品质指标以及挥发性化合物的影响变化,通过主成分降维综合分析法筛选重要品质指标以及最佳BR处理质量浓度,以期外源BR改善酿酒葡萄果实品质及栽培生产应用提供参考依据。

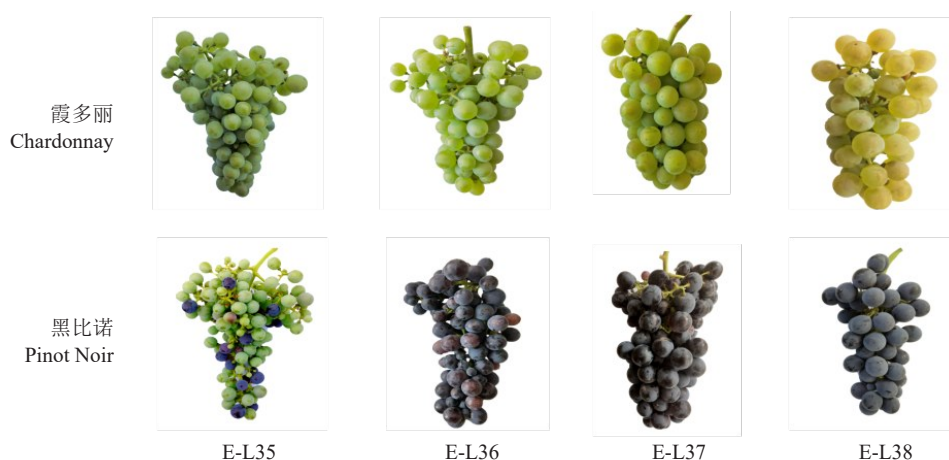
1 材料和方法

1.1 试验材料

试验于2021年在甘肃省武威市凉州区黄羊镇莫高葡萄酒厂进行。种植基地位于东经102°51'24",北纬37°41'05",海拔1500~1920 m,年有效积温1577.7 °C,年累计降水量73.6 mm,年平均气温8.6 °C,土壤类型为偏碱性灰棕砂土。供试品种为10年生霞多丽和黑比诺酿酒葡萄,“立架型”栽培,东西走向,株行距为1 m × 3 m。选取长势一致的葡萄植株(去除边际效应)进行随机区组试验。

1.2 试验设计

试验各品种分别设置0、0.4、0.6、0.8 mg · L⁻¹ BR(纯度≥95%)4个试验组,其中0 mg · L⁻¹ BR为对照组。各试验组选择50株葡萄。外源激素用0.1%的无水乙醇溶解后用清水稀释至各处理质量浓度,并且加入0.1%的Tween 80溶液作为展开剂。对照组在清水中加入与处理组等体积的无水乙醇和Tween 80。各组葡萄于E-L35(转色初期)及7 d后进行2次全冠喷施处理,喷施量以果穗滴水为准。参照李蔚^[6]的方法,根据酿酒葡萄浆果发育的Modified E-L系统,分别于E-L36(转色末期:霞多丽10.1%~12.8%;黑比诺11.2%~13.9%)、E-L37(成熟中期:霞多丽17.6%~18.8%;黑比诺18.2%~18.7%)、E-L38(采收期:霞多丽21.0%~22.2%;黑比诺20.5%~24.5%)3个物候期(图1),采用Z字型法采样。时间均为早上07:00—09:00,先在每个处理组葡萄藤阴阳两面的上、中、下部位随机选取果穗,再在每穗葡萄的上、中、下部位随机采摘共计3 kg果粒。低温转运回实验室,置于-80 °C超低温冰箱保存备用。所



E-L35. 转色初期;E-L36. 转色末期;E-L37. 成熟中期;E-L38. 采收期。下同。

E-L35. Onset of veraison; E-L36. Post-veraison; E-L37. Middle maturation; E-L38. Harvest time. The same below.

图1 霞多丽与黑比诺果实发育过程中浆果变化

Fig. 1 Phenotypic changes of Chardonnay and Pinot Noir grapes during development and maturation

有试验均设3次生物学重复。

1.3 试验方法

1.3.1 果实基本品质指标测定 采用手持数字折光计(PAL-1型,日本ATAGO)测定可溶性固形物含量;采用pH计(PHS-3C型,上海精科)测定pH;采用NaOH滴定法测定可滴定酸含量;采用直接滴定法测定还原糖含量;采用福林-酚法测定总酚含量^[17];采用甲醛滴定法测定酵母可同化氮(yeast assimilable nitrogen, YAN)质量浓度^[18];采用茚三酮显色法测定总游离氨基酸含量^[19]。

1.3.2 挥发性香气物质测定 果实前处理:取葡萄浆果20 g,去籽后的果皮与果肉于小型电动磨机中进行破碎处理。

顶空固相微萃取:参考朱珠芸茜等^[20]的方法,略作修改。准确称量5 g葡萄匀浆,放入15 mL顶空瓶中,并加入1 g NaCl、内标物(2-辛醇,10 μL ,81.06 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、磁力转子后密封。置于恒温加热磁力搅拌器中,40 $^{\circ}\text{C}$ 条件下预热30 min,萃取吸附30 min。之后将萃取头插入气相色谱进样口,热解析10 min,同时进行气相色谱质谱分析。

GC条件:载气(He)流速1 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$,进样时间5 min,进样口温度240 $^{\circ}\text{C}$,传输线温度230 $^{\circ}\text{C}$,离子源温度250 $^{\circ}\text{C}$,不分流进样,柱温升温程序:40 $^{\circ}\text{C}$ 保持5 min,以3.5 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至180 $^{\circ}\text{C}$,保持15 min,色谱柱DB-WAX(60.00 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm)。

MS条件:电子轰击离子源(EI),电子能为70 eV,离子源温度200 $^{\circ}\text{C}$,传输线温度180 $^{\circ}\text{C}$,采集条件为全扫描(30~350 $\text{m}\cdot\text{z}^{-1}$)。

定性定量分析:通过NIST文库、Wiley数据库等对香气化合物质谱图进行初步检索比对,并结合人工图谱解析进行定性分析。利用标准曲线($R^2 > 0.995$)对已有标准品化合物[己酸乙酯、辛酸乙酯、(E)-2-己烯-1-醇、(E, E)-2, 4-庚二烯醛、正己醛、3-己烯醛、2-己烯醛、正辛醛、壬醛、(E)-2-壬烯醛、(E, E)-2, 6-壬二醛、正癸醛、芳樟醇、柠檬烯、 β -大马士酮、苯乙烯、苯乙醛、2-甲基丁醛,均为色谱纯;纯度 $\geq 98\%$;美国Sigma]进行定量,无标准品的化合物采用化学结构、官能团相似、碳原子数相近的标准物质进行半定量分析。

1.3.3 葡萄香气特征及综合品质分析 参考朱珠芸茜等^[20]的方法,将2个品种采收期浆果中气味活性值(odor activity value, OAV) > 1 的香气化合物分为脂肪味、柑橘香、果香、草本香、花香、玫瑰香、坚果香、甜香8个香气类型。通过累加具有相似香气特征化合物的OAV值,绘制香气特征雷达图。

参考Petriccione等^[21]的方法,对pH及可滴定酸、可溶性固形物、还原糖、总酚、总游离氨基酸、YAN、脂肪酸衍生物、氨基酸衍生物、异戊二烯类衍生物含量等检测指标进行主成分分析,明确BR处理对葡萄果实综合品质的影响。

1.4 数据处理与统计分析

试验所有数据均取3次测定结果的平均值,以平均值 \pm 标准差表示。采用Microsoft Office Excel 2010软件进行数据处理,采用SIMCA 14.1与Origin 2020软件绘图,采用IBM SPSS Statistics 26.0软件进行显著性分析(Duncan法, $p < 0.05$)和主成分综合分析。

2 结果与分析

2.1 BR处理对葡萄基本品质指标的影响

2.1.1 BR处理对葡萄基本理化指标的影响 可溶性固形物积累和酸度降低是葡萄浆果成熟期的标志性变化。由表1可知,在霞多丽与黑比诺葡萄成熟过程中,葡萄果实中可溶性固形物和还原糖含量均逐

步增加。同一采样期,BR处理组的pH与对照均呈显著差异。在E-L38时,经 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR处理后,霞多丽果实的可溶性固形物含量、pH、还原糖含量相比对照组分别显著提高了5.03%、7.96%、4.34%,可滴定酸含量显著降低了36.42%,糖酸比达到44.21;黑比诺果实的可溶性固形物含量、pH、还原糖含量相比对照组分别显著提高了19.11%、1.94%、11.22%,

表1 不同处理对葡萄果实基本理化指标的影响

Table 1 Physicochemical parameters of grape berries treated with different concentrations of brassinolide

