

分类号：
学 号：20232112055

密 级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



不同品种改接的‘阳光玫瑰’生长发育差异及关键栽培技术研究

学 位 申 请 人	翟文婷
指 导 教 师	孙军利 教授
	边凤霞 副研究员
申 请 学 位 类 别	农业硕士
专 业 名 称	农业
研 究 领 域	农艺与种业
所 在 学 院	农学院

中国·新疆·石河子
2026 年 5 月

分类号：
学 号：20232112055

密 级：
单位代码：10759

石河子大学

硕 士 学 位 论 文

不同品种改接的‘阳光玫瑰’生长发育差异及关键栽培技术研究

学 位 申 请 人	翟文婷
指 导 教 师	孙军利 教授
	边凤霞 副研究员
申 请 学 位 类 别	农业硕士
专 业 名 称	农业
研 究 领 域	农艺与种业
所 在 学 院	农学院

中国·新疆·石河子
2026 年 5 月

**Research on the Growth and Development Differences and Key
Cultivation Techniques of 'Shine Muscat' Varieties after
Cross-Propagation**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Agriculture

By

Zhai Wen-ting

(Agronomy and Seed Industry)

Dissertation Supervisor: Prof. Sun Jun-li

Researcher: Bian Feng-xia

May, 2026

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：翟文婷

时间：2026年6月3日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：翟文婷

时间：2026年6月3日

导师签名：孙军利

时间：2026年6月3日

摘要

【目的】新疆是我国葡萄优势产区，引入‘阳光玫瑰’等新品种对优化品种结构、提升产业竞争力具有重要意义。嫁接是实现老园更新、提质增效的快捷途径。然而，不同品种嫁接‘阳光玫瑰’后的生长发育差异尚不明确，同时‘阳光玫瑰’对栽培管理要求严格，套用其他产区技术难以保障优质稳产。本研究旨在通过测定不同嫁接组合的光合指标与果实品质，明确其生长发育差异；筛选适宜新疆石河子地区‘阳光玫瑰’最佳无核膨大配方、最佳叶果比、5-ALA 和不同叶面肥的复配方案，以期为‘阳光玫瑰’栽培提质增效提供新的科学种植指导思路。

【方法】2023 年开展嫁接组合筛选试验，以‘维多利亚’、‘巨峰’、‘无核紫’和‘克瑞森无核’为砧木嫁接的‘阳光玫瑰’为试验材料，测定分析 4 个砧穗组合的光合指标、果实品质等生理指标，筛选出最优砧穗组合‘阳光玫瑰’/‘克瑞森无核’(SM/CR)。以 SM/CR 为试验材料，开展无核膨大、叶果比、5-氨基乙酰丙酸 (5-ALA) 和叶面肥复配试验：（1）2024 年进行无核试验，满花后 48 h 内保果，采用 8 种不同浓度的植物生长调节剂组合，蘸穗处理；保果后 14 d，统一使用 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{GA}_3 + 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{CPPU}$ ，蘸穗膨果，成熟期统计无核率，测定果实品质。2025 年进行膨大试验，盛花期浓度为 A8 ($25 \text{ GA}_3 + 4 \text{ CPPU} + 3 \text{ TDZ} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 配方，膨大期采用 4 种不同浓度的植物生长调节剂组合，蘸穗膨果，成熟期测定果实品质。（2）叶果比试验于 2024 年进行，设置 4 种处理，分别为 T1 (LFR15)、T2 (LFR20)、T3 (LFR25) 和 T4 (LFR30)，测定生长发育时期果实大小、色泽和内在品质指标，成熟期测定果皮挥发性代谢物。（3）2025 年进行 5-ALA 和叶面肥复配试验，以喷施清水作为对照 (CK)，共 6 个处理，分别为 CK、ALA ($100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{5-ALA}$)、LS (ALA+ KH_2PO_4 1000 倍液)、HZF (ALA+海藻肥 2000 倍液)、HFS (ALA+黄腐酸 1000 倍液) 和 AJS (ALA+氨基酸 1000 倍液)，果实膨大期每隔 10 d 喷施一次叶面肥，共喷施 4 次，测定生长发育时期果实大小、色泽和内在品质指标，成熟期测定叶片光合参数、叶绿素含量和抗氧化酶活性。

【结果】（1）以‘克瑞森无核’作砧木嫁接‘阳光玫瑰’，单穗质量达 919.19 g，可溶性固形物含量达 21.63%，固酸比达 62.08，果实品质较优；叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量以及光合特性指标、光系统 II (PSII) 的最大光能转换效率 (F_v/F_m) 较高，光合能力较强。

（2）不同无核处理果实无核率均达到 80.0% 以上，盛花期 48 h 内使用 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{GA}_3 + 4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{CPPU} + 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{TDZ}$ 处理果实的无核率最高，达 89.0%。不同膨大处理均显著提高了‘阳光玫瑰’果实单粒质量，膨大期使用 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{GA}_3 + 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{CPPU} + 5000 \text{ 倍保美灵}$ 处理的单粒质量最大，达 14.13 g，可溶性糖和可溶性固形物含量最高。

（3）T3（叶果比 25:1）处理能有效促进‘阳光玫瑰’果实纵向伸长，果粒纵径达 29.63 mm，单粒质量达 12.78 g；T4（叶果比 30:1）处理果皮绿色最浅，可溶性固形物和可溶性糖含量较高，可滴定酸含量较低，果实成熟度更高。T4 样品中萜类化合物的相对含量显著高于其他 3 组样品。K-means

聚类分析显示, 73 个差异代谢物随着叶片数量的增加呈上升趋势, 其中萜类是主要代谢物。T4 与其他三组样品相比, 差异代谢物注释到的共同代谢通路为单萜类生物合成。推测以下 12 种为高叶果比 T4 (叶果比 30:1) 处理 ‘阳光玫瑰’ 果皮风味形成的关键积累挥发性化合物: 四氢-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃、(E)- β -罗勒烯、(E)-3-苯基烯丙乙酸酯、反式玫瑰氧化物、(2S-顺式)-四氢化-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃、(E,E)-2,4-壬二烯醛、L- α -松油醇、(Z)-3,7-二甲基-1,3,6-辛三烯、1,3-二硫戊环、柠檬醛、 β -罗勒烯和顺式-氧化玫瑰。

(4) 花后 100 d, 5-ALA 和海藻肥复配 (HZF) 显著提升 ‘阳光玫瑰’ 果实单粒质量, 相较于对照 (CK) 提高了 13.26%, 叶片叶绿素 a+b 含量达 $3.99 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、过氧化物酶活性达 $4.05 \text{ U} \cdot (\text{g FW})^{-1}$ 、净光合速率达 $17.77 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 5-ALA 和氨基酸 (AJS) 复配果皮色相 a^* 值最高, 可溶性固形物含量达 22.73%, 果实成熟度较高; HZF 和 AJS 处理果实可滴定酸含量降至 0.32%, 提高固酸比, 改善果实甜度和风味。

【结论】 ‘克瑞森无核’ 是 4 个葡萄品种中改接 ‘阳光玫瑰’ 的最适品种; 盛花期 48 h 使用 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{GA}_3 + 4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{CPPU} + 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{TDZ}$, 膨大期使用 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{GA}_3 + 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{CPPU} + 5000$ 倍保美灵处理是最佳无核膨大方案; T4 (叶果比 30:1) 处理能优化果实的糖酸含量, 提高成熟度, 促进 ‘阳光玫瑰’ 果实中萜类化合物的积累; 5-ALA 与海藻肥复配显著促进果实生长、提高糖酸含量、增强叶片光合能力和抗氧化酶活性。

关键词: ‘阳光玫瑰’; 叶面肥; 植物生长调节剂; 挥发性代谢物; 果实品质

Abstract

Objective: Xinjiang is a premium grape-producing region in China, and the introduction of new cultivars such as ‘Shine Muscat’ is of great significance for optimizing cultivar structure and enhancing industrial competitiveness. Top-grafting serves as an efficient approach to renovate aging vineyards and improve fruit quality and yield. However, differences in growth and development patterns among various cultivars after top-grafting with ‘Shine Muscat’ remain unclear. Moreover, ‘Shine Muscat’ has stringent cultivation management requirements, making it difficult to ensure stable, high-quality yield by directly applying techniques from other production regions. This study aims to clarify these growth and developmental differences by measuring photosynthetic parameters and fruit quality indicators of different top-grafting combinations. Furthermore, it seeks to identify the optimal seedless and berry enlargement formula, the ideal leaf-to-fruit ratio, and the best combination of 5-aminolevulinic acid (5-ALA) and foliar fertilizers for ‘Shine Muscat’ cultivation in the Shihezi area of Xinjiang. This study is expected to provide new scientific guidance for improving the quality and efficiency of ‘Shine Muscat’ cultivation.

Methods: In 2023, a grafting combination screening trial was conducted using ‘Shine Muscat’ grafted onto four rootstocks: ‘Victoria’ ‘Kyoho’ ‘Black Monukka’ and ‘Crimson Seedless’. The photosynthetic parameters and fruit quality of these four scion-rootstock combinations were measured and analyzed to identify the optimal combination, which was ‘Shine Muscat’/‘Crimson Seedless’ (SM/CR). Using SM/CR as the test material, a series of experiments were conducted on seedless enlargement, leaf-to-fruit ratio, and the combined application of 5-aminolevulinic acid (5-ALA) and foliar fertilizer.

(1) In 2024, a seedlessness induction trial was performed. Fruit set was induced within 48 hours after full bloom using eight different concentrations of plant growth regulator (PGR) combinations applied via cluster dipping. Fourteen days after fruit set, all clusters were uniformly treated with $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ GA}_3 + 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CPPU}$ for berry enlargement. The seedless rate was recorded, and fruit quality was assessed at maturity. In 2025, a fruit enlargement experiment was conducted. At full bloom, formulation A8 ($25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ GA}_3 + 4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CPPU} + 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ TDZ}$) was applied. During the fruit enlargement stage, four combinations of plant growth regulators at different concentrations were used for cluster dipping to promote berry expansion. Fruit quality was evaluated at maturity.

(2) A leaf-to-fruit ratio experiment was carried out in 2024 with four treatments: T1 (LFR 15), T2 (LFR 20), T3 (LFR 25), and T4 (LFR 30). Fruit size, color, and internal quality indicators were measured during development, and volatile metabolites in the berry skin were analyzed at maturity.

(3) A trial combining 5-ALA and foliar fertilizers was conducted in 2025. The control (CK) was sprayed with water, and there were five additional treatments: ALA ($100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ 5-ALA}$), LS (ALA +

1000× KH₂PO₄), HZF (ALA + 2000× seaweed fertilizer), HFS (ALA + 1000× fulvic acid), and AJS (ALA + 1000× amino acids). Foliar fertilizers were applied every 10 days during the fruit enlargement stage, for a total of four applications. Fruit size, color, and internal quality were measured during development, and leaf photosynthetic parameters, chlorophyll content, and antioxidant enzyme activities were measured at maturity.

Results:

(1) Grafting ‘Shine Muscat’ onto ‘Crimson Seedless’ resulted in superior fruit quality, with a cluster weight of 919.19 g, soluble solids content of 21.63%, and a solid-to-acid ratio of 62.08. This combination also exhibited higher chlorophyll a, chlorophyll b, and total chlorophyll contents, along with enhanced photosynthetic characteristics and a higher maximum photochemical efficiency of photosystem II (*PSII*) (F_v/F_m).

(2) All seedless induction treatments achieved a seedless rate above 80.0%. The highest rate (89.0%) was observed in berries treated with 25 mg·L⁻¹ GA₃ + 4 mg·L⁻¹ CPPU + 3 mg·L⁻¹ TDZ within 48 hours after full bloom. All berry enlargement treatments significantly increased the single berry weight. The treatment with 30 mg·L⁻¹ GA₃ + 5 mg·L⁻¹ CPPU + 5000× promalin during the enlargement stage resulted in the highest single berry weight (14.13 g) and the highest soluble sugar and soluble solids contents.

(3) The T3 treatment (leaf-to-fruit ratio 25:1) effectively promoted longitudinal fruit growth, achieving a berry length of 29.63 mm and a single berry weight of 12.78 g. The T4 treatment (leaf-to-fruit ratio 30:1) resulted in the lightest green color in the berry skin, higher soluble solids and soluble sugar contents, lower titratable acidity, and greater fruit maturity. The relative content of terpenoids in the T4 samples was significantly higher than in the other three groups. K-means cluster analysis revealed that 73 differential metabolites, predominantly terpenoids, showed an increasing trend with higher leaf-to-fruit ratios. Compared to the other three groups, the differential metabolites in T4 were commonly annotated to the monoterpene biosynthesis pathway. Twelve key volatile compounds were speculated as crucial for flavor formation in ‘Shine Muscat’ berry skin under high leaf-to-fruit ratios.

(4) At 100 days post-flowering, the combined application of 5-aminolevulinic acid (5-ALA) with seaweed fertilizer (HZF) significantly increased the single-fruit weight by 13.26% compared to the control (CK). Additionally, under HZF treatment, the chlorophyll a+b content reached 3.99 mg·g⁻¹, peroxidase activity reached 4.05 U·(g FW)⁻¹, and the net photosynthetic rate rose to 17.77 μmol·m⁻²·s⁻¹. The combination of 5-ALA with amino acids (AJS) resulted in the highest peel chromaticity a* value, with a soluble solids content of 22.73%, indicating a higher degree of fruit maturity. Both HZF and AJS treatments reduced the titratable acidity to 0.32%, thereby increasing the soluble solids-to-acid ratio and improving fruit sweetness and flavor.

Conclusion: ‘Crimson Seedless’ is the most suitable rootstock among the four grape varieties for

top-grafting 'Shine Muscat'. The T4 treatment optimizes the sugar-acid balance, enhances maturity, and promotes the accumulation of terpenoids in 'Shine Muscat' berries. The combined application of 5-ALA and seaweed fertilizer (HZF) significantly promotes fruit growth, improves sugar-acid balance, and enhances leaf photosynthetic capacity and antioxidant enzyme activities. The optimal protocol for seedless berry enlargement involves applying $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ GA}_3 + 4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CPPU} + 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ TDZ}$ at 48 hours after full bloom, followed by $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ GA}_3 + 5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CPPU} + 5000\times$ dilution of promalin during the enlargement stage.

Key words: 'Shine Muscat'; foliar fertilizer; plant growth regulator; volatile metabolites; fruit quality

缩略词表 (Abbreviations)

英文缩写 Abbreviation	英文全称 Full name in English	中文全称 Full name in Chinese
5-ALA	5-Aminolevulinic Acid	5-氨基乙酰丙酸
c^*	Chroma	色泽饱和度
CAT	Catalase	过氧化氢酶
C_i	Intercellular CO ₂ concentration	胞间 CO ₂ 浓度
CK	Control Check	对照组
CPPU	Chloropyridylphenylurea	氯吡脞
F_0	Initial fluorescence	初始荧光
FC	Fold change	倍数变化
F_m	Maximum fluorescence	最大荧光
F_v/F_m	Maximal photochemical efficiency of photosystem II	光系统 II 最大光化学效率
FW	Fresh Weight	鲜重
GA ₃	Gibberellin A ₃	赤霉素 GA ₃
GC-MS	Gas Chromatography-Mass Spectrometry	气相色谱-质谱联用技术
G_s	Stomatal conductance	气孔导度
KEGG	Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes	京都基因与基因组百科全书
L^*	Lightness	亮度
LFR	Leaf-to-Fruit Ratio	叶果比
OPLS-DA	Orthogonal Partial Least Squares-Discriminant Analysis	正交偏最小二乘判别分析
PCA	Principal Component Analysis	主成分分析
P_n	Net photosynthetic rate	净光合速率
POD	Peroxidase	过氧化物酶
qP	photochemical quenching coefficient	光化学淬灭系数
rOAV	relative Odor Activity Value	相对气味活性值
RTT	Ratio of Total soluble solids to Titratable acidity	固酸比
SM	Shine Muscat	‘阳光玫瑰’
SOD	Superoxide Dismutase	超氧化物歧化酶
SP	Soluble Protein	可溶性蛋白
SS	Soluble Sugar	可溶性糖
SSC	Soluble Solids Content	可溶性固形物含量
TA	Titrateable Acid	可滴定酸
TDZ	Thidiazuron	噻苯隆
T_r	Transpiration rate	蒸腾速率
U	Unit	酶活单位
VC	Vitamin C	维生素 C
VIP	Variable Importance in Projection	变量重要性投影
VOCs	Volatile Organic Compounds	挥发性有机化合物
WUE	Water Use Efficiency	水分利用效率
$Y(II)$	Actual photochemical efficiency of PSII	光系统 II 实际光化学效率
$Y(NPQ)$	Non-photochemical quenching coefficient	非光化学淬灭系数

目录

摘要	I
Abstract	III
缩略词表 (Abbreviations)	VII
第 1 章 文献综述	1
1.1 ‘阳光玫瑰’ 概述	1
1.1.1 ‘阳光玫瑰’ 品种特性	1
1.1.2 ‘阳光玫瑰’ 葡萄栽培现状	1
1.2 葡萄果实的品质形成	2
1.2.1 葡萄果实品质形成的基本概况	2
1.2.2 葡萄果实的香气物质研究进展	3
1.3 果树改接	4
1.3.1 果树改接的目的意义	4
1.3.2 改接在生产上的应用效果	4
1.4 GA ₃ 、CPPU 和 TDZ 在果树生产上的应用	5
1.4.1 GA ₃ 、CPPU 和 TDZ 的性质及其作用	5
1.4.2 GA ₃ 、CPPU 和 TDZ 对果实品质的影响	5
1.5 叶果比研究进展	6
1.5.1 叶果比对果实大小的影响	6
1.5.2 叶果比对果实内在品质的影响	7
1.6 5-氨基乙酰丙酸与叶面肥在生产上的应用	8
1.6.1 叶面肥的种类与功效	8
1.6.2 5-氨基乙酰丙酸的生理功能	9
1.6.3 叶面肥对叶片生理及果实品质的影响	9
1.6.4 5-氨基乙酰丙酸对叶片生理及果实品质的影响	10
1.6.5 叶面肥与外源物质复配的协同效应	10
1.7 研究目的意义及技术路线	11
1.7.1 研究目的与意义	11
1.7.2 技术路线	12
第 2 章 4 个葡萄品种改接的 ‘阳光玫瑰’ 光合特性和果实品质的差异分析	13
2.1 材料与方法	13
2.1.1 试验地概况	13

2.1.2 供试材料	13
2.2 测定指标及方法	14
2.2.1 果实外观品质测定	14
2.2.2 果实内在品质测定	14
2.2.3 果皮颜色测定	14
2.2.4 光合相关指标测定	15
2.3 数据处理	15
2.4 结果与分析	16
2.4.1 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’果实大小差异	16
2.4.2 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’果实色泽差异	16
2.4.3 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’果实内在品质差异	17
2.4.4 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’叶绿素含量差异	17
2.4.5 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’光合指标差异	18
2.4.6 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’叶绿素荧光参数差异	20
2.4.7 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’光合特性和果实品质综合评价	20
2.5 讨论	22
2.6 本章小结	23
第 3 章 植物生长调节剂对‘阳光玫瑰’果实无核及品质的影响	24
3.1 试验材料与试验设计	24
3.1.1 试验地概况	24
3.1.2 试验设计	24
3.2 测定指标及方法	25
3.2.1 无核率统计	25
3.2.2 果实品质指标测定	26
3.3 数据处理	26
3.4 结果与分析	26
3.4.1 不同无核处理对‘阳光玫瑰’果实无核率的影响	26
3.4.2 不同无核处理对‘阳光玫瑰’果实外观品质的影响	26
3.4.3 不同无核处理对‘阳光玫瑰’果实内在品质的影响	28
3.4.4 不同膨大处理对‘阳光玫瑰’果实外观品质的影响	28
3.4.5 不同膨大处理对‘阳光玫瑰’果实内在品质的影响	29
3.5 讨论	30
3.5.1 不同植物生长调节剂配方对‘阳光玫瑰’果实无核率的影响	30
3.5.2 不同植物生长调节剂配方对‘阳光玫瑰’果实品质的影响	30

3.6 本章小结	31
第4章 不同叶果比对‘阳光玫瑰’果实生长发育及挥发性代谢物的影响	32
4.1 试验材料与试验设计	32
4.1.1 试验地概况	32
4.1.2 试验设计	32
4.2 测定指标及方法	33
4.2.1 果实品质指标测定	33
4.2.2 果皮挥发性代谢物的测定	34
4.3 数据处理	34
4.4 结果与分析	34
4.4.1 不同叶果比对‘阳光玫瑰’果实生长发育的影响	34
4.4.2 不同叶果比果皮挥发性代谢物质特征	39
4.4.3 不同叶果比果皮挥发性代谢物差异分析	42
4.4.4 不同叶果比果皮风味组学分析	47
4.5 讨论	52
4.5.1 不同叶果比对‘阳光玫瑰’果实生长发育的影响	52
4.5.2 不同叶果比对‘阳光玫瑰’挥发性代谢物的影响	52
4.5.3 不同叶果比对‘阳光玫瑰’代谢通路的影响	53
4.6 本章小结	54
第5章 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’果实发育及叶片生理特性的影响	55
5.1 试验材料与试验设计	55
5.1.1 试验地概况	55
5.1.2 试验设计	55
5.2 测定指标及方法	56
5.2.1 果实品质指标测定	56
5.2.2 叶片生理功能测定	56
5.3 数据处理	57
5.4 结果与分析	57
5.4.1 5-ALA 和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’果实外观品质的影响	57
5.4.2 5-ALA 和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’果实内在品质的影响	62
5.4.3 5-ALA 和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’叶片光合特性的影响	64
5.4.4 5-ALA 和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’叶片叶绿素含量的影响	67
5.4.5 5-ALA 和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’叶片抗氧化酶活性的影响	69
5.4.6 5-ALA 与叶面肥复配对‘阳光玫瑰’葡萄的综合效应评价	71

5.5 讨论	73
5.5.1 葡萄果实品质对 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥的响应	73
5.5.2 葡萄叶片光合及抗氧化能力对 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥的响应	74
5.6 本章小结	74
第 6 章 结论与展望	75
6.1 结论	75
6.2 创新点	76
6.3 展望	76
附录	77
参考文献	94
致谢	108
作者简介	109

第1章 文献综述

葡萄 (*Vitis* L.) 属葡萄科 (Vitaceae) 葡萄属 (*Vitis*) 的落叶藤本植物, 因其极高的经济价值, 在全球范围内被广泛种植。根据国际葡萄与葡萄酒组织 (OIV) 发布的行业数据显示, 2024 年, 全球葡萄种植面积约 710 万 hm^2 , 全球葡萄产量为 7770 万吨, 较 2023 年增长 3.7%; 中国葡萄栽培面积为 75.3 万 hm^2 , 位居世界第三 (OIV, 2024)。我国葡萄种植以鲜食葡萄为主, 占全国葡萄总产量的 80% (Zhou et al., 2022)。新疆作为我国葡萄传统优势产区, 近几年栽培面积维持在 200 万亩, 产量维持在 300 万吨左右, 栽培面积和产量均居全国首位 (付凌晖等, 2023)。新疆葡萄平均产值超过 5000 元/亩, 具有稳定的经济效益, 已成为主产区重要的经济支柱, 在推进乡村振兴工作中发挥着重要作用 (赵玉山, 2023)。

随着消费市场的不断升级与消费者偏好的多元化发展, 无籽、口感脆爽且带有独特风味的葡萄品种越来越受到消费者的青睐。在此背景下, ‘阳光玫瑰’ (Shine Muscat) 凭借其独特的玫瑰香气、高糖低酸及脆嫩无核的优良特性, 迅速成为鲜食葡萄市场中的代表性高端品种 (聂瑞洁, 2021)。

1.1 ‘阳光玫瑰’ 概述

1.1.1 ‘阳光玫瑰’ 品种特性

‘阳光玫瑰’ 新梢生长势旺, 成年树新梢第 4-6 节平均长度 15.5 cm。两性花, 每根结果枝着生 1-2 个花序, 第一花序着生在第 3-5 节上。幼叶淡红色, 成龄叶为深绿色, 叶片大、厚, 五角形, 裂刻浅 (毛妮妮等, 2016)。果粒着生紧密呈椭圆型, 成熟后果实呈黄绿色至黄色; 果皮中等厚, 不易剥离; 果肉厚且硬, 有玫瑰香味 (宋献策等, 2015)。

‘阳光玫瑰’ 葡萄在北疆地区栽培, 一般年份 4 月 15 日左右出土萌芽, 5 月中下旬进入始花期, 3 天后进入盛花期, 花期 8-12 d, 6 月上旬幼果进入膨大期, 7 月下旬果实开始转为有光泽的翠绿色, 9 月上旬果实开始成熟, 比 ‘巨峰’ 葡萄晚熟 10-12 d, 10 月中下旬落叶休眠 (吴桂玲等, 2023)。

1.1.2 ‘阳光玫瑰’ 葡萄栽培现状

‘阳光玫瑰’ 葡萄为欧美杂交种, 其亲本为 ‘安芸津 21 号’ (Steuben $\times$ Muscat of

Alexandria) 和‘白南’(Katta Kourgan × 甲斐路), 属二倍体, 2003 年由日本选育, 于 2009 年引入我国 (Yamada et al., 2017; 李婉雪, 2016)。该品种抗病性强, 果形外观优美、果实肉脆、有玫瑰香味, 是近年来国内葡萄新兴的主栽品种之一 (陈哲等, 2025)。据统计, 国内‘阳光玫瑰’种植面积 2016 年增至约 0.67 万 hm^2 , 2023 年超过 8 万 hm^2 , 目前约 10 万 hm^2 , 成为种植面积和产量增长最快的葡萄品种之一 (穆维松等, 2026; 钟其岭等, 2026)。

针对新疆地区‘阳光玫瑰’葡萄引种的栽培表现, 多项研究显示其具有良好潜力: 白世践等 (2022) 研究发现, ‘阳光玫瑰’葡萄在吐鲁番地区生长势强, 丰产性好, 抗白粉病; 赵新民等 (2017) 比较研究了 13 个葡萄品种在石河子垦区的结果及品质特性, 得出‘黑色甜菜’、‘阳光玫瑰’品质较好, 产量较高; 刘欣宇等 (2025) 研究 23 个鲜食葡萄品种在石河子垦区的栽培表现, 发现‘阳光玫瑰’糖酸比、批发价显著高于其他品种, 展现出较高的经济效益, 适合在该地区推广。

1.2 葡萄果实的品质形成

1.2.1 葡萄果实品质形成的基本概况

葡萄的果实品质是指满足消费者需求的各种优良性状的总和 (张琪等, 2022), 包括果实的外观品质和内在品质。对于鲜食葡萄, 果实形状、大小、色泽以及果粉厚度等外观性状, 是备受关注的品质特征 (李记明, 1999), 其中单粒质量是产量形成的关键指标, 产量会直接影响果树生产效益的高低 (乔军等, 2011)。鲜食葡萄的色泽在一定程度上反映了果实的成熟度, 是影响消费者选购商品时的重要品质指标 (穆维松等, 2019)。

葡萄果实的可溶性糖、有机酸、质地、风味、香气以及营养成分等构成了果实的内在品质 (Ju et al., 2022)。鲜食葡萄适宜的可溶性固形物含量为 16%-21% (李记明, 1999), 固酸比直接影响果实的酸甜风味, 可作为果实成熟度的判定标准 (Génard et al., 1992)。在成熟的葡萄果实中, 葡萄糖和果糖是可溶性糖的主要成分, 果糖含量略高于葡萄糖, 蔗糖完全不存在或含量极微 (Keller et al., 2016)。葡萄果实中的有机酸主要是苹果酸、酒石酸和柠檬酸, 酒石酸和苹果酸占总酸含量的 90% 以上 (Esteban et al., 1999; Fowles, 1992)。维生素 C 广泛存在于新鲜的蔬菜、水果中, 但葡萄中的维生素 C 含量不算很高 (朱会调等, 2021)。

1.2.2 葡萄果实的香气物质研究进展

香气是决定葡萄品质的重要因素之一 (Xi et al., 2020)。不同品种中香气物质的种类与含量差异较大, 因此造成不同品种的独特风味 (张上隆等, 2007)。葡萄中存在数百种挥发性有机化合物 (Alem et al., 2019), 主要包括萜类化合物、酯类、醇类、醛类以及挥发性酸类 (Ilc et al., 2016)。真正决定葡萄果实香味的关键在于少数几种特征香气物质, 它们的贡献取决于其阈值大小及在果实中的实际浓度。

葡萄中的香气物质以游离态和结合态两种形式存在, 二者之间可以相互转化 (Wu et al., 2020)。游离态的香气成分具有挥发性, 能够直接提供香气, 以萜烯类、醛类、醇类、酯类和芳香化合物等为主, 能直接刺激人的嗅觉 (Robinson et al., 2014)。结合态香气组分具有易溶于水、稳定性高、低活性、易转移和无毒等特点 (贺普超, 2001), 在果实中多以糖苷键的结合态、水溶性的非极性化合物形式存在, 被称为风味前体物 (Wu et al., 1991; Günata et al., 1985)。葡萄果实香气组分的前体物质是在叶片中形成, 但香气组分的最终合成是在果实内进行, 积累则主要在果粒转色后进行, 包括脂肪酸、氨基酸和异戊二烯等代谢途径 (贺普超, 2001)。

根据芳香气息的不同类型, 鲜食葡萄可以被分为不同的类别 (Wu et al., 2019b); 主要为三种香气类型: 中性型、草莓香型、麝香型, 其中单萜类化合物是麝香型葡萄品种中的主要芳香成分 (Mateo et al., 2000)。*‘阳光玫瑰’*葡萄属麝香型品种, 其特征香气物质为萜烯类中的单萜类化合物, 赋予果实花香和果香 (Wang et al., 2021b)。某些单萜类化合物会散发出类似花香的香气, 这种香气通常被称为“麝香香气”, 人类嗅觉能够很容易地察觉到这种气味 (Zhou et al., 2022)。据不完全统计, 近年来已经在葡萄中发现了十多种对葡萄玫瑰香味有特殊贡献的单萜物质, 包括里那醇、脱氢芳樟醇、 α -松油醇、橙花醇、香茅醛、 β -月桂烯、柠檬烯、桃金娘醇、香茅醇和顺式氧化玫瑰等 (王武, 2021)。其中一些关键的单萜类物质, 如芳樟醇及其衍生物 (如顺式和反式芳樟醇氧化物)、香叶醇及其衍生物 (如香叶醇、橙花醇氧化物和玫瑰醇氧化物), 都被证实是形成葡萄花香气息及甜味香气的主要因素, 同时也是构成麝香葡萄特有香气的重要成分 (Wu et al., 2016; Zhou et al., 2024)。葡萄栽培者可以通过采取相应的农艺措施来促进芳香前体物质的生成, 从而改善葡萄的芳香特性 (Alem et al., 2019)。

1.3 果树改接

1.3.1 果树改接的目的意义

近年来, 优质品种正逐步在鲜食葡萄市场占据主导地位, 部分品种亟需进行更新, 面临着重茬土壤改良、重新定植以及树体结构重新整形培育等问题(姚林啟等, 2018)。在葡萄生产上进行品种改良主要有重栽和大树改接两种方法。重栽即重新建园, 前 2-3 年无产量, 直接影响葡萄生产效益, 还存在土壤病虫害增多、产量和品质下降等问题, 故生产上多采用改接技术(王连起等, 2005)。果树改接换种技术是现代农业中一种重要的栽培管理手段, 通过将优质品种的接穗嫁接到已有树体上, 实现对老果园的更新改造(王秋萍, 2010)。大树改接有效缩短了葡萄的更新周期, 为葡萄产业的发展带来了显著成效。

1.3.2 改接在生产上的应用效果

改接技术的应用主要体现在四个方面: 一是增强抗逆性, 利用砧木提高接穗品种的抗寒、抗旱、抗病和耐盐碱等能力, 例如, 以贝达为砧木可显著提升葡萄的抗寒性(李鹏程等, 2015); 二是优化品种结构, 对低效或劣质果园进行“改劣换优”, 快速实现品种更新与升级, 适用于大面积生产推广; 三是缩短育种周期, 可提前观察鉴定新品种; 四是用于引种鉴定, 使植株提早结果, 便于及早评估其适应性及经济性(崔丽贤等, 2016)。

葡萄改接的过程中, 通常采取春季硬枝嫁接和夏季绿枝嫁接两种方式。其中, 绿枝嫁接简便、快速、成活率高, 常用于葡萄老园改造和新品种引进扩繁(王维霞等, 2018)。绿枝嫁接的时间应确定在砧木和接穗均在半木质化时, 以髓部呈点状发白时效果较好, 北疆地区在 5 月下旬至 6 月上旬为宜(龚鹏等, 2004)。

在应用实践方面, 果树改接换种技术已被广泛应用于苹果(李琴, 2011)、梨(西传龙等, 2013)、桃(王贵州等, 2007)、葡萄(王秋萍, 2010)等多种果树的品种更新和品质提升。已有研究表明, 桃夏季高接换种显著提高了嫁接的成活率(陈为峰等, 2023); ‘新球蜜荔’、‘妃子笑’等 22 个荔枝品种(优株)与‘怀枝’进行高接换种的成活率均较高, 改接后生长良好, 果实品质和成熟期具有丰富的多样性(李冬波等, 2023); 对大龄葡萄‘夏黑’高接‘阳光玫瑰’, 成活率高达 96%, 经济效益快速提高(陈晶和等, 2021); 在 4 个葡萄品种上绿枝嫁接‘阳光玫瑰’, 结果表明, 在‘夏黑’上嫁接物候期较早, 新梢健壮, 单穗重和单粒重最高(辛守鹏等, 2022)。

1.4 GA₃、CPPU 和 TDZ 在果树生产上的应用

1.4.1 GA₃、CPPU 和 TDZ 的性质及其作用

赤霉素（GA₃）是一类四环双萜类植物激素，植物生长发育的各个阶段该物质均发挥着调控作用（Jusoh et al., 2019）。葡萄内源 GA₃ 生物合成的重要器官是种子，种子败育性状可受内源 GA₃ 含量的调控（刘苗苗等，2024）。由于葡萄对 GA₃ 高度敏感，外源施用 GA₃ 可以有效诱导葡萄胚珠败育，基于这一独特的生理特性，GA₃ 被广泛应用于有核葡萄的无核化诱导过程中（朱佩佩等，2023）。

氯吡脲（CPPU）是一种人工合成的苯基脲类细胞分裂素，通过激活细胞周期蛋白依赖性激酶（CDKs）和调控细胞壁代谢相关基因表达，促进细胞分裂和膨大，通过调整作物内源激素平衡来促进生长，活性约为 6-苄氨基嘌呤（6-BA）的 10 倍之多（唐艳领等，2025）。CPPU 与 GA₃ 配合使用可以用于葡萄的无核化及膨大处理，促进糖分积累，提高萜烯类、醛类香气组分含量，增加香气层次（梁静怡等，2025）。

噻苯隆（TDZ）是新型人工生长调节剂，最初用作棉花的脱落剂（袁传卫等，2014），因其极强的生物活性和细胞分裂活性，常作为膨果剂广泛应用于葡萄种植中，能促进果实膨大，增强植物光合作用和抗逆性，延缓植物衰老，改善作物品质，提高作物产量（郑直，2021）。

1.4.2 GA₃、CPPU 和 TDZ 对果实品质的影响

GA₃ 对葡萄果实品质的影响具有显著的浓度效应，其作用主要体现在果实膨大、糖酸平衡、次生代谢物以及种子发育等方面，对于无核葡萄品种，GA₃ 能抑制种子发育，减少种子重量或数量，从而降低涩味，提高食用舒适度（王庆莲等，2014）。有研究表明，GA₃ 能显著延长‘红地球’的生育期，促进细胞分裂和扩张，从而增加果粒的重量、体积和直径，使果粒更大、更圆（董永娟等，2022）；适量的 GA₃ 处理能刺激糖分的积累，并促进有机酸的转化，提高固酸比（Yuan et al., 2025）；GA₃ 处理通常会增加葡萄果皮中类黄酮、花青素和总酚含量，不仅改善葡萄的色泽，同时提高葡萄的抗氧化能力（董永娟等，2022）。有研究表明，单独使用 GA₃ 可以提高‘阳光玫瑰’的果形指数和耐拉力，但会降低葡萄的可溶性固形物含量，单独使用 GA₃ 一般达不到生产要求（杨亚蒙等，2026）。

CPPU 通过刺激细胞分裂，能显著增加果实的纵径、横径和单果重。有研究表明，CPPU 能显著增加果实大小、果实重量、果实硬度，并减少果实脱落和枝梗坏死（Zabadal

et al., 2006), CPPU 处理通常会增加果实的硬度,使果实更耐运输 (Curry et al., 1993)。单独喷施 CPPU 可以提高‘阳光玫瑰’果实的无核率,但 CPPU 可能抑制 ABA 的合成,间接影响香气物质的积累 (董洁等, 2025)。CPPU 与 GA_3 共同使用在‘妮娜皇后’品种上,能显著增加果实大小和重量,但同时也导致可溶性固形物含量下降,影响了风味 (侯旭东等, 2021)。若要保证葡萄风味,需严格控制 CPPU 的浓度或采用分阶段使用植物激素以保持果实大小与糖度之间的平衡 (王立如等, 2023)。

TDZ 是目前已知最有效的增大剂之一,能显著增加葡萄的单果重和果穗重量。有研究表明,TDZ 处理后的‘玫瑰香’和‘红艳无核’,穗重和单粒重显著提高 (Tecchio et al., 2024; 程大伟等, 2021); 使用 TDZ 可以提高‘阳光玫瑰’幼果果实优质率,在成熟期果实的横纵经、单粒重、可溶性糖、总酚含量均有提升 (李晓桂, 2024)。TDZ 会抑制乙烯合成,导致果实成熟过程显著延迟,虽有助于延长采收期,但是有研究表明,在‘优无核’、‘红地球’等品种中,使用 TDZ 处理导致糖度下降、酸度上升 (Tecchio et al., 2024); 还有研究表明, GA_3 和 TDZ 组合处理在抑制叶绿素降解方面表现显著,但同时也抑制了果实的着色并促进了苦涩味物质的积累,导致果实品质下降 (程大伟等, 2018)。

1.5 叶果比研究进展

20 世纪初期, Mason 和 Maskell 提出的“源库理论 (source-sink theory)”对提高植物生长、产量和品质提供了重要的指导意义 (MASON et al., 1928)。Ewans 秉承并发展了该理论来补充光合性能理论的缺陷,此后“源库理论”便成为了人们对作物产量形成规律的主流研究方向。在果树生长的不同时期,源库器官的也处于动态变化中 (谢兆森, 2010),在早期营养生长阶段,花蕾、茎尖和幼叶属于库器官;随着生长中心的变化,生殖生长阶段果实成为最主要的库 (唐薇等, 2006; 张涛等, 2012)。