| 品种 Variety | 采样期 Sampling period | $\rho(\text{BR})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | w(可溶性固形物) Soluble solid content/% | pH | ρ (还原糖) Reducing sugar content/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) | ρ (可滴定酸) Titratable acid content/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) | 糖酸比 Sugar acid ratio |
|-------------------|---------------------------|---|---|-------------|--|--|----------------------------|
| 霞多丽 Chardonnay | E-L36 | 0.0 | 10.10±0.00 d | 3.15±0.01 d | 102.07±0.06 d | 12.80±0.22 a | 7.98±0.13 d |
| | | 0.4 | 12.00±0.00 b | 3.35±0.01 b | 124.67±0.58 b | 10.93±0.43 c | 11.42±0.49 b |
| | | 0.6 | 12.73±0.06 a | 3.46±0.01 a | 128.50±0.87 a | 9.68±0.22 d | 13.28±0.35 a |
| | | 0.8 | 11.50±0.00 c | 3.29±0.01 c | 116.17±0.29 c | 11.55±0.00 b | 10.06±0.02 c |
| | E-L37 | 0.0 | 17.70±0.10 d | 3.36±0.00 d | 173.33±1.53 c | 11.18±0.00 a | 15.51±0.14 d |
| | | 0.4 | 18.30±0.00 b | 3.67±0.01 b | 180.33±1.53 b | 8.68±0.22 c | 20.80±0.65 b |
| | | 0.6 | 18.80±0.00 a | 3.78±0.01 a | 184.00±0.00 a | 6.68±0.00 d | 27.57±0.00 a |
| | | 0.8 | 18.13±0.06 c | 3.53±0.01 c | 179.67±0.58 b | 9.80±0.22 b | 18.34±0.46 c |
| | E-L38 | 0.0 | 21.07±0.12 d | 3.77±0.02 d | 215.00±0.87 d | 6.93±0.22 a | 31.07±0.93 d |
| | | 0.4 | 21.80±0.00 b | 3.96±0.01 b | 222.50±0.87 b | 5.43±0.22 c | 41.06±1.60 b |
| | | 0.6 | 22.13±0.06 a | 4.07±0.02 a | 224.33±0.29 a | 5.08±0.09 c | 44.21±0.72 a |
| | | 0.8 | 21.40±0.00 c | 3.87±0.01 c | 219.00±0.00 c | 6.18±0.22 b | 35.50±1.27 c |
| 黑比诺 Pinot Noir | E-L36 | 0.0 | 11.20±0.00 c | 3.16±0.01 d | 114.33±0.58 d | 12.30±0.00 a | 9.30±0.05 d |
| | | 0.4 | 11.80±0.00 b | 3.29±0.01 b | 117.33±0.58 c | 9.59±0.26 c | 12.24±0.30 b |
| | | 0.6 | 13.30±0.52 a | 3.32±0.01 a | 130.33±0.58 a | 9.18±0.21 d | 14.21±0.31 a |
| | | 0.8 | 12.11±0.02 b | 3.20±0.01 c | 120.67±0.58 b | 11.05±0.22 b | 10.92±0.25 c |
| | E-L37 | 0.0 | 18.20±0.00 c | 3.36±0.00 c | 180.33±0.58 d | 11.18±0.00 a | 16.14±0.05 c |
| | | 0.4 | 18.20±0.00 c | 3.49±0.01 a | 182.33±0.58 c | 9.18±0.22 b | 19.88±0.45 b |
| | | 0.6 | 18.70±0.00 a | 3.50±0.00 a | 185.33±0.58 a | 8.68±0.22 c | 21.37±0.56 a |
| | | 0.8 | 18.47±0.06 b | 3.47±0.01 b | 183.67±0.58 b | 9.05±0.22 b | 20.30±0.45 b |
| | E-L38 | 0.0 | 20.57±0.06 d | 3.61±0.01 d | 208.00±0.87 d | 6.18±0.22 a | 33.71±1.28 c |
| | | 0.4 | 20.97±0.06 c | 3.64±0.01 b | 217.50±0.87 c | 6.05±0.22 ab | 35.98±1.20 b |
| | | 0.6 | 24.50±0.00 a | 3.68±0.01 a | 231.33±1.15 a | 5.18±0.00 c | 44.70±0.22 a |
| | | 0.8 | 21.57±0.06 b | 3.62±0.01 c | 220.00±0.87 b | 5.80±0.22 b | 37.97±1.60 b |

注:表中同一列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.05$);数值以平均值±标准差表示。

Note: Different small letters within each column indicate significant differences among different treatments ($p < 0.05$). Values are expressed as the mean ± SD of three replicates of all treatments.

可滴定酸含量显著降低19.31%,糖酸比为44.70。

2.1.2 BR处理对葡萄总酚含量的影响 葡萄中的酚类物质是决定葡萄酒结构、色泽、涩感及抗氧化水平等方面的关键因子。如图2所示,在葡萄成熟过程中,总酚含量先达到峰值再轻微下降。经BR处理后,2个品种总酚含量均得到了有效提升。在E-L38物候期,霞多丽0.4、0.6、0.8 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR处理组总酚含量相比对照组分别增加了1.41%、11.22%、

2.80%;黑比诺0.4、0.6、0.8 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR处理组相比对照组总酚含量分别显著增加了5.59%、8.12%、3.43%。

2.1.3 BR处理对葡萄总游离氨基酸含量的影响 BR处理对葡萄果实中总游离氨基酸含量的影响如图3所示。在成熟过程中,果实总游离氨基酸含量均呈现上升趋势,与对照组相比,0.4、0.6、0.8 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR处理组总游离氨基酸含量均显著增加。其中,在

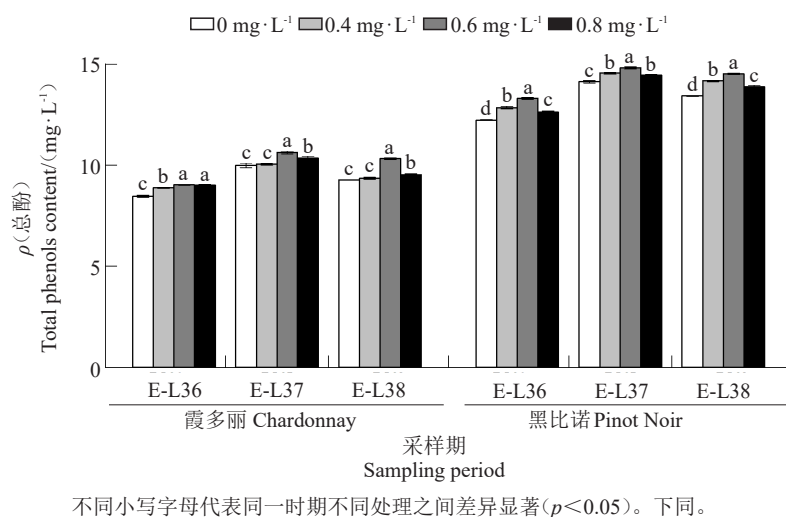


图2 不同处理对葡萄总酚含量的影响

Fig. 2 Effect of different brassinolide treatments on the total phenols content in grape berries

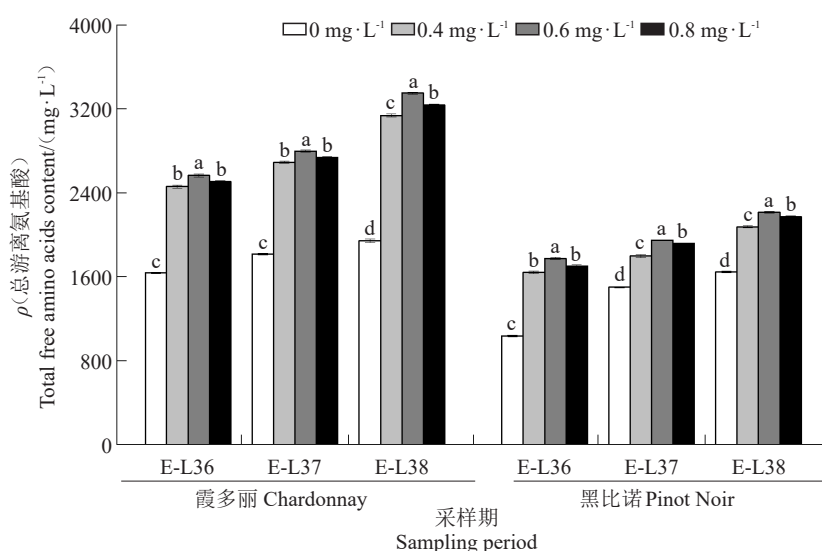


图3 不同处理对葡萄总游离氨基酸含量的影响

Fig. 3 Effects of different brassinolide treatments on total free amino acids content in grape berries

E-L38物候期, $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR处理组含量(ρ , 后同)最高,在霞多丽中达到 $352.38 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与对照组相比显著提高了72.50%;黑比诺中 0.4 、 0.6 、 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR处理组相对对照组分别显著提高了26.03%、34.54%、31.81%。

2.1.4 BR处理对葡萄YAN质量浓度的影响 酵母可同化氮(YAN)是指葡萄汁中除脯氨酸外,能够在酿酒过程中被酵母细胞吸收利用的游离态 α -氨基酸和铵态氮的总和,正常质量浓度范围为 $141 \sim 204 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。当YAN的质量浓度 $< 140 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,酒精发酵会发生停滞或迟缓的风险,产生过多不良的硫醇物质^[22]。从图4可知,YAN质量浓度在浆果

成熟过程中呈现逐步降低的趋势,可能与浆果中铵态氮的含量下降直接相关^[22]。在E-L38物候期,霞多丽 ($162.40 \sim 188.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)与黑比诺 ($168.00 \sim 194.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)各处理组均能满足葡萄酒基本发酵条件。霞多丽 0.4 、 0.6 、 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR处理组的质量浓度在采收期时,相对对照组分别提高8.50%、16.09%、2.30%,黑比诺中的YAN质量浓度分别显著提高5.55%、15.55%、8.89%。

2.2 BR处理对葡萄果实挥发性香气化合物的影响

2.2.1 BR处理对葡萄香气物质种类的影响 在葡萄浆果成熟过程中,挥发性化合物的种类和含量呈现特定的动态变化趋势(图5)。在3次采样期,霞多丽

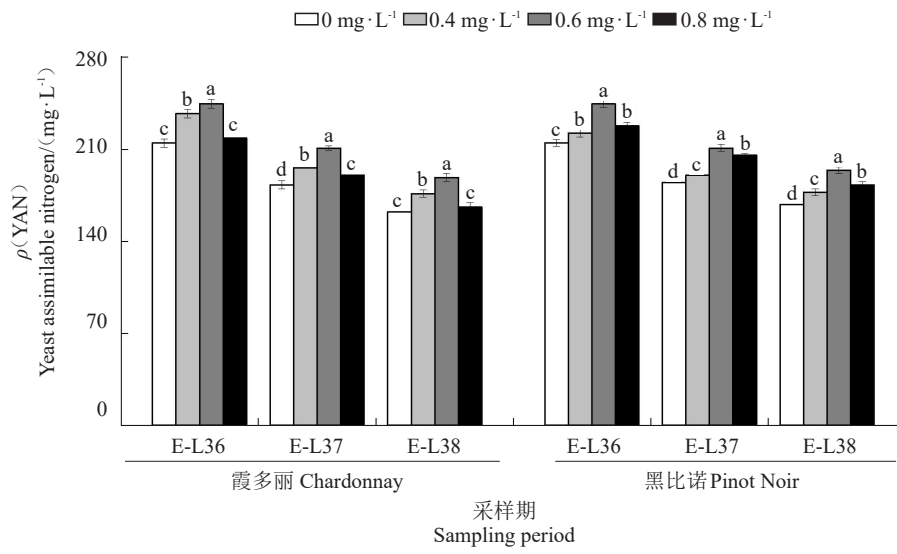


图 4 不同处理对葡萄 YAN 含量的影响

Fig. 4 Effects of different brassinolide treatments on YAN cotent in grape berries

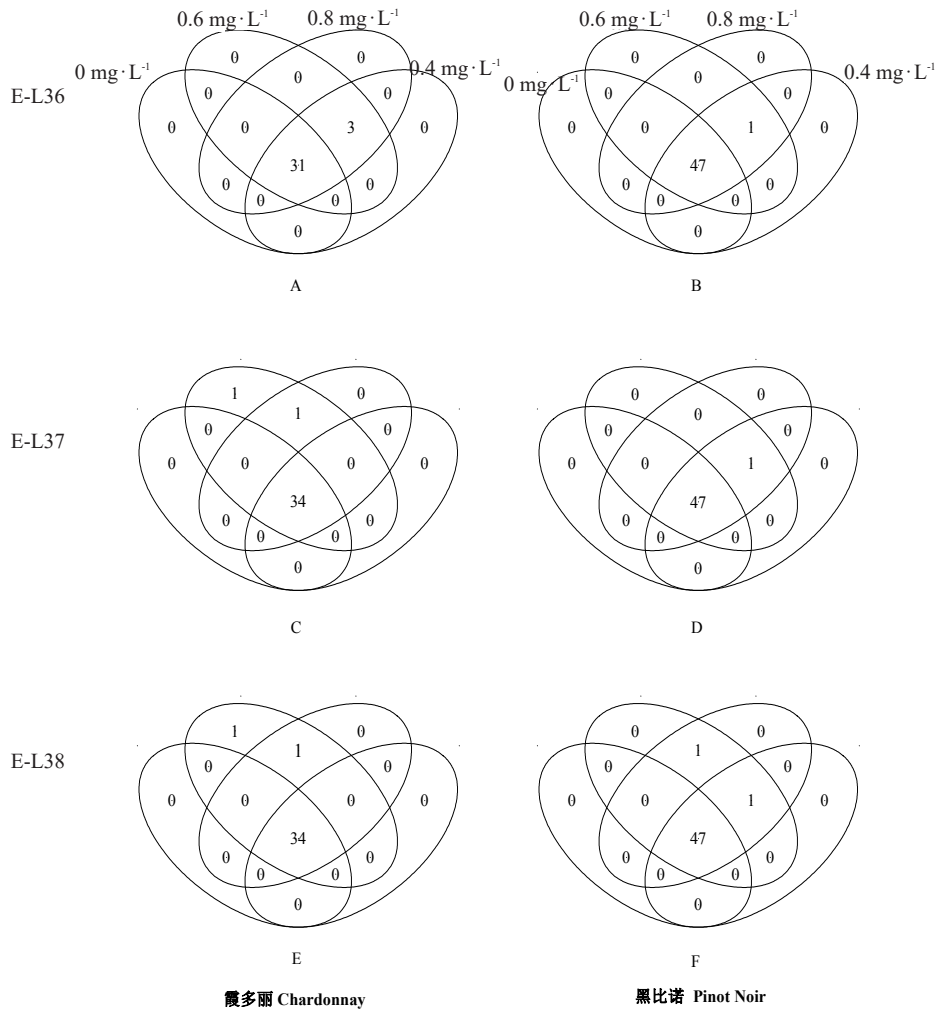


图 5 不同处理葡萄香气物质种类的变化

Fig. 5 Variety of aroma compounds in developing grapes treated with different concentrations of brassinolide

浆果中共鉴定出 36 种挥发性化合物,黑比诺浆果中共鉴定出 49 种,存在显著品种差异。由图 5-A、C、E 可知,在 E-L36、E-L37、E-L38 物候期,霞多丽果实中依次检测到 34、36、36 种香气物质,黑比诺中检测到 48、48、49 种(图 5-B、D、F)。在 E-L38 阶段,霞多丽 0、0.4、0.6、0.8 mg·L⁻¹ BR 处理组香气物质种类分别达到 34、34、36、35 种(图 5-E),对照组相比 0.6、0.8 mg·L⁻¹ BR 处理未检测出(*E, E*)-2, 6-壬二醛、橙花醇 2 种化合物;黑比诺的 0、0.4、0.6、0.8 mg·L⁻¹ BR 处理组检测出香气物质种类分别为 47、48、49、49 种(图 5-F),对照组未检测到十二醛与橙花醇。综合分析,0.6 mg·L⁻¹ BR 处理可促进霞多丽葡萄香气物质生成,0.6、0.8 mg·L⁻¹ BR 处理更有利于黑比诺葡萄香气物质合成。

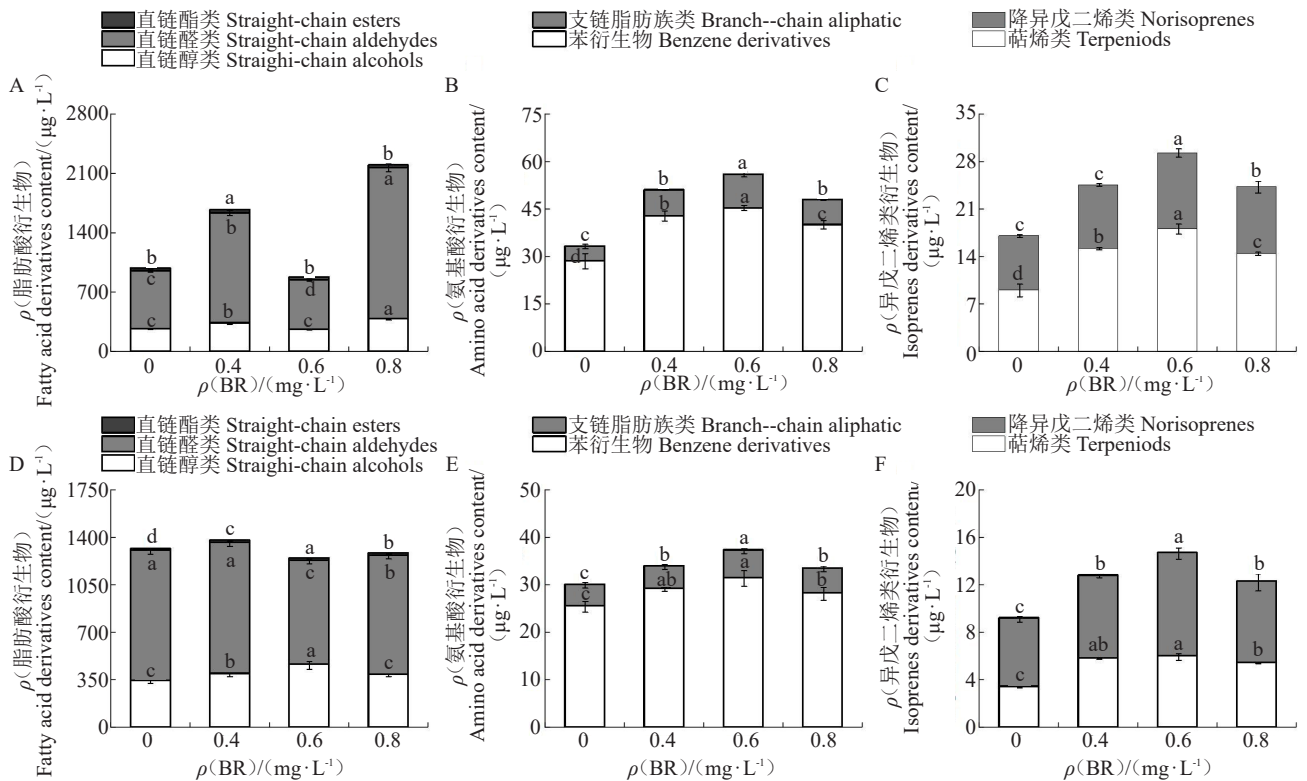
2.2.2 BR 处理对葡萄香气物质含量的影响 将 GC-MS 检测出的挥发性物质,根据其主要合成途径归类为脂肪酸衍生物、异戊二烯类衍生物、氨基酸衍生物等 3 类香气化合物并进行后续分析。

(1) 对转色末期果实挥发性化合物含量的影响。在 E-L36 物候期,霞多丽与黑比诺浆果中共检测到 12 种直链醇类、16 种直链醛类、7 种直链酯类、3

种直链酸类、6 种萜烯类、4 种降异戊二烯类、5 种苯衍生物类以及 3 种支链脂肪族类化合物。

在霞多丽浆果的脂肪酸衍生物中,直链醛类占比最大,其次为直链醇类化合物(图 6-A)。经 BR 处理后,0.4、0.8 mg·L⁻¹ BR 处理组的直链醛类与直链醇类含量均显著高于对照组,0.6 mg·L⁻¹ BR 处理的直链醇类则无显著影响(*p*>0.05)。直链酯类中乙酸叶醇酯占比为 25.27%~54.30%,且 0.4、0.8 mg·L⁻¹ BR 处理含量高于 0.6 mg·L⁻¹ BR 处理。直链酸类化合物含量占比相对较小,仅检测到正己酸,且对照组含量最高。氨基酸衍生物(图 6-B)、异戊二烯类衍生物(图 6-C)总量随着外源 BR 质量浓度增加均呈现先上升后下降的趋势。正己醇、 β -大马士酮、苯乙醇、苯甲醇、苯乙醛为霞多丽浆果的特征香气^[23],BR 处理显著提高了上述 5 种化合物含量,其中 0.6 mg·L⁻¹ BR 处理效果最明显,其含量分别是对照组的 1.62、1.24、2.11、2.69 和 1.42 倍。

由图 6-D 可知,0.4 mg·L⁻¹ BR 处理的黑比诺浆果中直链醛类物质含量与对照组相比无显著差异(*p*>0.05),0.6、0.8 mg·L⁻¹ BR 处理中含量显著下



A, B, C. 霞多丽; D, E, F. 黑比诺。下同。
A, B, C. Chardonnay; D, E, F. Pinot Noir. The same below.