“源库”关系是研究果树高产和优质的重要方向之一,果树“源库”关系的协调性可用“叶果比” (Leaf-to-fruit ratio, LFR) 来衡量 (彭丽丽等, 2012)。适宜的叶果比不仅有助于果树光合产物的积累和运输,减少树体养分消耗,还能促进内源激素的合成和利用,从而调控叶片的光合效率和果实的生长发育,进而提升果实品质 (程杰山等, 2014)。在果树生产中,常采用修剪、环剥、摘叶、疏果等栽培措施,改变源库的比例 (张瑞, 2017; 陈青, 2016)。

1.5.1 叶果比对果实大小的影响

有研究发现,叶果比对果实大小的影响大于果实营养物质的影响 (Famiani et al.,

1995)。对猕猴桃的研究发现,结果蔓叶果比 2-4: 1 满足果实正常生长,而叶果比过低,光合产物不足,果实显著变小(方金豹等,2002)。研究柑橘(*Citrus deliciosa* Ten.)类果实,发现较低的叶果比会降低果实的鲜重及直径(Antoine et al., 2016)。以蓝莓(*Vaccinium* spp.)为例,当叶果比较低时,其果实的鲜重、干重及直径都会减小;而随着叶果比的增加,果实会呈现异速生长现象(Jorquera-Fontena et al., 2018)。王鹏等(2022)研究发现不同叶果比对柑橘果实形态有显著影响,叶果比 100: 1 果实的单果重、纵径、横径、均显著高于 60: 1、80: 1;叶果比越低,果实越小。而张社南等(2019)对沙糖橘处理后观察到,叶果比低时,小果比例较少,成花率较高且秋梢萌发数量也较多。对香梨研究发现,叶果比(20-25): 1 或(25-30): 1 果实纵横径、单果重最优,过低或过高叶果比均不利果实发育(王乾等,2024)。

1.5.2 叶果比对果实内在品质的影响

大量研究都探讨了叶片数与果数对果树果实品质的影响。在果实的生长发育过程中,果实中有机养分的积累及其相互转化过程,依赖于叶片产生的碳水化合物的持续供给(Hernandez-Santana et al., 2021),这些碳水化合物会被输送到果实细胞中,进一步结合形成果实中的有机成分。摘叶会显著降低浆果质量,浆果成熟指标(可溶性固形物、酸度和花青素水平)受摘叶的影响也大于疏果(Martinez-Luscher et al., 2023),果实的发育和成熟也会因为碳供应不足而延迟(Covarrubias et al., 2021)。

此外,叶果比会通过影响果实的颜色、硬度、可溶性固形物含量以及糖酸比进而影响果实的成熟过程。在‘霞多丽’、‘赤霞珠’、‘北红’等葡萄上的研究表明,提高叶果比或降低负载量能提高果实中碳水化合物、花色苷等物质的含量,但产量下降;而叶果比过低或负载量过高,虽然会使产量升高,但导致果实中总糖、花色苷含量下降,并影响果实成熟度(豆一玲等,2010;鲍民胡等,2016;孟鑫等,2016)。低源库比条件下浆果花青素的积累减少(Bobeica et al., 2015; Wang et al., 2021a; Wang et al., 2022),较低的叶果比会延缓甜樱桃(*Cerasus avium* L.)及欧洲葡萄(*Vitis vinifera* L.)果实的着色过程,同时还会降低果实的可溶性固形物含量,从而延缓其成熟速度(Usenik et al., 2010; Parker et al., 2014)。有模型模拟表明,叶果比的降低对糖进口量的影响大于对糖代谢量和水分收支的影响,导致糖浓度的净下降(Dai et al., 2009),而叶果比由低变高之后,观察到的浆果鲜质量和干质量的恢复,以及在较小程度上的糖浓度的恢复,与虚拟桃子模型预测的趋势一致(Lescourret et al., 2005)。Zhang 等人(2025)的研究表明,在非碳限制条件下,代谢过程在通量方面几乎没有限制,从而最大限度地提高了生长速率和糖分积累。杜邦等(2011)研究表明,凯特芒果叶果比从 15: 1 增大到 30: 1,果实总酸含量逐渐减小、固酸比逐渐增大。在脐橙上的研究表明,源-库关系协调才能

达到果实优质、高产的目的 (Syvertsen et al., 2003)。也有研究认为“叶果比”对果实中营养物质的组成无显著影响, 相关研究已在猕猴桃 (方金豹等, 2001) 和油茶 (袁军等, 2015) 上报道。

修剪改变叶果比可影响果实品质与香气 (朱振家等, 2018)。研究表明, 提高叶果比能显著降低果实中苹果酸、酒石酸质量比, 显著提高可溶性糖、花色苷、总酚含量, 进而提高葡萄果实口感和香气品质 (李新海等, 2008; 张稳稳等, 2021; 孙霄等, 2019)。李洋等 (2022) 对‘玫瑰香’葡萄研究表明, 高叶果比可提高‘玫瑰香’葡萄果实香气物质总量, 促进萜烯类、醇酯类香气合成与相关基因表达。商佳胤等人 (2019) 研究表明, 合理夏季修剪优化叶果比, 显著影响芳樟醇、香叶醇等关键香气物质积累, 提升果实品质。高叶果比提升葡萄酒香气复杂度与整体品质, 显著影响葡萄与葡萄酒的香气合成前体、关键香气物质积累及感官品质 (Suklje et al., 2013)。因此, 开展不同叶果比对葡萄果实香气影响的研究, 提升葡萄的风味品质, 能增强市场竞争力, 为葡萄产业带来可观的经济效益。

1.6 5-氨基乙酰丙酸与叶面肥在生产上的应用

1.6.1 叶面肥的种类与功效

叶面肥是新型速效肥, 高肥效且绿色环保, 与土壤施肥相比, 效率更高、浪费更少, 能直接促进作物增产提质, 是农业绿色健康可持续发展的良好选择 (卞春松等, 2019; 许孜萍, 2024)。果树上常用的叶面肥种类繁多, 根据其主要成分和功能大致分为 5 大类, 分别为: 营养型、氨基酸型、腐殖酸型、调节型和复合型叶面肥 (张辰, 2020)。

磷酸二氢钾作为一种营养型叶面肥, 其中的磷是营养元素, 能够促进细胞分裂和花芽分化, 钾是品质元素, 促进光合作用产物的运输, 加速糖分积累和花青素形成。因此, 它在花期后和果实膨大期使用, 能显著提高坐果率, 并使果实着色均匀、色泽鲜艳 (齐翎子, 2025)。

氨基酸型叶面肥由氨基酸与矿质营养素等混合配制而成的叶面肥料, 氨基酸作为蛋白质构成的基本单位, 可以被植物叶片直接吸收, 补充营养快的同时, 还能促进植物光合作用, 改善风味, 因此氨基酸型叶面肥被广泛应用于植物生产当中 (胡松鹤, 2024)。

海藻肥作为一种调节型叶面肥, 主要是由以海藻活性成分为基础精制而成的有机肥料, 富含碘、钾、钠等矿质元素, 能够增强植株的生长活力和抗逆性, 延缓叶片衰老, 最终实现果实产量的增加 (徐石元, 2024), 并且相较于传统肥料, 海藻肥具有安全、无毒、对环境友好等特点 (谭星, 2019)。

黄腐酸作为一种腐殖酸型叶面肥，是一种含酚羟基、羧基和羰基等多种官能团的小分子类物质，具有促进植物生长发育、促进植物养分吸收和提高果实产量品质的作用（韦娜，2023）。

1.6.2 5-氨基乙酰丙酸的生理功能

5-氨基乙酰丙酸（5-ALA）作为卟啉生物合成的第一关键前体，参与叶绿素等重要分子的合成（Wu et al., 2019a）。在农业生产中，5-ALA 作为一种新型植物生长调节剂，一方面通过诱导叶片中叶绿素含量的增加和气孔开放度的扩大，提升叶片二氧化碳固定能力和光合捕光系统效率，从而显著提高植物的光合作用效率，达到促进有机物积累和能量转换的效果（Wang et al., 2019）；另一方面，5-ALA 通过调节植物激素平衡和后熟过程，抑制乙烯生物合成，延缓衰老，促进果实着色和营养物质的积累（张丽颖等，2015）。

1.6.3 叶面肥对叶片生理及果实品质的影响

叶面肥通过直接作用于果树的光合作用、营养代谢和生理激素调节，能够显著改善果树叶片的光合效率及抗逆性，并进一步提升果实的产量和品质。叶面肥对叶片生理的影响，主要体现在以下三点：叶面肥（尤其是含钙、硼和氨基酸的配方）能显著增加叶片的叶绿素含量（SPAD 值），降低叶绿素 a/b 比值，抑制光呼吸，从而提高净光合速率（Sava, 2014）；叶面肥能调节植物激素平衡，激活抗氧化酶系统，减少叶片因逆境导致的过早脱落（田永强等，2019）；叶面肥中的微量元素（如锌、铁、硒）能直接被叶片吸收，提升叶片中磷、钾、锰等营养元素的浓度，调节酶活性，促进蔗糖和氨基酸在叶片中的合成与运输（张枋分等，2024）。

叶面肥对果实品质的影响，主要体现在以下三点：叶面肥可提高果实促进果实糖分的积累，降低可滴定酸水平；施用叶面肥后果实中总酚、单宁、花青素、黄酮类及维生素 C 含量显著增加，果皮的着色更优，果实的抗氧化活性和营养保健价值更高；叶面肥能促进果实膨大，增加单果重，改善果皮厚度和硬度，缩短果实成熟期，使果实外观更加均匀、光亮，贮运性能显著提升（Xu et al., 2025）。已有研究表明，叶面肥直接喷施于果树叶片，能增加单果重，促进糖分积累，提高维生素 C 含量，显著降低可滴定酸含量（王斌，2025）；氨基酸型、腐殖酸型叶面肥能够显著促进‘阳光玫瑰’树体生长，茎基部粗度、叶面积较、叶片 SPAD 值、净光合速率较对照明显增加（凌凡舒等，2025）；叶面喷施氨基酸硒肥，可显著提高桃果实中水果类、植物类、脂肪类和甜香类香气的气味活性值（杨兴旺等，2025）。

1.6.4 5-氨基乙酰丙酸对叶片生理及果实品质的影响

5-ALA 作为一种植物生物刺激素,对植株叶片和果实的影响是多方面的。5-ALA 对叶片生理的影响主要集中在以下两个方面:一方面,5-ALA 能增加叶片的叶绿素含量,改善叶绿素荧光参数,从而提升光能的捕获效率和电子传递能力,提高叶片的光合效率,被认为是提升果实品质的基础 (Shen et al., 2012)。有研究表明,5-ALA 处理显著提高了苹果叶片叶绿素含量和净光合速率,并改善了光合色素的结构 (高晶晶等, 2013); NaCl 胁迫酸枣幼苗,喷施 5-ALA 能促进叶绿素合成,进而促进幼苗生长 (陈丽靓等, 2022)。另一方面,5-ALA 通过增强抗氧化酶活性,帮助叶片清除过氧化氢等活性氧,从而减轻逆境胁迫的损伤,维持细胞膜的完整性。在喜树幼苗盐害缓解研究中,5-ALA 提升了抗氧化酶活性并增加了叶绿素含量 (孟长军等, 2019); 喷施 5-ALA 能增强抗氧化酶活性,促进光合作用,提高酸枣的耐盐性 (常心怡等, 2019); 5-ALA 通过抑制 *zju-miR408a* 的表达上调靶基因 *POD* 的表达量达到清除活性氧的目的 (朱春梅等, 2025); 在苹果叶片研究中,5-ALA 显著提高了抗氧化酶活性并降低了丙二醛含量 (张丽颖等, 2015)。

5-ALA 对果实品质的影响主要集中在以下三个方面:首先,5-ALA 能促进光合作用产物的合成与积累,直接提升果实的甜度和可溶性固形物含量;在加工番茄研究中,5-ALA 提高了果实的糖分积累和硬度 (王俊文等, 2023)。其次,5-ALA 对能显著促进果实花青素的合成,使得果实的外观更加鲜艳、色泽均匀;例如,在苹果果实着色研究中,5-ALA 显著促进了苹果果实花青素的积累,使果皮着色提前且更鲜艳 (谢荔等, 2015); 在桃树果实着色机制研究中,5-ALA 也显示出类似的功效 (郭磊等, 2013); 经过 5-ALA 处理后的葡萄果实颜色指数 (CIRG) 及果皮花色苷相比对照显著提高 (姚会东等, 2022)。最后,5-ALA 能提高果实的抗氧化能力,延缓果实老化,在草莓采后冷藏期间,5-ALA 处理显著降低了 MDA 含量,抑制了细胞膜脂质过氧化,延缓了草莓果实腐烂 (Li et al., 2016)。

1.6.5 叶面肥与外源物质复配的协同效应

在实际生产中,叶面肥与外源物质复配已被证实能产生显著的协同效应,不仅提升营养利用率,还能调节植物生长、改善果实品质。有研究发现,磷酸二氢钾叶面肥复配 萘乙酸、细胞壁多糖和茉莉酸甲酯,可以不同程度提高金银花中绿原酸、木犀草苷等成分含量以及产量指标 (刘天亮等, 2021); 腐植酸叶面肥复配聚合氨基酸,可以提高番茄单株结果数、单果重和维生素 C 含量,显著降低硝酸盐含量 (王准等, 2022); 尿素和磷酸二氢钾复配,可以提高‘吉胜’李的单果重和产量,每亩增收 984.12 元 (武佳欣,

2023)；叶面肥复配黄腐酸钾和复硝酚钠喷施在黄瓜幼苗上，显著提高了黄瓜地上地下部分的干鲜重和净光合速率，有利于培育壮苗（李欣欣等，2023）；亚磷酸钾叶面肥与胺鲜·甲哌鎗复配，增强了棉花干物质的积累，提高了籽棉产量（吴刚等，2023）。

1.7 研究目的意义及技术路线

1.7.1 研究目的与意义

葡萄大树改接，是针对成年葡萄植株开展的高效品种更新技术，当原有品种因市场接受度低、抗逆性差、产量品质不佳等问题失去竞争力时，改接无需重新定植，可直接在原有健壮植株上嫁接优良品种，大幅缩短生长周期，通常 1-2 年便能恢复丰产，比新栽苗木提前 2-3 年进入盛果期（邵则夏，2009）。对种植户而言，改接稳定提升经济效益，还能利用原有根系优势，降低建园成本，减少土地闲置周期。对产业而言，改接技术能高效推动品种结构优化，助力区域打造差异化优势品种，避免同质化竞争。

‘阳光玫瑰’果实无核化处理及膨大技术是其商品性提升的关键，但传统处理配方易出现果皮锈斑、果梗硬化、空心果等问题。同时，新疆干旱、盐碱、强光照等特殊生态条件下，无核膨大配方的安全性、稳定性和适配性也需重新筛选与优化。

‘阳光玫瑰’品种对栽培管理较为严格，叶果比不当会导致果实糖度低、香气不足或果粒偏小；而新疆石河子地区属于典型的大陆性干旱气候，光照强、昼夜温差大、生育期短，盲目套用其他产区的叶果比标准难以达到优质果品要求。因此，筛选出最优叶果比，以平衡营养生长与生殖生长的关系，充分挖掘区域光热资源的优势。

5-氨基乙酰丙酸（5-ALA）作为新型植物生长调节物质，在提高光合效率、促进养分积累方面具有显著效果，但其与不同叶面肥的复配应用在‘阳光玫瑰’上尚未系统研究。研究表明，叶面肥复配外源物质能显著改善果实的内在品质指标，如糖分含量、可溶性固形物含量以及风味化合物的积累（杨凤英等，2021；郑强卿等，2021；蒲靖等，2022）。

本研究立足实际生产问题，针对不同品种改接‘阳光玫瑰’的栽培技术问题进行研究，明确不同品种改接的‘阳光玫瑰’生长发育差异；以此为基础，因地制宜地研究‘阳光玫瑰’关键栽培技术，筛选适宜新疆石河子地区‘阳光玫瑰’最佳无核膨大配方、最佳叶果比、5-ALA 和不同叶面肥的复配方案，以期为‘阳光玫瑰’栽培提质增效提供新的科学种植指导思路，对于‘阳光玫瑰’葡萄产业发展具有重要的意义。

1.7.2 技术路线

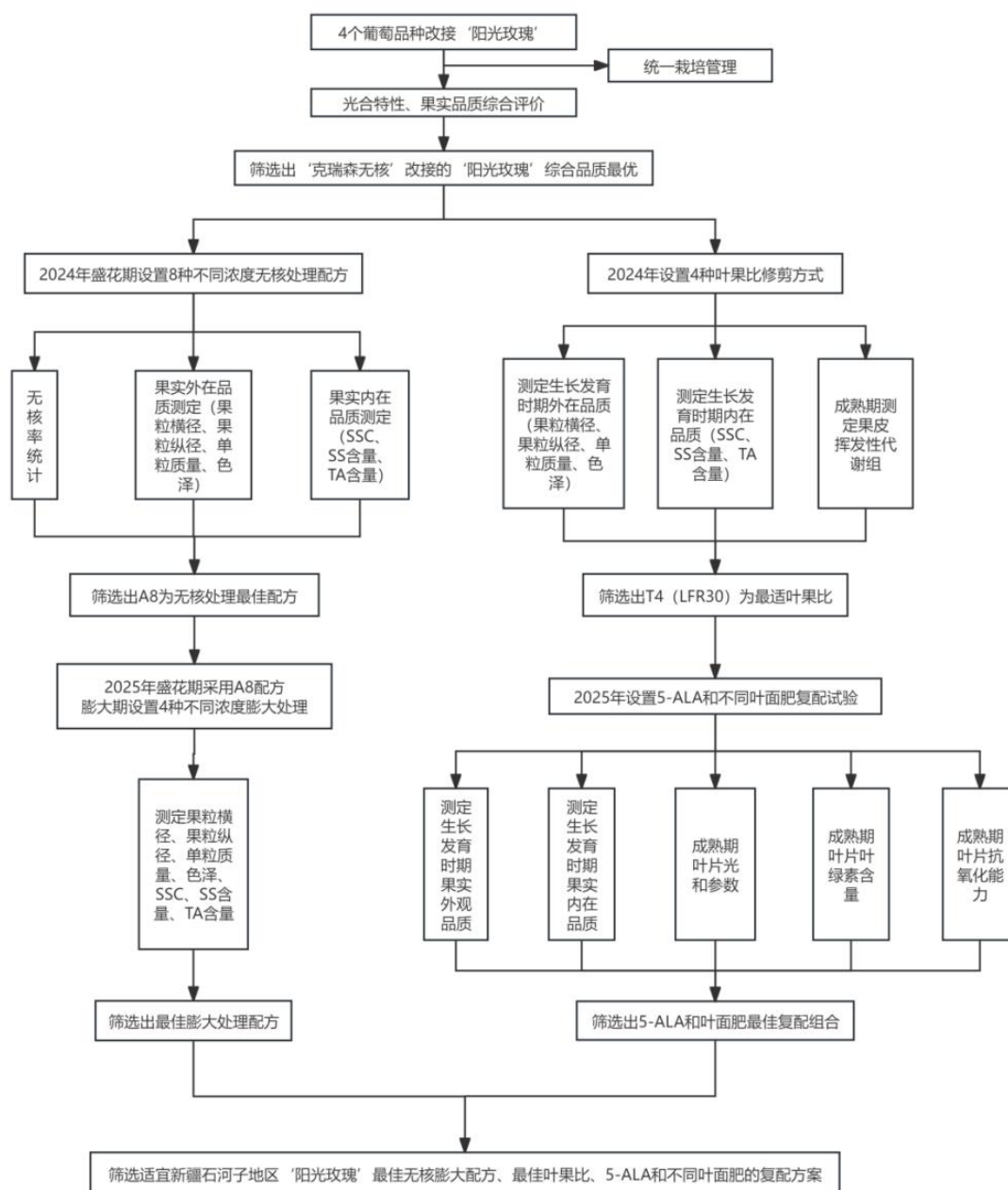


图 1-1 技术路线

Fig. 1-1 Technical route

第2章 4个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’光合特性和果实品质的差异分析

近年来,我国葡萄栽培品种更新迅速,部分老果园中的传统栽培品种因品质、抗性或成熟期等问题,已难以满足市场需求。‘阳光玫瑰’因其独特的玫瑰香味、高糖低酸、穗型美观、耐储运性、货架期长等特点,引起了众多专家学者和果农的关注,被视为葡萄园更新换代的首选品种(杨治元等,2017)。新疆石河子地区现有主栽品种中,‘维多利亚’(Victoria)果实含糖量、可溶性固形物含量低,品质不佳;‘无核紫’(Black Monukka)葡萄抗病性差、果粒难以着色;‘巨峰’(Kyoho)葡萄坐果率低;‘克瑞森无核’(Crimson seedless)成熟期极晚。由于栽植‘阳光玫瑰’幼苗进入丰产期时间较长(辛守鹏等,2022),故采用大树改接的方法进行换种(李育洲,2010),以实现品种的快速更新。

嫁接植株充分利用原栽品种的强大根系,两三年即可形成强大而丰满的树体,架面可恢复原状,很快进入丰产树龄,实现一年嫁接,两年结果,三年丰产见成效。本章通过对比分析4个原栽品种改接‘阳光玫瑰’后,植株光合特性与果实品质的差异,以期筛选出适宜改接‘阳光玫瑰’葡萄的优良砧木。

2.1 材料与方法

2.1.1 试验地概况

试验于2023年8-9月在石河子农科院葡萄研究所北疆示范基地(43°26'-45°20'N, 84°58'-86°24'E)进行。该试验地地势平坦,地处天山北麓中段,准噶尔盆地南部,自东南向西北倾斜,属典型的温带大陆性气候。年平均温度约为8℃,平均海拔高度为450 m,年平均降水量在125-208 mm,无霜期为169-172 d,一年中大于0℃的活动积温为4023-4118℃,年日照时数为2721-2818 h,日照充沛。供试土壤有机质含量为34.38 g·kg⁻¹,土壤pH值为8.15,碱解氮含量为50.38 mg·kg⁻¹,速效钾含量为127.67 mg·kg⁻¹,速效磷含量为34.05 mg·kg⁻¹。

2.1.2 供试材料

于2012年种植4个葡萄品种,分别为‘维多利亚’、‘巨峰’、‘无核紫’和‘克

瑞森无核’，均为自根苗，各品种植株健康、长势一致。2021年5月，采用绿枝嫁接法，对树龄9 a(年)的4个葡萄品种进行改接，分别记为SM/VI、SM/KY、SM/BM、SM/CR，至2023年均已进入盛果期。采用高“厂”字形水平叶幕方式进行整形，株行距为3.0 m×1.5 m，东西走向，葡萄树两侧铺设滴灌带，共4条，每侧各2条。

留梢密度及花果管理：新梢距离20-25 cm，单株留穗12-14穗，留果方式单枝单穗。花前修穗，保留穗尖20个左右的小穗轴；满花后1-2 d使用植物生长调节剂(25 mg·L⁻¹ GA₃+3 mg·L⁻¹ CPPU)进行第一次喷穗无核化处理；间隔10 d对果穗进行修整，每穗留果70-80粒，并在第一次植物生长调节剂溶液浓度的基础上加1 mg·L⁻¹ 噻苯隆对果穗进行第二次喷穗膨大处理；蘸穗时气温不超过30℃为宜，果实生长发育过程中未进行套袋处理。

2.2 测定指标及方法

2.2.1 果实外观品质测定

于果实成熟期(9月5日)，每个组合随机选取1株，每株随机摘取5穗果，3次重复。每穗果于中部随机选取10粒，用于果实外观品质的测定。使用游标卡尺测量果实纵径和横径，并计算果形指数(果形指数=果实纵径/果实横径)。单粒质量和单穗质量使用电子天平测定；根据果穗数和单穗质量折算单位面积产量(郑聪丽等，2023)。

2.2.2 果实内在品质测定

将上述测定外观品质的10粒果，与其对应果穗上的所有果实全部取下，揉碎过滤取汁，用于果实内在品质的测定。使用PAL-1手持测糖仪测定可溶性固形物含量(soluble solids content, SSC)，酸碱滴定法测定可滴定酸(titratable acid, TA)含量，紫外分光光度法快速测定维生素C(vitamin C, VC)含量，蒽酮试剂法测定可溶性糖(soluble sugar, SS)含量，考马斯亮蓝G-250染色法测定可溶性蛋白(soluble protein, SP)含量(高俊凤，2006)。根据可溶性固形物含量和可滴定酸含量计算固酸比(RTT)。

2.2.3 果皮颜色测定

使用CR-400便携式色差仪测定果皮色差的 L^* 、 a^* 、 b^* 值，并计算出色泽饱和度(Chroma, c^*) c^* 值(唐莎莎，2013)。果皮颜色指标中， L^* 值代表果皮亮度， L^* 值越大，果面越亮； a^* 值代表果皮红绿色差， $-a^*$ 到 $+a^*$ 变化过程代表绿色减退、红色增强；

b^* 值代表果皮黄蓝色差, $-b^*$ 到 $+b^*$ 变化过程代表蓝色减退、黄色增强。色泽饱和度 c^* 值越大, 颜色越纯(郭淑萍等, 2022)。

2.2.4 光合相关指标测定

2.2.4.1 光合指标测定

2023年8月下旬, 选择无云的晴天, 连续3 d, 在上午09:00-11:00, 采用Licor-6800光合仪(美国LI-COR公司生产)果穗以上第4枚叶的光合气体交换参数, 包括净光合速率(Net photosynthetic rate, P_n)、气孔导度(Stomatal conductance, G_s)、蒸腾速率(Transpiration rate, T_r)、胞间 CO_2 浓度(Intercellular carbon dioxide concentration, C_i); 并计算水分利用率(Water use efficiency, WUE)。

2.2.4.2 叶绿素含量测定

利用分光光度计法检测叶片的叶绿素含量(叶尚红等, 2004): 于8月30日, 每个组合随机选取4个结果枝, 每个结果枝选取果穗以上第6叶, 避开叶脉用直径6 mm的打孔器打取20个圆片, 3次重复, 混匀后称取0.2 g, 加入石英砂、95%无水乙醇研磨为匀浆, 定容于10 mL容量瓶, 置于暗处浸提24 h, 直至叶片完全变白后提取上清液分别测定665 nm、649 nm和470 nm波长下的吸光值。

2.2.4.3 叶绿素荧光测定

叶绿素荧光参数测定参照胡琳莉(2016)的方法: 于8月30日, 每个组合随机选取4个结果枝, 每个结果枝摘取果穗以上第6叶, 用湿棉球包裹整片叶, 黑暗处理1 h, 3次重复。使用PAM(调制叶绿素荧光仪, Modulated Chlorophyll Fluorometer), 测定慢速叶绿素荧光参数; 使用植物效率分析仪(M-PEA, Hansatech, UK), 测定快速叶绿素荧光参数。

2.3 数据处理

采用Microsoft Excel统计数据、绘制柱状图, 采用SPSS 25进行数据分析。

2.4 结果与分析

2.4.1 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’ 果实大小差异

从表 2-1 可以看出，SM/CR 的果粒纵径最大，为 28.47 mm，显著高于其他 3 种砧穗组合；SM/BM 的果粒横径最小，为 19.00 mm，显著低于 SM/CR。单粒质量以 SM/CR 最大，为 13.24 g；SM/BM 最小，为 9.99 g，二者差异显著。SM/BM 的单穗质量最小，为 682.82 g，显著低于其他 3 种砧穗组合，分别比 SM/KY、SM/VI、SM/CR 低 138.37 g、203.45 g、236.37 g。SM/BM 的每 666.7 m² 产量显著低于其他 3 种砧穗组合，每 666.7 m² 产量分别比 SM/VI、SM/KY、SM/CR 低 287.12、422.16、490.48 kg。

参照《葡萄种质资源描述规范和数据标准》（郭景南等，2010），果形指数在 1.1-1.3 之间，果实呈椭圆形；介于 1.0-1.1，果实呈圆形；小于 1.0 时，果实呈扁圆形。在这 4 种砧穗组合中，果形指数均在 1.1-1.3 之间，果粒呈椭圆形。市场普遍认为‘阳光玫瑰’的果粒为椭圆形，因此说明，这 4 种砧木对‘阳光玫瑰’果形的影响较小。

表 2-1 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’ 果实大小差异

Table 2-1 The fruit size of 'Shine Muscat' grafted on 4 grape varieties

砧穗组合 Stock-scion Combination	果粒纵径 Longitudinal diameter/mm	果粒横径 Transverse diameter/mm	果形指数 Shape index	单粒质量 Berry mass/g	单穗质量 Single cluster mass/g	产量 Yield/(kg·666.7 m ⁻²)
SM/VI	26.21 ± 0.76 b	21.45 ± 0.49 a	1.22 ± 0.01 a	11.57 ± 0.12 b	821.19 ± 33.50 a	1704.06 ± 69.51 a
SM/KY	25.35 ± 0.70 bc	21.68 ± 0.53 a	1.17 ± 0.05 a	10.86 ± 0.32 bc	886.27 ± 55.60 a	1839.10 ± 115.38 a
SM/BM	24.25 ± 0.12 c	19.00 ± 0.08 b	1.28 ± 0.01 a	9.99 ± 0.42 c	682.82 ± 16.39 b	1416.94 ± 34.00 b
SM/CR	28.47 ± 0.23 a	23.53 ± 1.13 a	1.21 ± 0.05 a	13.24 ± 0.31 a	919.19 ± 37.15 a	1907.42 ± 77.09 a

注：同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著（ $p<0.05$ ）。下同。
Note: Means followed by different small letters in the same column are significantly difference $p<0.05$. The same below.

2.4.2 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’ 果实色泽差异

由表 2-2 可知，SM/CR 的 L^* 值最大，为 50.79，显著高于其他 3 种砧穗组合； a^* 值以 SM/KY 最小，为 -3.74，果皮绿色较深，以 SM/CR 最大，为 -2.30，显著高于 SM/VI 和 SM/KY，果皮绿色较浅。SM/CR 的 b^* 值最小，果皮黄色偏浅；SM/BM 的 c^* 值最高，显著高于 SM/CR，果皮颜色较纯。

表 2-2 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’ 果实色泽差异

Table 2-2 Fruit color parameters of 'Shine Muscat' grafted on 4 grape varieties

砧穗组合 Stock-scion Combination	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	<i>c</i> *
SM/VI	49.64 ± 0.29 b	-3.60 ± 0.58 b	12.14 ± 0.31 b	12.68 ± 0.45 ab
SM/KY	48.46 ± 0.44 c	-3.74 ± 0.20 b	13.49 ± 0.26 ab	14.00 ± 0.27 ab
SM/BM	49.13 ± 0.31 bc	-2.78 ± 0.03 ab	14.22 ± 0.95 a	14.49 ± 0.93 a
SM/CR	50.79 ± 0.27 a	-2.30 ± 0.21 a	12.05 ± 0.41 b	12.30 ± 0.44 b

2.4.3 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’ 果实内在品质差异

由表 2-3 可知，SM/CR 的可溶性固形物含量最高，为 21.63%，显著高于其他 3 种砧穗组合。可滴定酸含量由高到低依次为 SM/KY>SM/VI>SM/CR>SM/BM，分别为 0.41、0.39、0.35、0.32%，各组合间差异显著。SM/CR 的固酸比显著高于 SM/BM，SM/CR 的固酸比为 62.08，SM/BR 的固酸比为 45.28；SM/KY、SM/VI 的固酸比无显著差异，SM/KY 的固酸比最低，为 37.33；维生素 C 含量各组合间差异显著，以 SM/CR 最高，为 12.15 mg·kg⁻¹，以 SM/BM 最低，为 10.52 mg·kg⁻¹，差异显著。可溶性蛋白含量以 SM/KY 最高，为 11.74 mg·kg⁻¹，显著高于其他 3 种砧穗组合，分别比 SM/CR、SM/BM、SM/VI 高 0.09、0.33、0.80 mg·kg⁻¹。

表 2-3 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’ 果实内在品质的差异

Table 2-3 The Internal Quality Differences of 'Shine Muscat' Fruit Grafted on 4 Grape Varieties

砧穗组合 Stock-scion Combination	<i>w</i> （可溶性固形物） Soluble solid content/%	<i>ρ</i> （可滴定酸） titratable acid content/%	固酸比 Solid to acid ratio	<i>w</i> （维生素 C） Vitamin C content/ （mg·kg ⁻¹ ）	<i>w</i> （可溶性蛋白） Soluble protein content/（mg·kg ⁻¹ ）
SM/VI	14.87 ± 0.54 b	0.39 ± 0.01 b	38.41 ± 1.59 c	11.70 ± 0.08 b	10.94 ± 0.01 d
SM/KY	15.20 ± 0.06 b	0.41 ± 0.01 a	37.33 ± 0.30 c	11.08 ± 0.05 c	11.74 ± 0.03 a
SM/BM	14.40 ± 0.12 b	0.32 ± 0.01 d	45.28 ± 0.30 b	10.52 ± 0.13 d	11.41 ± 0.01 c
SM/CR	21.63 ± 0.15 a	0.35 ± 0.01 c	62.08 ± 0.31 a	12.15 ± 0.01 a	11.65 ± 0.03 b

2.4.4 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’ 叶绿素含量差异

由图 2-1 (A) 所示，叶绿素 a（Chl a）含量以 SM/CR 最高，为 2.60 mg·g⁻¹，而后依次为 SM/VI>SM/KY>SM/BM，分别为 2.40、2.23、1.79 mg·g⁻¹。由图 2-1 (B) 、2-1 (C) 可知，SM/CR、SM/VI 的叶绿素 b（Chl b）、总叶绿素（Chl a+b）含量显著高于 SM/KY

和 SM/BM, SM/CR 的 Chl b、Chl a+b 含量均最高, 分别是 1.35 、 $3.95 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, SM/BM 的 Chl b、Chl a+b 含量均最低, 分别是 0.68 、 $2.45 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$; SM/CR 的 Chl a+b 含量分别比 SM/VI、SM/KY、SM/BM 高 0.43 、 1.03 、 $1.50 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。由图 2-1 (D) 表示各砧穗组合间叶绿素 a/b (Chl a/b) 的值, 由高到低排序为 SM/KY、SM/BM、SM/VI、SM/CR, 分别为 3.25 、 2.70 、 2.14 、 1.98 。由此可知, SM/CR 的 Chl a、Chl b、Chl a+b 含量均最高。

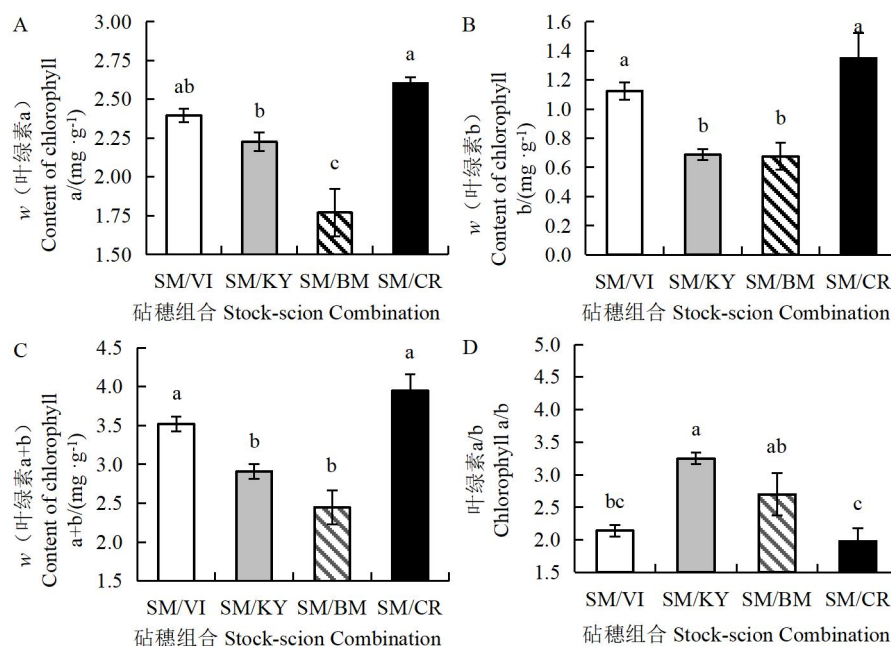


图 2-1 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’叶绿素含量的差异

Fig. 2-1 Chlorophyll contents of ‘Shine Muscat’ grafted on 4 grape varieties

注: 不同小写字母表示差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

Note: Different small letters show significant difference ($p < 0.05$). The same below.