图 6 各处理组在 E-L36 阶段葡萄香气物质含量的变化

Fig. 6 Changes in the content of aroma substances in control and brassinolide treatment groups at E-L36 stage

降。对于直链醇类与直链酯类物质,经BR处理后含量上升,其中 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR处理组相比对照组分别显著提高34.66%、29.32%,作用效果最佳。直链酸类除正己酸外还检测到正辛酸、(E)-2-己烯酸,对照组含量均高于BR处理组。氨基酸衍生物(图6-E)与异戊二烯类衍生物(图6-F)总量随着BR质量浓度增加,呈现先上升后下降趋势。 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR处理的浆果中主要特征香气(E)-3-己烯-1-醇、(E)-2-己烯-1-醇、十二醇与苯乙醇^[24]的含量分别是对照组的1.59、1.14、0.64和1.14倍。

(2)对成熟中期果实挥发性化合物含量的影响。在E-L37物候期,霞多丽与黑比诺浆果中共检测到12种直链醇类、16种直链醛类、7种直链酯类、3种直链酸类、6种萜烯类、4种降异戊二烯类、5种苯衍生物以及3种支链脂肪族类化合物。

如图7-A所示,霞多丽中直链醇类与直链酯类化合物含量随着BR质量浓度增加,均呈现先上升后下降趋势,且含量相比E-L36阶段均有提高。直链醛类中正己醛与2-己烯醛含量占比为83.91%~90.66%。氨基酸衍生物(图7-B)中苯衍生物和支链脂肪族类化合物含量 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR处理组。相比E-L36阶

段,各处理组异戊二烯类衍生物中萜烯类化合物含量均呈上升趋势,降异戊二烯类化合物含量则下降(图7-C);其中 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR处理相比对照组分别显著提升了41.73%、42.55%。总体分析,经 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR处理后浆果的特征香气物质正己醇、 β -大马士酮、苯乙醇、苯甲醇、苯乙醛含量分别是对照组的2.24、1.24、2.94、2.58和1.34倍。

由图7-D可知, 0.6 、 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR处理对黑比诺果实的直链醇类表现出促进作用,相比对照组分别提高了8.15%、1.86%。经BR处理后直链醛类化合物含量无显著差异($p > 0.05$)。 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR处理的直链酯类含量显著高于其他处理组($p < 0.05$)。随着浆果发育,该阶段脂肪酸衍生物含量总体高于E-L36阶段。氨基酸衍生物(图7-E)与异戊二烯类衍生物(图7-F)经 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR处理后,相比对照组分别显著提高了35.82%、41.07%。综合分析,经 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR处理后浆果特征香气物质(E)-3-己烯-1-醇、(E)-2-己烯-1-醇、十二醇、苯乙醇含量分别是对照组的1.30、1.16、0.68和1.33倍。

(3)对采收期果实挥发性化合物含量的影响。在E-L38物候期,霞多丽与黑比诺浆果中共检测到12种直链醇类、14种直链醛类、8种直链酯类、3种直

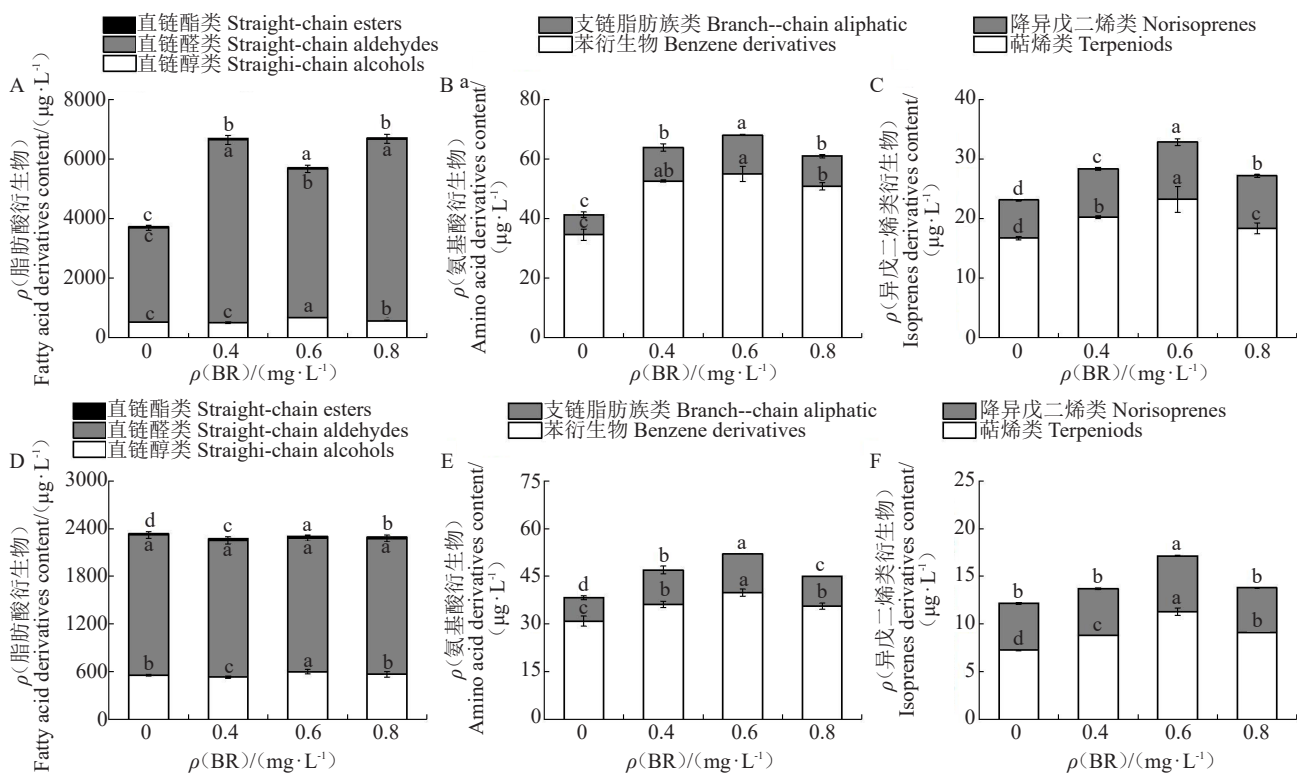


图7 各处理组在E-L37阶段葡萄香气物质含量的变化

Fig. 7 Changes in the content of aroma substances in control and brassinolide treatment groups at E-L37 stage

链酸类、8 种萜烯类、4 种降异戊二烯类、5 种苯衍生物类以及 3 种支链脂肪族类化合物。

霞多丽 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR 处理组中直链醇类与直链酯类含量显著高于其他处理组 ($p < 0.05$), 直链醛类化合物含量 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 0.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR 处理组(图 8-A)。相比 E-L37 阶段, 脂肪酸衍生物中直链醛类与直链醇类含量降低, 直链酯类与直链酸类含量增加。氨基酸衍生物含量随着 BR 质量浓度增加呈现先上升后下降的趋势(图 8-B)。异戊二烯类衍生物中萜烯类含量在采收期达到峰值, 降异戊二烯类化合物含量持续下降。 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR 处理组的萜烯类与降异戊二烯类化合物含量相比对照组分别显著提高了 82.96%、67.87%。经 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR 处理后果实的特征香气物质正己醇、金合欢醇、 β -大马士酮、苯乙醇、苯甲醇、苯乙醛含量分别是对照组的 2.46、35.75、2.39、2.42、1.32 和 1.64 倍。

由图 8-D 可知, $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR 处理黑比诺浆果的直链醇类与直链酯类含量最高, 但对直链醛类物质表现出抑制效果, 0.4 、 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR 处理的直链醛类含量相比对照组无显著影响 ($p > 0.05$)。相比 E-L37 阶段, 黑比诺采收期浆果的直链醇类与直链

醛类化合物含量也出现下降趋势, 直链酯类、苯衍生物、支链脂肪族类、萜烯类含量保持增加趋势, 降异戊二烯类化合物含量明显下降。 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR 处理对氨基酸衍生物(图 8-E)与异戊二烯类衍生物(图 8-F)作用效果最显著 ($p < 0.05$), 相比对照组分别显著提升了 40.44%、45.22%。浆果特征香气物质(E)-2-己烯-1-醇、十二醇、苯乙醇含量分别是对照组的 1.16、0.60 和 2.29 倍, (E)-3-己烯-1-醇与对照组无显著差异 ($p > 0.05$)。

综合分析 E-L36、E-L37、E-L38 各阶段的香气化合物含量, $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR 处理组的霞多丽、黑比诺浆果中, 直链酯类、萜烯类、降异戊二烯类、苯衍生物、支链脂肪族类化合物含量均高于对照组。随着浆果发育成熟, 2 个品种的降异戊二烯类化合物含量均呈现下降趋势, 直链醇类与直链醛类化合物含量均保持先上升后略微下降的变化趋势, 直链酯类、萜烯类、苯衍生物、支链脂肪族类化合物则持续积累, 在 E-L38 阶段达到峰值。总体而言, $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR 处理显著提升了 2 个品种的主要特征香气化合物含量, 有利于增强葡萄的品种香气典型性。

2.2.3 香气物质主成分分析 为进一步全面了解 BR 处理对 2 个品种浆果香气品质的影响差异, 对检

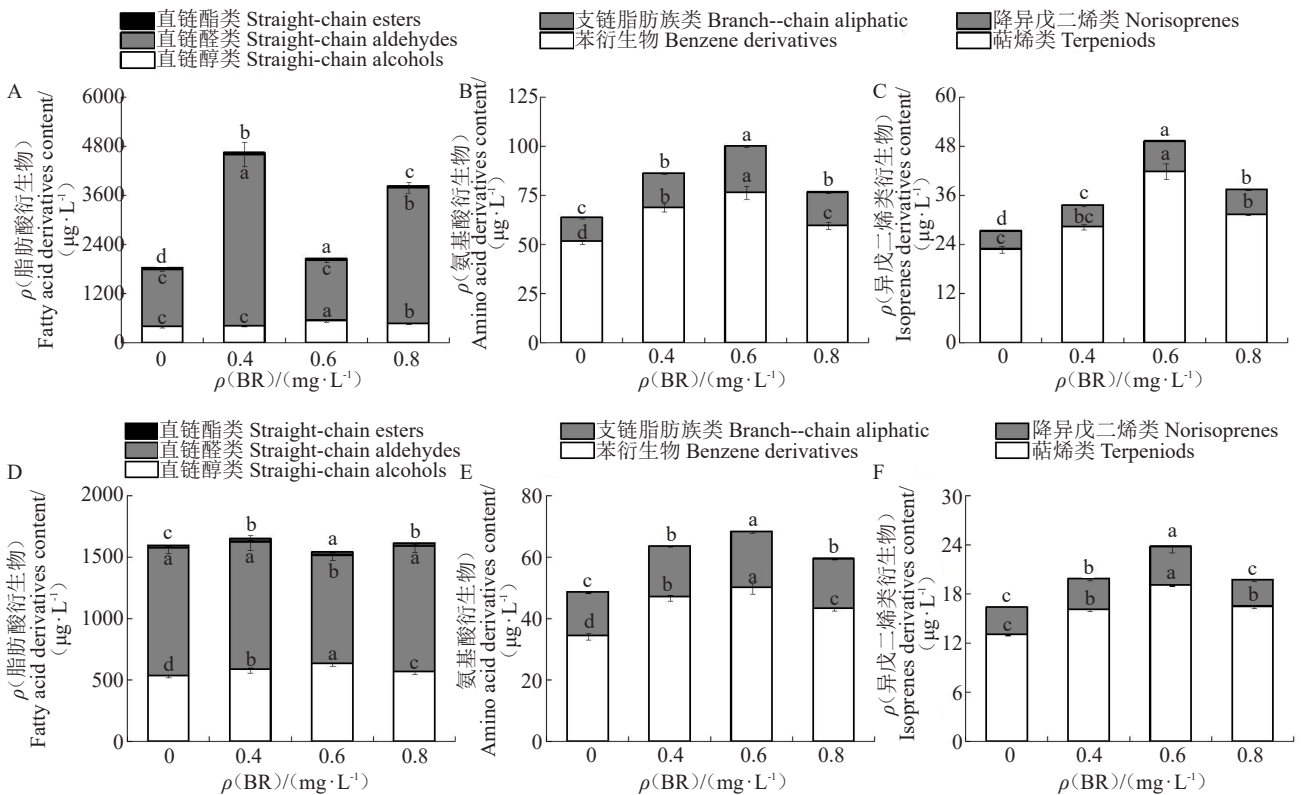


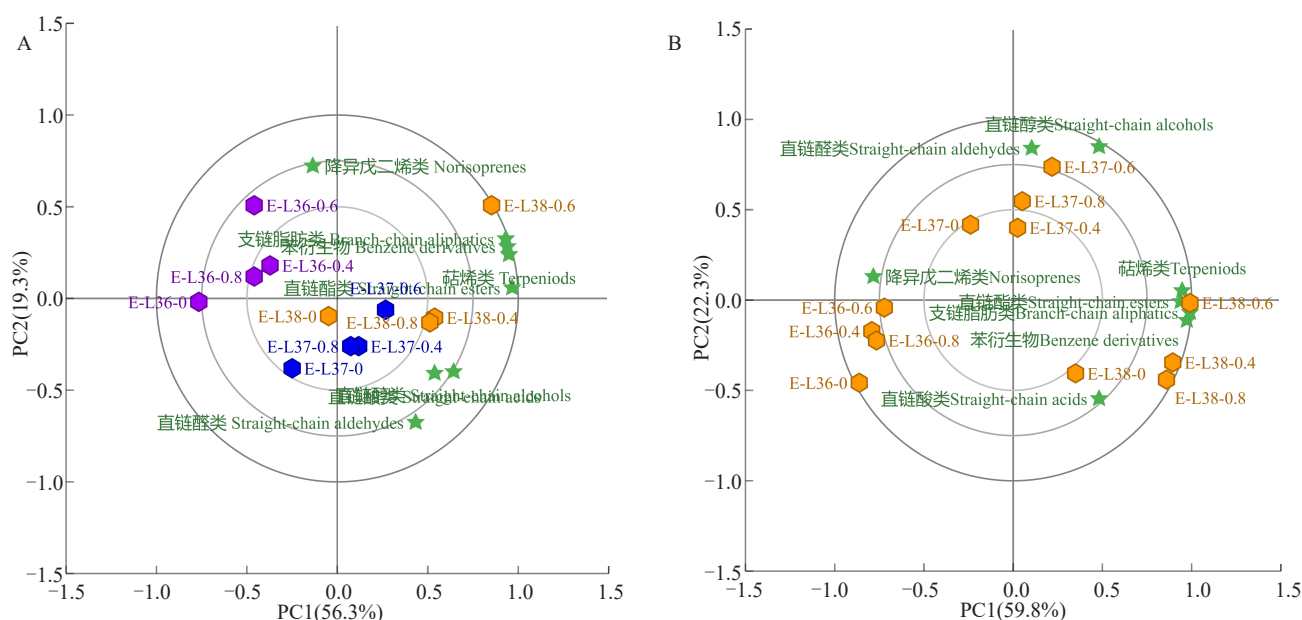
图 8 各处理组在 E-L38 阶段葡萄香气物质含量的变化

Fig. 8 Changes in the content of aroma substances in control and brassinolide treatment groups at E-L38 stage

测出的各类香气组分进行主成分分析(principal component analysis, PCA)。如图9-A所示,霞多丽PC1可以解释总方差的56.3%,根据不同成熟阶段将不同处理组分开,其中E-L37阶段样品位于E-L36和E-L38之间,与葡萄发育阶段一致。PC2可以解释总方差的19.3%,沿着PC2正向端,各采样时期的0.6 mg·L⁻¹ BR处理组周围分布的香气组分含量普遍高于其他处理组。在E-L38阶段,0.6 mg·L⁻¹ BR处理周围分布支链脂肪族类、苯衍生物、萜烯类、直链酯类化合物,表明该质量浓度处理有利于上述化

合物的生物合成,并且相比于萜烯类、直链酯类物质,0.6 mg·L⁻¹ BR处理对苯衍生物、支链脂肪族类化合物的作用效果更佳。

黑比诺葡萄挥发性化合物主成分分析结果如图9-B所示,PC1可以解释总方差的59.8%,不同处理组分布与葡萄发育阶段一致。PC2可以解释总方差的22.3%,在各采样时期,0.6 mg·L⁻¹ BR处理周围分布的各类香气组分含量高于其他处理组。在E-L38阶段,相比于萜烯类、直链酯类物质,0.6 mg·L⁻¹ BR处理更有利于苯衍生物、支链脂肪族类化合物的生



A. 霞多丽; B. 黑比诺。六边形代表处理组; 绿色五角星代表香气物质。

A. Chardonnay; B. Pinot Noir. The hexagon indicate the treatment groups, and the green pentagram indicate aroma compounds.

图9 不同处理组葡萄香气物质PCA分析

Fig. 9 PCA analysis of aroma compounds in grapes treated with different concentrations of brassinolide

物合成。

综上所述,0.6 mg·L⁻¹ BR处理有利于2个品种的降异戊二烯类、萜烯类、苯衍生物、直链酯类化合物的生物合成,尤其对氨基酸衍生物作用效果最显著。

2.2.4 葡萄香气特征分析 为了更加直观地反映BR处理对葡萄果实香气特征影响,笔者选择E-L38阶段OAV>1的化合物进行香气特征分析(表2)。由图10可知,草本香、果香与玫瑰香是2个品种的主要香气特征,霞多丽的香气强度高于黑比诺。霞多丽中草本香强度较高的是0.4、0.8 mg·L⁻¹ BR处理组,黑比诺中为0.0 mg·L⁻¹、0.4 mg·L⁻¹ BR处理组,正己醛为最大贡献者。0.6 mg·L⁻¹ BR处理组在2个品种中的特征香气均为果香与玫瑰香,主要贡献者为芳樟醇。

2.3 BR处理对葡萄果实综合品质的影响

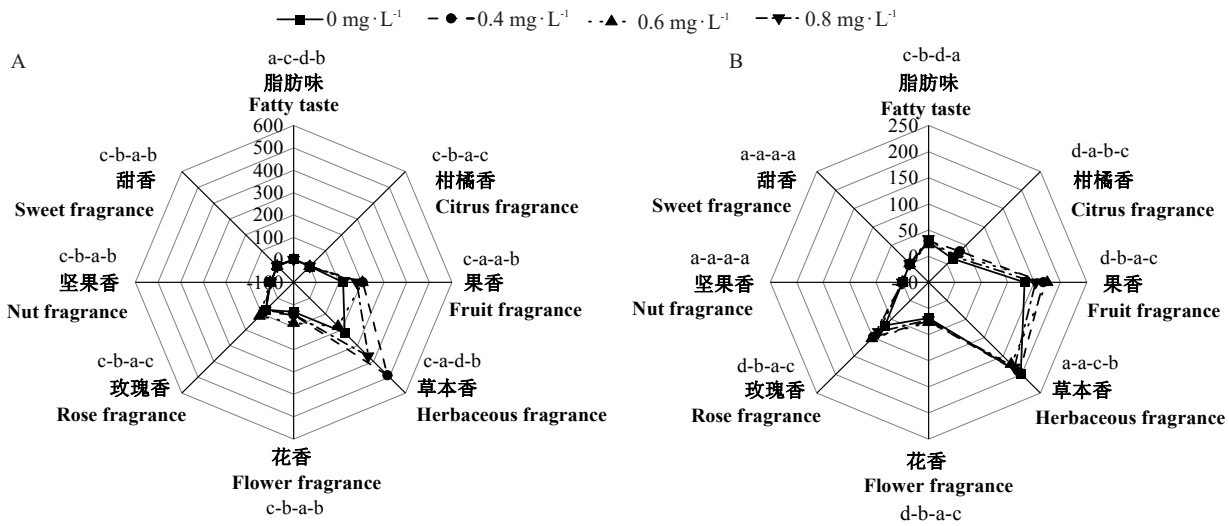
BR处理对葡萄果实综合品质的影响如表3所示。根据特征值大于1共提取出2个主成分,霞多丽与黑比诺的累计贡献率分别达到96.365%、96.987%,可基本反映所有指标的具体信息。霞多丽的PC1主要与氨基酸衍生物含量、pH和可溶性固形物含量呈显著正相关,PC2与脂肪酸衍生物含量有较高相关性。在黑比诺中,PC1主要与还原糖、异戊二烯类衍生物、氨基酸衍生物含量和糖酸比呈显著正相关,PC2与脂肪酸衍生物、总游离氨基酸和氨基酸衍生物含量有较显著的相关性。

此外,由表3主成分矩阵得到主成分与霞多丽葡萄各品质指标的线性表达式如下:

表2 各处理组在 E-L38 阶段葡萄果实中气味活性值 OAV > 1 的芳香物质含量
Table 2 Aromatic substances with odor activity value (OAV) > 1 in each brassinolide treatment group at E-L38 stage

| 化合物名称 Compound name | 阈值 Threshold value/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) | 香气描述 Aroma description | 香气类型 Aroma type | 霞多丽 Chardonnay | | | | 黑比诺 Pinot Noir | | | |
|--|---|----------------------------------|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | | | 0.0 mg·L ⁻¹ | 0.4 mg·L ⁻¹ | 0.6 mg·L ⁻¹ | 0.8 mg·L ⁻¹ | 0.0 mg·L ⁻¹ | 0.4 mg·L ⁻¹ | 0.6 mg·L ⁻¹ | 0.8 mg·L ⁻¹ |
| 乙酸乙酯 Ethyl acetate | 5.00 ^[25] | 果香、甜香 Fruity, sweet | 1,5 | 4.93±0.36 d | 6.00±0.56 b | 6.29±0.54 a | 5.53±0.11 c | 4.21±0.15 c | 4.49±0.10 c | 6.15±0.27 a | 5.56±0.31 b |
| 己酸乙酯 Ethyl hexanoate | 1.00 ^[20] | 水果、白兰地香气 Fruity, brandy | 1 | 6.02±0.09 c | 7.75±0.30 b | 8.92±0.56 a | 7.63±0.20 b | ND | ND | ND | ND |
| 辛酸乙酯 Ethyl caprylate | 5.00 ^[26] | 果香、甜香 Fruity, sweet | 1,5 | 4.17±0.49 c | 5.22±0.14 b | 6.43±0.10 a | 5.06±0.02 b | 3.65±0.08 d | 4.78±0.02 c | 5.85±0.01 a | 5.30±0.02 b |
| (E)-2-己烯-1-醇 trans-2-Hexen-1-ol | 100.00 ^[27] | 青草、草药 Grass, herbs | 3 | 205.61±0.21 a | 144.39±10.98 b | 107.45±6.05 c | 157.86±19.18 b | 128.33±6.21 b | 141.66±0.73 a | 149.49±5.16 a | 146.39±5.61 a |
| (E,E)-2,4-庚二烯醛 (E,E)-2,4-Heptadienal | 15.40 ^[27] | 花香、坚果香 Floral, nut | 2,7 | 11.89±0.38 c | 14.07±0.71 b | 16.91±1.19 a | 13.76±0.70 b | ND | ND | ND | ND |
| 正己醛 Hexanal | 4.50 ^[20] | 绿色蔬菜香气 Green vegetable aroma | 3 | 800.46±18.30 c | 1 502.71±234.99 a | 422.09±2 9.40 d | 1 157.06±159.94 b | 341.36±38.69 a | 340.99±43.52 a | 244.24±21.03 c | 327.62±30.43 b |
| 3-己烯醛 3-Hexen-1-al | 0.25 ^[27] | 青草香气 Grass | 3 | 1.42±0.02 d | 13.24±0.52 a | 4.49±0.09 c | 5.89±0.06 b | 6.72±0.31 a | 5.09±1.00 c | 4.37±0.43 d | 5.43±0.20 b |
| 2-己烯醛 2-Hexen-1-al | 34.00 ^[28] | 绿叶青香、果香 Grass, fruity | 1,3 | 564.62±12.45 d | 2 624.58±236.46 a | 968.44±23.26 c | 2 115.95±91.45 b | 645.37±29.74 a | 621.01±22.26 b | 574.72±39.91 c | 631.99±13.88 ab |
| 正辛醛 Octanal | 0.70 ^[20] | 果味、玫瑰、柑橘 Fruity, rosy, citrus | 1,4,6 | ND | ND | ND | ND | 1.22±0.02 c | 1.52±0.04 b | 1.61±0.02 a | 1.54±0.04 b |
| 壬醛 Nonanal | 1.00 ^[20] | 柑橘、玫瑰、果味 Citrus, rosy, fruity | 1,4,6 | ND | ND | ND | ND | 12.18±1.71 d | 31.54±1.91 a | 22.46±0.66 b | 17.41±0.37 c |
| (E)-2-壬烯醛 (E)-oct-2-enal | 0.09 ^[28] | 豆类、绿色 Beans, green | 3 | 1.44±0.30 c | 1.96±0.08 b | 3.24±0.91 a | 1.89±0.41 b | 3.57±0.05 b | 4.72±0.11 a | 3.37±0.13 c | 3.64±0.05 b |
| (E,E)-2,6-壬二醛 (2E,6E)-nona-2,6-dienal | 0.50 ^[28] | 花香 Floral | 2 | ND | ND | 5.43±0.12 a | ND | 1.99±0.08 c | 2.99±0.08 a | 3.04±0.09 a | 2.29±0.01 b |
| 正癸醛 Decanal | 0.10 ^[28] | 肥皂、油脂味 Soap, grease | 8 | ND | ND | ND | ND | 2.27±0.04 c | 2.49±0.05 b | 1.89±0.09 d | 2.87±0.06 a |
| 芳樟醇 Linalool | 0.09 ^[29] | 玫瑰香、浆果味 Rose, fruity | 1,4 | 6.23±0.02 c | 7.50±0.17 b | 9.75±0.44 a | 6.51±0.04 c | 4.52±0.02 c | 5.61±0.09 b | 6.70±0.04 a | 5.54±0.07 b |
| 柠檬烯 Limonene | 10.00 ^[20] | 柑橘味、花香 Citrus, floral | 2,4 | 9.65±0.73 d | 12.55±0.75 b | 14.62±2.18 a | 10.35±0.39 c | ND | ND | ND | ND |
| β -大马士酮 β -Damascone | 0.05 ^[28] | 花香、水果香 Floral, fruity | 1,2 | 1.26±0.02 c | 1.78±0.04 b | 3.01±0.10 a | 1.73±0.14 b | 0.59±0.02 c | 0.76±0.04 b | 0.87±0.02 a | 0.71±0.05 b |
| β -紫罗兰酮 β -Ionone | 0.01 ^[30] | 雪松、花香 Cedars, flowers | 2 | ND | ND | ND | ND | 0.26±0.01 b | 0.27±0.01 b | 0.29±0.01 a | 0.27±0.01 b |
| 苯乙烯 Styrene | 1.20 ^[29] | 油脂味、橡胶味 Grease, rubber | 8 | 5.40±0.25 a | 4.16±0.16 b | 1.33±0.28 d | 2.19±0.33 c | 5.46±0.39 a | 4.99±0.03 b | 4.39±0.15 c | 4.82±0.05 b |
| 苯乙醛 Phenylacetaldehyde | 4.00 ^[20] | 花香、玫瑰味 Floral, rose | 2,4 | 19.78±0.59 d | 29.95±1.52 b | 32.47±3.85 a | 21.31±0.61 c | 10.58±0.03 b | 11.51±0.18 a | 11.68±0.06 a | 10.77±0.03 b |
| 2-甲基丁醛 2-Methylbutanal | 9.00 ^[26] | 轻微的坚果香 Slight nutty aroma | 7 | 1.98±0.20 c | 6.85±0.20 b | 9.96±0.48 a | 6.25±0.22 b | ND | ND | ND | ND |

注:“ND”表示未检出该香气化合物。香气类型:1.果香;2.花香;3.草本香;4.玫瑰香;5.甜香;6.柑橘香;7.坚果香;8.脂肪味;同一品种同行不同小写字母表示各处理间差异显著($p < 0.05$)。
Note: “ND” means not been detected. Aroma types: 1. Fruity; 2. Floral; 3. Herbal; 4. Rose; 5. Sweet; 6. Citrus; 7. Nut; 8. Fat. Different small letters in the same variety indicate significant differences among treatments ($p < 0.05$).



A. 霞多丽; B. 黑比诺; 图中描述词中不同小写字母代表差异显著 ($p < 0.05$)。

A. Chardonnay; B. Pinot Noir; Descriptive words with different small letters indicate significant differences ($p < 0.05$) among treatments.

图 10 不同处理组葡萄香气雷达图

Fig. 10 Radar map of aroma compounds in grapes treated with different concentrations of brassinolide

表 3 各处理组在 E-L38 阶段葡萄品质指标的主成分载荷矩阵与方差贡献率

Table 3 Load matrix and variance contribution rate for principal component of quality indexes in grapes at E-L38 stage

| 品质指标 Quality indexes | 霞多丽 Chardonnay | | 黑比诺 Pinot Noir | |
|---|----------------|--------|----------------|--------|
| | PC1 | PC2 | PC1 | PC2 |
| pH | 0.997 | -0.015 | 0.934 | 0.009 |
| 可滴定酸含量 Titratable acid content | -0.979 | -0.168 | -0.963 | 0.264 |
| 可溶性固形物含量 Soluble solids content | 0.991 | 0.027 | 0.951 | -0.301 |
| 还原糖含量 Reducing sugar content | 0.982 | 0.171 | 0.996 | 0.034 |
| 糖酸比 Sugar acid ratio | 0.983 | 0.099 | 0.981 | -0.191 |
| 总酚含量 Total phenols content | 0.824 | -0.526 | 0.932 | 0.318 |
| 总游离氨基酸含量 Total free amino acids content | 0.848 | 0.366 | 0.840 | 0.416 |
| 酵母可同化氮含量 YAN content | 0.964 | -0.174 | 0.985 | -0.013 |
| 脂肪酸衍生物含量 Fatty acid derivatives content | 0.133 | 0.988 | -0.466 | 0.883 |
| 氨基酸衍生物含量 Amino acid derivatives content | 0.999 | -0.019 | 0.912 | 0.406 |
| 异戊二烯类衍生物含量 Isoprene derivatives content | 0.906 | -0.290 | 0.995 | 0.095 |
| 方差贡献率 Variance contribution rate/% | 82.085 | 14.280 | 84.039 | 12.948 |
| 累积方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/% | 82.085 | 96.365 | 84.039 | 96.987 |

$$Y_1 = 0.361X_1 - 0.354X_2 + 0.358X_3 + 0.355X_4 + 0.355X_5 + 0.298X_6 + 0.307X_7 + 0.349X_8 + 0.048X_9 + 0.361X_{10} + 0.328X_{11};$$

$$Y_2 = -0.022X_1 - 0.248X_2 + 0.040X_3 + 0.252X_4 + 0.146X_5 - 0.776X_6 + 0.540X_7 - 0.257X_8 + 1.458X_9 - 0.028X_{10} - 0.428X_{11};$$

主成分与黑比诺葡萄各品质指标的线性表达式如下:

$$Y_1 = 0.351X_1 - 0.361X_2 + 0.357X_3 + 0.374X_4 + 0.368X_5 + 0.350X_6 + 0.315X_7 + 0.370X_8 - 0.175X_9 + 0.342X_{10} + 0.373X_{11};$$

$$Y_2 = 0.006X_1 + 0.191X_2 - 0.217X_3 + 0.025X_4 - 0.138X_5 + 0.229X_6 + 0.300X_7 - 0.009X_8 + 0.637X_9 + 0.293X_{10} + 0.069X_{11}.$$