2.4.5 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’光合指标差异

植物的净光合速率 (P_n) 直接决定了植株的生长速度和产量。由图 2-2 (A) 可知, 4 种砧穗组合的 P_n 表现为, SM/CR 最高, 为 $15.45 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 分别比 SM/VI、SM/KY、SM/BM 显著提高 1.73 、 1.91 、 $5.67 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

蒸腾速率 (T_r) 反映了植物的水分状况和生理状态。由图 2-2 (B) 可知, 4 种砧穗组合的 T_r 表现为, SM/CR 最高, 为 $3.85 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 其次是 SM/KY, 为 $3.76 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 两组组合间无显著差异, SM/VI、SM/BM 的 T_r 分别为 3.45 、 $2.85 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 两组组合间差异显著。

CO_2 是植物光合作用的主要碳源, 通过光合作用转化为有机物, 是构建生物体的物质基础。由图 2-2 (C) 可知, 胞间 CO_2 浓度 (C_i) 由高到低依次为 SM/CR > SM/KY > SM/VI

>SM/BM, 分别为 279.02、256.44、237.27、229.37 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

气孔导度 (G_s) 作为植物叶片与外界进行气体交换的主要通道, 直接影响植物的光合作用、呼吸作用以及蒸腾作用。由图 2-2 (D) 可知, 气孔导度 (G_s) 以 SM/BM 最低, 为 $0.08 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 显著低于 SM/CR、SM/VI, 分别低 0.11、0.08 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

水分利用率(WUE)是蒸腾消耗单位质量水所制造的干物质量, 受到净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r)的影响。由图 2-2 (E) 可知, SM/CR、SM/VI 的 WUE 显著高于 SM/KY、SM/BM, SM/CR 的 WUE 最高, 为 $4.01 \text{ mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$, SM/BM 最低, 为 $3.43 \text{ mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。以上结果说明由‘克瑞森无核’改接的‘阳光玫瑰’相较于其他 3 种砧穗组合, 叶片光合能力较强。

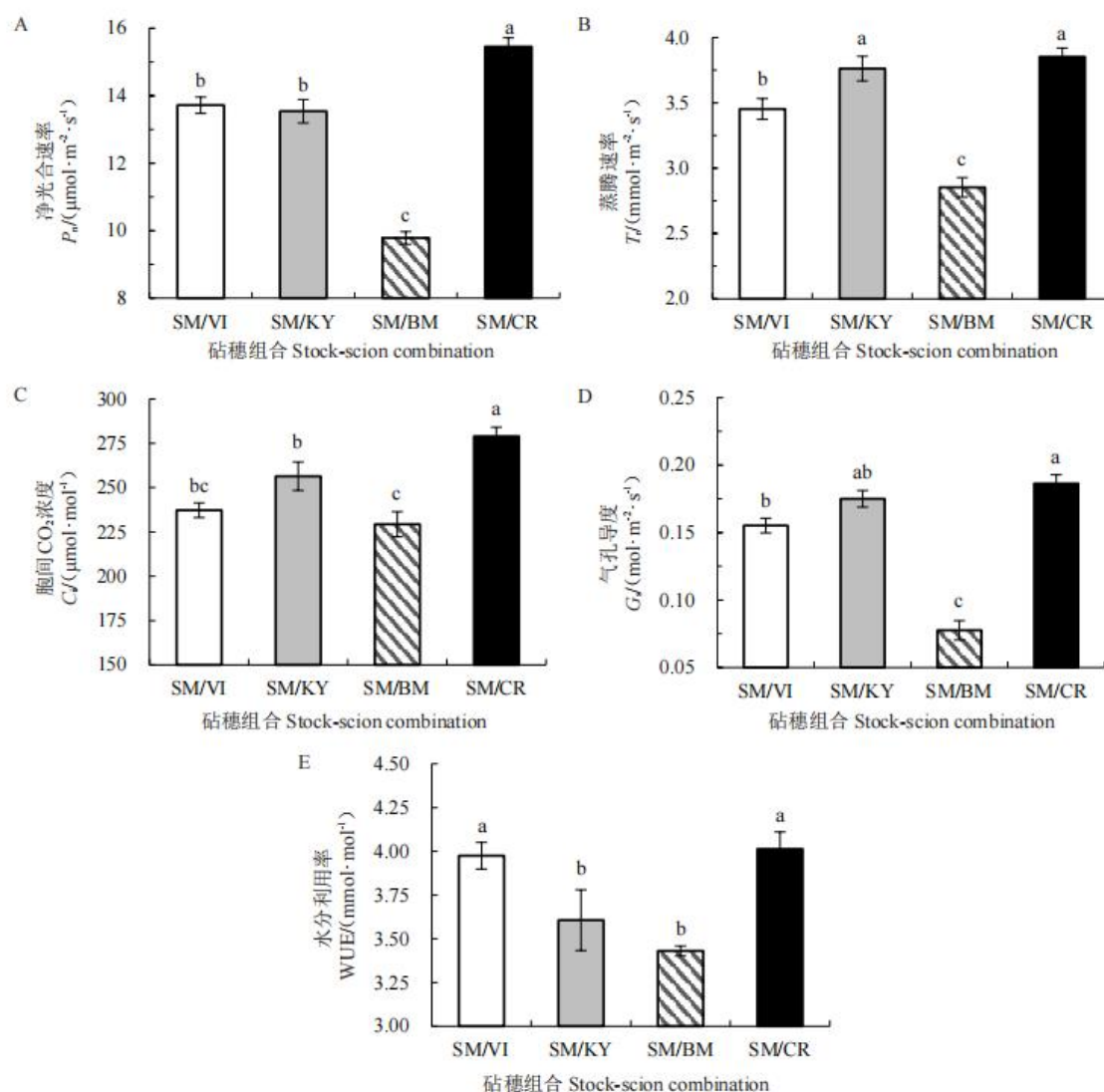


图 2-2 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’光合指标差异

Fig. 2-2 Differences in photosynthetic indexes of ‘Shine Muscat’ grafted on 4 grape varieties

2.4.6 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’ 叶绿素荧光参数差异

将叶绿素荧光参数标准化后，绘制雷达图，由图 2-3 所示，SM/CR 的 *PSII* 的最大光能转换效率（maximum photochemical efficiency of *PSII*, F_v/F_m ）、光化学淬灭系数（photochemical quenching coefficient, qP ）高于其他 3 种砧穗组合高，初始荧光（initial fluorescence, F_0 ）低于其他 3 种砧穗组合，差异显著，分别比 SM/BM、SM/KY、SM/VI 低 38.89%、32.01%、30.38%。SM/BM 的最大荧光产量（maximum fluorescence yield, F_m ）高于其他 3 种砧穗组合。SM/KY 的 *PSII* 的实际光化学效率（actual photochemical efficiency of *PSII*, $Y(II)$ ）高于其他 3 种砧穗组合。SM/VI 的非光化学淬灭系数（non-photochemical quenching coefficient, $Y(NPQ)$ ）高于其他砧穗组合，差异显著。

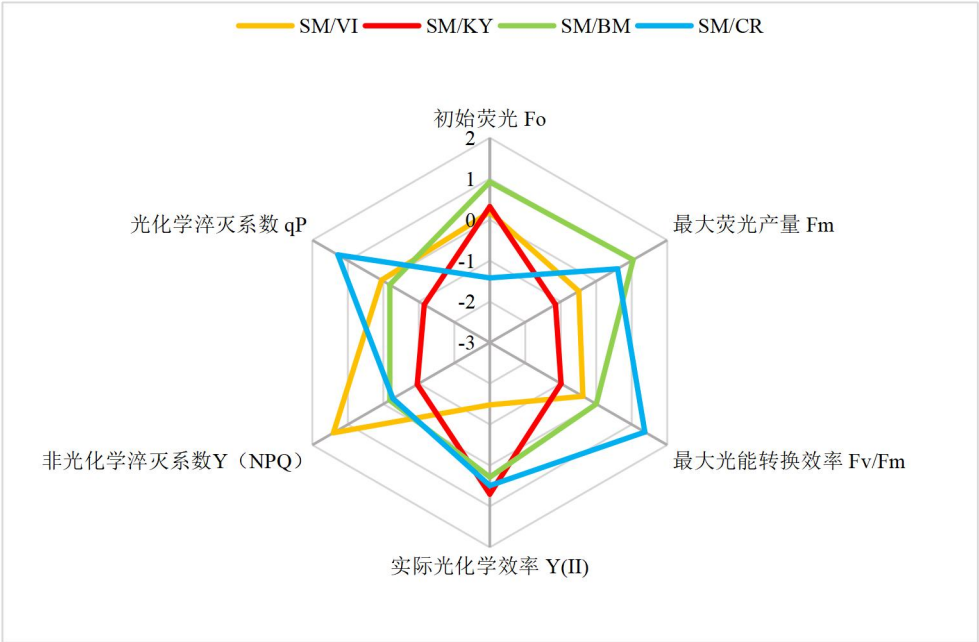


图 2-3 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’ 叶绿素荧光参数差异

Fig. 2-3 Chlorophyll fluorescence parameters of ‘Shine Muscat’ grafted on 4 grape varieties

2.4.7 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’ 光合特性和果实品质综合评价

对 4 个砧穗组合的 9 个指标进行主成分分析，如表 2-4 所示，发现前两个主成分的特征值分别为 6.054、1.489，提取出的 2 个主成分，累积方差贡献率达 83.810%，对应的方差贡献率分别为 67.264%、16.547%，表明这 2 个主成分具有较强的信息代表。

由表 2-5 可知，通过主成分综合模型计算综合得分，根据综合得分对 4 种砧穗组合进行排序：SM/CR>SM/KY>SM/VI>SM/BM。

表 2-4 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’光合特性和果实品质主成分分析

Table 2-4 Principal component analysis of photosynthetic characteristics and fruit quality of 'Shine Muscat'

grafted on 4 grape varieties		
指标	主成分 Principal component	
Indexes	PC1	PC2
叶绿素 a+b	0.926	0.124
Chlorophyll a+b		
蒸腾速率	0.827	0.327
Transpiration rate (T_r)		
净光合速率	0.949	0.216
Net Photosynthetic Rate (P_n)		
胞间 CO ₂ 浓度	0.645	0.678
Intercellular carbon dioxide (C_i)		
气孔导度	0.883	0.224
Stomatal conductance (G_s)		
固酸比	0.300	0.753
Solid acid ratio (RTT)		
维生素 C	0.944	0.119
Vitamin C (VC)		
可溶性蛋白	-0.087	0.879
Soluble protein (SP)		
可溶性固形物含量	0.611	0.714
Soluble solids content (SSC)		
特征值	6.054	1.489
Eigenvalue		
贡献率 (%)	67.264	16.547
Contribution rate		
累计贡献率 (%)	67.264	83.810
Cumulative contribution rate (%)		

表 2-5 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’葡萄综合评价

Table 2-5 Comprehensive evaluation of Shine Muscat grafted on 4 grape varieties

砧穗组合	主成分 1 得分	主成分 2 得分	综合得分	排名
Stock-scion	Principal component 1 score	Principal component 2 score	Comprehensive score	Rank
Combination				
SM/VI	2.66	0.21	2.87	3
SM/KY	2.53	0.41	2.95	2
SM/BM	0.54	0.21	0.75	4
SM/CR	4.42	0.73	5.15	1

2.5 讨论

砧木是嫁接果树的基础，对接穗品种的生长发育及果实品质有重要影响（胡利明等，2006）。已有研究表明，8B 砧木嫁接‘阳光玫瑰’增加其果实大小和硬度，1103P、5BB 砧木嫁接后果实固酸比增大（沈乐意等，2023）；郑碧霞等（2023）研究表明，贝达砧木嫁接‘阳光玫瑰’果实可溶性固形物和可溶性糖含量最高，果实成熟期早于 SO4、5BB 砧木 1-2 周。固酸比是反映果实口感及成熟度的重要指标。本研究中，SM/CR、SM/KY、SM/VI 的单粒质量显著大于 SM/BM，其中 SM/CR 可溶性固形物含量较高，达 21.63%，固酸比最高达 62.08，说明以‘克瑞森无核’做砧木改接‘阳光玫瑰’果实成熟度较高，口感更甜，风味更佳。

光合作用是影响树体生长及果实品质重要因素之一。净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率是反映光合作用的重要指标（焦念元等，2015；张秀珍等，2022）。在‘霞多丽’葡萄上的研究表明，不同砧木对树体长势和光合特性均有显著影响，其中以 1103P-CFC57-34、1103P-CFC60-30 作砧木的净光合速率、气孔导度较高，光合效率明显高于其他砧木的嫁接树（李双岑等，2016）。笔者在本研究中发现，以‘克瑞森无核’作砧木改接‘阳光玫瑰’，净光合速率、蒸腾速率、胞间二氧化碳和气孔导度均高于其他 3 种砧穗组合。由此可见，以‘克瑞森无核’作砧木改接‘阳光玫瑰’叶片光合能力较强。

叶绿体是植物进行光合作用的场所，叶绿素的含量与植株的光合作用之间呈正相关（苏晓琼等，2013）。叶绿素含量能够反映出植株对外部光照的适应性和光合作用的强度，高叶绿素含量有助于维持高的光合速率，从而改善植株的光合速率（刘兆新等，2017；陆志峰等，2016）。许凯等（2023）研究发现，砧木‘SA15’显著提升了‘赤霞珠’和‘脆

光’叶片的净光合速率，提高了叶片中叶绿素含量。笔者在本研究中发现，SM/CR的Chl a、Chl b、Chl a+b含量均显著高于SM/BM。对试验数据进行相关性分析，发现Chl a+b含量与影响光合速率的指标 P_n 、 T_r 、 C_i 、 G_s 均呈显著正相关，这与贾瑞瑞等（2023）关于不同砧木对楸树嫁接苗生长及光合特性影响的研究结果一致。说明叶片光合能力的强弱受Chl a+b含量影响较大，这可能是导致SM/CR叶片光合能力较强的直接原因。

植物叶绿素荧光参数与植物光合作用关系密切，是研究植物光合作用的有效探针（Baker, 1991），可快速、准确、无损伤地检测植物的光合作用状况，已广泛应用在植物光合水平的相关研究中（Guanter et al., 2014）。*PSII*最大光能转换效率（ F_v/F_m ）被认为是叶片光合效率的重要衡量指标，反映了植物叶片利用光能的能力（武传兰等，2012；Sarijeva et al., 2007）。在叶片吸收的光能过程中，高*PSII*实际光化学效率 $Y(II)$ 通常意味着高光合效率（蔡倩等，2020）。王强等（2015）对不同砧木嫁接辣椒叶绿素荧光参数的研究表明，以‘佳伴辣椒’品种作为砧木嫁接‘陇椒2号’的*PSII*最大光能转换效率（ F_v/F_m ）显著高于‘dw-21’/‘陇椒2号’，具有潜在的最大光合能力。笔者在本研究中发现，SM/CR的 F_v/F_m 较高，SM/KY的 $Y(II)$ 较高，说明SM/CR、SM/KY叶片利用光能的能力较强。初始荧光（ F_0 ）是PS反应中心处于完全开放时的荧光产量（Murchie et al., 2013）， F_m 可反映*PSII*反应中心的电子传递情况。 F_0 体现出植物对光能的利用效率以及光反应中心保护机制的变化， F_0 越高说明植物对光能的利用效率越低，反之则越高（Wan et al., 2020）。刘春燕等（2023）研究表明，9个砧穗组合嫁接苗叶片的初始荧光（ F_0 ）存在显著性差异。笔者在本研究中发现，SM/BM的初始荧光（ F_0 ），最大荧光（ F_m ）均高于其他3种砧穗组合，差异显著，说明其光能利用效率较弱；而*PSII*反应中心电子传递的能力较强。

2.6 本章小结

通过比较4种砧穗组合生长发育差异，结果表明：在供试的4种砧穗组合中，‘克瑞森无核’改接的‘阳光玫瑰’（SM/CR）果实单粒质量、单穗质量及单位面积产量较高，同时改善了果实色泽，使其果皮更亮、绿色更浅；在内在品质上，SM/CR果实具有最高的固酸比、可溶性固形物和维生素C含量，综合表现出更优的果实品质；此外，SM/CR组合的叶片叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素含量以及光合特性指标、 F_v/F_m 较高，光合能力较强；而‘无核紫’作砧木改接的‘阳光玫瑰’ F_0 、 F_m 较高，光能利用效率较弱。通过主成分分析也进一步说明了SM/CR砧穗组合的综合表现最佳，因此，‘克瑞森无核’是4个葡萄品种中改接‘阳光玫瑰’的最适品种。

第3章 植物生长调节剂对‘阳光玫瑰’果实无核及品质的影响

‘阳光玫瑰’葡萄果实有核、果实偏小、果肉偏软、易生果锈，需使用植物生长调节剂对其进行无核膨大处理（王莎等，2019）。GA₃作为葡萄无核化与膨果的主剂，在一定浓度范围内，随着施用浓度的升高，果实无核率随之提高，单粒质量也相应增大（赵荣华等，2016；刘金标等，2018；郑秋玲等，2021）。CPPU常与GA₃混用，在盛花期使用适当浓度的GA₃与CPPU混合液浸蘸葡萄花序，其效果优于单独使用GA₃的处理（李海燕等，2016）。此外，在花期使用GA₃和TDZ混合液处理‘阳光玫瑰’葡萄，其单粒质量、可溶性固形物含量均大于GA₃和CPPU处理（夏丽娟等，2021；Qi et al., 2021）。

本章节以‘阳光玫瑰’/‘克瑞森无核’为试材，与2024年盛花期采用8种不同浓度的植物生长调节剂组合进行蘸穗处理，在成熟期采集果实进行无核率统计及果实品质的测定分析，筛选无核处理的最佳配方；2025年进行膨大试验，盛花期采用无核处理最佳配方，膨大期采用4种不同浓度的植物生长调节剂组合进行蘸穗处理，成熟期测定果实品质，筛选膨大处理最佳配方。

3.1 试验材料与试验设计

3.1.1 试验地概况

同第二章 2.1.1

3.1.2 试验设计

以‘克瑞森无核’改接的‘阳光玫瑰’为试材，记为SM/CR。分别于2024年进行无核处理、2025年进行膨大处理，每个处理设3个重复，每个重复5穗葡萄。

2024年进行无核化处理：当全园满花后，在48 h内完成保果。采用8种不同浓度的植物生长调节剂组合，蘸穗处理，以蘸清水作对照（CK）；蘸穗在晴朗无雨的上午，气温不超过30℃为宜，蘸穗时间3-5 s，抖动果穗去除果穗上多余的药液。保果后14 d，使用25 mg·L⁻¹ GA₃+3 mg·L⁻¹ CPPU蘸穗膨果（表3-1）。

2025年进行膨大处理：盛花期浓度处理为A8配方，保果后14 d，采用4种不同浓

度的植物生长调节剂组合，蘸穗膨果，以蘸清水作对照（CK）（表 3-2）。

表 3-1 无核处理药剂配比

Table 3-1 Seedless treatments agent ratio

处理	满花后 48 h 内	保果处理 14 d 后
Treatment	24 h post-inoculation	At 14 days after fruit retention treatment
CK	清水	清水
A1	25 mg·L ⁻¹ GA ₃ +2 mg·L ⁻¹ CPPU	
A2	25 mg·L ⁻¹ GA ₃ +4 mg·L ⁻¹ CPPU	
A3	25 mg·L ⁻¹ GA ₃ +1.5 mg·L ⁻¹ TDZ	
A4	25 mg·L ⁻¹ GA ₃ +3 mg·L ⁻¹ TDZ	
A5	25 mg·L ⁻¹ GA ₃ +2 mg·L ⁻¹ CPPU+1.5 mg·L ⁻¹ TDZ	25 mg·L ⁻¹ GA ₃ +3 mg·L ⁻¹ CPPU
A6	25 mg·L ⁻¹ GA ₃ +2 mg·L ⁻¹ CPPU+3 mg·L ⁻¹ TDZ	
A7	25 mg·L ⁻¹ GA ₃ +4 mg·L ⁻¹ CPPU+1.5 mg·L ⁻¹ TDZ	
A8	25 mg·L ⁻¹ GA ₃ +4 mg·L ⁻¹ CPPU+3 mg·L ⁻¹ TDZ	

表 3-2 膨大处理药剂配比

Table 3-2 Swelling treatments agent ratio

处理	满花后 48 h 内	保果处理 14 d 后
Treatment	24 h post-inoculation	At 14 days after fruit retention treatment
CK	清水	清水
B1		30 mg·L ⁻¹ GA ₃ +3 mg·L ⁻¹ CPPU+5000 倍保美灵
B2		30 mg·L ⁻¹ GA ₃ +3 mg·L ⁻¹ CPPU+10000 倍保美灵
B3	25 mg·L ⁻¹ GA ₃ +4 mg·L ⁻¹ CPPU+3 mg·L ⁻¹ TDZ	30 mg·L ⁻¹ GA ₃ +5 mg·L ⁻¹ CPPU+5000 倍保美灵
B4		30 mg·L ⁻¹ GA ₃ +5 mg·L ⁻¹ CPPU+10000 倍保美灵

3.2 测定指标及方法

3.2.1 无核率统计

无核率测定：成熟期每种处理随机选取 3 串葡萄，剖开统计无核情况。

无核率=（无核果粒数/果粒总数）×100%

3.2.2 果实品质指标测定

同第二章 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3

3.3 数据处理

同第二章 2.3 小节

3.4 结果与分析

3.4.1 不同无核处理对‘阳光玫瑰’果实无核率的影响

由表 3-3 可知, 不同处理果实无核率均达到 80%以上, 其中, 盛花期 48 h 内使用 25 GA₃+4 CPPU+3 TDZ mg·L⁻¹ 处理果实的无核率最高, 达 89.0%; 盛花期 48 h 内使用 25 GA₃+3 TDZ mg·L⁻¹ 处理次之, 无核率达 88.5%。

3.4.2 不同无核处理对‘阳光玫瑰’果实外观品质的影响

3.4.2.1 不同无核处理对‘阳光玫瑰’果实大小的影响

由表 3-3 可知, 不同无核处理均显著提高了‘阳光玫瑰’果实横径和纵径。A8 和 A6 处理果实横径分别达 25.84、25.73 mm, 与其他处理相比差异显著 ($P<0.05$), 添加噻苯隆 (TDZ) 的组合, 其果实横径均显著高于赤霉素 (GA₃) + 氯吡脲 (CPPU) 组合。A8 处理果实纵径达 28.64 mm, 与其他处理相比差异显著 ($P<0.05$)。CK 和 A2 处理果形指数最高, 分别为 1.18、1.17, 显著高于其他处理; 添加 TDZ 的处理 (A3-A8), 果形指数均小于 CK 和 A2 处理, 其中, A6 处理果形指数最小, 为 1.10, 添加 TDZ 处理的果实横径相对较大, 果形更趋近圆形。不同无核处理均显著提高了‘阳光玫瑰’单粒质量, 单粒质量由高到低排序为: A8>A6>A4>A7>A5>A3>A2>A1>CK, 较 CK 分别提高了 6.37、6.14、5.96、5.47、5.36、5.26、4.68、4.44 g, 其中, A8 和 A6 处理果实单粒重分别达 12.89、12.66 g, 与 A4 处理无显著差异, 但与其他处理相比差异显著 ($P<0.05$)。说明, GA₃、CPPU 和 TDZ 配合使用更有利于果实增大。

综上所述, 添加 TDZ 的处理 (A3-A8) 在促进果实横径纵径增长与单粒重提升方面的整体成效优于 GA₃+CPPU 组合 (A1、A2)。其中, A8 和 A6 处理的效果较为显著, 能够有效促进‘阳光玫瑰’果实的膨大。

表 3-3 不同处理对‘阳光玫瑰’葡萄果实大小和无核率的影响

Table 3-3 Effects of different treatments on fruit size and seedless rate of 'Shine Muscat' grape fruits

处理 Treatment	果粒横径 Transverse diameter/mm	果粒纵径 Longitudinal diameter/mm	单粒质量 Berry mass/g	果形指数 Shape index	无核率 Seedless rate%
CK	19.32 ± 0.34 d	22.84 ± 0.15 e	6.52 ± 0.32 d	1.18 ± 0.02 a	-
A1	23.83 ± 0.16 c	27.03 ± 0.09 d	10.96 ± 0.38 c	1.13 ± 0.01 b	82.2
A2	23.62 ± 0.14 c	27.64 ± 0.16 c	11.20 ± 0.50 c	1.17 ± 0.01 a	83.6
A3	25.09 ± 0.16 b	28.18 ± 0.17 b	11.78 ± 0.15 b	1.12 ± 0.02 bc	85.1
A4	25.32 ± 0.15 b	28.11 ± 0.10 b	12.48 ± 0.18 a	1.11 ± 0.00 cd	88.5
A5	25.05 ± 0.13 b	27.77 ± 0.15 c	11.88 ± 0.15 b	1.11 ± 0.00 cd	86.4
A6	25.73 ± 0.25 a	28.22 ± 0.08 b	12.66 ± 0.18 a	1.10 ± 0.01 d	88.0
A7	25.26 ± 0.09 b	28.34 ± 0.10 b	11.99 ± 0.13 b	1.12 ± 0.01 bc	87.2
A8	25.84 ± 0.18 a	28.64 ± 0.32 a	12.89 ± 0.26 a	1.11 ± 0.01 cd	89.0

3.4.2.2 不同无核处理对‘阳光玫瑰’果实色泽的影响

由表 3-4 可知, 处理 A1 与 CK 的果实亮度无显著差异, 其他处理果实亮度均显著高于 CK; A6 处理果皮亮度最大, 为 41.86, 其次为 A7 和 A8 处理, 果皮亮度分别为 41.58、41.40, A6、A7 和 A8 处理无显著差异。不同无核处理果皮色相 a^* 值均显著低于 CK。A8 处理果皮色相 a^* 值最小, 为 -3.75, 其次是 A4 和 A6 处理, 三者无显著差异。A8 处理果皮色相 b^* 值最大, 为 10.31; A8 处理色泽饱和度 c^* 最大, 为 10.97。

表 3-4 不同处理对‘阳光玫瑰’葡萄果皮颜色的影响

Table 3-4 Effects of different treatments on peel color of 'Shine Muscat' grape fruits

处理 Treatment	L^*	a^*	b^*	c^*
CK	39.45 ± 0.22 e	-2.36 ± 0.30 a	8.56 ± 0.24 d	8.88 ± 0.31 e
A1	39.77 ± 0.25 e	-2.80 ± 0.23 b	8.68 ± 0.21 d	9.12 ± 0.27 e
A2	40.43 ± 0.37 d	-3.16 ± 0.23 bc	9.43 ± 0.33 c	9.95 ± 0.24 d
A3	40.62 ± 0.14 d	-3.33 ± 0.17 cd	9.57 ± 0.09 c	10.13 ± 0.12 cd
A4	41.26 ± 0.24 bc	-3.74 ± 0.17 d	10.19 ± 0.24 a	10.85 ± 0.29 a
A5	40.84 ± 0.17 cd	-3.47 ± 0.20 cd	9.80 ± 0.19 bc	10.40 ± 0.24 bc
A6	41.86 ± 0.35 a	-3.70 ± 0.18 d	10.04 ± 0.16 ab	10.70 ± 0.21 ab
A7	41.58 ± 0.36 ab	-3.37 ± 0.16 cd	9.61 ± 0.20 c	10.18 ± 0.14 cd
A8	41.40 ± 0.37 ab	-3.75 ± 0.47 d	10.31 ± 0.12 a	10.97 ± 0.27 a

3.4.3 不同无核处理对‘阳光玫瑰’果实内在品质的影响

由表 3-5 可知，A6 处理果实 SSC 含量最高，达 21.40%，其次是 A8 和 A4 处理，SSC 含量分别达 21.27%和 21.20%。果实可滴定酸含量由高到低依次为：CK>A1>A2>A3>A5>A7>A8>A4>A6，其中，A4 和 A6 处理无显著差异，但显著低于 CK、A1、A2 和 A3 处理。A1、A2 和 A3 处理可溶性糖含量无显著差异，但显著低于 A4-A8 处理；A6 处理果实可溶性糖含量最高，为 19.74%，与 A4 和 A8 处理无显著差异，但显著高于 A5 和 A7 处理。

表 3-5 不同无核处理对‘阳光玫瑰’葡萄内在品质影响

Table 3-5 The effects of different non-fermentative treatments on the intrinsic quality of 'Shine Muscat'

grapes			
处理	w（可溶性固形物）	ρ（可滴定酸）	w（可溶性糖）
Treatment	Soluble solid content/%	Titrateable acid content/g·L ⁻¹	Soluble sugar content/%
CK	19.77 ± 0.15 d	3.96 ± 0.06 a	17.28 ± 0.28 d
A1	20.50 ± 0.20 c	3.70 ± 0.11 b	18.47 ± 0.21 c
A2	20.60 ± 0.36 c	3.60 ± 0.08 b	18.58 ± 0.27 c
A3	20.83 ± 0.12 bc	3.48 ± 0.14 bc	18.78 ± 0.13 c
A4	21.20 ± 0.10 a	3.22 ± 0.07 d	19.39 ± 0.17 ab
A5	21.07 ± 0.06 ab	3.37 ± 0.22 cd	19.14 ± 0.16 b
A6	21.40 ± 0.26 a	3.20 ± 0.05 d	19.74 ± 0.17 a
A7	21.13 ± 0.15 ab	3.30 ± 0.13 cd	19.24 ± 0.18 b
A8	21.27 ± 0.15 a	3.26 ± 0.14 cd	19.52 ± 0.27 ab

3.4.4 不同膨大处理对‘阳光玫瑰’果实外观品质的影响

3.4.4.1 不同膨大处理对‘阳光玫瑰’果实外观品质的影响

选择无核率最高的 A8 处理作为盛花期保果蘸穗配方，在膨大期设置不同浓度的 GA₃+CPPU 组合进行膨大处理。

不同膨大处理对‘阳光玫瑰’果实大小的影响如表 3-6 所示，不同膨大处理均显著提高了果实的大小。B3 和 B4 处理果粒横径无显著差异，但显著高于其他 3 种处理；B3 处理果粒纵径最大，达 30.89 mm，显著高于其他处理；B3 处理的单粒质量最大，达 14.13 g，显著高于其他处理。B2 处理的果形指数最小，为 1.13，显著低于 CK 和 B3 处理。

表 3-6 不同处理对‘阳光玫瑰’葡萄果实大小的影响

Table 3-6 Effects of different treatments on fruit size, shape and seedless rate of 'Shine Muscat' grape fruits

处理 Treatment	果粒横径 Transverse diameter/mm	果粒纵径 Longitudinal diameter/mm	单粒质量 Berry mass/g	果形指数 Shape index
CK	19.59 ± 0.13 c	23.24 ± 0.06 d	7.03 ± 0.19 d	1.18 ± 0.01 a
B1	26.35 ± 0.18 b	30.24 ± 0.11 b	13.41 ± 0.13 bc	1.15 ± 0.01 bc
B2	26.19 ± 0.23 b	29.77 ± 0.10 c	13.10 ± 0.19 c	1.13 ± 0.01 c
B3	26.77 ± 0.12 a	30.89 ± 0.29 a	14.13 ± 0.26 a	1.16 ± 0.02 b
B4	26.73 ± 0.06 a	30.49 ± 0.24 b	13.69 ± 0.14 b	1.14 ± 0.01 bc

3.4.4.2 不同膨大处理对‘阳光玫瑰’果实色泽的影响

不同膨大处理对‘阳光玫瑰’果实色泽影响如表 3-7 所示，果皮亮度以 B4 处理最高，达 41.67，其次为 B3 处理，达 41.45，二者无显著差异。果皮色相 a^* 由大到小排序为：CK>B2>B1>B4>B3。B1、B2、B3 和 B4 处理的果皮色相 b^* 和 c^* 值均无显著差异，但显著高于 CK，说明不同膨大处理显著提高了果皮的色泽饱和度。

表 3-7 不同处理对‘阳光玫瑰’葡萄果皮颜色的影响

Table 3-7 Effects of different treatments on peel color of 'Shine Muscat' grape fruits

处理 Treatment	L^*	a^*	b^*	c^*
CK	39.75 ± 0.19 d	-2.49 ± 0.18 a	8.33 ± 0.31 b	8.70 ± 0.32 b
B1	40.59 ± 0.28 c	-3.27 ± 0.13 bc	9.48 ± 0.26 a	10.03 ± 0.22 a
B2	41.15 ± 0.17 b	-3.21 ± 0.21 b	9.38 ± 0.22 a	9.92 ± 0.28 a
B3	41.45 ± 0.19 ab	-3.68 ± 0.16 d	9.60 ± 0.21 a	10.28 ± 0.24 a
B4	41.67 ± 0.13 a	-3.55 ± 0.13 cd	9.72 ± 0.07 a	10.35 ± 0.08 a

3.4.5 不同膨大处理对‘阳光玫瑰’果实内在品质的影响

如表 3-8 所示，B3 处理可溶性固形物含量最高，达 21.37%，其次是 B4 处理，为 21.13%，二者间无显著差异；B2 和 B1 处理可溶性固形物含量分别为 21.10%和 20.87%，二者间无显著差异。果实可滴定酸含量排序为：CK>B2>B1>B3>B4，其中，B4 处理可滴定酸含量为 3.20 g·L⁻¹，与 B3 处理无显著差异。B3 处理可溶性糖含量最高，达 19.24%，其次为 B4 处理，为 19.00%，二者间无显著差异。

表 3-8 不同处理对‘阳光玫瑰’葡萄果实可溶性固形物、糖和酸含量的影响

Table 3-8 Effects of different treatments on sugar and acid contents of 'Shine Muscat' grape fruits

处理	w（可溶性固形物）	ρ（可滴定酸）	w（可溶性糖）
Treatment	Soluble solid content/%	Titrateable acid content/g·L ⁻¹	Soluble sugar content/%
CK	20.30 ± 0.17 d	3.72 ± 0.13 a	18.10 ± 0.25 d
B1	20.87 ± 0.12 c	3.42 ± 0.09 b	18.43 ± 0.18 c
B2	21.10 ± 0.10 bc	3.44 ± 0.16 b	18.74 ± 0.13 b
B3	21.37 ± 0.12 a	3.23 ± 0.09 bc	19.24 ± 0.13 a
B4	21.13 ± 0.15 ab	3.20 ± 0.10 c	19.00 ± 0.05 ab

3.5 讨论

3.5.1 不同植物生长调节剂配方对‘阳光玫瑰’果实无核率的影响

‘阳光玫瑰’葡萄是有籽品种，生产上常使用 GA₃、CPPU 和 TDZ 等植物生长调节剂进行葡萄无核化处理和保花保果（陈少珍等，2016），使‘阳光玫瑰’具备食用无籽的特性。‘阳光玫瑰’无核化处理需把握两个关键时期：首次处理目的是诱导无核和保果，应在花前至花期进行，末花期 7 天后处理诱导效应基本消失（王莎等，2020）；第二次处理的主要目的是促进果实膨大，通常在保果（首次处理）后的 10-15 d 左右进行（吕中伟，2016）。本研究发现，花后 48 h 使用 25 GA₃ + 4 CPPU + 3 TDZ mg·L⁻¹ 处理果实的无核率达 89.0%。王莎等（2019）研究表明，花后 2 d 施用 2.5 mg·L⁻¹ TDZ + 25 mg·L⁻¹ GA₃ + 200 mg·L⁻¹ 链霉素，无核率显著提高，达到 96% 以上，添加 TDZ 或 CPPU 后，果实无核率达 100% 且不受处理时间影响，验证了 GA₃ 与 CPPU 和 TDZ 配合使用能提高无核率，与本文研究结果一致。

3.5.2 不同植物生长调节剂配方对‘阳光玫瑰’果实品质的影响

GA₃ 通过诱导葡萄产生内源生长素，促使果实膨大；而 CPPU 和 TDZ 主要是通过诱导细胞分裂，增加果粒中细胞数量，达到果实膨大的目的。在柑橘上使用 CPPU，可以增加浆果质量并延长成熟期（Serri et al., 2004）。在相同浓度条件下，TDZ 处理后果粒膨大效果更显著。本研究发现，相较于 CK，不同植物生长调节组合均显著提高了‘阳光玫瑰’果实的横径、纵径和单粒重，其中，在花后 48 h 使用 25 GA₃+4 CPPU+3 TDZ mg·L⁻¹ 处理（A8）的单粒重最大，果形指数下降，果实趋于偏圆。郑婷等（2024）研究

表明,在谢花后和谢花后 15 d,使用 TDZ 和 CPPU 对‘天工墨玉’葡萄进行处理,TDZ 对葡萄果实膨大的影响比 CPPU 更明显,TDZ 处理的果实又大又圆,这与本研究结论一致。研究表明,GA₃ 和 TDZ 通过调节果实中内源赤霉素、生长素和 IAA-ASP 的水平来实现对果实果形指数的影响(谭显甫, 2025)。有研究表明 TDZ 在盛花和盛花后 15 d 两次处理‘阳光玫瑰’葡萄后,单果质量显著增加的同时明显降低了果形指数, CPPU 和 CA₃ 分别增加了韧皮部、木质部的面积,两者混合使用对木质部和韧皮部面积均有较强的影响,增加维管束系统进而提高养分的转运达到膨果的作用(Li et al., 2024)。

前人研究表明, 25 mg·L⁻¹ GA₃+5-10 mg·L⁻¹ CPPU 处理效果较好,能显著增加果实可溶性固形物含量,并降低可滴定酸含量(Tyagi et al., 2022; 李海燕等, 2016; 史文婷等, 2017)。王建萍等(2022)使用 GA₃ 和 CPPU 组合调节剂处理‘阳光玫瑰’幼果,结果表明 25 mg·L⁻¹ GA₃ 与 2.5 mg·L⁻¹ CPPU 组合显著增加果实香气;而 25 mg·L⁻¹ GA₃ 与 5 mg·L⁻¹ CPPU 混合施用可使无核率提升至 90%,同时显著提高可溶性固形物和还原糖含量;黄艳(2021)研究表明,使用 20 mg·L⁻¹ GA₃+3.0 mg·L⁻¹ TDZ 进行保果,使用 25 mg·L⁻¹ GA₃+3 mg·L⁻¹ CPPU 进行膨果处理,调节剂显著提高了果实可溶性糖含量;路方方(2020)的研究表明在‘阳光玫瑰’葡萄上使用 25 mg·L⁻¹ GA₃+2 mg·L⁻¹ CPPU(满花后 12 h 和 10-14 d 后两次)可以实现降低果实的可滴定酸的作用。本研究表明,盛花期使用 25 mg·L⁻¹ GA₃+4 mg·L⁻¹ CPPU+3 mg·L⁻¹ TDZ,膨大期使用 30 mg·L⁻¹ GA₃+5 mg·L⁻¹ CPPU+5000 倍保美灵,可促进果实膨大和糖分积累,与上述研究结果相似。

3.6 本章小结

(1) 不同无核处理果实无核率均达 80%以上,其中, A8 处理果实的无核率最高,达 89.0%,其次是 A4 处理,果实无核率达 88.5%;此外, A8 和 A6 的果实单粒质量较大, A6 处理可溶性固形物、可溶性糖含量最高,可滴定酸含量最低。

(2) 不同膨大处理均显著提高了‘阳光玫瑰’果实的单粒质量, B3 处理的单粒质量最大,达 14.13 g,可溶性固形物、可溶性糖含量最高; B4 处理可滴定酸含量最低。

第4章 不同叶果比对‘阳光玫瑰’果实生长发育及挥发性代谢物的影响

叶果比是调控果树源库关系的关键栽培措施,直接影响光合产物的分配与利用,进而决定果实的生长发育进程及品质形成(程杰山等,2014)。在葡萄生产中,合理调节叶果比能够优化树体负载量,改善果实大小、糖酸积累及色泽等外观与内在品质指标(朱振家等,2015;豆一玲等,2010;孟鑫等,2016)。研究表明,高叶果比处理中果实中花色苷合成相关酶 *PAL*、*4CL* 和 *C4H* 活性明显高于低叶果比处理,提高花色苷的含量,提高了‘北红’葡萄的果实品质(孟鑫等,2016)。近年来,随着消费者对果实风味品质要求的提升,挥发性代谢物作为构成果实香气特征的重要物质,其合成与积累受到源库关系的显著调控,可能通过调节初级代谢产物向次生代谢途径的分配,改变萜烯类、酯类、醇类等挥发性化合物的种类与含量(李洋等,2022)。然而,针对叶果比变化对果实挥发性代谢物影响的研究仍有限,尤其在‘阳光玫瑰’这一香气主导型品种上,其介导果皮芳香物质形成与积累的机制尚不明确。

基于第2章对4个葡萄品种改接‘阳光玫瑰’的综合评价结果,本章节以‘阳光玫瑰’/‘克瑞森无核’为试材,设置4种叶果比处理,系统观测果实生长发育动态,并结合代谢组学技术,分析成熟期果皮挥发性代谢物的变化,旨在揭示叶果比对果实品质形成的调控作用,为葡萄优质化栽培中源库关系的精准调控提供理论依据。

4.1 试验材料与试验设计

4.1.1 试验地概况

同第二章 2.1.1

4.1.2 试验设计

以‘克瑞森无核’改接的‘阳光玫瑰’为试材,记为 SM/CR。每个处理3个重复,每个重复1株葡萄。

试验设置4个叶果比(leaf fruit ratio, LFR),采用高“厂”字型,东西走向,株行距 3.0 m×1.5 m,葡萄树两侧铺设滴灌带,共四条,每侧各两条,栽培管理一致。选择树势良好、长势一致、无病虫害的葡萄植株进行叶果比处理,修剪方式如图 4-1 所示。



图 4-1 不同叶果比试验模式图

Fig. 4-1 Schematic diagram of the experiment with different leaf-to-fruit ratios

表 4-1 不同叶果比试验处理

Table 4-1 Experiment treat with different leaf-to-fruit ratios

处理	处理方法
Treatment	Treatment method
T1 (LFR15)	果穗以下 3 叶、副梢全部抹去，果穗及以上 5 叶摘心副梢留 1 叶+顶端一次副梢留 3 叶
T2 (LFR20)	果穗以下 3 叶、副梢全部抹去，果穗及以上 5 叶摘心副梢留 1 叶+顶端一次副梢 4 叶摘心、二次副梢留 1 叶
T3 (LFR25)	果穗以下 3 叶、副梢全部抹去，果穗及以上 5 叶摘心副梢留 1 叶+顶端一次副梢 5 叶摘心、二次副梢留 1 叶+顶端二次副梢留 4 叶
T4 (LFR30)	果穗以下 3 叶、副梢全部抹去，果穗及以上 5 叶摘心副梢留 1 叶+顶端一次副梢 5 叶摘心、二次副梢留 1 叶+顶端二次副梢 5 叶摘心、三次副梢留 1 叶

4.2 测定指标及方法

4.2.1 果实品质指标测定

同第二章 2.2.1，2.2.2，2.2.3

4.2.2 果皮挥发性代谢物的测定

用手术刀将果皮与果肉剥离，放入 50 mL 离心管，迅速放入液氮冷冻保存，转移至 -80 °C 冰箱保存，用于挥发性代谢物的测定。样品提取流程、色谱质谱采集条件采用孙天雨等（2024）的方法。

4.3 数据处理

同第二章 2.3 小节

采用 Graphpad Prism 绘制柱状图。

4.4 结果与分析

4.4.1 不同叶果比对‘阳光玫瑰’果实生长发育的影响

4.4.1.1 不同叶果比对‘阳光玫瑰’果实大小的影响

如图 4-2 (A) 所示，不同叶果比处理下果粒横径在花后 70-85 d 增长最快。花后 40 d，不同叶果比处理下果粒横径无显著差异；T1（LFR15）处理的果粒横径在 5 个时期均最低；花后 55-100 d，T3（LFR25）处理的果粒横径均最高，并在花后 100 d 达 24.84 mm，显著高于其他处理。

如图 4-2 (B) 所示，不同叶果比处理的果粒纵径在花后 40-55 d 增长最快。T1 处理的果粒纵径在 5 个时期均保持最低，T3 处理的果粒纵径在 5 个时期均保持最高；花后 85 d，T2（LFR20）、T3 和 T4（LFR30）处理果粒纵径无显著差异，均显著高于 T1 处理；花后 100 d，T3 处理的果粒纵径达 29.63 mm，显著高于其他处理。

单粒质量的变化趋势与果粒横径、果粒纵径相似，在花后 40-55 d、70-85 d 增长较快，而在花后 55-70 d 增长较为缓慢。如图 4-2 (C) 所示，T1 处理的单粒质量在 5 个时期均处于较低水平，而 T3 处理的单粒质量则在各时期均表现最优；花后 40、55、70 d，T3 处理的单粒质量显著高于 T1 处理，但与 T2 和 T4 处理无显著差异；花后 85 d，T2、T3 和 T4 处理的单粒质量无显著差异；花后 100 d，不同叶果比处理的单粒质量排序为：T3>T4>T2>T1，单粒质量分别为 12.78、12.57、12.30、12.08 g，其中，T3 和 T4 处理的单粒质量无显著差异。

果形指数变化如图 4-2 (D) 所示，花后 40 d，T3 处理果形指数最高，为 1.23，与其他处理相比差异显著（ $P<0.05$ ）；花后 55、70、100 d，4 种叶果比处理的果形指数均

无显著差异，且在花后 100 d，4 种叶果比处理的果形指数均在 1.1-1.3 之间，果粒均呈椭圆形。

结果表明，叶果比过低可能限制果实的生长，T3 处理能有效促进果实纵向伸长，在果实发育后期维持较高的增长速率，更有利于果实的膨大。

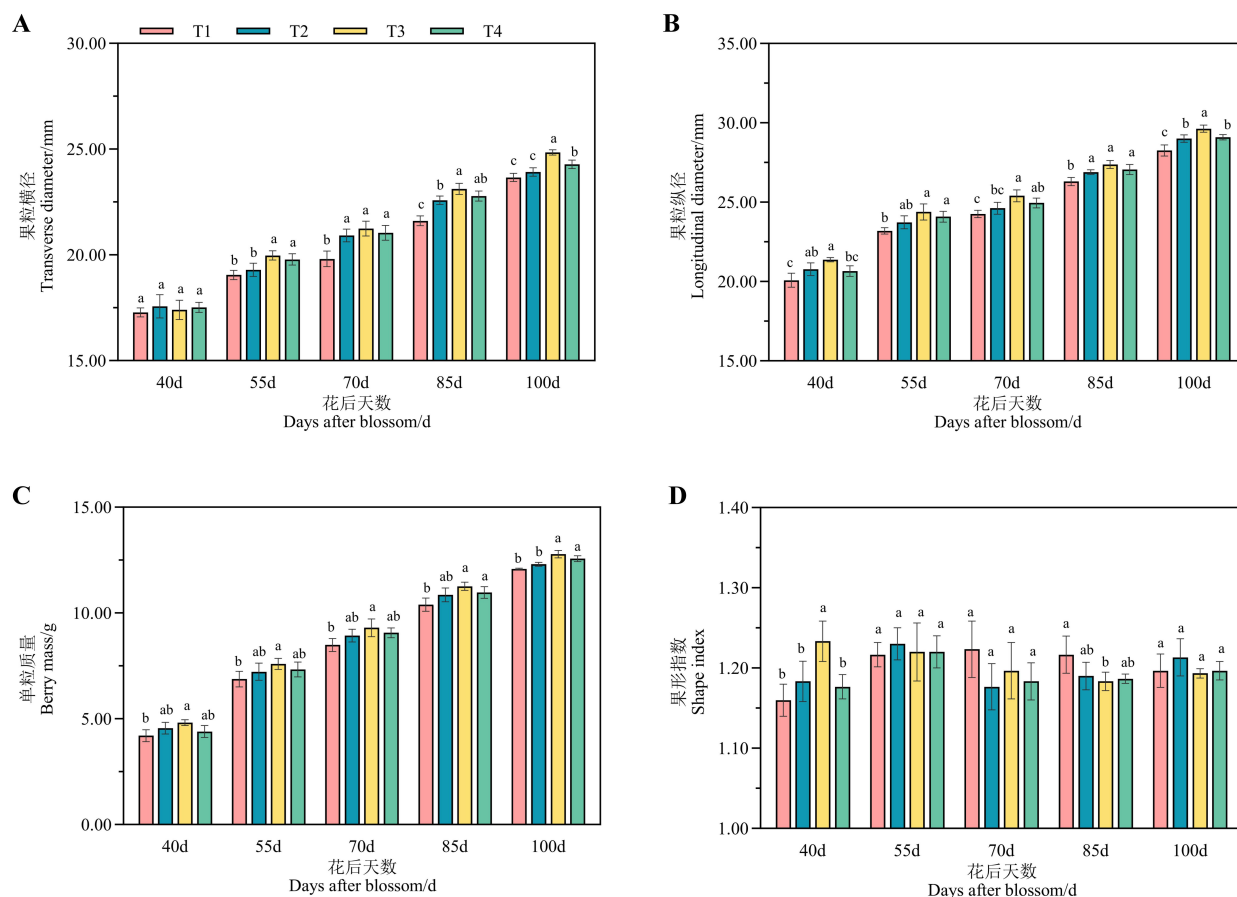


图4-2 不同叶果比对‘阳光玫瑰’果实大小的影响

Fig. 4-2 Effects of Different Leaf-to-Fruit Ratios on the Size of ‘Shine Muscat’ Grapes

4.4.1.2 不同叶果比对‘阳光玫瑰’果实色泽的影响

如图 4-3 (A) 所示，随着果实的生长发育，不同叶果比处理果皮色相 L^* 值逐渐下降，花后 40-55 d 缓慢下降，花后 55-70 d 下降较快，花后 70-100 d 趋于平稳。花后 55 d，T2 处理果皮色相 L^* 值为 44.52，显著低于 T4 处理；花后 100 d，T2 处理果皮色相 L^* 值最大为 40.95，T1 处理果皮色相 L^* 值最小为 40.83，各处理间无显著差异。

如图 4-3 (B) 所示，随着果实的生长发育，4 种叶果比处理果皮色相 a^* 值逐渐上升，果皮绿色逐渐减退；不同叶果比处理果皮色相 a^* 值在花后 55-70 d 增幅最快，在花后 85~100 d 趋于平缓。花后 40、85 d，不同处理果皮色相 a^* 值无显著差异；花后 55 d，T4 处理果皮色相 a^* 最高，为 -5.43，显著高于其他 3 种处理；花后 70 d，T4 处理果皮色相 a^* 值显著高于 T1 和 T2 处理，但与 T3 处理差异不显著；花后 100 d，T4 处理果皮色

相 a^* 值最大, 为 -3.11, 显著高于其他处理, T1 处理果皮 a^* 最小为 -3.52, 说明 T4 较其他 3 种处理果皮绿色更浅。

如图 4-3 (C) 所示, 随着果实的生长发育, 4 种叶果比处理果皮色相 b^* 值逐渐下降, 在花后 55-70 d 下降最快。花后 40 d, T2 处理果皮色相 b^* 值最高, 为 22.81, 显著高于其他 3 种处理; 花后 55 d, 果皮色相 b^* 值无显著差异; 花后 70 d, T1 处理果皮色相 b^* 值最高, 为 14.60, 显著高于其他处理; 花后 85 d, T2 处理果皮色相 b^* 值最高, 为 13.87, 与 T1 和 T3 处理无显著差异, T4 处理果皮色相 b^* 值最小, 为 12.77; 花后 100 d, T1 处理果皮色相 b^* 值最高, 为 12.25, T4 处理果皮色相 b^* 值最低, 为 10.64, 两者间差异显著。

如图 4-3 (D) 所示, 色泽饱和度 c^* 值呈下降趋势, 与果皮色相 b^* 值变化趋势相似。花后 40 d, 果皮色相 c^* 值以 T2 处理最高, 为 24.03, 显著高于其他 3 种处理; 花后 55 d, 各处理果皮色相 c^* 值无显著差异; 花后 70 d, 果皮色相 c^* 值以 T1 处理最高, 为 15.20, 显著高于其他处理; 花后 85 d, 果皮色相 c^* 值以 T2 处理最高, 为 14.35, 显著高于 T4 处理; 花后 100 d, T4 处理果皮色相 c^* 值为 11.09, 显著低于其他 3 种处理, T2 和 T3 处理差异不显著。

结果表明, 不同叶果比对‘阳光玫瑰’果实色泽的影响较显著, 较低的叶果比可能减缓果皮 a^* 值下降速率, 使得果皮绿色的持续时间延长; 而较高的叶果比果皮 a^* 值维持较高水平, 果皮绿色最浅, 果实成熟度更高。

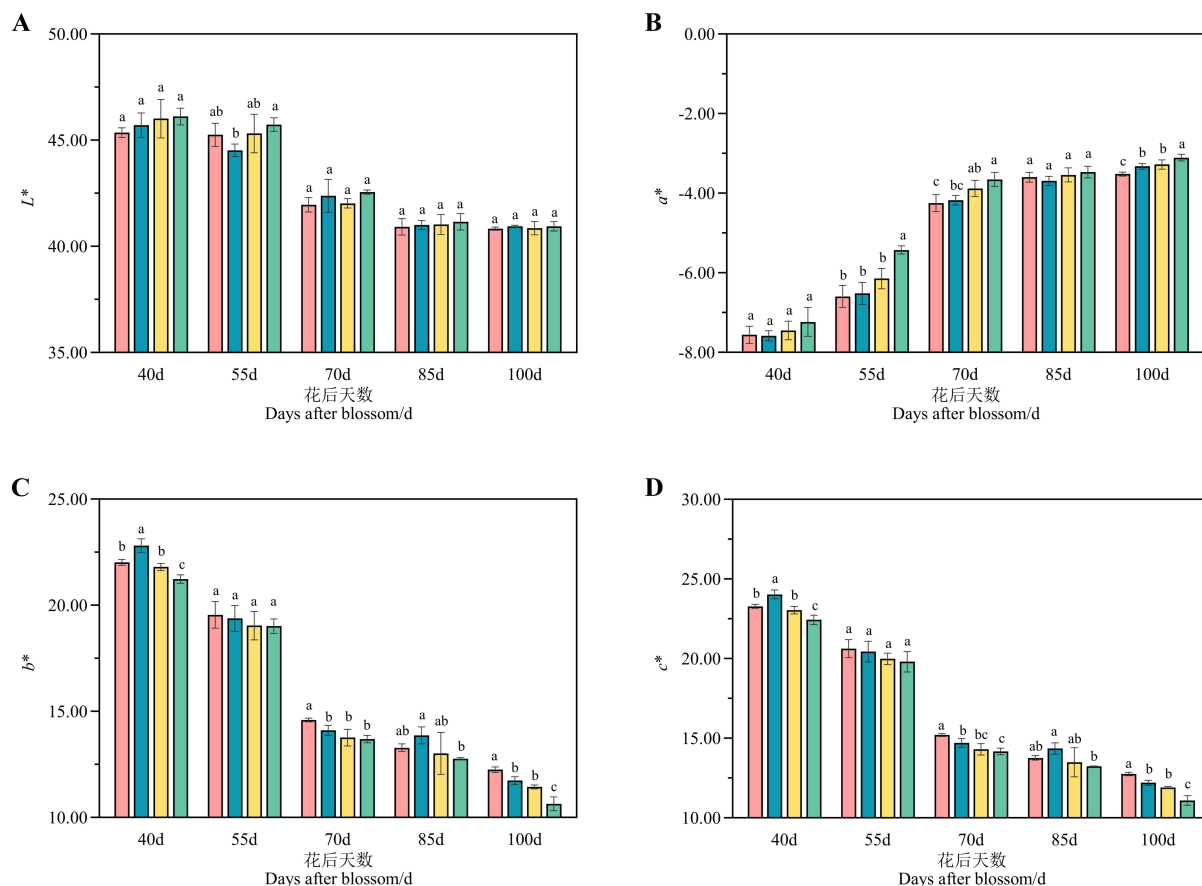


图4-3 不同叶果比对‘阳光玫瑰’果实色泽的影响

Fig. 4-3 The influence of different leaf-to-fruit ratios on the fruit color of 'Shine Muscat'

4.4.1.3 不同叶果比对‘阳光玫瑰’果实内在品质的影响

如图 4-4 (A) 所示, 不同处理果实可溶性固形物和可溶性糖含量呈相似增长趋势, 在花后 55-70 d 增长速度最快, 花后 70-100 d 增长平缓。花后 70 d, T4 处理果实可溶性固形物含量达 16.27%, 显著高于 T1 和 T2 处理, 根据国际葡萄和葡萄酒组织 (OIV) 决议 VITI 1/2008, 食用葡萄被认为成熟时可溶性固形物(SSC)≥16 °Brix, 表明 T4 处理下果实可溶性固形物含量达到成熟标准的最低阈值 (标准), 而此时其他处理组的果实尚未成熟。花后 85 d, T3 和 T4 处理果实可溶性固形物含量分别达 18.17%和 18.83%, 显著高于 T1 和 T2 处理; 花后 100 d, T4 处理可溶性固形物含量达 21.13%, 显著高于其他 3 组处理。

如图 4-4 (B) 所示, 随着果实生长发育, 不同叶果比处理果实可滴定酸含量逐渐下降, 在花后 40-55 d 可滴定酸含量快速下降。在 5 个发育时期, T1 处理果实可滴定酸含量均保持最高水平, T4 处理果实可滴定酸含量均处于最低水平; 花后 40 d, T1 和 T2 处理果实可滴定酸含量分别为 2.49%和 2.43%, 显著高于 T3 和 T4 处理; 花后 55、70 d, T4 处理可滴定酸含量均最低, 由 1.14%降至 0.65%, 均显著低于其他处理; 花后 85 d,

T4 处理可滴定酸含量最低, 为 0.51%, 显著低于其他处理; 花后 100 d, T3 和 T4 处理果实可滴定酸含量分别为 0.39%和 0.38%, 两者间无显著差异, 但显著低于 T1 和 T2 处理。

如图 4-4 (C) 所示, 花后 40 d, T3 和 T4 处理果实可溶性糖含量分别为 3.36%和 3.47%, 显著高于 T1 和 T2 处理; 花后 55 d, T3 处理果实可溶性糖含量最高, 为 6.42%, 其次是 T4 处理, 为 6.31%, 均显著高于 T1 和 T2 处理; 花后 70 d, T1 处理果实可溶性糖含量最低为 12.94%, 显著低于 T3 和 T4 处理, 但与 T2 处理无显著差异; 花后 85-100 d, 可溶性糖含量增速趋于平缓; 花后 100 d, T2、T3 和 T4 处理果实可溶性糖含量分别达 18.05%、18.25%和 18.78%, 均显著高于 T1 处理。

综上所述, T4 处理在可溶性固形物和可溶性糖含量上表现出显著优势, 同时在可滴定酸含量上保持较低水平, 这表明适宜的叶果比有助于果实内含物的积累与转化, 而较低叶果比在果实成熟过程中表现出品质形成的相对滞后性。

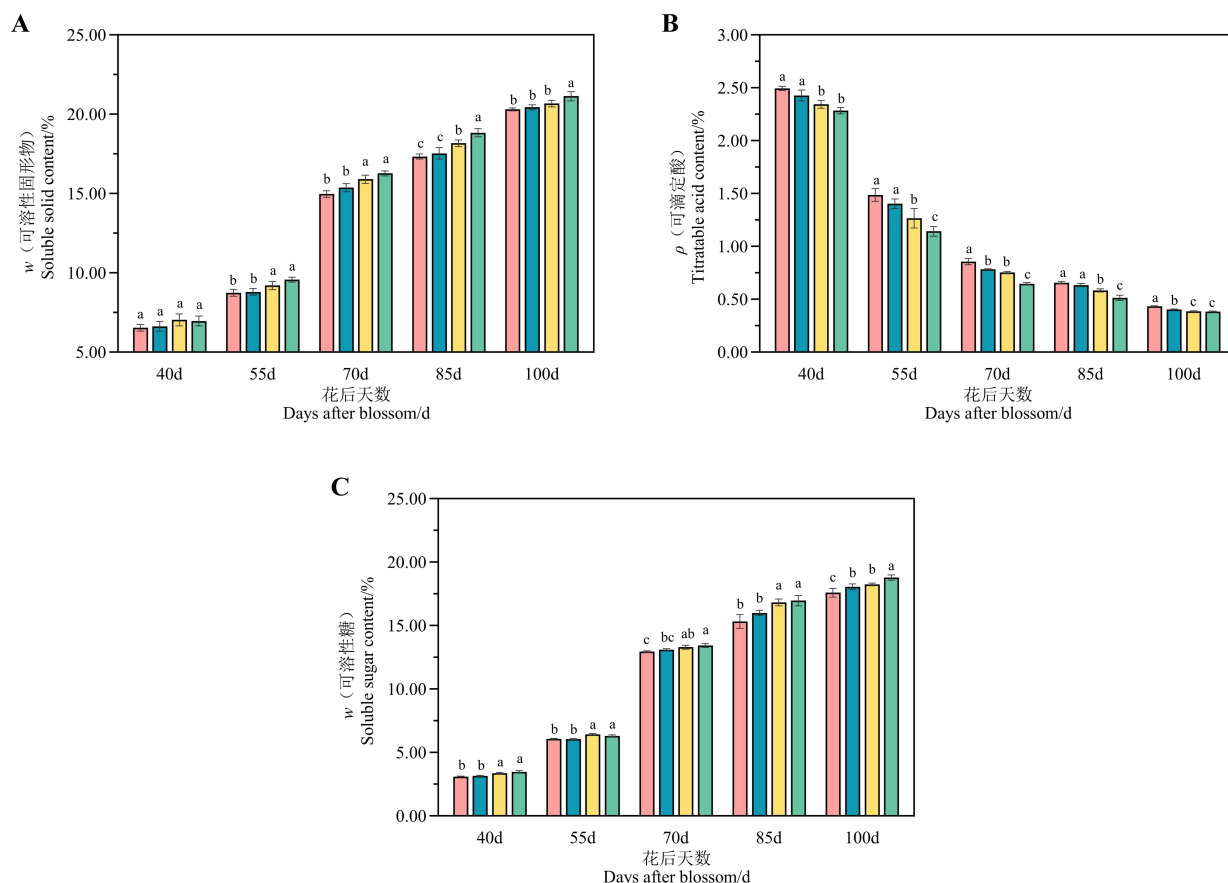


图4-4 不同叶果比对‘阳光玫瑰’果实内在品质的影响

Fig. 4-4 Effects of different leaf-to-fruit ratios on the internal quality of ‘Shine Muscat’ grapes

4.4.2 不同叶果比果皮挥发性代谢物质特征

4.4.2.1 不同叶果比果皮挥发性代谢组 PCA 及正交偏最小二乘法判别分析

为研究 4 种叶果比处理对‘阳光玫瑰’/‘克瑞森无核’成熟期果皮挥发性代谢物的差异，采用气相色谱-质谱（GC-MS）分析了来自 4 组样品的挥发性代谢物。PCA 结果如图 4-5 (A) 所示，PC1 和 PC2 分别解释了总方差的 34.08%和 22.49%，累计方差贡献率为 56.57%，清楚地将 4 个样本区分开。

本研究进一步采用正交偏最小二乘判别分析（OPLS-DA）构建模型如图 4-5 (B)，旨在实现对样本分类效果的准确评估。OPLS-DA 方法结合了降维和分类的优势，在分类准确率方面比 PCA 模型更高效。结果表明，4 组样品的挥发性成分在 OPLS-DA 得分图中均表现出显著的组间分离，这验证了样本组间差异的显著性。采用 R^2Y 和 Q^2 判断模型的有效性，两者均大于 0.5，且 R^2Y 大于 Q^2 （附图 S1），表明 OPLS-DA 模型对数据的拟合稳定且良好。这一结果强化了 PCA 分析的结论，表明这 4 组样品在挥发性代谢物类型和含量上存在显著差异，可用于后续组间差异代谢物的筛选。

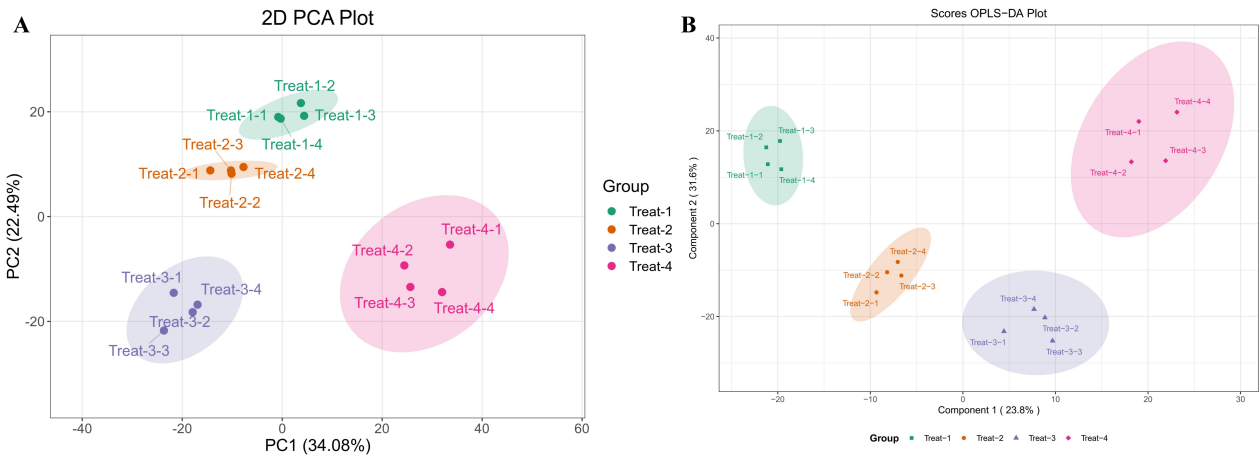


图 4-5 挥发性代谢组数据 PCA 得分及正交偏最小二乘法判别分析

Fig. 4-5 Principal component analysis scores and orthogonal partial least squares discriminant analysis of volatile metabolome data

4.4.2.2 不同叶果比果皮挥发性代谢物成分与含量分析

采用气相色谱-质谱联用技术（GC-MS）检测 4 组样品中的挥发性代谢物，旨在探究这 4 组样品中挥发性代谢物的种类和含量变化。本研究在 4 组样品中共检测到 1086 种挥发性代谢物，这些代谢物属于 15 个一级分类，包括萜类（221 种）、酯类（177 种）、酮类（134 种）、杂环化合物（110 种）、醇类（104 种）、醛类（72 种）、烃类（67 种）、酸类（51 种）、芳烃（35 种）、酚类（33 种）、胺类（30 种）、醚类（25 种）、

含氮化合物（15种）、卤代烃（8种）、含硫化合物（4种）。其中，萜类、酯类、酮类、杂环化合物和醇类是主要的挥发性代谢物，分别占果皮挥发性代谢物总量的20.35%、16.30%、12.34%、10.13%和9.58%，而卤代烃和含硫化合物占比较小，仅为0.74%和0.37%（图4-6(A)）。

不同叶果比处理果皮挥发性代谢物相对含量如图4-6(C)所示。萜类化合物是玫瑰香型葡萄的主要香气成分（Leng et al., 2023），在葡萄果皮中含量最为丰富（CABRITA et al., 2013），其具有浓郁的香味，感官阈值较低（张明霞等，2008）。研究表明，T4样品中萜类化合物的相对含量显著高于其他3组样品，达 $37.05 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ FW，分别比T1、T2和T3样品高12.09%、11.10%、15.49%。值得注意的是，T4样品中萜类化合物的特征香气物质芳樟醇、 α -松油醇、柠檬烯、月桂烯、 δ -萜品烯、薄荷醇、 α -水芹烯、 β -杜松烯、香树烯的相对含量均显著高于其他3个样本，而香叶醇、香茅醇以T2样本最高，橙花醇以T1样本最高。醛类物质中（E）-2-己烯醛、己醛也是重要的特征香气物质，T1样品中己醛的相对含量显著高于其他3个样本，T2样品中（E）-2-己烯醛的相对含量最高但与其他3组样品无显著差异。

4.4.2.3 不同叶果比果皮挥发性代谢物相对气味活性值(rOAV)分析

为研究‘阳光玫瑰’的香气活性物质，计算了4组样品中挥发性代谢物的相对气味活度值（rOAV）。一般 $\text{rOAV} \geq 1$ 的挥发性化合物，被认为是香气的直接贡献者。本研究在4组样品中鉴定出 $\text{rOAV} \geq 1$ 的挥发性代谢物共计178种，并将其归为芳香活性化合物（附表S1）。这些挥发性代谢物被分为12类，其中T4样本萜类化合物最多，共有45种，其次是醛类（图4-6(D)）。萜类化合物中，芳樟醇、顺式-氧化玫瑰、反式玫瑰氧化物和 α -松油醇具有花香，且在T4样本中最高；值得注意的是，T4样品醇类化合物种类最少。

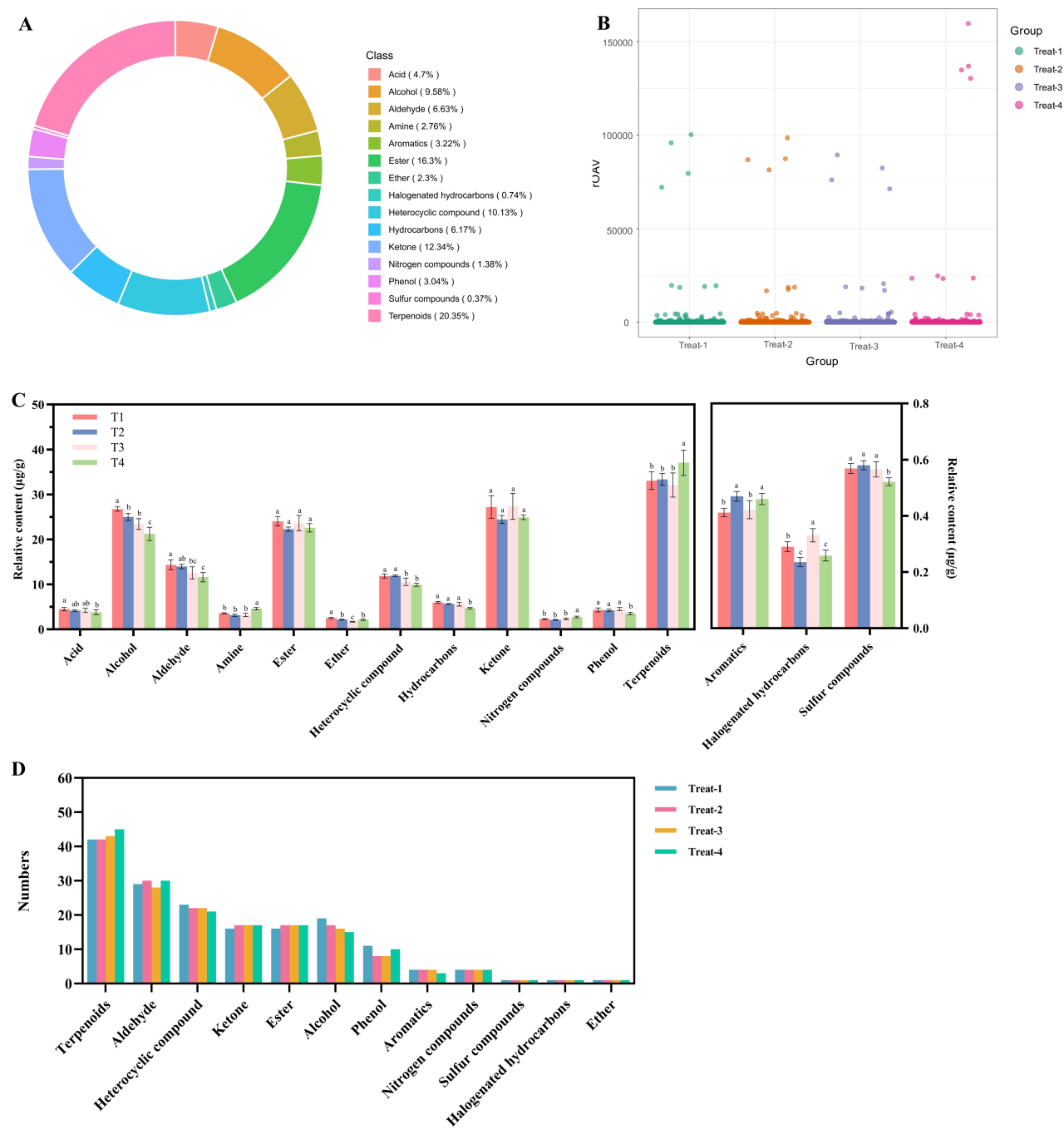


图 4-6 A 挥发性代谢物类别组成环形图；B 4 组样本主要气味物质 rOAV；C 4 组样本挥发性代谢物
分组相对含量；D 各组 rOAV≥1 的挥发性代谢物个数

Fig. 4-6 A. Circular diagram of the composition of volatile metabolite categories; B. rOAV of the main
odor substances in the 4 groups of samples; C. Relative content of volatile metabolites in groups of the 4
groups of samples; D. Number of volatile metabolites with $rOAV \geq 1$ in each group.

4.4.3 不同叶果比果皮挥发性代谢物差异分析

4.4.3.1 不同叶果比挥发性代谢组差异代谢物筛选

基于 OPLS-DA 模型得到的变量重要性投影(Variable Importance in Projection, VIP), 初步筛选差异代谢物。如图 4-7 所示, T2 与 T1 相比, 一共有 72 种差异代谢物, 其中上调 33 个, 下调 39 个; T3 与 T2 相比, 一共有 131 种差异代谢物, 其中上调 21 个, 下调 110 个; T4 与 T3 相比, 一共有 103 种差异代谢物, 其中上调 87 个, 下调 16 个; T4 与 T2 相比, 一共有 123 种差异代谢物, 其中上调 75 种, 下调 48 种; T4 与 T1 相比, 一共有 144 种差异代谢物, 其中上调 85 种, 下调 59 种。总体而言, T4 样品与 T1、T2、T3 相比, 随着叶片数量差距逐渐减小, 差异代谢物数量呈现减少趋势, 同时下调代谢物的种类也逐渐减少(图 4-7(A))。

为解析不同叶果比梯度及高叶果比(T4)对‘阳光玫瑰’挥发性差异代谢物的调控特征, 绘制 Venn 图, 如图 4-7(B)所示, 五组共有核心差异代谢物有 5 种, 以酯类物质为主, 包括毛果芸香碱、9,12,15-十八碳三烯酸甲酯、苯乙酸-(4-甲氧基苯基)甲酯、苯甲酸、(Z,Z,Z)-9,12,15-十八碳三烯酸甲酯。

选择差异倍数前 20 种代谢物进行展示(附表 S2)。T4 与其他 3 组样品相比, 3-甲基戊酸、邻氨基苯甲酸甲酯、 δ -榄香烯是各组共有的差异代谢物, 且呈显著下调趋势。与 T1 相比, (E)- β -罗勒烯、(E)-3-苯基烯丙乙酸酯是 T2、T4 共有的差异代谢物, 且与 T1 相比均呈显著上调趋势。T4 与 T3 相比, 8-壬烯醛呈显著上调。结合 rOAV 分析, (E)- β -罗勒烯、(E)-3-苯基烯丙乙酸酯、8-壬烯醛的 rOAV 值均 ≥ 1 , 对香气有重要贡献, 可能是关键的差异挥发性代谢物(附表 S1)。

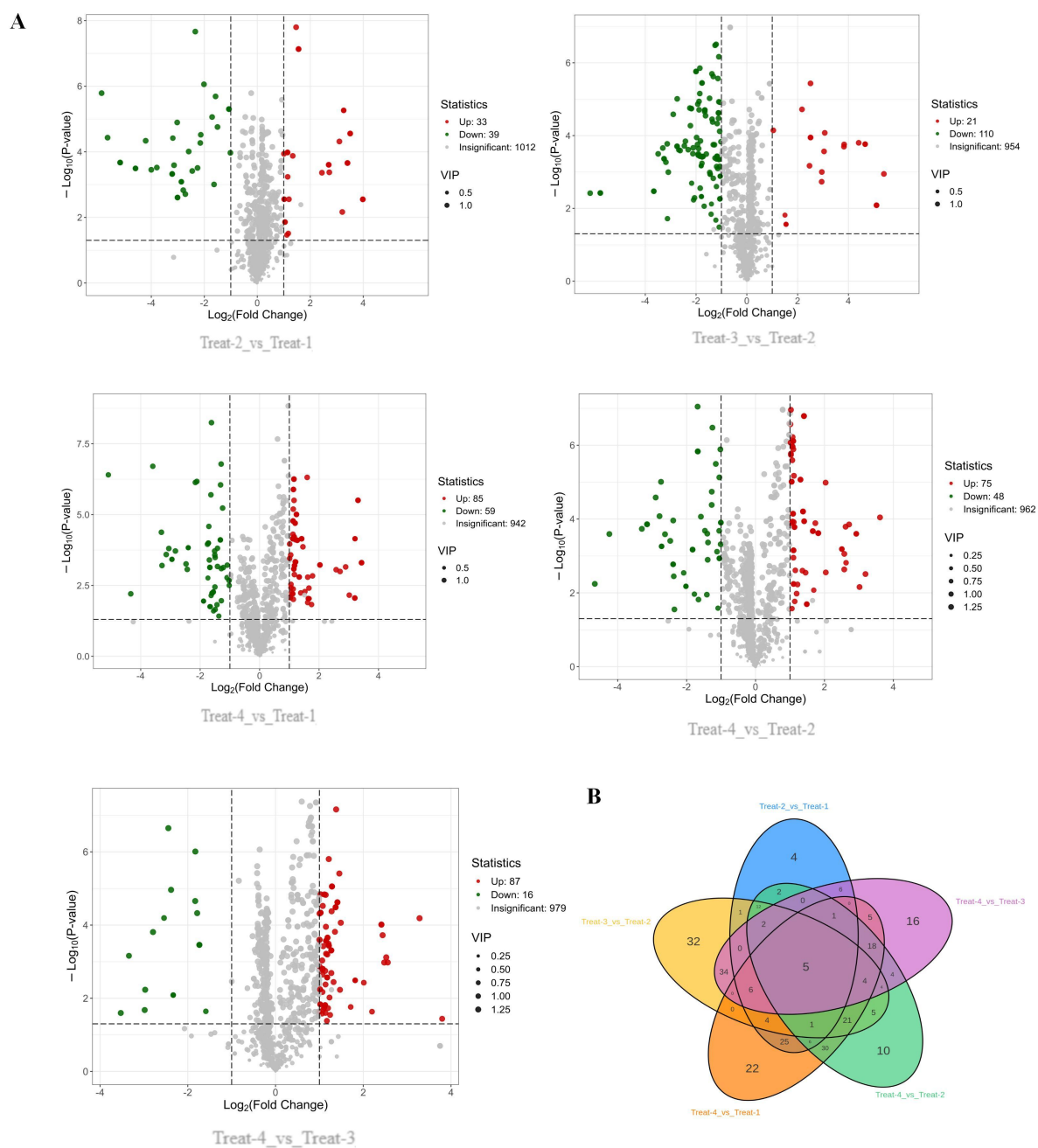


图 4-7 差异代谢物分析；A 不同叶果比处理差异代谢物火山图；B 差异代谢物 Venn 图

Fig. 4-7 Differential metabolite analysis; A Volcano plot of differential metabolites in different leaf-to-fruit ratio treatments; B Venn diagram of differential metabolites.