式中 $X_1 \sim X_{11}$ 分别为标准化后的 pH 及可滴定酸、可溶性固形物、还原糖、糖酸比、总酚、总游离氨基酸、YAN、脂肪酸衍生物、氨基酸衍生物、异戊二烯类衍生物含量。霞多丽葡萄的综合评价函数模型为 $Y = 0.82085Y_1 + 0.14280Y_2$, 黑比诺葡萄的综合评价函数模型为 $Y = 0.84039Y_1 + 0.12948Y_2$ 。

利用该数学模型进行综合评价, 综合得分越高, 果实品质越好。如表 4 所示, 2 个品种中, $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

表4 各处理组在 E-L38 阶段葡萄品质的综合分析

Table 4 Comprehensive PCA results of grape quality in each brassinolide treatment group at E-L38 stage

| $\rho(\text{BR})/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) | 霞多丽 Chardonnay | | | | 黑比诺 Pinot Noir | | | |
|---|---|---|--------------------------------|------------|---|---|--------------------------------|------------|
| | PC1 得分 Principal component 1 score | PC2 得分 Principal component 2 score | 综合得分 Comprehensive score | 排名 Rank | PC1 得分 Principal component 1 score | PC2 得分 Principal component 2 score | 综合得分 Comprehensive score | 排名 Rank |
| 0.0 | -3.94 | -1.69 | -3.47 | 4 | -3.84 | -0.94 | -3.35 | 4 |
| 0.4 | 0.93 | 2.73 | 1.15 | 2 | -0.60 | 1.38 | -0.33 | 3 |
| 0.6 | 3.86 | -2.14 | 2.86 | 1 | 4.58 | -0.60 | 3.77 | 1 |
| 0.8 | -0.85 | 1.11 | -0.54 | 3 | -0.13 | 0.16 | -0.09 | 2 |

BR 处理组的葡萄品质均最优。

3 讨论

本试验结果表明,霞多丽与黑比诺果实品质主要受 pH、可溶性固形物含量、还原糖含量、糖酸比以及香气化合物种类和含量的影响。采收期酿酒葡萄的还原糖和可滴定酸的含量显著影响葡萄酒的酒精度、风味及口感协调性^[31]。果实中的糖主要包括葡萄糖、果糖以及微量的蔗糖,它们不仅是果实生长发育过程中重要的能量来源,而且还是诸多风味化合物的代谢前体物,可以调节香气物质的积累^[32]。孙艳丽^[33]研究发现 0.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ EBR 处理可显著增加美乐葡萄 *VvSS*、*VvcwINV*、*VvSUC12* 基因表达量,促进果实糖分积累,与本试验结果一致。葡萄中的酸以酒石酸、苹果酸以及少量的柠檬酸为主^[32]。已有研究表明,采收期浆果含酸量过高会影响葡萄酒的发酵稳定性和口感,但也并非越低越好,因为适宜的酸度对酒体平衡性非常重要^[32]。因此,研究者常采用糖酸比来反映果实的生理成熟度^[34]。本试验 2 个受试品种经 BR 处理后虽然可滴定酸含量有所降低,但采收期果实糖酸比均在 35~45 之间,符合最佳采收标准的要求^[31]。此外,在葡萄成熟过程中,总酚含量先达到峰值再轻微下降,可能与葡萄品种、栽培环境及方式等有关^[35]。同时果实中的游离氨基酸不仅影响发酵过程中酿酒酵母的生长代谢,还能被转化为异戊醇、乙酸异戊酯、乙基-2-甲基丁酸甲酯等游离态化合物^[22]。而本试验各处理组葡萄中总游离氨基酸含量显著高于对照组,有利于增强所酿葡萄酒的香气浓郁度和复杂性。

葡萄的挥发性成分是影响葡萄酒风味和感官特性的重要因素。本试验香气物质检测结果表明,BR 处理提高了 2 个品种 3 个代谢途径中大部分挥发性

物质的含量,且随着果实发育呈现动态积累过程。在脂肪酸代谢途径中,霞多丽脂肪酸衍生物含量高于黑比诺,与霞多丽果皮中的脂肪酸含量高于黑比诺直接相关^[36]。其中 2-己烯醛与正己醛为主要的脂肪酸衍生物,在葡萄成熟过程中其含量先增加,随后呈现稳定或下降状态,并且通过 LOX 途径被脂氢过氧化物裂解酶(HPL)还原产生正己醇、(E)-3-己烯-1-醇与(E)-2-己烯-1-醇等 C_6 -醇类化合物^[2]。0.4 与 0.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BR 处理则显著促进了霞多丽 C_6 类化合物的合成($p < 0.05$),可能与提高了脂氧合酶(LOX)、HPL、(3Z)-(2E)-烯醛异构酶和醇脱氢酶(ADH)的酶活性相关,这与权桂蓉等^[12]采用 0.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ EBR 处理可以促进赤霞珠葡萄中 2-己烯醛与正己醛含量提高的结果相一致。

本试验中 BR 处理提高了浆果中萜烯类物质的含量。尤其是 E-L38 物候期,0.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BR 处理的 2 个受试组葡萄中萜烯类化合物含量均显著高于对照组,合金欢醇仅出现在此阶段,可能是法尼基二磷酸合酶参与了成熟果实金合欢醇的合成^[37]。此外,BR 可以通过抑制甲羟戊酸途径中 *VvHMGR3* 基因表达使果实中萜烯类的含量及种类增加^[38]。与此同时,李健忠^[39]发现 BR 处理有利于类胡萝卜素的生物合成。而果实成熟期降异戊二烯类化合物的积累与浆果中的类胡萝卜素的酶促裂解有关,其中新黄质可通过过氧乙酸降解生成 β -大马士酮、 β -胡萝卜素降解生成 β -紫罗兰酮,并且部分类胡萝卜素也参与内源 ABA 的合成^[40]。本研究各受试组葡萄浆果中的降异戊二烯类物质含量在成熟期整体呈下降趋势,但 BR 处理组含量均高于对照组,推测主要是外源 BR 促进了类胡萝卜素的合成,提高了降异戊二烯类物质的相对含量,其是否与类胡萝卜素裂解双加氧酶活性存在相关性还有待进一步验证。

采收期葡萄果实挥发性化合物主成分分析结果表明, $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR 处理对氨基酸代谢衍生物的影响最为显著($p < 0.05$)。有研究表明 BR 处理可以增强葡萄果实的苯丙烷代谢酶基因表达, 提高果皮苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性^[41], 促进了苯甲醛、苯乙醛、苯甲醇和苯乙醇等化合物生成, 赋予果实花香与果香味。此外, 亮氨酸可生成 3-甲基-1-丁醇和 3-甲基-1-丁酸, 缬氨酸生成 2-甲基-1-丙醇和 2-甲基-1-丙酸, 异亮氨酸生成 2-甲基-1-丁醇^[42]。本试验各处理组果实中上述支链脂肪族化合物含量均有提高, 表明 BR 处理影响了亮氨酸、异亮氨酸以及缬氨酸的生物转化和代谢调控, $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR 处理组总游离氨基酸含量在各物候期均显著高于对照组, 尤其在 E-L38 阶段, 霞多丽处理组总游离氨基酸含量提高 72.50%, 黑比诺中总游离氨基酸含量提高 34.54%, 与氨基酸衍生物含量也相应明显上调相一致。总体而言, $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BR 处理对霞多丽与黑比诺葡萄在浆果成熟期的 pH, 可滴定酸、可溶性固形物、还原糖、总酚、总游离氨基酸, 以及异戊二烯、脂肪酸和氨基酸衍生物含量均有一定影响, 但其对葡萄酒品质的调控效应还需进一步通过酿酒实践分析和探讨。

4 结 论

在转色初期及 7 d 后 2 次外源喷施油菜素内酯, 能够提高霞多丽与黑比诺浆果的糖酸比, 以及酚类、总游离氨基酸和酵母可同化氮含量, 显著促进挥发性氨基酸衍生物的合成。果实品质综合分析表明, $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的外源油菜素内酯处理效果最优, 具备酿酒葡萄栽培生产应用潜力。

参考文献 References:

- [1] 迟明, 刘美迎, 宁鹏飞, 张振文. 避雨栽培对酿酒葡萄果实品质和香气物质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(7):27-32.
CHI Ming, LIU Meiyong, NING Pengfei, ZHANG Zhenwen. Effect of rain-shelter cultivation on fruit quality and aroma components in wine grape (*Vitis vinifera* L.)[J]. Food Science, 2016, 37(7):27-32.
- [2] MA Z H, YANG S J, MAO J, LI W F, LI W, ZUO C W, CHU M Y, ZHAO X, ZHOU Q, CHEN B H. Effects of shading on the synthesis of volatile organic compounds in 'Marselan' grape berries (*Vitis vinifera* L.)[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2021, 40(2):679-693.
- [3] 姜有虎, 李彦彪, 常永平, 李旭林. 嘉峪关地区'霞多丽'葡萄的采收期[J]. 林业科技通讯, 2022(4):72-75.
JIANG Youhu, LI Yanbiao, CHANG Yongping, LI Xulin. Harvesting period of *Vitis vinifera* 'Chardonnay' in Jiayuguan area[J]. Forest Science and Technology, 2022(4):72-75.
- [4] 马宗桓, 李彦彪, 赵津, 李文芳, 毛娟, 陈佰鸿. 不同肥料配比对荒漠区'黑比诺'葡萄果实品质的影响[J]. 北方园艺, 2022(4):1-7.
MA Zonghuan, LI Yanbiao, ZHAO Jin, LI Wenfang, MAO Juan, CHEN Baihong. Effects of different fertilizer ratios on fruit quality of 'Pinot Noir' grape in desert areas[J]. Northern Horticulture, 2022(4):1-7.
- [5] 张亚光, 白耀栋. 不同架式对酿酒葡萄产量与果实品质的影响[J]. 西北园艺(果树), 2022(1):41-43.
ZHANG Yaguang, BAI Yaodong. Effects of different frames on yield and fruit quality of wine grape[J]. Northwest Horticulture (Fruit), 2022(1):41-43.
- [6] CRUPI P, ALBA V, MASI G, CAPUTO A R, TARRICONE L. Effect of two exogenous plant growth regulators on the color and quality parameters of seedless table grape berries[J]. Food Research International, 2019, 126:108667.
- [7] JIA H F, XIE Z Q, WANG C, SHANGGUAN L F, QIAN N, CUI M J, LIU Z J, ZHENG T, WANG M Q, FANG J G. Abscisic acid, sucrose, and auxin coordinately regulate berry ripening process of the Fujiminori grape[J]. Functional & Integrative Genomics, 2017, 17(4):441-457.
- [8] JU Y L, LIU B C, XU X L, WU J R, SUN W, FANG Y L. Targeted metabolomic and transcript level analysis reveals the effects of exogenous strigolactone and methyl jasmonate on grape quality[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 299:111009.
- [9] CLOUSE S D, SASSE J M. BRASSINOSTEROIDS: Essential regulators of plant growth and development[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1998, 49:427-451.
- [10] KHATOON F, KUNDU M, MIR H, NAHAKPAM S. Efficacy of foliar feeding of brassinosteroid to improve growth, yield and fruit quality of strawberry (*Fragaria* × *Ananassa* Duch.) grown under subtropical plain[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2021, 52(8):803-814.
- [11] VERGARA A, TORREALBA M, ALCALDE J A, PÉREZ-DONOSO A G. Commercial brassinosteroid increases the concentration of anthocyanin in red tablegrape cultivars (*Vitis vinifera* L.)[J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 2020, 26(4):427-433.
- [12] 权桂蓉, 高翔, 惠竹梅. 外源激素处理对葡萄及葡萄酒香气成分的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(1):126-134.
QUAN Guirong, GAO Xiang, XI Zhumei. Effect of exogenous plant hormones on aroma components of grapes and dry red wine[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2020, 48(1):126-134.
- [13] 马立娜, 惠竹梅, 霍珊珊, 栾丽英, 高翔, 赵晓琳. 油菜素内酯和脱落酸调控葡萄果实花色苷合成的研究[J]. 果树学报, 2022(4):72-75.