4.4.3.2 不同叶果比挥发性代谢组差异代谢物 K-Means 聚类分析

将 5 个比较组中鉴定得到全部差异代谢物的相对含量进行 UV(unit variance scaling)处理，K-means 聚类分析显示，280 个差异代谢物可分为 8 个簇，分别包含 14、25、62、19、27、73、29 和 31 个代谢物（图 4-8）。随着叶片数量的增加，Sub class 6 呈现上升

趋势，其中萜类是主要代谢物，共有 33 种，涵盖 δ -萜品烯、L- α -松油醇、反式玫瑰氧化物、 α -杜松烯、紫苏醇、(-)-乙酸香芹酯等重要香气物质。Sub class 7 中代谢物呈现下降趋势，主要涵盖醇类和酯类。

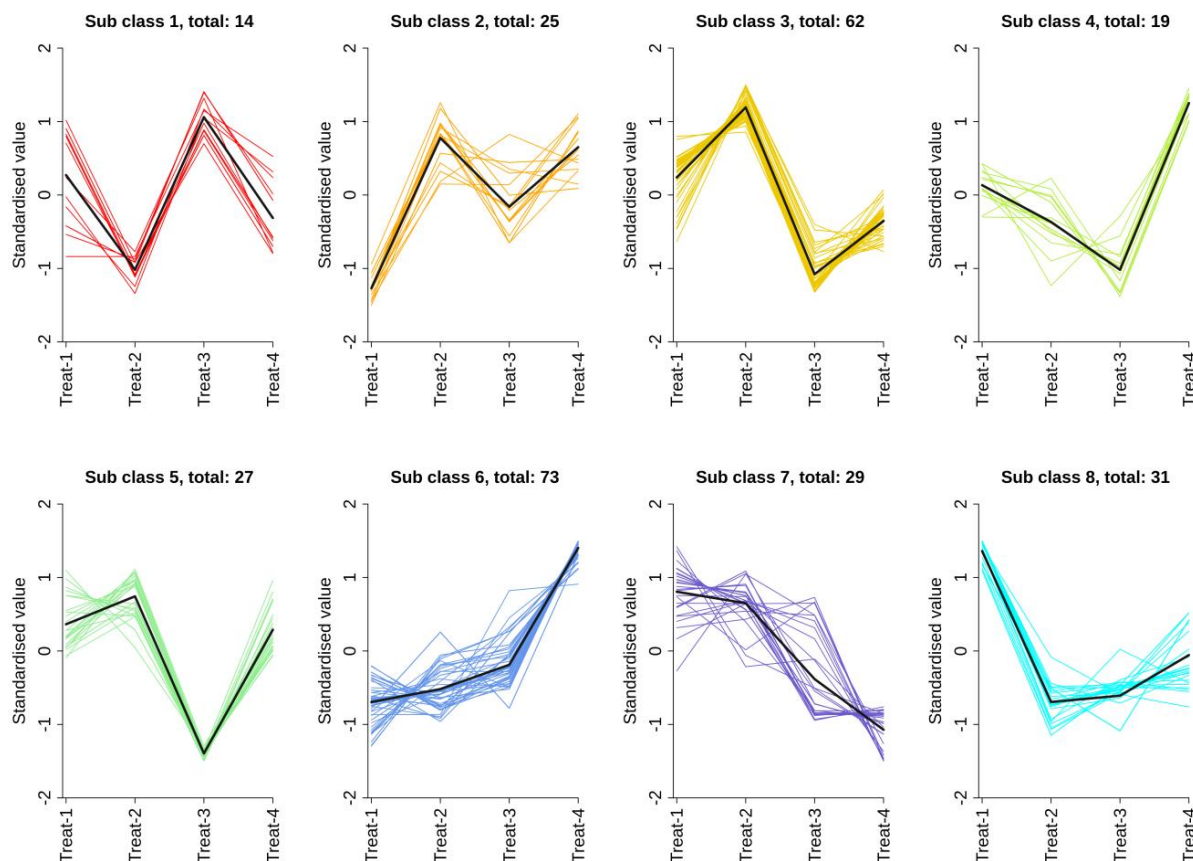


图 4-8 差异代谢物 K-Means 聚类分析

Fig. 4-8 Differential metabolite K-Means clustering analysis

4.4.3.3 不同叶果比挥发性代谢组差异代谢物 KEGG 分类和富集分析

对差异显著代谢物 KEGG 的注释结果进行分类展示（图 4-9），5 个比较组的差异代谢物注释到的共同代谢通路为以下 2 个：代谢途径和次生代谢物的生物合成。T4 与其他三组样品相比，注释到的共同代谢通路为单萜类生物合成；T4 与 T1、T2 相比，注释到倍半萜类和三萜类生物合成途径；T4 与 T1、T3 相比，注释到二萜类生物合成途径。

在上述 KEGG 注释结果的基础上，对不同叶果比样品差异代谢物进行 KEGG 富集分析，选择 P-value 排名前 20 个通路由小到大进行展示（图 4-10）。结果表明，在 T3 VS T2 组、T4 VS T2 组均有 11 个差异代谢物，显著（ $P < 0.05$ ）富集于次生代谢物的生物合成通路中；在 T2 VS T1 组、T4 VS T1 组、T4 VS T2 组分别有 3 个、4 个、3 个差异代谢物，显著（ $P < 0.05$ ）富集于倍半萜类和三萜类生物合成通路中。

在次生代谢物的生物合成通路中，T3 与 T2 相比，3-甲基丁醛肟、香叶醇、L-哌啶甲酸、香茅醇、对羟基苯乙烯、(R)-3,7-二甲基-6-辛烯醇和乙酸叶醇酯均为下调表达，反式-肉桂酸、毛果芸香碱、苯甲酸和泪柏醚均为上调表达；T4 与 T2 相比，反式-肉桂酸、 α -法尼烯、 δ -杜松烯、(S)-(-)-(4-异丙烯基-1-环己烯基)甲醇、毛果芸香碱、苯甲酸、L- α -松油醇、L-薄荷醇和紫苏醇均为上调表达，3-甲基丁醛肟和乙酸叶醇酯为下调表达（附表 S3）。

在倍半萜类和三萜类生物合成通路中，T2、T4 与 T1 相比(Z)-1-甲基-4-(6-甲基-5-庚烯-2-亚基)-1-环己烯、 α -法尼烯和 β -红没药烯均为下调表达，而 T4 与 T1 比较组中的 δ -杜松烯为上调表达；T4 与 T2 相比，(Z)-1-甲基-4-(6-甲基-5-庚烯-2-亚基)-1-环己烯、 α -法尼烯和 δ -杜松烯均为上调表达（附表 S4）。

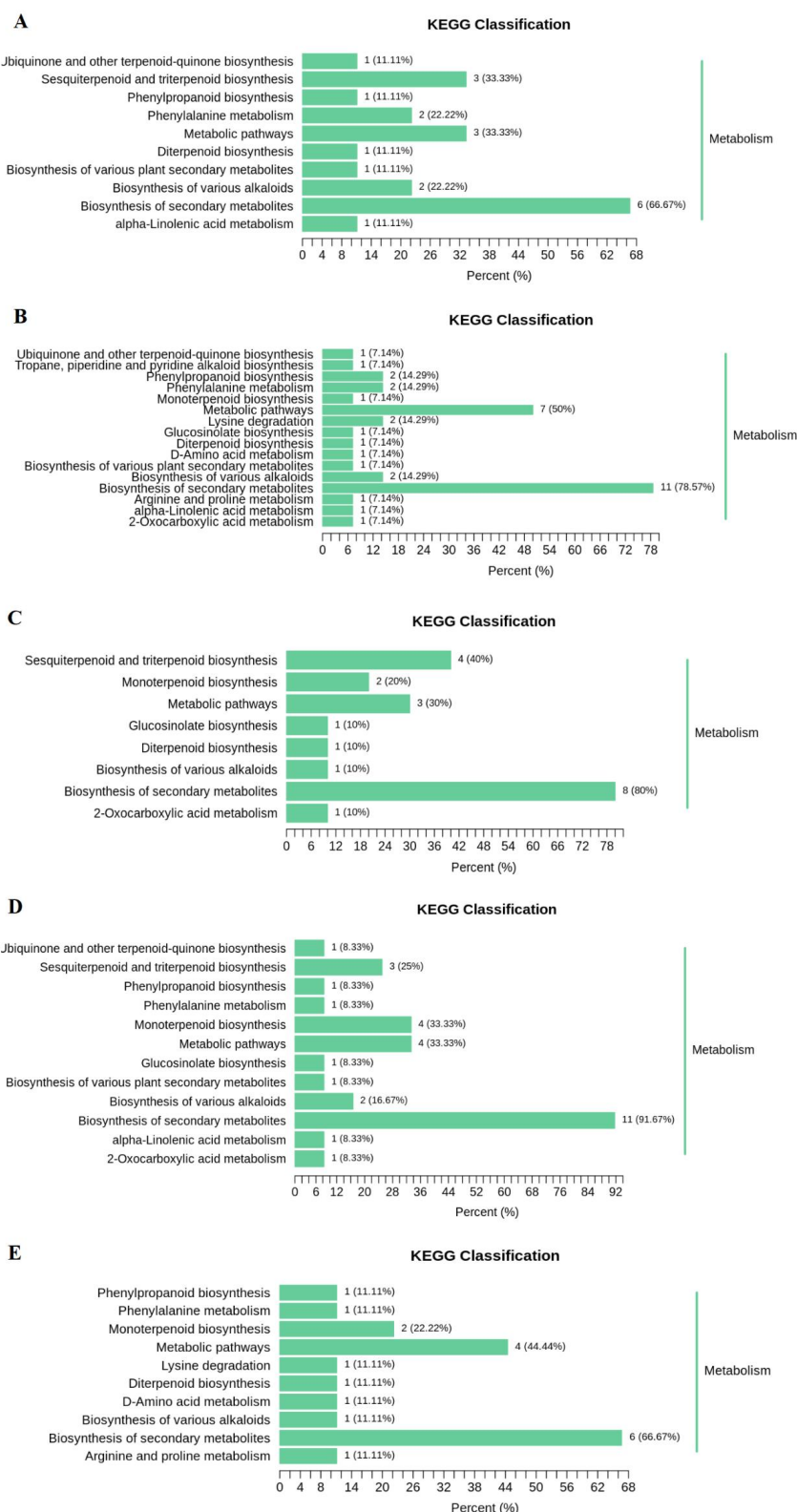


图 4-9 差异代谢物 KEGG 注释结果及分类展示图; A T2VS T1; B T3VS T2; C T4 VS T1; D T4 VS T2;

E T4 VS T3

Fig. 4-9 KEGG annotation results and classification chart of differential metabolites

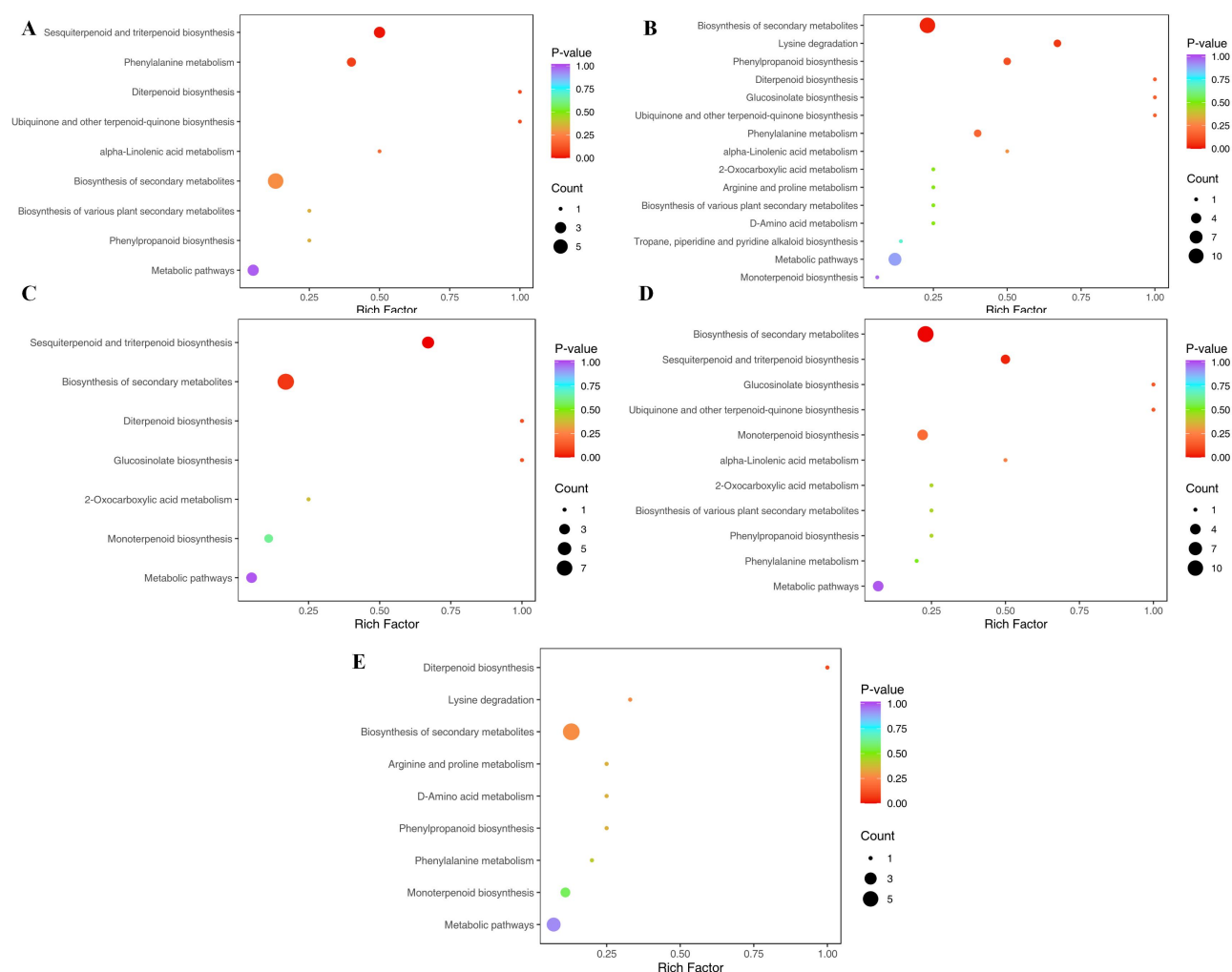


图 4-10 差异代谢物通路富集图；A T2VS T1；B T3VS T2；C T4 VS T1；D T4 VS T2；E T4 VS T3

Fig. 4-10 Pathway enrichment plot of differential metabolites

4.4.4 不同叶果比果皮风味组学分析

将高叶果比 T4 处理与其他三组样品进行差异比较，基于筛选标准鉴定得到的差异代谢物及注释到的感官风味特征，挑选注释个数最高的前 10 个感官风味进行展示：果皮特征风味主要包括绿、甜、果味、药草味、花香、辛辣、木质、香脂、薄荷、清新、蜡质和脂肪（图 4-11）。结合 $rOAV \geq 1$ 的挥发性化合物，进一步筛选对香气有直接贡献的差异累积挥发性化合物。

T4 与 T1 相比, T4 果皮与甜、果味和花香风味相关的物质有 8 种, 1-己醇(KMW0102)、乙基麦芽酚(NMW0077)和(E)-2-己烯醇(KMW0111*007)是下调挥发性代谢物, 四氢-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃(w48*025)、(E)- β -罗勒烯(WMW0040*154)、(E)-3-苯基烯丙乙酸酯(NMW0195*057)、反式玫瑰氧化物(KMW0299*025)和(2S-

顺式)-四氢化-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃(KMW0302*025)是上调化合物(图4-12)。

T4与T2相比,T4果皮中果味、甜风味相关物质有5种,1-己醇(KMW0102)、(E,E)-2,4-壬二烯醛(KMW0407*260)、(E)-2-己烯醇(KMW0111*007)和乙基麦芽酚(NMW0077)是下调挥发性代谢物,仅四氢-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃(w48*025)是上调挥发性代谢物;与花香相关物质有4种,包括反式玫瑰氧化物(KMW0299*025)、L- α -松油醇(NMW0071*144)、(2S-顺式)-四氢化-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃(KMW0302*025)和四氢-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃(w48*025)均呈上调趋势(图4-12)。

T4与T3相比,T4果皮中有8种挥发性代谢物与甜、果味和花香风味相关,包括(Z)-3,7-二甲基-1,3,6-辛三烯(KMW0235*018)、1,3-二硫戊环(QWMW0545)、柠檬醛(KMW0446)、乙基麦芽酚(NMW0077)、(E)- β -罗勒烯(WMW0040*154)、 β -罗勒烯(WMW0215*018)、(E,E)-2,4-壬二烯醛(KMW0407*260)和顺式-氧化玫瑰(KMW0298),仅有乙基麦芽酚(NMW0077)呈下调趋势(图4-12)。

综上所述,推测以下12种化合物为高叶果比下‘阳光玫瑰’果皮风味形成的关键差异积累挥发性化合物:四氢-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃、(E)- β -罗勒烯、(E)-3-苯基烯丙乙酸酯、反式玫瑰氧化物、(2S-顺式)-四氢化-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃、(E,E)-2,4-壬二烯醛、L- α -松油醇、(Z)-3,7-二甲基-1,3,6-辛三烯、1,3-二硫戊环、柠檬醛、 β -罗勒烯和顺式-氧化玫瑰。

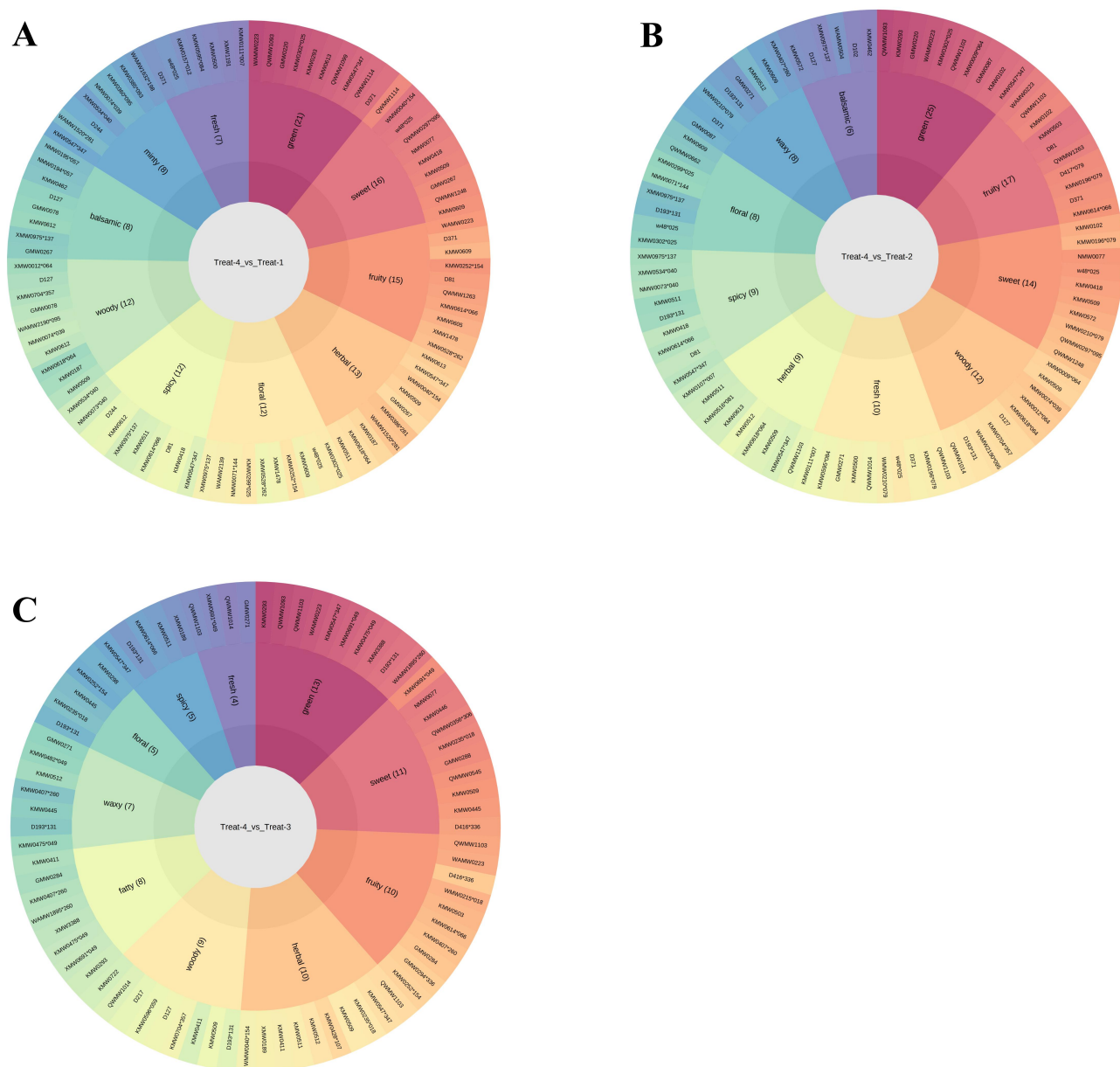
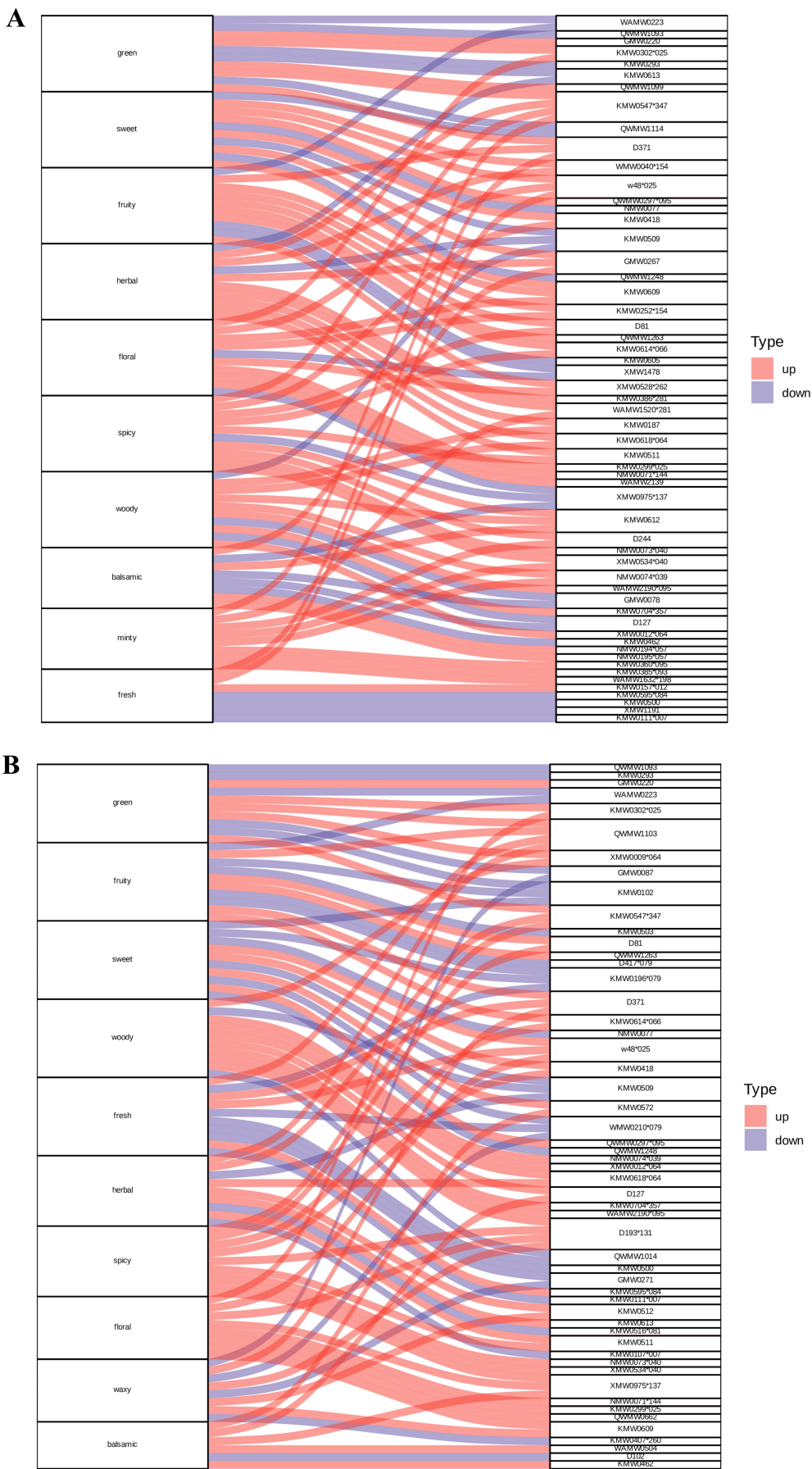


图 4-11 差异代谢物风味轮；A T4 VS T1；B T4 VS T2；C T4 VS T3

Fig. 4-11 Flavor wheel of differential metabolites; A T4 VS T1; B T4 VS T2; C T4 VS T3.



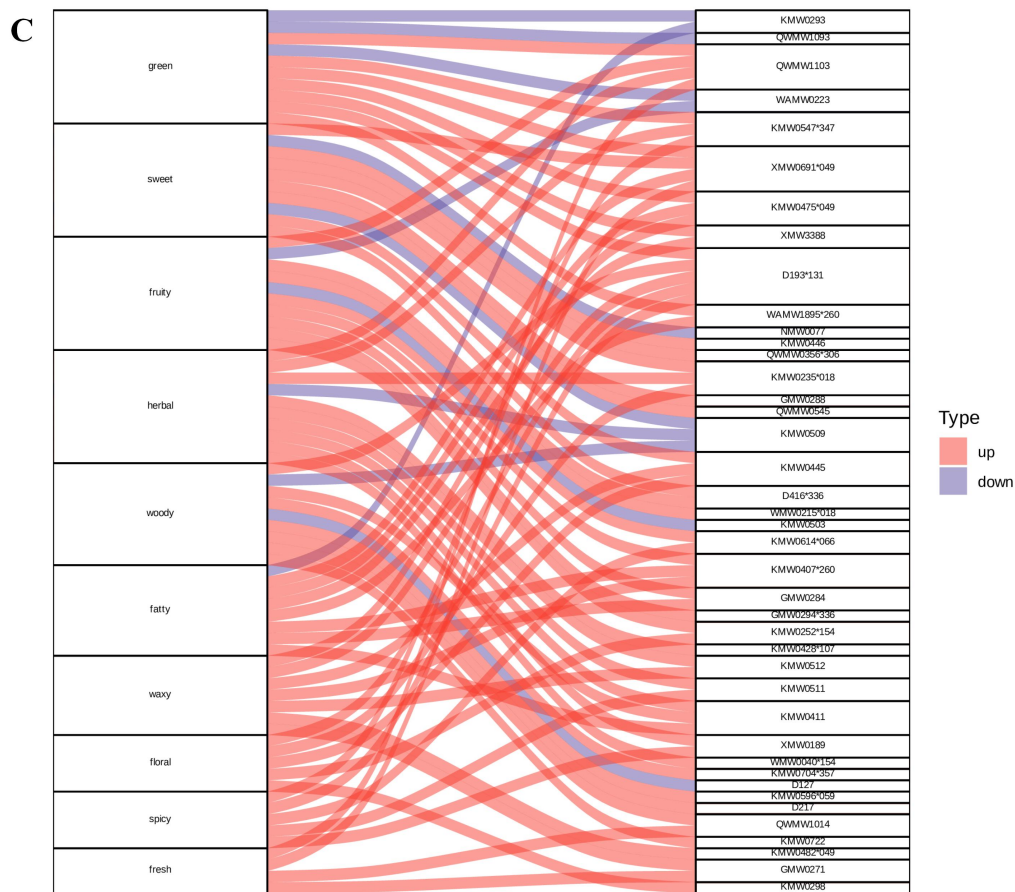


图 4-12 风味组学桑基图；A T4 VS T1；B T4 VS T2；C T4 VS T3

Fig. 4-12 Flavoromics Sankey diagram; A T4 VS T1; B T4 VS T2; C T4 VS T3.

4.5 讨论

4.5.1 不同叶果比对‘阳光玫瑰’果实生长发育的影响

源-库之间的关系十分紧密,对果树产量和果实品质都有重要的影响。叶果比会通过影响果实的颜色、硬度、可溶性固形物含量以及糖酸比来进而影响果实的成熟过程。例如,较低的叶果比会延缓甜樱桃(*Cerasus avium* L.) (Usenik et al., 2010)及欧洲葡萄(*Vitis vinifera* L.)果实的着色过程,同时还会降低果实的可溶性固形物含量,从而延缓其成熟速度(Parker et al., 2014)。本研究表明,在花后 100 d 采收时,较低的叶果比可能减缓果皮 a^* 值下降速率,使得果皮绿色的持续时间延长;而 T4 处理果实可溶性固形物达 21.13%,可滴定酸含量最低为 0.38%,果皮色相 a^* 值达 -3.11,果皮绿色最浅,果实成熟度更高。说明 T4 处理,使果实可溶性糖快速积累,能较快达到可食用标准。

4.5.2 不同叶果比对‘阳光玫瑰’挥发性代谢物的影响

影响香气物质形成的外因较为复杂,除了光照等自然环境条件外,栽培条件也对香气物质种类和含量的影响较大,主要体现在对香气前体物质的合成及转化方面,如合理的负载量有利于果实中糖分和氨基酸类物质的积累,从而促进芳香物质尤其是特征香气物质的合成(刘松忠, 2004)。葡萄中的挥发性有机化合物包括数百种属于不同化学类别的物质(Alem et al., 2019),这些化合物包括萜类化合物、酯类、醇类、醛类以及挥发性酸类(Ilç et al., 2016)。“阳光玫瑰”葡萄属于玫瑰香型,主要香气物质以萜烯类化合物为主,且物质含量较高(Sefton et al., 2008);尤其以单萜烯为特征,主导了其浓郁的玫瑰香气(Wu et al., 2019b)。本研究中采用 4 种叶果比处理“阳光玫瑰”/“克瑞森无核”,对成熟期的挥发性代谢物进行分析,发现萜类物质的占比最高。

前人研究表明,在“阳光玫瑰”中主要单萜醇有芳樟醇、香叶醇、橙花醇、香茅醇和 α -松油醇(Leng et al., 2023; Mateo et al., 2000)其主要以自由态(游离态)及糖苷结合态两种形态存在于葡萄果实中,在玫瑰香型葡萄果实中含量较高,但品尝阈值较低(Fenoll et al., 2009),因此这类物质对葡萄果实的玫瑰香味贡献很大。本研究发现, T4 样品中的萜类物质的相对含量均显著高于其他 3 个样品,其中,芳樟醇、萜品烯等特征香气物质含量也显著高于其他 3 个样品;而香叶醇、香茅醇以 T2 样本最高,橙花醇以 T1 样本最高。有研究表明,玫瑰香型葡萄果实的主要特征香气物质是芳樟醇和香叶醇,橙花醇和香茅醇起辅助作用(BARBERA et al., 2013);橙花醇、香叶醇、香茅醇含量在成熟初期含量最大,而芳樟醇和萜品醇在成熟中期才达到峰值(张克坤等, 2015;

Kalua et al., 2009)。然而,也有少数学者认为氧化玫瑰才是判断果实玫瑰香味的关键组分(Ruiz-García et al., 2014)。带有玫瑰气味的玫瑰氧化物是仅在麝香型品种中检测到的活性成分,表明玫瑰氧化物可能作为标志性香气物质(Li et al., 2025)。在葡萄果实成熟过程中,香叶醇转化为橙花醇和香茅醇,香茅醇又可进一步环化形成顺-氧化玫瑰,并且随着果实成熟,香茅醇向顺-氧化玫瑰的转化比率增加(Luan et al., 2005)。本研究中 T4 样品顺式-氧化玫瑰和反式玫瑰氧化物相对含量与 rOAV 值较高,可能与该处理下香茅醇向氧化玫瑰的转化效率较高有关;同时, T2 样本香叶醇含量最高, T1 样本橙花醇含量最高的结果,也暗示了不同叶果比可能通过调控萜类物质的生物合成路径及相互转化,进而影响各挥发性代谢物的积累水平。

此外,醛类物质中(E)-2-己烯醛、己醛也是重要的特征香气物质,在果实转熟后含量逐渐上升,成熟后有减少趋势(Kalua et al., 2009; Yang et al., 2011)。在本研究中, T1 样品中己醛的相对含量显著高于其他 3 个样本, T2 样品中(E)-2-己烯醛的相对含量最高但无显著差异。有研究表明,己醛具有青草气味和苹果气味,一般在未充分成熟的果实中含量较高(李海燕, 2017),表明 T1 样本果实成熟度较低。

4.5.3 不同叶果比对‘阳光玫瑰’代谢通路的影响

基于 KEGG 注释与富集分析结果,本研究进一步揭示了不同叶果比处理下,‘阳光玫瑰’差异代谢物在代谢通路层面的响应特征,尤其是与挥发性香气形成密切相关的萜类代谢途径表现出显著的富集与差异表达。

在所有比较组中,代谢途径与次生代谢物的生物合成为共有的共同代谢通路,与不同叶果比在油茶上的结果相似(Zhang et al., 2025)。值得关注的是, T4 样本相较于其他三组,富集了单萜类生物合成通路,并在与 T1、T2 的比较中富集了倍半萜类和三萜类生物合成通路,与 T1、T3 的比较中富集了二萜类生物合成通路。这一结果表明, T4 可能通过调控萜类合成途径中关键酶的表达,进而影响挥发性香气物质的积累,与高叶果比能上调‘玫瑰香’葡萄萜类途径中的关键基因这一结果相似(李洋, 2022)。

在次生代谢物的生物合成通路中, T3 与 T2 的比较显示,香叶醇、香茅醇、乙酸叶醇酯等呈现下调表达,可能反映了碳代谢流向由萜类合成向苯丙烷类途径倾斜,从而减弱了挥发性香气的释放,这与油茶中低叶果比激活苯丙烷通路、上调 *PAL* 等 21 个关键酶基因的结果相反(Tong et al., 2025)。在 T4 与 T2 的比较中 δ -杜松烯、L- α -松油醇、L-薄荷醇等单萜和倍半萜类香气物质显著上调,表明 T4 处理有利于促进多种挥发性萜类物质的合成,可能赋予样品更为浓郁或复杂的香气特征。

综上所述,不同叶果比处理对挥发性香气代谢具有显著调控作用,其中 T4 处理最有利于激活萜类合成途径,促进多种单萜和倍半萜香气物质的积累。

4.6 本章小结

本章通过系统研究不同叶果比对‘阳光玫瑰’果实生长发育及挥发性代谢物的影响，在供试的叶果比处理中，T4（LFR30）处理不仅在果实膨大后期能有效促进果实内含物如 SSC、SS 含量的积累，并降低 TA 含量，提升果实甜度与风味平衡，同时显著提高了果皮色相 a^* 值，促进果实成熟。

代谢组学分析揭示了，T4 处理显著促进了萜类化合物的合成与积累，其萜类化合物相对含量最高，且具有重要香气贡献（ $rOAV \geq 1$ ）的萜类化合物种类最多，包括芳樟醇、顺式-氧化玫瑰等关键花香物质。代谢组学分析进一步揭示，随着叶果比的增加，以萜类为代表的 73 个差异代谢物呈上升趋势，且 T4 处理下差异代谢物显著富集于单萜类生物合成通路。风味组学分析推测 12 种化合物为高叶果比下‘阳光玫瑰’果皮风味形成的关键差异积累挥发性化合物。说明 T4 处理能有效提高果实的糖酸含量和成熟度，促进‘阳光玫瑰’果实中萜类化合物的积累，显著提升果实的香气品质。

第5章 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’果实发育及叶片生理特性的影响

5-氨基乙酰丙酸(5-aminolevulinic acid, ALA)是叶绿素、血红素和维生素 B12 的前体,作为一种常见的植物生物刺激素,能促进葡萄光合作用,外源喷施能提高叶绿素含量、光合效率,显著促进果实糖分积累、降低酸度及增加果皮花青素含量,改善内外品质(刘晖等,2006)。叶面肥作为补充树体营养的重要途径,能够快速弥补养分不足,增强树体生理活性(王敏等,2019;车俊峰等,2011;陈智强,2021)。已有研究表明,海藻肥显著促进‘夏黑’葡萄生长,提高果实横纵径、单穗重和糖度(涂海华等,2019)。喷施磷酸二氢钾能提高葡萄果皮总花色苷、总酚及总单宁含量(万卓吾等,2025)。氨基酸型、腐殖酸型叶面肥能够显著促进设施‘阳光玫瑰’树体生长,增加叶片 SPAD 值和净光合速率,提高果实可溶性固形物和维生素 C 含量(凌凡舒等,2025)。针对生物刺激素与肥料复配,已有研究证实其对植物有积极影响。叶面喷镁及 5-ALA 可提高葡萄叶绿素含量,促进叶片光合作用提高葡萄品质(潘萧亦,2025)。

基于第 2、4 章筛选出的最优砧穗组合与最佳叶果比,以本章节以‘阳光玫瑰’/‘克瑞森无核’为试材,采用高叶果比 T4(LFR30)的修剪方式,设置 5-ALA 与不同叶面肥复配处理,测定果实生长发育动态、叶片光合性能及抗氧化生理指标,旨在探明 5-ALA 与叶面肥复配对葡萄果实发育及叶片生理功能的调控效应。

5.1 试验材料与试验设计

5.1.1 试验地概况

同第二章 2.1.1

5.1.2 试验设计

以‘克瑞森无核’改接的‘阳光玫瑰’为试材,记为 SM/CR,夏季修剪方式采用高叶果比 T4(LFR30)的修剪方式,每个处理设 3 个重复,每个重复 1 株葡萄。试验共设 5 个处理(表 5-2),在常规施肥的基础上,在果实膨大期(6 月 17 日)喷施一次叶面肥,之后每隔 10 d 喷施一次叶面肥,共喷施 4 次。叶片正反两面分别喷施,喷施时间选择在傍晚进行,每次喷至叶片湿润,肥液欲滴而不落下。其余管理措施均与对照相同。

表 5-1 叶面肥基本信息

Table 5-1 Basic information of foliar fertilizers

肥料名称 Name of fertilizer	主要成分 Major components	生产厂家 Manufacturer
磷酸二氢钾	$P_2O_5 \geq 52\%$, $K_2O \geq 34\%$	山东中博农业科技有限公司
海藻肥	海藻酸 $\geq 40.0\%$, $N+K_2O \geq 13.5\%$, 有机质 $\geq 30.0\%$, B: 0.5%-1.0%	青岛鲸灵海洋科技有限公司
黄腐酸	黄腐酸 $\geq 45\%$, 腐殖酸 $\geq 50\%$, 氨基酸类物质 $\geq 1.5\%$	山东农大肥业科技股份有限公司
氨基酸	氨基酸 $\geq 100\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $Fe+Zn+B \geq 20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$	四川润尔科技有限公司

表 5-2 不同叶面肥施肥方案

Table 5-2 Different foliar fertilizer application schemes

处理 Treatment	处理缩写 Treatment abbreviation	施肥方案 Fertilizer plan	稀释倍数 Dilution factor
CK	CK	清水	—
T1	ALA	5-氨基乙酰丙酸	$100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$
T2	LS	5-氨基乙酰丙酸+磷酸二氢钾叶面肥	$100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、稀释 1000 倍
T3	HZF	5-氨基乙酰丙酸+海藻叶面肥	$100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、稀释 2000 倍
T4	HFS	5-氨基乙酰丙酸+黄腐酸叶面肥	$100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、稀释 1000 倍
T5	AJS	5-氨基乙酰丙酸+氨基酸叶面肥	$100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、稀释 1000 倍

5.2 测定指标及方法

5.2.1 果实品质指标测定

同第二章 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3

5.2.2 叶片生理功能测定

同第二章 2.2.4, 2.2.5

8 月 20 日采集叶片，测定超氧化物歧化酶（Superoxide dismutase, SOD）、过氧化物酶（Peroxidase, POD）、过氧化氢酶（Catalase, CAT）（施海涛，2016；李忠光等，2008；刘世鹏等，2011）。

5.3 数据处理

同第二章 2.3 小节

5.4 结果与分析

5.4.1 5-ALA 和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’果实外观品质的影响

5.4.1.1 5-ALA 和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’果实大小的影响

5-氨基乙酰丙酸（5-ALA）和不同叶面肥复配对‘阳光玫瑰’葡萄果实横径影响如图 4-1 所示，花后 40 d，CK 与 ALA 处理果实横径无显著差异，LS 处理果实横径最小，为 19.11 mm，显著低于 HZF、HFS 和 AJS 处理。花后 55 d，HZF 处理的果实横径最高，为 22.11 mm，对照（CK）果实横径最低，为 20.73 mm，二者差异显著（ $P<0.05$ ）；花后 70 d，果实横径以 HZF 处理最高，达 23.38 mm，其次是 HFS，达 23.10 mm，HZF 和 HFS 处理的果实横径显著高于 CK 和 ALA 处理；花后 100 d，HZF 处理果实横径最高，达 26.28 mm，显著高于其他 5 种处理，CK 果粒横径最低，为 24.56 mm，显著低于其他处理。

由图 5-2 可以看出，‘阳光玫瑰’果实纵径在花后 55-70 d 增长缓慢，花后 70-85 d 增长较快；HZF 处理果实纵径在各时期均表现最优。花后 70 d，除 CK 外，其余处理果实纵径均达 25.00 mm 以上；花后 85 d，HZF 处理果实纵径最高，其次是 HFS 处理，显著高于 CK 和 ALA 处理；花后 100 d，LS、HZF、HFS 和 AJS 处理的果实纵径均达 30.00 mm 以上，果粒纵径由高到低依次为：HZF>AJS>HFS>LS>ALA>CK。

由图 5-3 可以看出，HZF 处理单粒质量在各时期均表现最优，CK 处理单粒质量在各时期均最低；花后 40 d，HZF 处理单粒质量显著高于 CK 和 LS 处理，但与其他处理无显著差异；花后 70-85 d，果实单粒质量增长较快进入第二次生长高峰；花后 100 d，其中，HZF 处理果实单粒质量达 14.09 g，与 AJS 处理无显著差异，但与其他 4 种处理差异显著（ $P<0.05$ ）；不同处理果实单粒质量均高于 CK，从大到小依次为 HZF>AJS>LS>HFS>ALA>CK，分别较 CK 提高了 1.65、1.18、0.83、0.79、0.62 g。

5-ALA 与不同叶面肥复配对‘阳光玫瑰’果形指数的影响如图 4-4 所示，花后 40 d，HZF 和 AJS 处理的果形指数分别为 1.19 和 1.16，显著高于 CK；花后 55 d 和 70 d，不同处理果实的果形指数无显著差异；花后 85 d，CK 处理的果形指数显著高于 HZF、HFS 和 AJS；花后 100 d，不同处理果实的果形指数无显著差异，不同处理果实果形指数均在 1.1-1.3 之间，果粒呈椭圆形。

综上所述, 5-ALA 与不同叶面肥复配均促进了‘阳光玫瑰’果实的增大。其中, HZF 处理对‘阳光玫瑰’果实横径与纵径增长以及提升单粒重方面效果最显著。

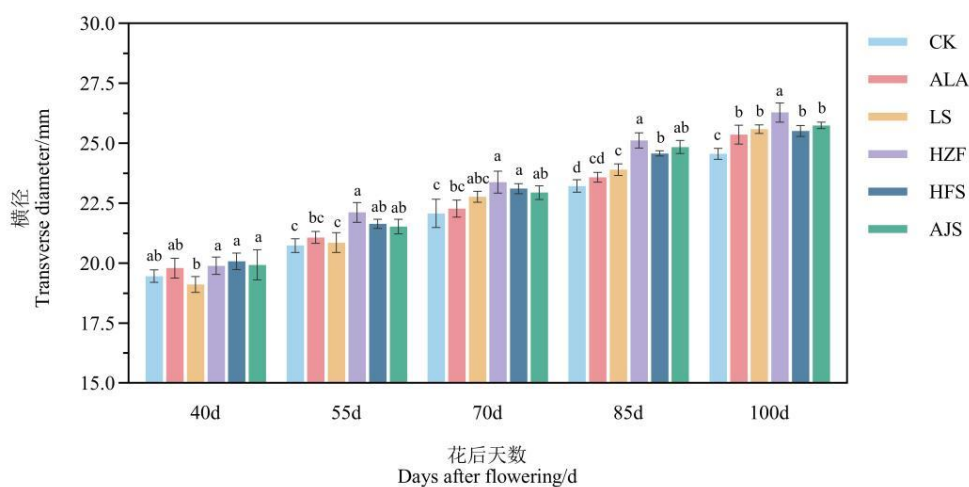


图5-1 5-ALA和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’葡萄果实横径的影响

Fig. 5-1 Effect of the combination of 5-ALA and foliar fertilizer on the fruit transverse diameter of ‘Shine Muscat’ grape

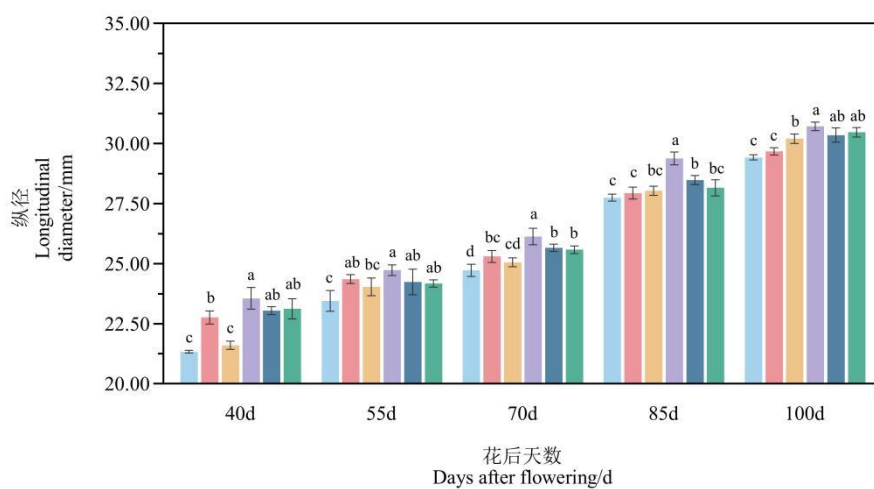


图5-2 5-ALA和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’葡萄果实纵径的影响

Fig. 5-2 Effect of the combination of 5-ALA and foliar fertilizer on the fruit longitudinal diameter of ‘Shine Muscat’ grape

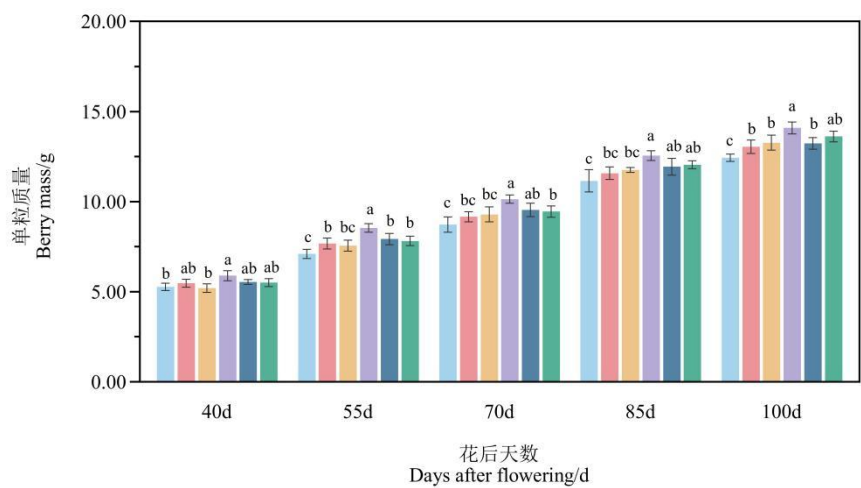


图 5-3 5-ALA 和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’葡萄果实单粒质量的影响

Fig. 5-3 Effect of the combination of 5-ALA and foliar fertilizer on the single berry weight of ‘Shine Muscat’ grape

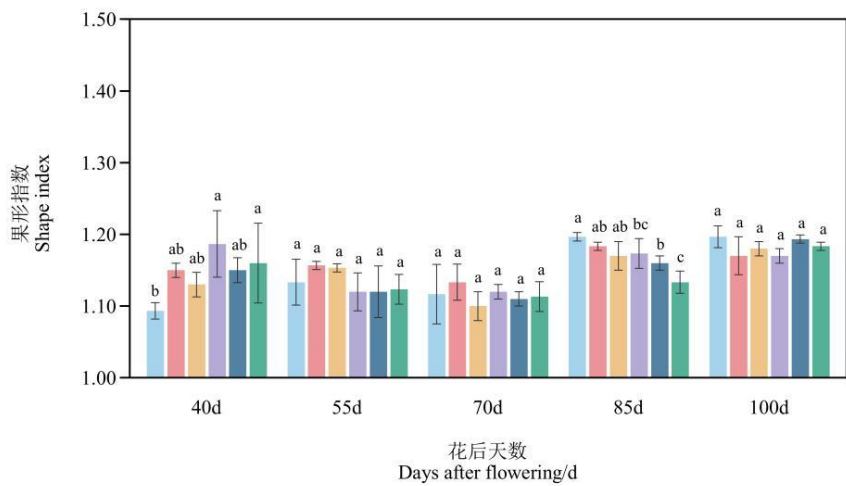


图 5-4 5-ALA 和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’葡萄果形指数的影响

Fig. 5-4 Effect of the combination of 5-ALA and foliar fertilizer on the fruit shape index of ‘Shine Muscat’ grape

5.4.1.2 5-ALA 和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’果实色泽的影响

5-ALA 和不同叶面肥复配对‘阳光玫瑰’葡萄果皮色相 L^* 影响如图 5-5 所示，花后 40 d，LS 处理果皮色相 L^* 最高，为 46.63，显著高于其他处理；花后 55 d，ALA 处理果皮色相 L^* 最小，为 44.23，显著低于 CK、HFS 和 AJS 处理；花后 70 d，LS 处理果皮色相 L^* 值最大，为 43.72，显著高于其他处理；花后 85 d，HFS 处理果皮色相 L^* 值最大，为 42.64，显著高于其他处理；花后 100 d，果皮色相 L^* 值以 ALA 处理最大，为 42.77，

以 AJS 处理最小，为 40.55，二者间差异显著。

果皮色相 a^* 值变化如图 5-6 所示，随着果实的生长发育，‘阳光玫瑰’葡萄果皮色相 a^* 值逐渐增大。花后 40 d，HZF 和 HFS 处理果皮色相 a^* 值显著高于 CK；花后 55 d 和 70 d，HZF 处理果皮色相 a^* 均最高，由 -4.19 增长到 -2.92；花后 85 d，AJS 和 HZF 处理果皮色相 a^* 分别为 -2.52 和 -2.34，均显著高于其他处理；花后 100 d，果皮色相 a^* 以 AJS 处理最高，为 -2.02，其次为 HZF 处理，为 -2.05，两者间差异不显著，但显著高于其他 4 个处理。HZF 处理在花后 55、70 及 85 d 均表现出较高的 a^* 值，AJS 处理则在花后 100 d 成为 a^* 值最高的处理，且与 HZF 处理差异不显著。

如图 5-7 所示，随着果实生长发育果皮色相 b^* 值逐渐降低，花后 40 d，CK 和 ALA 处理果皮色相 b^* 值无显著差异；花后 55 d，HZF 处理果皮色相 b^* 最低，为 13.08，显著低于其他处理；花后 70-85 d，CK 处理果皮色相 b^* 由 12.30 下降至 10.73；花后 100 d，CK 和 HFS 处理果皮色相 b^* 值分别为 8.97 和 8.90，显著高于其他处理。

色泽饱和度 c^* 值变化如图 5-8 所示，随着果实的生长发育果皮色相 c^* 值逐渐下降，在花后 100 d，果皮色泽饱和度 c^* 值由大到小依次为 CK>HFS>LS>ALA>HZF>AJS，分别达 9.31、9.21、8.74、8.59、8.37、8.24。

综上所述，HZF 处理在花后 55、70 及 85 d 果皮色相 a^* 值均最高，而花后 100 d，AJS 处理的 a^* 值最高，且与 HZF 处理差异不显著，说明 HZF 和 AJS 处理的果实成熟度较高。色泽饱和度 c^* 值而言，至花后 100d，CK 处理的 c^* 值最高，AJS 处理最低，说明 CK 处理下果实颜色最为鲜艳，而 AJS 处理果实颜色相对较暗淡。

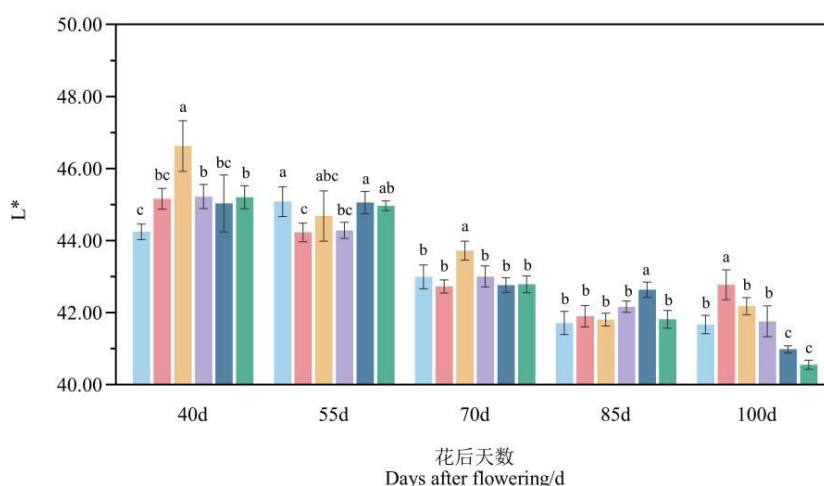


图5-5 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’葡萄色泽 L^* 的影响

Fig. 5-5 Effect of the combination of 5-ALA acid and foliar fertilizer on the color L^* of ‘Shine Muscat’ grape

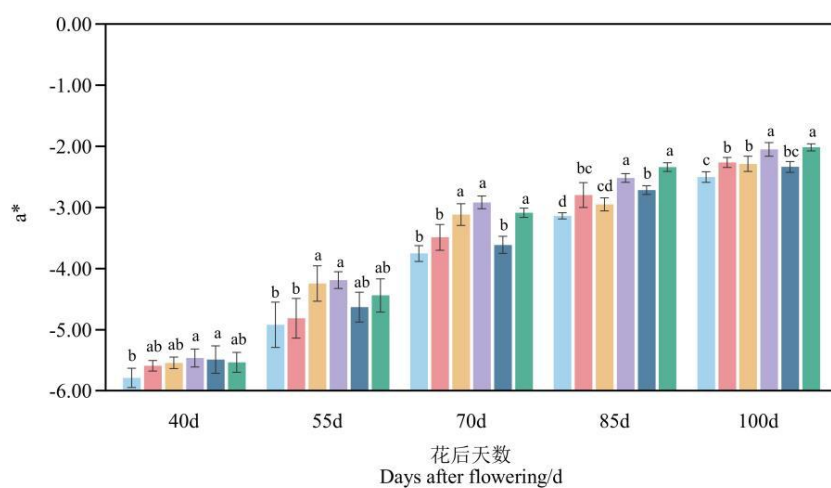


图5-6 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’葡萄色泽 a^* 的影响

Fig. 5-6 Effect of the combination of 5-ALA acid and foliar fertilizer on the color a^* of ‘Shine Muscat’ grape

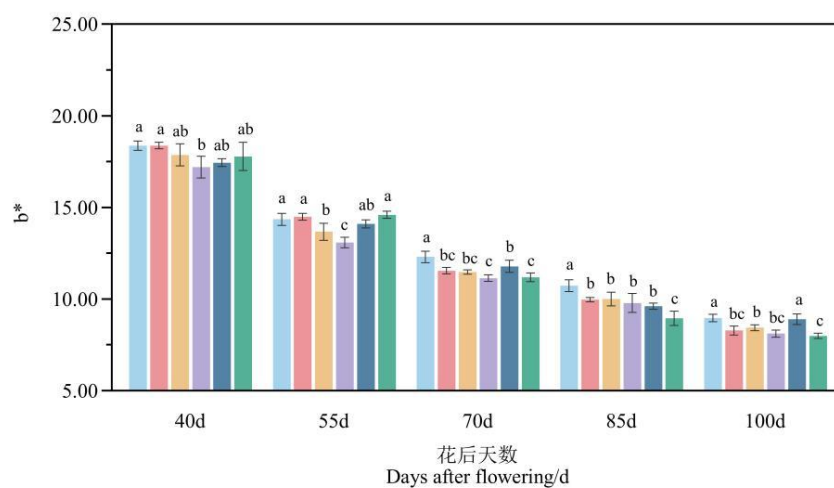


图5-7 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’葡萄色泽 b^* 的影响

Fig. 5-7 Effect of the combination of 5-ALA acid and foliar fertilizer on the color b^* of ‘Shine Muscat’ grape

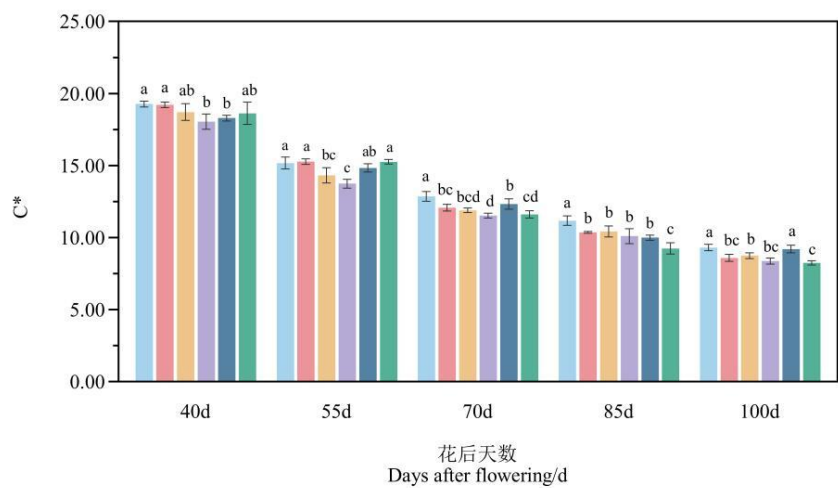


图5-8 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’葡萄色泽 c^* 的影响

Fig. 5-8 Effect of the combination of 5-ALA acid and foliar fertilizer on the color c^* of ‘Shine Muscat’ grape

5.4.2 5-ALA 和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’果实内在品质的影响

随着果实的生长发育，‘阳光玫瑰’果实可溶性固形物（SSC）变化如图 5-9 所示，花后 40 d，果实 SSC 无显著差异，花后 55-70 d，SSC 快速上升，AJS、HZF、LS 和 ALA 处理的果实 SSC 均超过 16%，显著高于 CK，而 HFS 处理与 CK 差异不显著；花后 85 d，HZF 和 AJS 处理果实 SSC 显著高于其他处理，分别达 20.07%和 20.10%，花后 100 d，AJS 处理果实 SSC 最高，达 22.73%，其次为 HZF 处理，达 22.40%，显著高于其他处理。

可溶性糖（SS）含量的变化如图 5-10 所示，随着果实的生长发育，‘阳光玫瑰’果实 SS 含量呈逐渐上升趋势，花后 55-70 d，上升速率最快。花后 55 d 和 70 d，HZF 处理果实 SS 含量均最高分别为 7.50%和 13.60%；花后 100 d，AJS 处理果实 SS 含量最高，达 20.40%，与 HZF 处理无显著差异。

如图 5-11 所示，可滴定酸（TA）含量随着果实的生长发育呈下降趋势，在花后 40-55 d 下降最快，花后 55-70 d 下降速率减慢，花后 70-100 d 下降缓慢趋于平缓。CK 果实 TA 含量在各时期均表现最高；花后 100 d，HZF 和 AJS 处理果实 TA 含量降至 0.32%，显著低于其他 4 组处理。

固酸比（RTT）变化如图 5-12 所示，花后 40 d，ALA、LS 和 AJS 处理果实 RTT 显著高于 CK；花后 55 d，HZF 处理果实 RTT 显著高于 CK 和 LS 处理，与 ALA、HFS 和 AJS 处理无显著差异；花后 70 d，ALA、LS、HZF 和 AJS 处理果实 RTT 均显著高于 CK 和 HFS 处理；花后 85 d，HZF 和 AJS 处理果实 RTT 分别达 51.71 和 52.00，显著高于其他处理；花后 100 d，果实固酸比从大到小依次为 AJS>HZF>LS>ALA>HFS>CK，

其中 AJS 处理果实 RTT 达 70.23，分别比 HZF、LS、ALA、HFS 和 CK 高 1.43、6.32、7.00、7.71、13.38，果实 RTT 各处理显著大于 CK，分别比 CK 高 11.22%、12.42%、21.02%、9.97%和 23.54%。

综上所述，AJS 和 HZF 处理表现较优，表明 AJS 和 HZF 处理能够有效促进‘阳光玫瑰’果实糖分的积累，同时降低 TA 含量，提高果实 RTT。ALA 单剂和 LS 处理虽有一定效果，但整体提升幅度不及 AJS 和 HZF 处理。

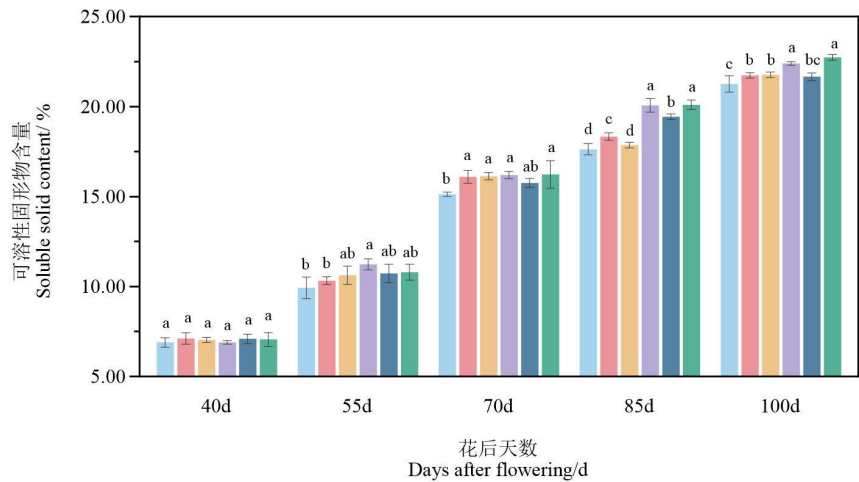


图 5-9 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’葡萄可溶性固形物含量的影响

Fig. 5-9 Effect of the combination of 5-ALA acid and foliar fertilizer on the soluble solids content of ‘Shine Muscat’ grape

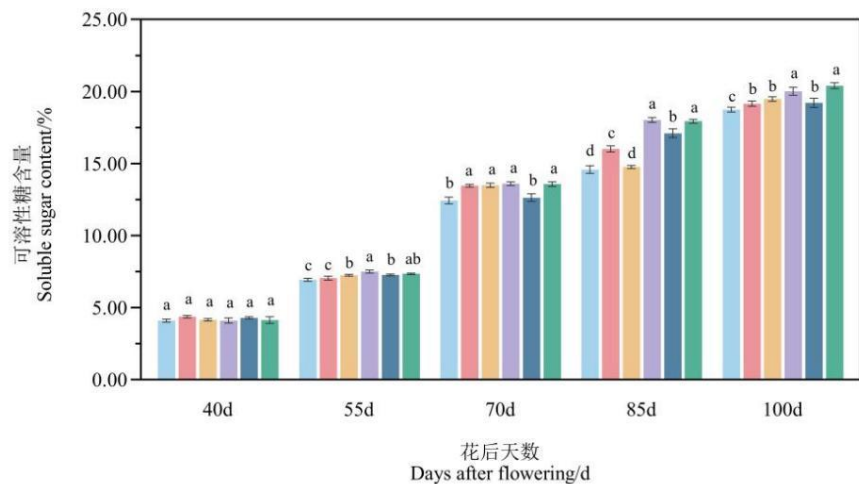


图5-10 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’葡萄可溶性糖含量的影响

Fig. 5-10 Effect of the combination of 5-ALA acid and foliar fertilizer on the soluble sugar content of ‘Shine Muscat’ grape

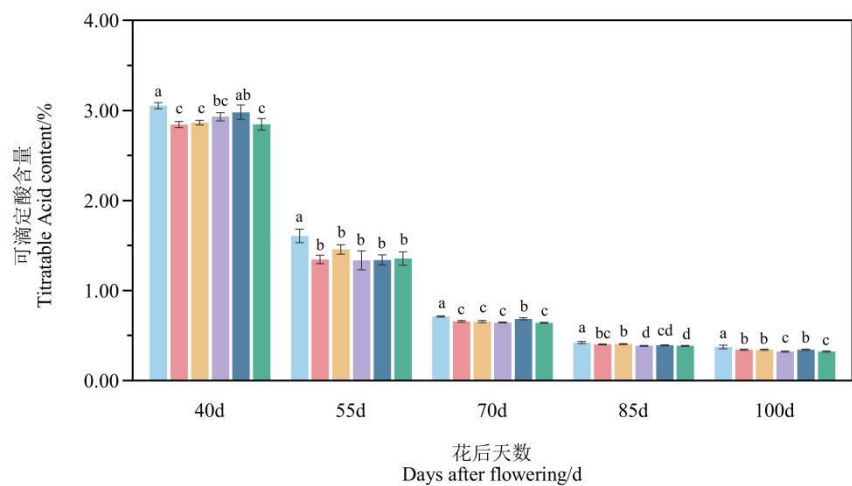


图5-11 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’葡萄可滴定酸含量的影响
Fig. 5-11 Effect of the combination of 5-ALA acid and foliar fertilizer on the titratable acid content of ‘Shine Muscat’ grape

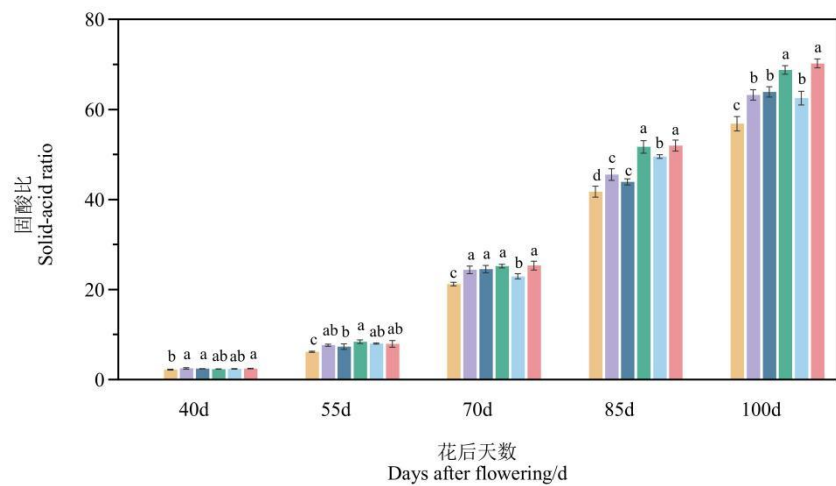


图5-12 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’葡萄固酸比的影响
Fig. 5-12 Effect of the combination of 5-ALA and foliar fertilizer on the sugar-acid ratio of ‘Shine Muscat’ grape

5.4.3 5-ALA 和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’叶片光合特性的影响

5-ALA 和不同叶面肥复配对‘阳光玫瑰’叶片的蒸腾速率 (T_r) 的影响如图 5-13; T_r 以 AJS 处理最高, 达 $4.40 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 其次为 HZF 和 LS 处理, 分别达 $4.35 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $4.22 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 与 CK 存在显著差异 ($P<0.05$)。

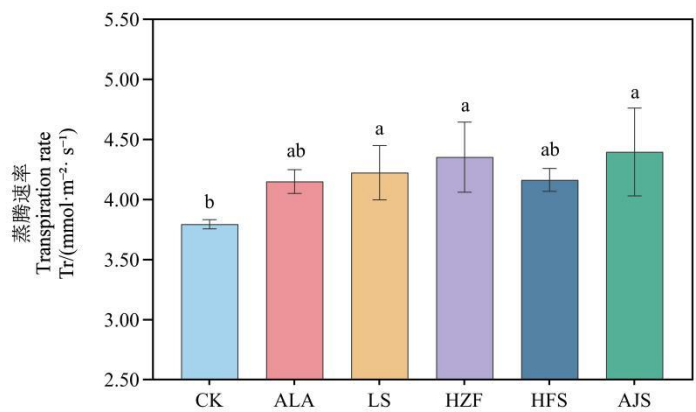


图 5-13 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’叶片蒸腾速率的影响

Fig. 5-13 Effect of the combination of 5-ALA and foliar fertilizer on the leaf transpiration rate of ‘Shine Muscat’ grape leaves

由图5-14可知，5-ALA和不同叶面肥复配显著提高了‘阳光玫瑰’叶片的净光合速率（ P_n ）；各处理 P_n 大小为 $HZF > AJS > HFS > LS > ALA > CK$ ，分别达17.77、17.60、16.74、16.68、16.56和15.15 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ，各处理叶片 P_n 与CK相比均存在显著差异（ $P < 0.05$ ）。

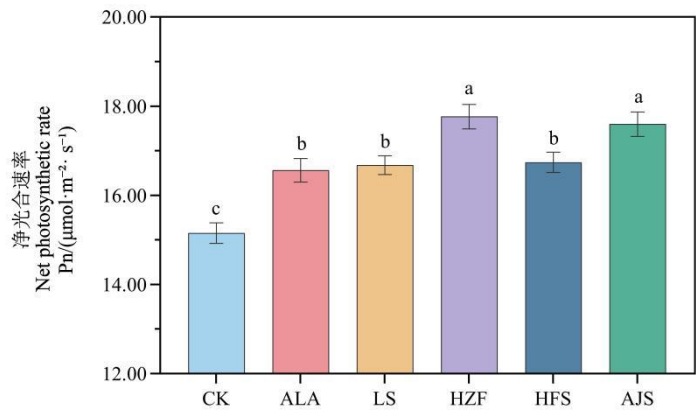


图5-14 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’叶片净光合速率的影响

Fig. 5-14 Effect of the combination of 5-ALA and foliar fertilizer on the net photosynthetic rate of ‘Shine Muscat’ grape leaves

由图 5-15 可知，5-ALA 和不同叶面肥复配显著提高了‘阳光玫瑰’叶片的胞间 CO_2 浓度（ C_i ）。各处理叶片 C_i 与 CK 相比均存在显著差异（ $P < 0.05$ ）， C_i 从大到小依次为 $HZF > AJS > LS > HFS > ALA > CK$ ，各处理与 CK 相比显著提高了 18.31%、16.66%、15.27%、12.58%、11.83%。

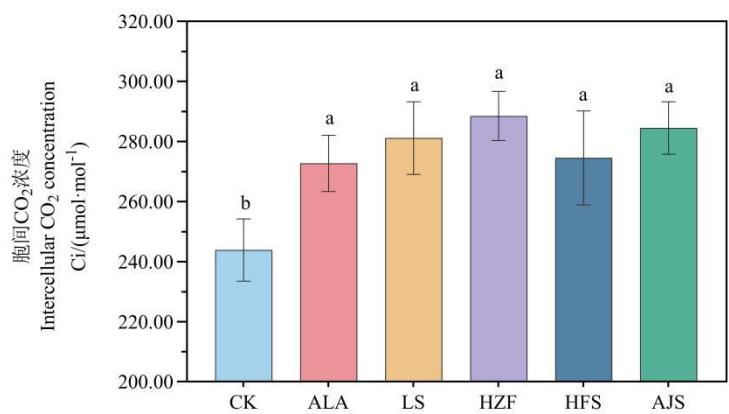


图5-15 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’叶片胞间CO₂浓度的影响

Fig. 5-15 Effect of the combination of 5-ALA and foliar fertilizer on the leaf intercellular CO₂ concentration of ‘Shine Muscat’ grape leaves

由图 5-16 可知，5-ALA 与不同叶面肥复配可显著提高‘阳光玫瑰’叶片的气孔导度（ G_s ）。不同处理叶片的 G_s 与 CK 相比均存在显著差异（ $P<0.05$ ），其中，HZF 和 AJS 处理的叶片 G_s 分别达 0.35 、 $0.34 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，二组间无显著差异，但显著高于 CK、ALA 和 HFS 处理。

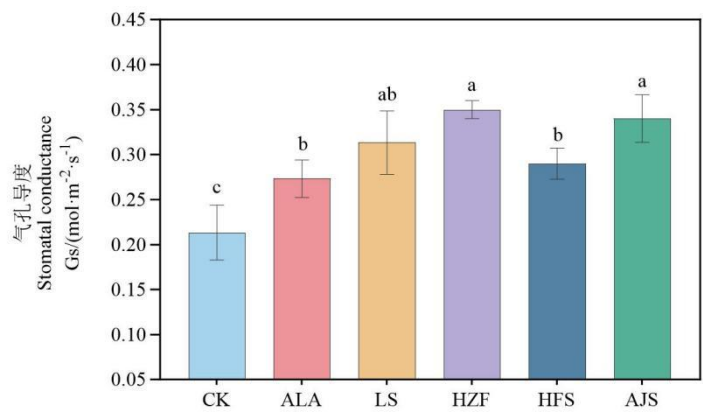


图5-16 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’叶片气孔导度的影响

Fig. 5-16 Effect of the combination of 5-ALA and foliar fertilizer on the leaf stomatal conductance of ‘Shine Muscat’ grape leaves

由图5-17可知，不同处理叶片的水分利用率（WUE）与CK相比无显著差异。HZF 处理的WUE最高，为 $4.09 \text{ mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ，LS处理的WUE最低，为 $3.96 \text{ mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ，无显著差异。

综上所述，HZF与AJS处理在提高叶片光合性能方面表现较为显著，为果实品质的形成奠定了良好的基础。

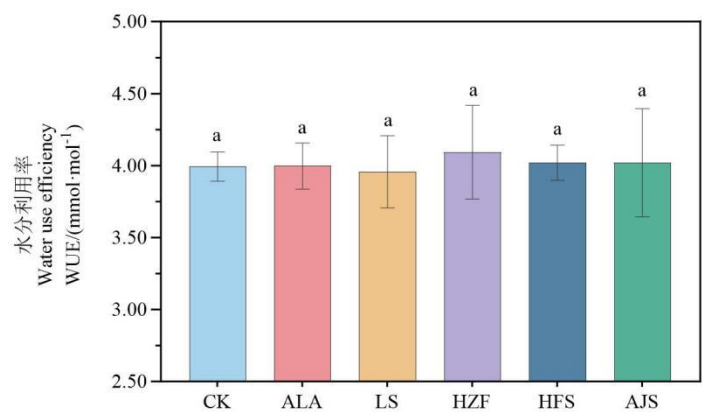


图5-17 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’叶片水分利用率的影响

Fig. 5-17 Effect of the combination of 5-ALA and foliar fertilizer on the leaf water use efficiency of ‘Shine Muscat’ grape leaves

5.4.4 5-ALA 和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’叶片叶绿素含量的影响

如图 4-18 所示，5-ALA 和不同叶面肥复配均显著提高了‘阳光玫瑰’叶片叶绿素 a（Chl a）的含量，Chl a 含量由高到低依次为：HZF>AJS>LS>HFS>ALA>CK；其中，HZF 和 AJS 处理的 Chl a 含量分别达 2.81、2.79 mg·g⁻¹，二者无显著差异，相较于 CK 显著提高了 18.57%、17.72%。

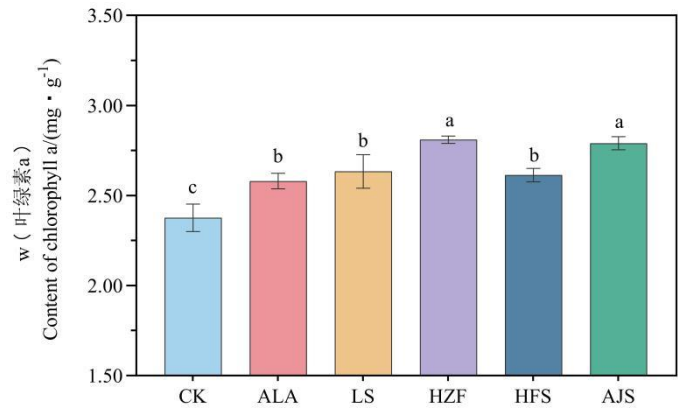


图5-18 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’叶片叶绿素a含量的影响

Fig. 5-18 Effect of the combination of 5-ALA and foliar fertilizer on the leaf chlorophyll a content of ‘Shine Muscat’ grape leaves