- 2012, 29(5):830-836.
- MA Lina, XI Zhumei, HUO Shanshan, LUAN Liying, GAO Xiang, ZHAO Xiaolin. Studies on the regulation of anthocyanin biosynthesis in grape berry by brassinosteroid and abscisic acid[J]. Journal of Fruit Science, 2012, 29(5):830-836.
- [14] DING Y, SHENG J P, CHENG F S. Assessment of the role of brassinosteroid in regulating the disease resistance of postharvest tomato fruit by proteomic analysis[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(9):e15708.
- [15] 王小璐. 24-表油菜素内酯对猕猴桃果实冷藏品质的影响及其机理[D]. 西安:西北大学, 2020.
- WANG Xiaolu. Effect and mechanism of 24-epibrassinolide treatment maintain kiwifruit cold storage quality[D]. Xi'an: Northwest University, 2020.
- [16] 李蔚. 外源茉莉酸甲酯调控‘贵人香’葡萄品质机制研究[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2020.
- LI Wei. Mechanism of exogenous methyl jasmonate in regulating grape (*Vitis vinifera* L. cv. Italian Riesling) quality[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020.
- [17] 孟江飞, 杨学威, 房玉林, 张会宁, 张振文, 龚镞, 姜娇. 不同采收期对梅尔诺葡萄和葡萄酒酚类物质及抗氧化活性的影响[J]. 中国食品学报, 2012, 12(10):155-162.
- MENG Jiangfei, YANG Xuewei, FANG Yulin, ZHANG Huining, ZHANG Zhenwen, GONG Lei, JIANG Jiao. Effect of harvest time on phenolic composition and antioxidant activity of merlot grape and wine[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2012, 12(10):155-162.
- [18] 刘琦. 不同酿造因子对‘贵人香’干白葡萄酒挥发性香气化合物的影响研究[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2019.
- LIU Qi. Study on the influence of different brewing factors on volatile aroma compounds in ‘Italian Riesling’ dry white wine[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019.
- [19] FOLKERTSMA B, FOX P F. Use of the Cd-ninhydrin reagent to assess proteolysis in cheese during ripening[J]. Journal of Dairy Research, 1992, 59(2):217-224.
- [20] 朱珠芸茜, 王斌, 邓乾坤, 史学伟. 新疆5种鲜食葡萄挥发性香气成分比较分析[J]. 农产品加工, 2020(20):68-74.
- ZHU Zhuyunqian, WANG Bin, DENG Qiankun, SHI Xuewei. Comparing analysis of aroma components among five table grapes from Xinjiang region[J]. Farm Products Processing, 2020(20):68-74.
- [21] PETRICCIONE M, PAGANO L, FORNITI R, ZAMPELLA L, MASTROBUONI F, SCORTICHINI M, MENCARELLI F. Postharvest treatment with chitosan affects the antioxidant metabolism and quality of wine grape during partial dehydration[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 137:38-45.
- [22] LEE J, STEENWERTH K L. Rootstock and vineyard floor management influence on ‘Cabernet Sauvignon’ grape yeast assimilable nitrogen (YAN)[J]. Food Chemistry, 2011, 127(3):926-933.
- [23] 曹建宏. 霞多丽营养系品种葡萄与葡萄酒香气成分的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2006.
- CAO Jianhong. Study on aroma components for clones of chardonnay grape and wine[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2006.
- [24] 张晓. 黑比诺营养系品种葡萄与葡萄酒香气研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2007.
- ZHANG Xiao. Study on aroma components for clones of pinot noir grape and wine[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2007.
- [25] 熊榆, 杨国顺, 陈文婷, 许延帅, 谭君. 延后栽培对‘夏黑’和‘巨玫瑰’果实品质及挥发性香气物质的影响[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2021(3):18-24.
- XIONG Yu, YANG Guoshun, CHEN Wenting, XU Yanshui, TAN Jun. Effects of delayed cultivation on fruit quality and volatile aroma components of ‘Summer Black’ and ‘Jumeigui’ grapes[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2021(3):18-24.
- [26] 官凌霄. 六个葡萄品种酿酒品质分析及单体酚色谱指纹图谱构建[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2021.
- GUAN Lingxiao. Analysis of wine quality of six grape varieties and construction of mono-phenol fingerprints[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.
- [27] 马宗桓, 贺雅娟, 李蔚, 李文芳, 郭艳兰, 左存武, 毛娟, 陈佰鸿. 施氮时期对‘马瑟兰’葡萄果实芳香物质组分与含量的影响[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4):247-255.
- MA Zonghuan, HE Yajuan, LI Wei, LI Wenfang, GUO Yanlan, ZUO Cunwu, MAO Juan, CHEN Baihong. Effects of nitrogen application periods on aroma components and contents of ‘Marselan’ wine grape in the mature period[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(4):247-255.
- [28] TERANISHI R, BUTTERY R G, GUADAGNI D G. Odor quality and chemical structure in fruit and vegetable flavors[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 1974, 237(1):209-216.
- [29] 满坤. 不同光质对‘阳光玫瑰’葡萄香气组分及风味的影响[D]. 杭州:浙江大学, 2020.
- MAN Kun. Effect of different light quality on aroma components and flavor of ‘Shine Muscat’ grape[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [30] 朱保庆, 温可睿, 王军, 段长青. 利用 AMDIS 技术解析雷司令果实发育过程中的降异戊二烯类香气物质[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2011(11):4-9.
- ZHU Baoqing, WEN Kerui, WANG Jun, DUAN Changqing. Identification of norsesquiterpenoids from the developing berries of *Vitis vinifera* L. cv. Riesling by AMDIS[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2011(11):4-9.
- [31] 王瑜. 铺膜和摘叶对‘蛇龙珠’果实和葡萄酒品质的影响研究[D]. 烟台:烟台大学, 2020.
- WANG Yu. Influence of reflective mulch and leaf removal on fruit and wine quality of ‘Cabernet Gernischt’ [D]. Yantai: Yan-

- tai University, 2020.
- [32] CONDE C, SILVA P, FONTES N, DIAS A C P, TAVARES R M, SOUSA M J, AGASSE A, DELROT S, GERÓS H. Biochemical changes throughout grape berry development and fruit and wine quality[J]. *Food*, 2007, 1(1): 1-22.
- [33] 孙艳丽. 外源油菜素内酯处理对‘美乐’葡萄糖代谢和花色苷合成的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2020.
SUN Yanli. Effect of exogenous brassinolides treatment on sugar metabolism and anthocyanin synthesis of Merlot grape berries[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2020.
- [34] 马文婷. 脱落酸、乙烯利和芸薹素内酯对蛇龙珠葡萄果实品质及果皮花色苷的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2015.
MA Wenting. Effects of ABA, ETH and BR on fruit quality and anthocyanin on grape peel of cabernet gemischt[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2015.
- [35] PÉREZ-MAGARIÑO S, GONZÁLEZ-SAN JOSÉ M L. Polyphenols and colour variability of red wines made from grapes harvested at different ripeness grade[J]. *Food Chemistry*, 2006, 96(2): 197-208.
- [36] 曾婕. 栽培措施对酿酒葡萄 LOX 酶活性和脂肪酸组分的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
ZENG Jie. Effects of cultivation measures on LOX activity and fatty acids component of wine grape[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2014.
- [37] BONIKOWSKI R, ŚWITAKOWSKA P, SIENKIEWICZ M, ZAKŁOS-SZYDA M. Selected compounds structurally related to acyclic sesquiterpenoids and their antibacterial and cytotoxic activity[J]. *Molecules*, 2015, 20(6): 11272-11296.
- [38] ZHENG T, DONG T Y, HAIDER M S, JIN H C, JIA H F, FANG J G. Brassinosteroid regulates 3-hydroxy-3-methylglutaryl CoA reductase to promote grape fruit development[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(43): 11987-11996.
- [39] 李健忠. 打顶后喷施油菜素内酯与生长素对烤烟生长及品质的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2016.
LI Jianzhong. Effects of brassinolide and auxins on growth and leave quality of flue-cured tobacco after topping[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2016.
- [40] CHEN K, WEN J F, MA L Y, WEN H C, LI J M. Dynamic changes in norisoprenoids and phenylalanine-derived volatiles in off-vine *Vidal blanc* grape during late harvest[J]. *Food Chemistry*, 2019, 289: 645-656.
- [41] 秦晨亮. 24-表油菜素内酯和水杨酸对酿酒葡萄白藜芦醇合成机制的研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2016.
QIN Chenliang. Study on the mechanism of resveratrol biosynthesis of grapevines by 24-epibrassinolide and salicylic acid[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2016.
- [42] GUITART A, ORTE P H, FERREIRA V, PEÑA C, CACHO J. Some observations about the correlation between the amino acid content of musts and wines of the chardonnay variety and their fermentation aromas[J]. *American Journal of Enology and Viticulture*, 1999, 50(3): 253-258.