如图5-19所示，HZF处理叶片叶绿素b（Chl b）含量最高，达1.18 mg·g⁻¹，其次为AJS处理，含量为1.11 mg·g⁻¹，二者均显著高于其他处理；ALA、LS和HFS处理下叶片Chl b含量与CK相比无显著差异。

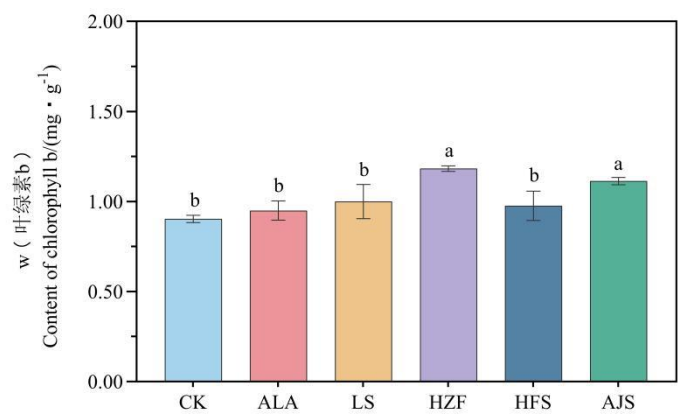


图5-19 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’叶片叶绿素b含量的影响

Fig. 5-19 Effect of the combination of 5-ALA and foliar fertilizer on the leaf chlorophyll b content of ‘Shine Muscat’ grape leaves

如图5-20所示，5-ALA和不同叶面肥复配均显著提高了‘阳光玫瑰’叶片总叶绿素（Chl a+b）含量；Chl a+b含量由高到低依次为：HZF>AJS>LS>HFS>ALA>CK，Chl a+b含量分别达3.99、3.91、3.63、3.59、3.53、3.28 mg·g⁻¹，各处理叶片Chl a+b含量与CK相比差异显著（*P*<0.05）。

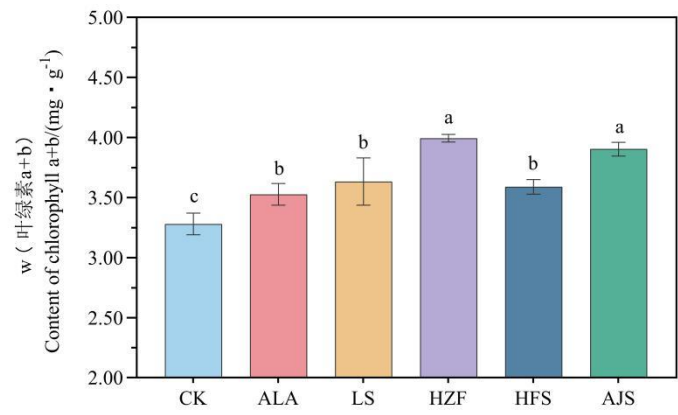


图5-20 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’叶片总叶绿素含量的影响

Fig. 5-20 Effect of the combination of 5-ALA and foliar fertilizer on the leaf chlorophyll a+b content of ‘Shine Muscat’ grape leaves

如图 5-21 所示，HZF 处理叶片叶绿素 a/b（Chl a/b）的值与 AJS 无显著差异，但显著低于其他处理；ALA 处理 Chl a/b 的值最高，为 2.72，HZF 处理的 Chl a/b 的值最低，为 2.37。

综上所述，HZF 和 AJS 处理显著提高了叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量，进而使得总叶绿素含量也显著增加，且叶绿素 a/b 值相对较低，更有利于植物对弱光的利用。

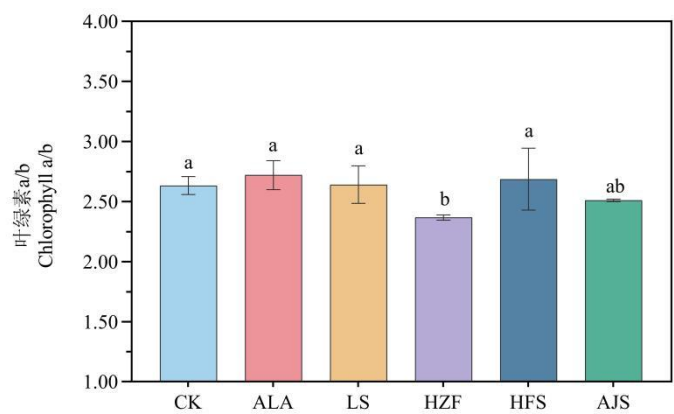


图5-21 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’叶片叶绿素a/b的影响

Fig. 5-21 Effect of the combination of 5-ALA and foliar fertilizer on the leaf chlorophyll a/b of ‘Shine Muscat’ grape leaves

5.4.5 5-ALA 和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’叶片抗氧化酶活性的影响

如图 5-22 所示，5-ALA 与不同叶面肥复配处理均显著提高了‘阳光玫瑰’叶片超氧化物歧化酶（SOD）活性。其中，HZF、HFS 和 ALA 处理的 SOD 活性无显著差异，分别达 296.29、294.11、285.72 U·(g FW)⁻¹；CK 处理的 SOD 活性最低，为 230.63 U·(g FW)⁻¹，显著低于其他 5 种处理。

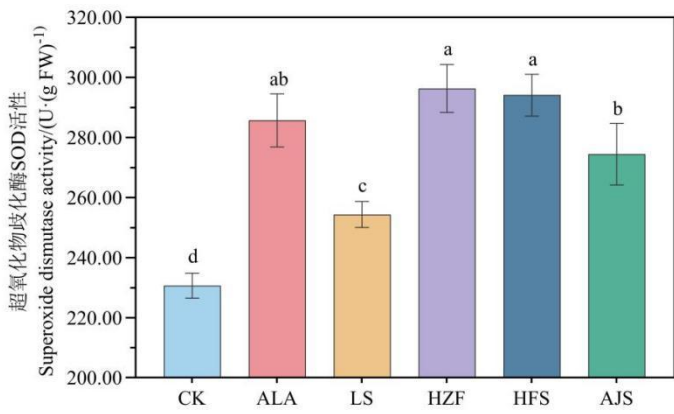


图5-22 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’叶片SOD活性的影响

Fig. 5-22 Effect of the combination of 5-ALA and foliar fertilizer on the leaf SOD activity of ‘Shine Muscat’ grape leaves

如图 5-23 所示，不同处理叶片过氧化物酶（POD）活性从大到小依次为：HZF>HFS>AJS>LS>ALA>CK；其中，HZF 处理 POD 活性达 4.05 U·(g FW)⁻¹，相较于 CK 提高了 2.02 U·(g FW)⁻¹；ALA 处理与 CK 无显著差异，HZF、HFS、AJS 和 LS 处理与 CK 存在显著差异（P<0.05）。

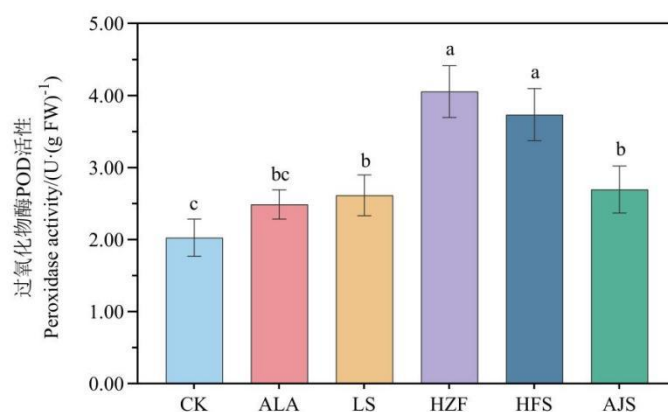


图5-23 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’叶片POD活性的影响

Fig. 5-23 Effect of the combination of 5-ALA and foliar fertilizer on the leaf POD activity of ‘Shine Muscat’ grape leaves

如图 5-24 所示，AJS 处理叶片过氧化氢酶（CAT）活性最高，其次为 HFS 处理和 HZF 处理，其 CAT 活性分别达 3.07、2.99、2.96 U·(g FW)⁻¹，三者之间无显著差异；与 CK 相比，AJS、HFS 和 HZF 处理分别使 CAT 活性提高了 0.85、0.77、0.74 U·(g FW)⁻¹。

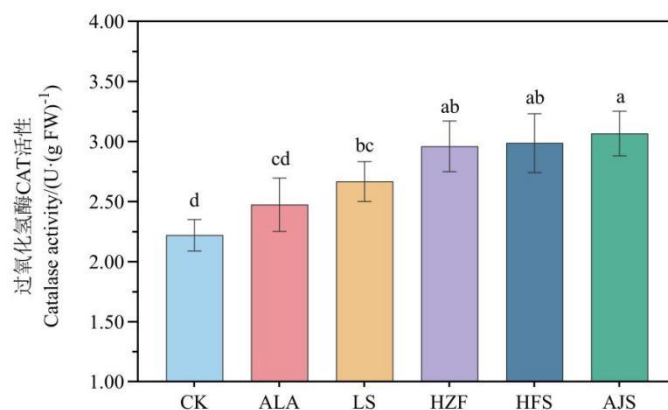


图5-24 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥复配对‘阳光玫瑰’叶片CAT活性的影响

Fig. 5-24 Effect of the combination of 5-ALA and foliar fertilizer on the leaf CAT activity of ‘Shine Muscat’ grape leaves

综上所述，不同处理能够提高‘阳光玫瑰’叶片 SOD、POD 和 CAT 的活性，增强植株清除活性氧自由基的能力。其中，HZF 处理在提升 SOD 和 POD 活性较显著，AJS 处理则在提高 CAT 活性最显著，表明不同叶面肥与 5-ALA 复配在调节叶片抗氧化系统方面的协同效应。

5.4.6 5-ALA 与叶面肥复配对‘阳光玫瑰’葡萄的综合效应评价

5.4.6.1 相关性分析

对不同处理的 23 个生理指标进行相关性分析，由图 5-25 可知：果皮色相 a^* 值与横径、纵径、单粒质量、SSC、SS、RTT、Chl a、Chl b、Chl a+b、 T_r 、 P_n 、 C_i 、 G_s 和 CAT 呈极显著正相关 ($P<0.01$)，与 SOD 呈显著正相关 ($P<0.05$)，与 b^* 、 c^* 和 TA 呈极显著负相关 ($P<0.01$)。RTT 与横径、纵径、单粒质量、 a^* 、SSC、SS、Chl a、Chl b、Chl a+b、 T_r 、 P_n 、 C_i 、 G_s 、SOD 和 CAT 呈极显著正相关 ($P<0.01$)，与 TA、 b^* 和 c^* 呈极显著负相关 ($P<0.01$)。

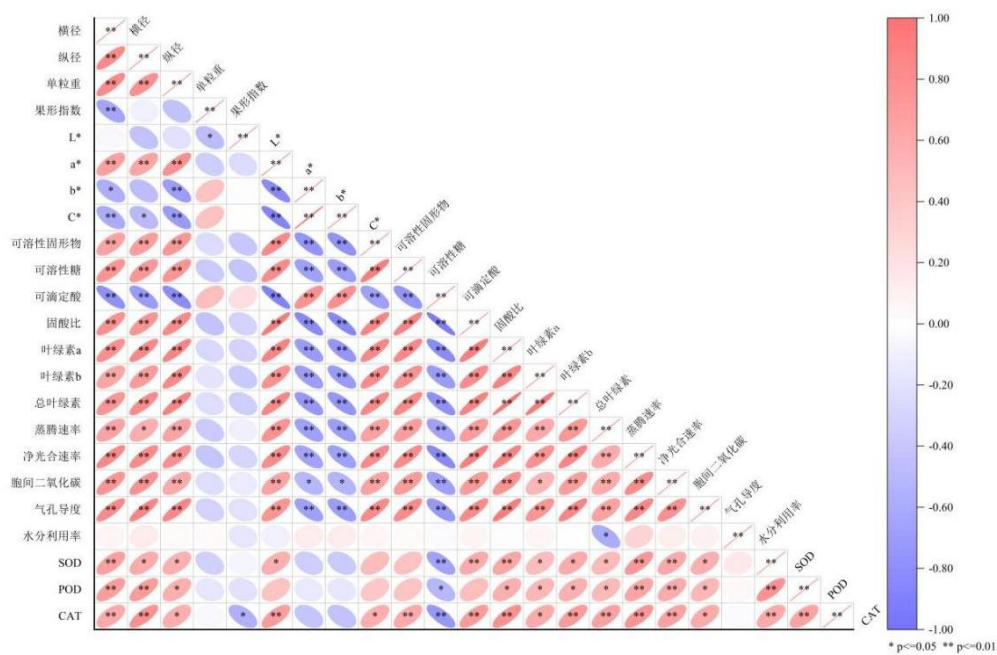


图 5-25 5-ALA 和不同叶面肥复配相关指标的相关性分析图

Fig. 5-25 Correlation analysis plot of indicators related to the combination of 5-ALA and different foliar fertilizers

5.4.6.2 主成分分析

对 5-ALA 和不同叶面肥复配的 17 个指标进行主成分分析，如表 5-3 所示，发现两个主成分的特征值分别为 12.308、1.533，共提取出 2 个主成分，累计方差贡献率达 81.421%，对应的方差贡献率分别为 72.402%、9.019%，表明这 2 个主成分可以代表大部分的信息，因此选取这 2 个主成分进行综合评价。在第一主成分中，单粒质量、 a^* 、 b^* 、SSC、SS、TA、RTT、Chl a+b 和 G_s 的贡献率较大；果粒纵径、SOD 和 POD 对第二主成分的贡献率较大。

根据综合得分排名（表 4-4），5-ALA 和不同叶面肥复配的综合评价由高到低依次为：HZF>AJS>LS>HFS>ALA>CK。

表 5-3 5-ALA 和不同叶面肥复配相关指标的主成分分析

Table 5-3 Principal component analysis of indicators related to the combination of 5-ALA and different foliar fertilizers

项目 Projects	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2
特征根 Latent root	12.308	1.533
贡献率 (%) Contribution rate	72.402	9.019
累计贡献率 (%) The contribution rate	72.402	81.421
横径 Transverse diameter	0.575	0.693
纵径 Longitudinal diameter	0.513	0.750
单粒重 Berry mass	0.735	0.490
a^*	0.876	0.336
b^*	-0.923	-0.039
可溶性固形物含量 Soluble solid content	0.858	0.307
可溶性糖 Soluble sugar content	0.841	0.365
可滴定酸 Titratable acid content	0.794	0.459
固酸比 (RTT) Solid acid ratio (RTT)	0.882	0.424
叶绿素 a+b Chlorophyll a+b	0.800	0.496
蒸腾速率 (T_r) Transpiration rate (T_r)	0.672	0.399
净光合速率 (P_n) Net Photosynthetic Rate (P_n)	0.692	0.647
胞间 CO_2 浓度 (C_i) Intercellular carbon dioxide (C_i)	0.524	0.657
气孔导度 (G_s) Stomatal conductance (G_s)	0.755	0.518
超氧化物歧化酶 (SOD) Superoxide dismutase activity	0.248	0.809
过氧化物酶 (POD) Peroxidase activity	0.080	0.939
过氧化氢酶 (CAT) Catalase activity	0.442	0.696

表 5-4 5-ALA 和不同叶面肥复配相关指标的的综合评价

Table 5-4 Comprehensive evaluation of indicators related to the combination of 5-ALA and different foliar fertilizers

处理	主成分 1 得分	主成分 2 得分	综合得分	排名
Treatment	Component 1 Score	Component 2 Score	Comprehensive score	Rank
CK	0.397	0.100	0.497	6
5-ALA	3.859	0.441	4.300	5
5-ALA+磷酸二氢钾	4.553	0.508	5.062	3
5-ALA+海藻肥	7.440	0.839	8.279	1
5-ALA+黄腐酸	4.008	0.585	4.593	4
5-ALA+氨基酸	7.375	0.730	8.105	2

5.5 讨论

5.5.1 葡萄果实品质对 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥的响应

5-ALA 作为叶绿素生物合成的关键前体，主要通过改善叶绿体功能，提高果树的光合效率与抗逆性（高晶晶等，2013；孟长军等，2019）。叶面肥提供的矿质营养与 5-ALA 所激活的生理功能互为补充、协同增效，从而更有效地促进果实产量与品质的形成（李博等，2020）。本研究表明，5-ALA 与叶面肥复配处理显著改善了‘阳光玫瑰’的果实外观（大小、色泽）和内在品质（糖酸等），并提升了叶片的光合性能和抗氧化能力。其中，5-ALA+海藻肥处理的综合效果最为显著。

在葡萄转色期喷施 5-ALA 可使‘阳光玫瑰’单粒质量增加 12.7%，果皮花色苷积累量提升 1.8 倍（傅伟红等，2023）。叶面喷施海藻提取物，葡萄单果重增加 39%，最终产量提高了 60.4%（Norrie et al., 2006）。本研究表明，不同叶面肥复配 5-ALA 处理均提高了果实的横纵经和单粒重，5-ALA 和海藻肥复配处理横纵经和单粒质量均为最大，说明该处理在提升果实大小方面效果最显著，与潘萧艺（2025）将镁肥和 5-ALA 复配喷施在‘妮娜皇后’上的结果相似。

针对番茄的研究表明，在坐果期施用 5-ALA，可通过上调 ACS2 基因表达来加速乙烯合成，使成熟期提前 5-7 d（袁鸿等，2022）。本研究表明，不同叶面肥复配 5-ALA 处理均提高了果实的可溶性固形物和可溶性糖含量，降低了果实可滴定酸的含量，提高了固酸比，说明不同叶面肥复配 5-ALA 可以加快果实成熟过程，与 KHANAL S R（2025）在桃树上喷施商业肥复配 5-ALA 能加快果实成熟的结论一致。本研究表明，5-ALA 与

氨基酸叶面肥复配，果皮褪绿较快，促进果实的成熟。与刘鑫铭等（2019）研究结果相似，在葡萄叶面喷施含氨基酸水溶性肥料能促进果皮着色，提高果实 SSC 含量，促进果实成熟期，使‘巨峰’葡萄成熟上市时期提早 12 d。

5.5.2 葡萄叶片光合及抗氧化能力对 5-氨基乙酰丙酸和叶面肥的响应

5-ALA 与不同叶面肥复配提高了叶片叶绿素含量，增强了叶片对光能的“捕获能力”。李瑞杰等（2020）发现，5-ALA 与乙烯利复配剂对能够提高春玉米的叶绿素含量和 RuBP 羧化酶（RuBPCase）活性，进而提高春玉米功能叶的净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度和蒸腾速率。5-ALA 在低浓度下作为一种信号分子，可以诱导抗氧化酶基因的表达和活性提升；同时，叶面肥增强了植株的代谢活力，为酶蛋白的合成提供了物质保障。本研究表明，不同叶面肥复配 5-ALA 显著提升了叶片的抗氧化酶活性，可以有效延缓功能叶的衰老，保证在果实发育后期，叶片仍能持续提供光合产物，为果实产量和品质提升提供了物质保障，与 Song 等（2017）通过大量元素肥复配 5-ALA 喷施在羊草叶片上缓解干旱胁迫的结论相似，大量元素肥复配 5-ALA 显著提高了羊草叶片的抗氧化酶活性，降低了丙二醛含量，缓解了胁迫对光合色素的损害。

5.6 本章小结

ALA与叶面肥复配试验结果表明：HZF与AJS处理在提高叶片光合性能方面表现较为显著，二者能显著提高叶片Chl a和Chl b含量，并通过优化气孔结构、促进CO₂同化等途径，有效增强了‘阳光玫瑰’叶片的光合能力，为果实品质的形成奠定了良好的物质基础；在果实品质方面，AJS和HZF处理能够有效促进‘阳光玫瑰’果实糖分的积累，降低TA含量，提高果实的RTT，进而显著改善果实的甜度和风味。此外，HZF处理在提高果实单粒质量、SOD和POD活性较显著，而AJS处理则在提高果皮色相 a^* 值和CAT活性最显著。通过主成分分析也进一步说明了5-ALA和海藻肥复配综合表现最佳。

第6章 结论与展望

6.1 结论

本研究选择4个葡萄品种改接‘阳光玫瑰’，筛选最优砧穗组合，探究最优砧穗组合最适无核膨大配方，同时设置4种不同叶果比，用代谢组学方法解析挥发性代谢物差异，确定最佳修剪叶果比。此外，进行5-氨基乙酰丙酸（5-ALA）和不同叶面肥处理，筛选最佳叶面肥复配方案。旨在为葡萄栽培生理与品质调控提供理论支撑，为果树精准栽培及风味代谢调控研究提供新的科学依据与研究思路。

研究主要结论如下：

1. 比较了4个葡萄品种改接‘阳光玫瑰’后生长发育差异，明确了以‘克瑞森无核’作砧木改接‘阳光玫瑰’，果实的可溶性糖、可溶性固形物含量、固酸比较高，叶片的叶绿素含量较高；光合作用较强，果实品质更优，综合表现较好。

2. 筛选出最佳无核膨大配方：盛花期48 h内使用 $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{GA}_3+4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{CPPU}+3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{TDZ}$ 进行蘸穗处理，能有效提高‘阳光玫瑰’果实的无核率；膨大期使用 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{GA}_3+5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{CPPU}+5000$ 倍保美灵处理，果实单粒质量最大，可溶性固形物、可溶性糖含量较高。

3. 分析了不同叶果比对‘阳光玫瑰’/‘克瑞森无核’生长发育影响：T4（LFR30）处理在果实膨大后期可促进果实内含物可溶性糖、可溶性固形物的积累，降低可滴定酸含量，提升果实甜度与风味平衡，提高果皮色相 a^* 值，促进果实成熟。

4. 代谢组学分析显示：T4（LFR30）处理显著促进萜类化合物合成与积累；随着叶片数量的增加，73个以萜类为代表的差异代谢物呈上升趋势，T4处理下差异代谢物显著富集于单萜类生物合成通路。

5. 风味组学分析明确以下12种为高叶果比下‘阳光玫瑰’/‘克瑞森无核’果皮风味形成的关键积累挥发性化合物：四氢-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃、(E)- β -罗勒烯、(E)-3-苯基烯丙乙酸酯、反式玫瑰氧化物、(2S-顺式)-四氢化-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃、(E,E)-2,4-壬二烯醛、L- α -松油醇、(Z)-3,7-二甲基-1,3,6-辛三烯、1,3-二硫戊环、柠檬醛、 β -罗勒烯和顺式-氧化玫瑰。

6. 筛选出5-ALA和海藻肥复配的综合表现最佳，能提高叶片Chl a和Chl b含量，增强叶片光合能力；显著提高SOD和POD活性，增强植株清除活性氧自由基的能力。在果实品质方面，能显著提高果实单粒质量、促进糖分积累，降低可滴定酸含量，提高

固酸比。

6.2 创新点

1.本研究系统解析了不同叶果比处理下果实挥发性代谢物的差异，明确了关键香气代谢物对叶果比的响应规律，揭示了源库关系影响果实风味形成的微观机制，为基于香气品质的精准修剪与精细化管理提供了科学依据。

2.本研究将 5-ALA 与多种叶面肥进行复配筛选，系统探究了最佳复配方案对叶片光合特性、抗氧化酶活性及果实内外品质的综合影响。揭示了 5-ALA 与叶面肥协同增效的生理基础，为‘阳光玫瑰’葡萄高品质栽培提供了新型功能性叶面肥配方及理论依据。

6.3 展望

针对不同品种改接‘阳光玫瑰’关键栽培技术研究，后续可进一步从以下方面深化：

（1）改接筛选试验后续可系统测定不同葡萄品种改接‘阳光玫瑰’后果实的香气组分，分析萜烯类、酯类等特征香气物质的差异，明确原栽品种对果实香气品质的调控效应，为适宜砧木筛选提供品质依据。

（2）在叶果比试验中，可结合转录组技术，挖掘不同叶果比条件下差异表达的香气合成相关基因，构建转录因子与代谢物的调控网络，筛选关键候选基因并进行功能验证，揭示源库关系影响‘阳光玫瑰’香气品质的分子机制。

（3）探究最优砧穗组合与叶果比、植物生长调节剂、水肥管理等栽培措施的耦合效应，建立多因子协同优化的品质调控综合技术体系。

附录

附表 S1. 相对气味活性值表

Table S1. Relative Odor Activity Values Plot

Order	Class I	Compounds	Odor	Threshold	Treat-1	Treat-2	Treat-3	Treat-4
1		Linalool	floral, green	0.006	34.854	28.781	33.172	52.346
2		Cyclohexene, 1-methyl-4-(1-methylethylidene)-	pine, plastic	0.2	7.603	6.306	7.615	12.413
3		1,3,6-Octatriene, 3,7-dimethyl-, (Z)-	warm, floral, herbal, flowery, sweet	0.034	4.153	4.632	2.302	4.557
4		6-Octenal, 3,7-dimethyl-, (R)-	fresh, herbal, citrus	0.03	1.326	1.424	1.485	1.269
5		p-Cymene	gasoline, citrus	0.0114	4.641	3.454	3.511	3.820
6		Citronellal	sweet, dry, floral, herbal, waxy, aldehydic, citrus	0.06	1.419	1.540	1.584	1.327
7		Bicyclo[3.1.1]hept-2-ene-2-methanol, 6,6-dimethyl-	woody, minty	0.007	20.686	20.483	25.508	42.123
8	Terpenoids	.alpha.-Terpineol	pine, iris, teil	0.3	1.659	1.656	2.069	3.438
9		CIS-ROSE OXIDE	floral	0.0001	11.430	8.085	4.321	18.426
10		.beta.-Myrcene	musty, balsamic, spice	0.015	13.170	14.945	13.552	18.029
11		trans-Rose oxide	floral	0.0005	22.584	17.609	33.924	45.504
12		.beta.-Phellandrene	terpenic, herbal	0.036	5.947	5.353	3.468	6.468
13		(-)-Carvone	sweet, spearmint, herbal, minty	0.085	2.095	2.079	2.288	1.870
14		Geraniol	sweet, floral, fruity, rose, waxy, citrus	0.0066	249.660	304.355	90.068	164.596
15		.beta.-Pinene	dry, woody, resinous, pine, hay, green	0.14	0.798	0.946	0.838	1.223
16		1,6,10-Dodecatrien-3-ol, 3,7,11-trimethyl-	floral, green, waxy, citrus, woody	0.01	2.393	3.045	3.104	3.305
17		1,3,8-p-Menthatriene	turpentine, camphor, herbal, woody	0.015	2.246	1.271	1.338	1.055

18	D-Limonene	citrus	0.034	3.757	3.309	3.040	4.428
19	Citronellol	floral, rose, lime	0.04	18.817	23.019	7.044	12.978
20	Neral	sweet, citral, lemon, peel	1	3.759	3.684	4.018	3.559
21	Naphthalene, 1,2,3,5,6,8a-hexahydro-4,7-dimethyl-1-(1-m ethylethyl)-, (1S-cis)- 2-Buten-1-one,	thyme, herbal, woody, dry	0.0015	0.955	0.820	1.273	2.076
22	1-(2,6,6-trimethyl-1,3-cyclohexadien-1-yl)-, (E)-	apple, rose, honey, tobacco, sweet	0.0015	22.095	40.495	27.937	39.900
23	2,6-Octadien-1-ol, 3,7-dimethyl-, (Z)-	lemon, fresh	0.049	3.932	2.763	1.569	2.874
24	Citral	sharp, lemon, sweet	0.1	1.738	2.201	0.738	1.507
25	L-Fenchone	camphor, herbal, earthy, woody	0.11	6.060	5.028	6.080	9.667
26	D-Fenchone	camphor, thuja, cedar leaf, herbal, earthy, woody	0.24	2.777	2.304	2.787	4.431
27	.beta.-Ocimene	apple, pear, fruity	0.034	4.153	4.632	2.302	4.557
28	o-Cymene	gasoline	0.01144	4.625	3.442	3.499	3.807
29	6-Octenal, 3,7-dimethyl-, (S)-	-	0.03	2.838	3.081	3.167	2.653
30	L-.alpha.-Terpineol	lilac, floral, terpenic	0.33	1.508	1.505	1.881	3.126
31	L-Menthone	menthol, pepperminty, herbal, camphor	0.17	3.188	3.512	3.640	3.019
32	(2S,4R)-4-Methyl-2-(2-methylprop-1-en-1-yl))tetrahydro-2H-pyran 2H-Pyran,	rose, cortex, green, floral, geranium, powdery, metallic	0.0002	56.459	44.022	84.811	113.760
33	tetrahydro-4-methyl-2-(2-methyl-1-propenyl))-	sweet, floral, aromatic, rose, fresh, bay, leafy	0.0002	56.459	44.022	84.811	113.760
34	Cyclohexene, 1-methyl-5-(1-methylethenyl)-, (R)-	-	0.045	4.758	4.283	2.775	5.174
35	.alpha.-Phellandrene	citrus, herbal, terpene, green, woody, peppery	0.04	5.353	4.818	3.121	5.821
36	Carvone	minty, licorice	0.067	2.658	2.637	2.903	2.373
37	D-Carvone	spice, minty, bread, caraway	0.01	17.806	17.669	19.449	15.896

38		1,3-Cyclohexadiene-1-carboxaldehyde, 2,6,6-trimethyl-	fresh, herbal, phenol, metallic, rosemary, tobacco, spicy	0.003	9.297	8.910	8.887	8.144
39		Germacrene D	woody, spice	0.0012	36.316	36.703	41.265	34.040
40		2-Cyclohexen-1-ol, 2-methyl-5-(1-methylethenyl)-, acetate	green, minty, spearmint, nasturtium, herbal, rummy, grape, pear, spicy	0.0015	1.501	0.908	1.371	3.115
41		Limonene	citrus, herbal, terpene, camphor	0.01	12.773	11.250	10.336	15.056
42		Cyclohexene, 1-methyl-4-(1-methylethenyl)-, (S)-	terpene, pine, herbal, peppery	0.034	3.757	3.309	3.040	4.428
43		6-Octen-1-ol, 3,7-dimethyl-, (R)-	citronella oil, rose, leafy, oily, petal	0.04	18.817	23.019	7.044	12.978
44		2,6-Octadienal, 3,7-dimethyl-, (E)-	citrus, lemon	0.028	134.237	131.587	143.511	127.111
45		trans-.beta.-Ocimene	sweet, herbal	0.034	0.523	5.239	1.574	5.192
46		Benzaldehyde, 2-methyl-	mild floral, sweet	0.0096	1.699	1.797	1.420	1.915
47		2-octenal	fatty, green, herbal	0.0002	471.377	571.004	579.384	574.573
48		2-Nonenal, (Z)-	orris, fatty, waxy, cucumber	0.0045	8.653	9.185	9.449	8.114
49		6-Nonenal, (Z)-	green, cucumber, melon, cantaloupe, honeydew, waxy, vegetable, orris, violet, leafy	0.00014	141.574	125.208	139.927	128.078
50		2,6-Nonadienal, (E,Z)-	cucumber, green	0.00001	4342.093	4691.913	4876.841	4138.344
51	Aldehyde	2-Nonenal, (E)-	fatty, green, cucumber, aldehydic, citrus	0.00008	486.722	516.674	531.523	456.391
52		Benzeneacetaldehyde	floral, honey, rose, cherry	0.0063	35.906	16.819	14.957	17.324
53		2-Decenal, (Z)-	tallow	0.05	1.617	1.948	0.560	1.047
54		2-Decenal, (E)-	waxy, fatty, earthy, green, cilantro, mushroom, aldehydic, fried, chicken, fatty, tallow	0.005	1.451	2.596	0.803	1.050
55		Nonanal	aldehyde, citrus, orange peel	0.001	105.770	91.639	106.795	102.396
56		4-Decenal, (E)-	fresh, aldehydic, citrus, orange, mandarin, tangerine, green, fatty	0.025	2.030	2.421	2.298	2.137
57		Decanal	sweet, aldehydic, waxy, orange peel, citrus,	0.0001	114.088	75.876	68.191	69.670

58	2-Hexenal, (E)-	floral green, grassy	0.0031	870.503	947.661	878.361	791.965
59	Heptanal	fresh, aldehydic, fatty, green, herbal, wine, ozonous	0.0028	4.215	5.044	4.236	3.834
60	Hexanal	aldehyde, grassy, green, leafy, vinegar	0.005	851.087	730.448	647.774	553.908
61	2-Heptenal, (Z)-	-	0.013	1.555	2.282	2.627	3.644
62	2,4-Nonadienal	fatty, green, cucumber	0.00005	3494.74 8	3390.25 8	780.329	1643.91 3
63	10-Undecenal	waxy, aldehydic, rose, mandarin, citrus, soapy, fatty	0.0035	3.480	1.985	1.646	1.250
64	3-Methylthiobutylaldehyde	cooked potato	0.0025	5.714	9.120	10.240	15.291
65	2,4-Heptadienal, (E,E)-	fatty, green, oily, aldehydic, vegetable, cake, cinnamon	0.056	0.792	1.665	1.151	1.483
66	Non-8-enal	smoky, plastic	0.0002	38.486	35.384	12.113	110.922
67	2-Octenal, (E)-	fresh, cucumber, fatty, green, herbal, banana, waxy, leafy	0.003	31.425	38.067	38.626	38.305
68	2-Nonenal	fatty, green, waxy, cucumber, melon	0.0001	389.377	413.339	425.219	365.113
69	6-Nonenal, (E)-	-	0.000022	900.928	796.779	890.443	815.039
70	2,6-Nonadienal, (E,E)-	fresh, citrus, green, cucumber, melon	0.0005	86.842	93.838	97.537	82.767
71	2-Hexenal	sweet, almond, fruity, green, leafy, apple, plum, vegetable	0.017	158.739	172.809	160.172	144.417
72	2,4-Decadienal, (E,Z)-	fried, fatty, geranium, green, waxy	0.00007	21.839	17.999	14.150	29.966
73	2,4-Decadienal, (E,E)-	dusty, waxy, oily, soapy	0.00007	21.839	17.999	14.150	29.966
74	2-Heptenal, (E)-	pungent, green, vegetable, fresh, fatty	0.013	1.555	2.282	2.627	3.644
75	2,4-Nonadienal, (E,E)-	fatty, melon, waxy, green, violet, leafy, cucumber, tropical, fruity, chicken	0.00016	1092.10 9	1059.45 6	243.853	513.723
76	Heterocyclic 1,2-Dithiane	garlic, metallic	0.002	27.159	23.980	27.997	34.525

77	compound	Pyridine, 3,4-dimethyl-	green	0.005	2.662	3.134	1.448	2.450
78		Oxazole, trimethyl-	nutty, nut skin, roasted, wasabi, shellfish, mustard, vegetable	0.005	22.161	22.186	22.499	20.613
79		Pyrazine, 2-methyl-3-(methylthio)-	roasted meat, nutty, almond, vegetable	0.001	18.433	19.232	21.033	16.608
80		2-Ethoxy-3-methylpyrazine	hazelnut, roasted, almond, pineapple, earthy	0.0008	29.726	19.637	22.455	21.361
81		Pyridine, 5-ethyl-2-methyl-	nutty, strong, raw, potato, roasted, earthy	0.019	2.430	2.156	1.516	2.839
82		1,3-Dithiolo[4,5-b]furan, tetrahydro-3a-methyl-	boiled, milky, chicken, cooked beef, rubbery, sulfury, thiamin	0.006	12.281	12.648	13.470	11.210
83		2-Methyl-3-propylpyrazine	-	0.06	2.375	2.170	2.468	2.637
84		2-Methyl-1,3-dithiacyclopentane	sulfury, alliaceous, smoky, savory, vegetable	0.02	1.094	1.015	1.107	0.995
85		Acetylpyrazine	popcorn, nutty, corn, chip, bread, crust, chocolate, hazelnut, coffee	0.01	6.581	5.864	3.789	7.532
86		Pyrazine, 2-methoxy-5-(2-methylpropyl)-	-	0.01	6.008	5.831	6.352	5.217
87		Pyrazine, 2-butyl-3,5-dimethyl-	fragrant	0.18	1.552	1.921	0.528	1.014
88		Furan, 2,3-dihydro-	-	0.27	1.496	1.415	1.162	1.072
89		n-Pentylpyrazine	-	0.005	48.645	61.914	12.018	31.207
90		1,3-Dithiolane	onion, sulfury, sweet	0.002	5.004	4.457	2.665	5.470
91		Furan, 2-pentyl-	fruity, green, earthy, beany, vegetable, metallic	0.006	1.218	0.999	1.026	0.868
92		Pyridine, 2,3,4,5-tetrahydro-	-	0.302	2.650	2.398	1.972	1.724
93		2-Acetyl-3-methylpyrazine	nutty, flesh, roasted hazelnut, toasted grain, corn, chip, vegetable, nut skin, caramel	0.02	4.237	4.226	3.695	6.519
94		Pyridine, 2-propyl-	green, fatty, roasted, tobacco, nutty	0.011	1.415	1.433	0.681	1.466
95		1,3,5-Trithiane	sulfury	0.00004	111.943	196.594	77.726	92.545
96		Pyrazine, 2-methyl-6-(methylthio)-	-	0.02	0.922	0.962	1.052	0.830
97		Pyrazine, 2-methyl-6-propyl-	burnt, butterscotch	0.1	1.425	1.302	1.481	1.582
98		Pyrazine, 2-methoxy-3-methyl-	roasted almond, hazelnut, peanut	0.003	1.005	1.032	1.062	1.014
99		Pyrazine, 2-ethyl-3,5-dimethyl-	burnt, almond, roasted, nutty, coffee	0.00004	53.525	55.163	58.468	87.942

100		3,4-Dimethyl-1,2-cyclopentadione	sweet, maple, caramel, sugar, fenugreek, licorice	0.017	51.158	45.110	52.697	64.109
101		Ethanone, 1-(4,5-dihydro-2-thiazolyl)-	corn, chip, taco, potato, toasted, bread, nutty	0.001	2.206	2.034	2.104	1.599
102		3-Undecanone	-	0.0083	1.154	1.141	1.148	0.940
103		1-Nonen-3-one	pungent, mushroom	0.000001	19215.3 14	17897.6 21	18698.5 96	23776.7 65
104		2-Hexanone, 4-methyl-	-	0.00081	50.154	51.176	54.289	49.518
105		6-Methyl-3,5-heptadiene-2-one	-	0.1	4.552	4.605	4.796	4.198
106		3-Nonanone	caramel, spicy, sweet	0.017	15.216	14.774	15.530	13.944
107		Cycloundecanone	-	0.009	9.911	9.747	11.232	8.497
108		Cyclohexanone, 2,2,6-trimethyl-	pungent, thujone, labdanum, honey, cistus	0.0001	46.318	34.258	47.480	51.236
109	Ketone	4-(2,6,6-Trimethylcyclohexa-1,3-dienyl)but-3-en-2-one	-	0.00009	458.406	467.973	524.396	408.240
110		3-Butylisobenzofuran-1(3H)-one	herbal, phenol, celery	0.01	2.242	2.213	2.668	1.879
111		Ethanone, 1-(2-thienyl)-	sulfury, nutty, hazelnut, walnut	0.001	109.264	93.102	111.400	136.576
112		3,5-Octadien-2-one, (E,E)-	fruity, green, grassy	0.0005	15.504	17.578	26.083	17.474
113		5-Hepten-2-one, 6-methyl-	herbal, green, citrus, musty, lemon grass	0.05	0.919	1.135	1.246	1.855
114		2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-	strong, caramel	0.052	16.725	14.747	17.228	20.959
115		2-Hydroxy-3,5-dimethylcyclopent-2-en-1-one	strong, caramel	1	0.870	0.767	0.896	1.090
116		Cyclohexanone, 5-methyl-2-(1-methylethyl)-, (2R-cis)-	minty	0.15	3.613	3.981	4.126	3.422
117		1-Hexen-3-one	cooked, vegetable, metallic	0.00002	761.894	1173.39 6	731.659	676.120
118		2-Pentanol, acetate	herbal, weedy, musty, green, vegetable, nut skin, beany, ketonic, animalic	0.015	9.112	9.338	9.481	8.748
119	Ester	Pentanoic acid, 3-methylbutyl ester	fruity, ripe apple, green	0.1	3.092	2.489	3.195	3.128
120		Propanoic acid, 2-methyl-, 2-methylbutyl ester	fruity, ethereal, tropical, banana	0.014	1.940	2.214	2.450	2.027

121	Benzoic acid, methyl ester	phenol, wintergreen, almond, floral, canga	0.00052	37.933	37.788	38.012	69.744
122	Butyl angelate	sweet, herbal, fruity, floral, winey, caramel, chamomile	0.013	85.085	77.205	88.081	89.786
123	Hexanoic acid, 2-methylbutyl ester	ethereal	0.032	6.117	6.075	6.697	5.478
124	Geranyl propionate	floral, fresh, waxy, fruity, rose, tropical	0.01	1.896	1.926	2.175	1.647
125	Propanoic acid, hexyl ester	pear, green, fruity, musty, rotten	0.008	11.034	10.649	11.906	9.874
126	Decanoic acid, methyl ester	oily, wine, fruity, floral	0.0043	2.596	2.931	2.761	2.831
127	2(3H)-Furanone, dihydro-5-propyl-	sweet, coconut, nutty, caramel, tonka, hay	0.4	0.898	0.916	1.085	0.820
128	3-Mercaptohexyl acetate	sulfury, grapefruit, fruity	0.00002	161.286	163.900	166.613	141.651
129	Propanoic acid, heptyl ester	-	0.004	1.163	0.823	0.933	1.084
130	Propanoic acid, 2-methyl-, 1-methylethyl ester	-	0.026	20.174	15.631	14.286	13.284
131	Benzene, (isothiocyanatomethyl)-	mild, watercress, dusty, medicinal, horseradish, oily	0.0007	7.630	15.586	6.893	4.811
132	1-Methoxy-2-propyl acetate	-	0.016	0.522	1.177	0.134	0.225
133	Butanoic acid, 3-methyl-, 2-phenylethyl ester	floral, fruity, sweet, rose, peach, apricot	0.00001	2127.538	2189.779	2489.113	1910.871
134	n-Valeric acid cis-3-hexenyl ester	green, fruity, apple, pear, kiwi, unripe, banana, tropical	0.06	6.919	6.873	6.791	6.385
135	cis-3-Hexenyl isovalerate	fresh, green, apple, fruity, tropical, pineapple	0.02	20.758	20.618	20.372	19.156
136	2-Propen-1-ol, 3-phenyl-, acetate, (E)-	sweet, floral, spicy, balsamic	0.002	0.155	1.437	1.408	1.355
137	1-Hexanol	ethereal, fusel, oily, fruity, alcoholic, sweet, green	0.0056	117.094	91.692	44.291	44.063
138	Alcohol 3-Hexen-1-ol, (Z)-	fresh, green, grass, foliage, vegetable, herbal, oily	0.05	22.168	17.614	16.074	14.854
139	2-Butanethiol, 3-methyl-	repulsive, beefy, meaty	0.0002	72.531	72.982	75.104	70.542
140	trans,cis-2,6-Nonadien-1-ol	green, cucumber, oily, violet, leafy	0.001	212.696	228.729	237.413	201.229
141	4-Phenyl-2-butanol	floral, peony, foliage, sweet, mimosa, heliotrope	0.0043	16.136	18.441	5.765	10.041

142	6-Undecanol	-	0.0086	1.509	1.479	1.459	1.211
143	3-Cyclohexene-1-methanethiol, .alpha.,.alph a.,4-trimethyl-	sulfury, aromatic, grapefruit, naphthyl, resinous, woody	0.0000000	86931.8	88534.6	79767.8	140356.
144	2-Furanmethanethiol, 5-methyl-	sulfury, roasted, coffee	0.00005	131.048	147.818	184.063	114.721
145	2-Pentanol, 3-methyl-	-	0.83	2.143	2.024	1.659	1.515
146	3-Hexen-1-ol	green, leafy	0.07	6.367	6.647	6.089	5.679
147	3-Hexanol, 2,2-dimethyl-	-	0.0013	1.707	2.092	1.577	1.456
148	5-Octen-1-ol, (Z)-	green, melon, watery, watermelon, earthy, mushroom, violet, leafy, fishy, soapy	0.002	3.194	2.597	6.527	8.160
149	2-Hexen-1-ol, (Z)-	green, cortex, leafy, green, beany, nasturtium, herbal, soapy, aldehydic, narcissus, narcissus, phenol	0.1	1.059	0.857	0.260	0.126
150	1-Pentanol, 2,2-dimethyl-	-	0.0081	1.016	1.007	0.140	0.132
151	3-Hexen-1-ol, (E)-	moss, fresh	0.11	10.076	8.007	7.306	6.752
152	1-Pentanol, 2-methyl-	-	0.1	11.541	10.102	10.050	8.650
153	1-Pentanol, 3-methyl-	fusel, cognac, wine, cocoa, green, fruity	1	1.154	1.010	1.005	0.865
154	3-Furanmethanol	-	0.0045005	69.280	59.593	61.034	52.292
155	2-Hexen-1-ol, (E)-	fresh, green, leafy, fruity, unripe banana	0.1	1.059	0.857	0.260	0.126
156	Phenol, 2-methoxy-	nutty	0.0016	231.667	224.120	247.662	293.699
157	Phenol, 2,3-dichloro-	-	0.03	1.270	0.922	0.950	1.191
158	Phenol, 3-methyl-4-(methylthio)-	-	0.2	0.959	0.961	1.107	0.841
159	Phenol, 2-methyl-	phenol	0.0039	3.156	3.561	1.616	3.661
160	Phenol, 3-(1-methylethyl)-	-	0.005	16.454	11.414	6.196	11.657
161	4-Vinylphenol	chemical, woody	0.01	1.930	2.322	0.654	1.411
162	Phenol	phenol, medicinal	0.03	2.485	2.210	2.351	2.260
163	Phenol, 2-(1-methylethyl)-	medicinal, cresol, phenol	0.001	4.385	4.487	5.268	9.392
164	Ethyl maltol	sweet, caramel, jammy, strawberry, cotton,	0.044	40.743	39.668	40.130	6.967

			candy					
165		Phenol, 3-propyl-	-	0.00029	2.002	0.215	0.223	0.210
166		Phenol, 2,4-dichloro-	-	0.0014	27.213	19.763	20.351	25.528
167		Phenol, 2,5-dichloro-	-	0.03	1.270	0.922	0.950	1.191
168		Benzene, 1,4-diethyl-	-	0.0021	6.060	6.523	5.172	6.979
169	Aromatics	Styrene	penetrating, balsamic, gasoline	0.0036	6.975	9.801	8.167	9.506
170		Biphenyl	pungent, rose, green, geranium	0.0033	1.289	1.395	1.042	0.945
171		Naphthalene, 2-methyl-	sweet, floral, woody	0.004	1.323	1.452	1.428	1.191
172		Cyclohexane, nitro-	-	0.15	11.687	10.303	11.987	14.923
173	Nitrogen	Benzenepropanenitrile	-	0.015	2.353	2.339	2.549	2.076
174	compounds	Dodecanenitrile	citrus, orange, peel, metallic, spicy	0.00009	411.661	404.560	458.745	348.266
175		Benzene, 2-methyl-1,3-dinitro-	-	0.05	1.463	1.489	1.743	1.799
176	Sulfur compounds	Diallyl sulfide	sulfury, onion, garlic, horseradish, metallic	0.1	5.435	5.517	5.489	4.968
177	Halogenated hydrocarbons	Octane, 1-iodo-	-	0.0002	370.086	367.079	398.900	329.650
178	Ether	Benzene, 1,3-dimethoxy-	acid, fruity, nutmeg, neroli	0.0214	1.564	1.676	1.729	1.457

附表 S2. 各比较组中差异倍数前 20 种代谢物结果

Table S2. Results of the top 20 metabolites by fold change in each comparison group

Comparable group	Compounds	Class I	Fold Change	VIP	regulated
Treat-2 Vs Treat-1	.gamma.-Terpinene	Terpenoids	10.58	1.40	up
	Acetic acid, cinnamyl ester	Acid	9.58	1.27	up
	(3S,3aR,3bR,4S,7R,7aR)-4-Isopropyl-3,7-dimethyloctahydro-1H-cyclopenta[1,3]cyclopropa[1,2]benzen-3-ol	Terpenoids	9.24	1.38	up
	(1R,5S)-1,8-Dimethyl-4-(propan-2-ylidene)spiro[4.5]dec-7-ene	Terpenoids	15.81	1.39	up
	cis-Dihydrocarvone	Terpenoids	11.36	1.40	up
	1,3,7-Octatriene, 3,7-dimethyl-	Terpenoids	10.58	1.40	up
	trans-.beta.-Ocimene	Terpenoids	10.58	1.40	up
	2-Propen-1-ol, 3-phenyl-, acetate, (E)-	Ester	9.58	1.27	up
	(3aS,8aS)-6,8a-Dimethyl-3-(propan-2-ylidene)-1,2,3,3a,4,5,8,8a-octahydroazulene	Terpenoids	15.81	1.39	up
	(+)-Dihydrocarvone	Terpenoids	11.36	1.40	up
	.alpha.-Cuprenene	Terpenoids	0.11	1.39	down
	1,3-Cyclohexadiene, 5-(1,5-dimethyl-4-hexenyl)-2-methyl-, [S-(R*,S*)]-	Terpenoids	0.11	1.39	down
	Pilocarpine	Ester	0.07	1.39	down
	Benzoic acid, 3,4-dimethyl-, methyl ester	Ester	0.02	1.40	down
	9,12,15-Octadecatrienoic acid, methyl ester	Ester	0.04	1.35	down
	Benzeneacetic acid, (4-methoxyphenyl)methyl ester	Ester	0.05	1.40	down
	Benzoic acid	Acid	0.02	1.40	down

Treat-3 VS Treat-2	1H-Naphtho[2,1-b]pyran, 3-ethenyldodecahydro-3,4a,7,7,10a-pentamethyl-, [3S-(3.alpha.,4a.alpha.,6a.beta.,10a.alpha.,10b.beta.)]-	Terpenoids	0.03	1.40	down
	Azulene, 1,2,3,5,6,7,8,8a-octahydro-1,4-dimethyl-7-(1-methylethenyl)-, [1S-(1.alpha.,7.alpha.,8a.beta.)]-	Terpenoids	0.06	1.40	down
	1H-Benzocycloheptene, 2,4a,5,6,7,8-hexahydro-3,5,5,9-tetramethyl-, (R)-	Terpenoids	0.11	1.39	down
	9,12,15-Octadecatrienoic acid, methyl ester, (Z,Z,Z)-	Ester	0.04	1.35	down
	1H-Naphtho[2,1-b]pyran, 3-ethenyldodecahydro-3,4a,7,7,10a-pentamethyl-, [3R-(3.alpha.,4a.beta.,6a.alpha.,10a.beta.,10b.alpha.)]-	Terpenoids	0.03	1.40	down
	Benzyl chloride	Halogenated hydrocarbons	8.39	1.40	up
	2-Acetylthiazole	Heterocyclic compound	14.23	1.40	up
	Pilocarpine	Ester	14.16	1.39	up
	9,12,15-Octadecatrienoic acid, methyl ester	Ester	25.25	1.34	up
	Benzeneacetic acid, (4-methoxyphenyl)methyl ester	Ester	21.18	1.40	up
	Benzoic acid	Acid	42.14	1.39	up
	1H-Naphtho[2,1-b]pyran, 3-ethenyldodecahydro-3,4a,7,7,10a-pentamethyl-, [3S-(3.alpha.,4a.alpha.,6a.beta.,10a.alpha.,10b.beta.)]-	Terpenoids	34.45	1.38	up
	2-Octen-4-one	Ketone	8.23	1.39	up
	9,12,15-Octadecatrienoic acid, methyl ester, (Z,Z,Z)-	Ester	25.25	1.34	up
	1H-Naphtho[2,1-b]pyran, 3-ethenyldodecahydro-3,4a,7,7,10a-pentamethyl-, [3R-(3.alpha.,4a.beta.,6a.alpha.,10a.beta.,10b.alpha.)]-	Terpenoids	34.45	1.38	up
	Geranic acid	Terpenoids	0.08	1.38	down
	Bicyclo[3.1.1]hept-2-ene-2-carboxylic acid, 6,6-dimethyl-	Terpenoids	0.01	1.36	down

	2-Cyclohexen-1-one, 3-methyl-6-(1-methylethyl)-	Terpenoids	0.10	1.39	down
	Propanethioic acid, S-(2-furanylmethyl) ester	Ester	0.10	1.39	down
	1,3-Benzenediol, 2-methyl-	Alcohol	0.02	1.39	down
	2-Isoamyl-6-methylpyrazine	Heterocyclic compound	0.11	1.39	down
	2-Propenoic acid, 2-methyl-, (tetrahydro-2-furanyl)methyl ester	Ester	0.09	1.39	down
	Neric acid	Terpenoids	0.08	1.38	down
	Carvenone	Terpenoids	0.10	1.39	down
	Orcinol	Phenol	0.02	1.39	down
	.gamma.-Terpinene	Terpenoids	10.78	1.39	up
	Acetic acid, cinnamyl ester	Acid	9.25	1.26	up
	(1R,5S)-1,8-Dimethyl-4-(propan-2-ylidene)spiro[4.5]dec-7-ene	Terpenoids	9.21	1.38	up
	cis-Dihydrocarvone	Terpenoids	9.92	1.39	up
	1,3,7-Octatriene, 3,7-dimethyl-	Terpenoids	10.78	1.39	up
Treat-4	3-Hexen-1-ol, formate, (Z)-	Ester	8.09	1.37	up
Vs	trans-.beta.-Ocimene	Terpenoids	10.78	1.39	up
Treat-1	2-Propen-1-ol, 3-phenyl-, acetate, (E)-	Ester	9.25	1.26	up
	(3aS,8aS)-6,8a-Dimethyl-3-(propan-2-ylidene)-1,2,3,3a,4,5,8,8a-octahydroazulene	Terpenoids	9.21	1.38	up
	(+)-Dihydrocarvone	Terpenoids	9.92	1.39	up
	Benzoic acid, 3,4-dimethyl-, methyl ester	Ester	0.03	1.26	down
	Pentanoic acid, 3-methyl-	Acid	0.10	1.39	down
	2-Hexen-1-ol, (Z)-	Alcohol	0.13	1.25	down

	Cyclohexene, 4-ethenyl-4-methyl-3-(1-methylethenyl)-1-(1-methylethyl)-, (3R-trans)-	Terpenoids	0.05	1.39	down
	Benzoic acid	Acid	0.08	1.30	down
	Methyl anthranilate	Ester	0.05	1.07	down
	1-Butene, 4-butoxy-	Ether	0.12	1.39	down
	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	Ketone	0.10	1.39	down
	Phenol, 3-propyl-	Phenol	0.11	1.39	down
	2-Hexen-1-ol, (E)-	Alcohol	0.13	1.25	down
	Benzyl chloride	Halogenated hydrocarbons	6.12	1.33	up
	2-Acetylthiazole	Heterocyclic compound	9.12	1.32	up
	.beta.-Santalol	Terpenoids	6.17	1.15	up
	9,12,15-Octadecatrienoic acid, methyl ester	Ester	7.58	1.22	up
	Benzeneacetic acid, (4-methoxyphenyl)methyl ester	Ester	5.95	1.32	up
	.alpha.-Cubebene	Terpenoids	12.22	1.33	up
Treat-4	Azulene, 1,2,3,5,6,7,8,8a-octahydro-1,4-dimethyl-7-(1-methylethenyl)-, [1S-(1.alpha.,7.alpha.,8a.beta.)]-	Terpenoids	6.56	1.33	up
Vs	2-Octen-4-one	Ketone	5.96	1.32	up
Treat-2	3-Hexen-1-ol, formate, (Z)-	Ester	8.09	1.31	up
	9,12,15-Octadecatrienoic acid, methyl ester, (Z,Z,Z)-	Ester	7.58	1.22	up
	cis-3-Hexenyl cis-3-hexenoate	Ester	0.11	1.31	down
	Pentanoic acid, 3-methyl-	Acid	0.10	1.32	down
	2,4-Octadienal, (E,E)-	Aldehyde	0.14	1.33	down
	2-Hexen-1-ol, (Z)-	Alcohol	0.15	1.17	down

	Cyclohexene, 4-ethenyl-4-methyl-3-(1-methylethenyl)-1-(1-methylethyl)-, (3R-trans)-	Terpenoids	0.04	1.32	down
	Methyl anthranilate	Ester	0.05	1.32	down
	1-Pentanol, 2,2-dimethyl-	Alcohol	0.13	1.33	down
	1-Butene, 4-butoxy-	Ether	0.15	1.33	down
	Hexanoic acid, 3-hexenyl ester	Ester	0.11	1.31	down
	2-Hexen-1-ol, (E)-	Alcohol	0.15	1.17	down
	Bicyclo[3.1.1]hept-2-ene-2-carboxylic acid, 6,6-dimethyl-	Terpenoids	13.91	1.20	up
	2-Cyclohexen-1-one, 3-methyl-6-(1-methylethyl)-	Terpenoids	5.33	1.30	up
	Propanethioic acid, S-(2-furanylmethyl) ester	Ester	5.43	1.30	up
	1,3-Benzenediol, 2-methyl-	Alcohol	13.45	1.16	up
	2-Isoamyl-6-methylpyrazine	Heterocyclic compound	5.75	1.30	up
	1-Decanamine	Amine	5.57	1.30	up
Treat-4	2-Propenoic acid, 2-methyl-, (tetrahydro-2-furanyl)methyl ester	Ester	5.89	1.30	up
VS	Non-8-enal	Aldehyde	9.73	1.30	up
Treat-3	Carvenone	Terpenoids	5.33	1.30	up
	Orcinol	Phenol	13.45	1.16	up
	Benzoic acid, 2-hydroxy-, ethyl ester	Ester	0.17	1.12	down
	Pentanoic acid, 3-methyl-	Acid	0.13	1.29	down
	Ethyl maltol	Phenol	0.18	1.30	down
	2,4-Octadienal, (E,E)-	Aldehyde	0.14	1.30	down
	Cyclohexene, 4-ethenyl-4-methyl-3-(1-methylethenyl)-1-(1-methylethyl)-, (3R-trans)-	Terpenoids	0.13	1.26	down

Benzoic acid	Acid	0.10	1.21	down
1H-Naphtho[2,1-b]pyran, 3-ethenyldodecahydro-3,4a,7,7,10a-pentamethyl-, [3S-(3.alpha.,4a.alpha.,6a.beta.,10a.alpha.,10b.beta.)]-	Terpenoids	0.20	1.05	down
Methyl anthranilate	Ester	0.09	1.26	down
Butanenitrile, 4-(methylthio)-	Ether	0.19	1.30	down
1H-Naphtho[2,1-b]pyran, 3-ethenyldodecahydro-3,4a,7,7,10a-pentamethyl-, [3R-(3.alpha.,4a.beta.,6a.alpha.,10a.beta.,10b.alpha.)]-	Terpenoids	0.20	1.05	down

附表 S3.次生代谢物的生物合成

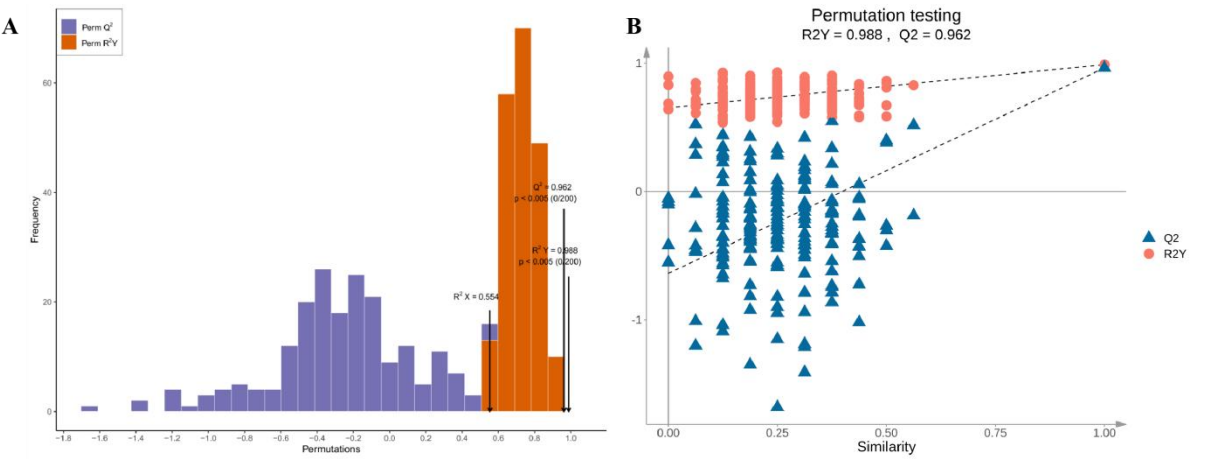
Table S3. Biosynthesis of secondary metabolites

Comparable group	Compounds	Class I	Fold Change	VIP	regulated
Treat-3 VS Treat-2	Butanal, 3-methyl-, oxime	Aldehyde	0.43	1.39	down
	trans-Cinnamic acid	Acid	2.06	1.36	up
	Geraniol	Terpenoids	0.29	1.39	down
	L-Pipecolinic acid	Acid	0.49	1.38	down
	Citronellol	Terpenoids	0.29	1.37	down
	4-Vinylphenol	Phenol	0.27	1.37	down
	Pilocarpine	Ester	14.16	1.39	up
	Benzoic acid	Acid	42.14	1.39	up
	6-Octen-1-ol, 3,7-dimethyl-, (R)-	Terpenoids	0.29	1.37	down
	3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)-	Ester	0.25	1.40	down
Treat-4 VS Treat-2	1H-Naphtho[2,1-b]pyran, 3-ethenyldodecahydro-3,4a,7,7,10a-pentamethyl-, [3R-(3.alpha.,4a.beta.,6a.alpha.,10a.beta.,10b.alpha.)]-	Terpenoids	34.45	1.38	up
	Butanal, 3-methyl-, oxime	Aldehyde	0.42	1.32	down
	trans-Cinnamic acid	Acid	4.09	1.32	up
	.alpha.-Farnesene	Terpenoids	2.11	1.32	up
	Naphthalene, 1,2,3,5,6,8a-hexahydro-4,7-dimethyl-1-(1-methylethyl)-, (1S-cis)-	Terpenoids	2.60	1.32	up
	(S)-(-)-(4-Isopropenyl-1-cyclohexenyl)methanol	Terpenoids	2.15	1.26	up
	Pilocarpine	Ester	4.11	1.29	up

Benzoic acid	Acid	4.16	1.03	up
L-.alpha.-Terpineol	Terpenoids	2.13	1.32	up
Levomenthol	Terpenoids	2.07	1.31	up
3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)-	Ester	0.31	1.31	down
p-Mentha-1,8-dien-7-ol	Terpenoids	2.15	1.26	up

附表 S4. 单萜类和二萜类生物合成

Table S4. Sesquiterpenoid and triterpenoid biosynthesis					
Comparable group	Compounds	Class I	Fold Change	VIP	Regulated
Treat-2 Vs Treat-1	(Z)-1-Methyl-4-(6-methylhept-5-en-2-ylidene)cyclohex-1-ene	Terpenoids	0.12	1.38	down
	.alpha.-Farnesene	Terpenoids	0.17	1.40	down
	.beta.-Bisabolene	Terpenoids	0.12	1.40	down
Treat-4 Vs Treat-1	(Z)-1-Methyl-4-(6-methylhept-5-en-2-ylidene)cyclohex-1-ene	Terpenoids	0.33	1.36	down
	.alpha.-Farnesene	Terpenoids	0.35	1.39	down
	.beta.-Bisabolene	Terpenoids	0.23	1.39	down
	Naphthalene, 1,2,3,5,6,8a-hexahydro-4,7-dimethyl-1-(1-methylethyl)-, (1S-cis)-	Terpenoids	2.36	1.36	up
Treat-4 Vs Treat-2	(Z)-1-Methyl-4-(6-methylhept-5-en-2-ylidene)cyclohex-1-ene	Terpenoids	2.66	1.27	up
	.alpha.-Farnesene	Terpenoids	2.11	1.32	up
	Naphthalene, 1,2,3,5,6,8a-hexahydro-4,7-dimethyl-1-(1-methylethyl)-, (1S-cis)-	Terpenoids	2.60	1.32	up



附图 S1: A OPLS-DA 累积解释率与预测能力图. B OPLS-DA 模型置换检验图.

Fig. S1 A OPLS-DA cumulative explained variance and predictive ability plot. B OPLS-DA model permutation test plot.

参考文献

- 白世践, 户金鸽, 赵荣华, 等. “阳光玫瑰”葡萄在吐鲁番地区的栽培特性[J]. 北方园艺, 2022, (12): 14-22.
- 鲍民胡. “厂”字整形方式下负载量对“赤霞珠”葡萄矿质营养的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2016.
- 卞春松, 刘建刚, 金黎平. 2018年马铃薯养分管理最新研究进展[C]//中国作物学会马铃薯专业委员会, 湖北省农业农村厅, 恩施州人民政府. 马铃薯产业与健康消费(2019). 中国农业科学院蔬菜花卉研究所/农业农村部薯类作物生物学与遗传育种重点实验室, 2019: 2.
- 蔡倩, 白一光. 果粮间作对仁用杏生长及叶绿素荧光参数的影响[J]. 农业科技与装备, 2020 (6): 1-4.
- 常心怡, 孙军利, 赵宝龙, 等. 外源 ALA 对 NaCl 胁迫下酸枣幼苗光合特性与膜脂过氧化的影响[J]. 新疆农业科学, 2019, 56 (9): 1635-1644.
- 车俊峰, 郭春会, 苏婷, 等. 叶面肥组配喷施对克瑞森无核葡萄产量和品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29 (3): 174-179.
- 陈晶和, 史树仁. 大龄葡萄夏秋季节高接换种技术[J]. 果农之友, 2021 (5): 18-20.
- 陈丽靓, 孙军利, 常心怡, 等. 外源 ALA 对 NaCl 胁迫下酸枣幼苗叶绿素合成的影响[J]. 新疆农业科学, 2022, 59 (7): 1659-1665.
- 陈青. “厂”字整形方式下负载量对酿酒葡萄光合作用的调控研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2016.
- 陈少珍, 蒋慧萍, 吴代东, 等. 植物生长调节剂对野生毛葡萄保花保果及其果实品质的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29 (6): 1420-1424.
- 陈为峰, 杨玉, 邓文. 桃夏季高接换种嫁接成活率和生长状况影响试验 (英文) [J]. Agricultural Science & Technology, 2023, 24 (1): 1-5.
- 陈哲, 徐超, 李小婷, 等. 植物生长调节剂对阳光玫瑰葡萄果实风味品质的影响[J]. 浙江农业科学, 2025, 66 (4): 952-957.
- 陈智强. 叶面施磷对不同冠型杉木幼苗根系磷营养竞争的影响研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2021.
- 程大伟, 何莎莎, 谷世超, 等. GA₃ 和 TDZ 对‘红艳无核’葡萄果实品质的影响[J]. 果树学报, 2021, 38 (2): 212-221.
- 程大伟, 陈锦永, 顾红, 等. GA₃ 与 TDZ 组合对巨玫瑰葡萄果实理化指标和苦涩味物质含量的影响[J]. 南方农业学报, 2018, 49 (5): 922-929.
- 程杰山, 王利军, 蒋爱丽, 等. 果树库源关系改变对源叶光合作用的影响机制研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30 (19): 75-80.
- 崔丽贤, 刘金利. 果树高接换头技术要点[J]. 烟台果树, 2016 (04): 54.

- 董洁, 张鹏, 李旺泽, 等. 基于 GA₃ 与 CPPU 的无核化与膨大处理对‘阳光玫瑰’葡萄果实品质的影响[J]. 中国农业科学, 2025, 58 (10): 2008-2021.
- 董永娟, 王延秀, 张仲兴, 等. 外源 GA₃ 对设施延后栽培‘红地球’葡萄果实膨大和品质的影响[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44 (5): 1144-1155.
- 豆一玲, 董新平, 张建昌. 不同负载量对霞多丽葡萄生长发育及酿酒品质的影响[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2010, (1): 28-30.
- 杜邦, 李贵利, 周文静, 等. 凯特芒果不同叶果比对果实品质和营养元素含量的影响[J]. 广东农业科学, 2011, 38 (24): 29-30.
- 方金豹, 田莉莉, 陈锦永, 等. 猕猴桃源库关系的变化对果实特性的影响[J]. 园艺学报, 2002, (2): 113-118.
- 方金豹, 郑芳, 陈锦永, 等. 源库关系的变化对猕猴桃叶片光合强度的影响[C]. 重庆: 中国科学技术出版社, 2001: 85-90.
- 付凌晖, 叶礼奇. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- 傅伟红, 夏澜, 应永涛, 等. 5-ALA 对阳光玫瑰葡萄果实品质的影响[J]. 中国果树, 2023, (10): 45-51.
- 高晶晶, 冯新新, 段春慧, 等. ALA 提高苹果叶片光合性能与果实品质的效应[J]. 果树学报, 2013, 30 (6): 944-951.
- 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- 龚鹏, 毛剑, 费青青. 葡萄品种的更新[J]. 农村科技, 2004, (3): 32.
- 郭景南, 刘崇怀, 冯义彬, 等. 《葡萄种质资源描述规范和数据标准》概述及使用讨论[J]. 果树学报, 2010, 27 (5): 784-789.
- 郭俊强, 王琦俐, 王玮玮, 等. 花穗整形及植物生长调节剂处理对‘阳光玫瑰’葡萄果实品质的影响[J]. 中国果树, 2021 (4): 27-34.
- 郭磊, 蔡志翔, 张斌斌, 等. 5-氨基乙酰丙酸促进桃果皮提前着色机制研究[J]. 园艺学报, 2013, 40 (6): 1043-1050.
- 郭淑萍, 杨顺林, 杨玉皎, 等. GA₃ 和 CPPU 对无核翠宝葡萄果实品质的影响[J]. 果树学报, 2022, 39 (10): 1834-1844.
- 贺普超. 葡萄学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- 侯旭东, 谭佳欣. CPPU 与 GA₃ 对“妮娜皇后”葡萄果实品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2021, 49 (21): 65-69.
- 胡利明, 夏仁学, 周开兵, 等. 不同砧木对温州蜜柑光合特性的影响[J]. 园艺学报, 2006, 33 (5): 937-941.
- 胡琳莉. 铵硝营养缓解小型大白菜幼苗弱光胁迫的生理和分子机制[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
- 胡松鹤. 施用氨基酸叶面肥对马铃薯地上部分植株生长及块茎风味物质的影响[D]. 昆明: 云南农业大学, 2024.

- 黄艳. ‘阳光玫瑰’葡萄果锈形成机理及调控技术研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2021.
- 贾瑞瑞, 祝艳艳, 杨秀莲, 等. 不同砧木对楸树嫁接苗生长及光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 97-106.
- 焦念元, 李亚辉, 李法鹏, 等. 间作玉米穗位叶的光合和荧光特性[J]. 植物生理学报, 2015, 51(7): 1029-1037.
- 李博, 方俊文, 王莹. 植物生长调节剂与肥料复配的潜力与问题[J]. 磷肥与复肥, 2020, 35(3): 1-4.
- 李冬波, 彭宏祥, 徐宁, 等. 35个荔枝品种与‘怀枝’高接换种的亲和性及性状评价[J]. 西南农业学报, 2023, 36(2): 386-395.
- 李海燕, 张丽平, 王莉, 等. 2种植物生长调节剂对阳光玫瑰葡萄品质的影响[J]. 浙江大学学报, 2016, 42(4): 419-426.
- 李海燕. ‘阳光玫瑰’葡萄香气物质积累规律及其调控研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- 李记明. 关于葡萄品质的评价指标[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 1999, (1): 56-59.
- 李鹏程, 李铭, 郭绍杰, 等. 几种葡萄砧木的引种表现及抗寒性分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(34): 93-97.
- 李琴. 苹果树高接换种技术[J]. 河北果树, 2011, (2): 6.
- 李瑞杰, 唐会会, 王庆燕, 等. 5-氨基乙酰丙酸和乙烯利复配剂对东北春玉米光合特性及产量的影响[J]. 作物杂志, 2020, (2): 125-133.
- 李双岑, 胡宏远, 王振平. 不同砧木对1年生霞多丽葡萄生长和光合特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(10): 213-215.
- 李婉雪. ‘阳光玫瑰’葡萄优质栽培技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- 李晓桂. 噻苯隆与氯吡脲对‘阳光玫瑰’葡萄果实内源激素及品质的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2024.
- 李欣欣, 杜清洁, 张翠杰, 等. 几种化合物复配的叶面肥对黄瓜幼苗生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(21): 153-156.
- 李新海. 不同叶果比对香梨果实生长发育的影响[J]. 新疆农垦科技, 2008, 4(5): 27-28.
- 李洋, 田淑芬, 王超霞, 等. 不同叶果比对‘玫瑰香’葡萄果实可挥发香气合成的影响[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2022, (5): 59-65.
- 李育洲. 葡萄改接换头技术[J]. 河北林业, 2010, (5): 34.
- 李忠光, 龚明. 愈创木酚法测定植物过氧化物酶活性的改进[J]. 植物生理学通讯, 2008(2): 323-324.
- 梁静怡, 蔡晓月, 张剑侠. 植物生长调节剂处理对阳光玫瑰葡萄果实香气含量的影响[J]. 中国果树, 2024, (09): 30-36.
- 凌凡舒, 徐丹, 马郡孺, 等. 不同叶面肥对设施阳光玫瑰葡萄生长、叶片功能与果实品质的影响[J]. 西北园艺, 2025, (8): 71-74.
- 刘春燕, 侯毅兴, 马丽花, 等. 9个砧穗组合葡萄嫁接苗叶片光合及叶绿素荧光参数比

- 较[J]. 经济林研究, 2023, 41 (2): 194-204.
- 刘晖, 康琅, 刘卫琴, 等. 5-氨基乙酰丙酸(ALA)在水溶液中的稳定性[J]. 南京农业大学学报, 2006, (2): 29-32.
- 刘金标, 李洪艳, 曹雄军, 等. 不同处理对‘巨峰’葡萄无核化及果实品质的影响. 西南农业学报, 2018, 30 (12): 2788-2792.
- 刘苗苗, 姚锦, 包敏, 等. 赤霉素诱导葡萄无核形成机理研究进展[J]. 园艺学报, 2024, 51 (7): 1610-1622.
- 刘世鹏, 曹娟云, 陈宗礼. 鲜枣中过氧化氢酶活性的测定[J]. 北方园艺, 2011, (17): 22-24.
- 刘松忠, 姜远茂. 疏果处理对草莓果实芳香成分的影响[J]. 西北农业学报, 2004, 13 (2): 172-175.
- 刘天亮, 杨林林, 董诚明, 等. 不同复配叶面肥对金银花成分及产量的影响[J]. 中药材, 2021, 44 (12): 2758-2763.
- 刘欣宇, 翟文婷, 朱春梅, 等. 23 个鲜食葡萄品种在石河子垦区的栽培特性及经济效益分析[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2025, (4): 105-115.
- 刘鑫铭, 陈婷, 刘锡铭, 等. 含氨基酸水溶性肥料对巨峰葡萄的影响[J]. 福建农业学报, 2019, 34 (7): 782-789.
- 刘兆新, 刘妍, 刘婷如, 等. 控释复合肥对麦套花生光系统II性能及产量和品质的调控效应[J]. 作物学报, 2017, 43 (11): 1667-1676.
- 陆志峰, 鲁剑巍, 潘勇辉, 等. 钾素调控植物光合作用的生理机制[J]. 植物生理学报, 2016, 52 (12): 1773-1784.
- 路方方. 几种生长调节剂组合处理对‘阳光玫瑰’葡萄果实膨大和品质的影响[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2020.
- 吕中伟, 王鹏, 张晓锋, 等. ‘阳光玫瑰’葡萄无核化处理及配套栽培技术[J]. 河北果树, 2016, (4): 21-22.
- 吕中伟, 王鹏, 张晓锋, 等. 植物生长调节剂对阳光玫瑰葡萄膨大及果实品质的影响初探[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2015, (6): 38-39.
- 毛妮妮, 刘伟忠, 吉沐祥, 等. “阳光玫瑰”葡萄的引种表现及省力化栽培技术[J]. 江苏农业科学, 2016, 44 (12): 204-205.
- 孟鑫, 单守明, 付东艳, 等. 叶果比对“北红”葡萄花色苷积累的影响[J]. 北方园艺, 2016, (23): 56-59.
- 孟长军, 杜喜春, 张旸. 5-氨基乙酰丙酸对喜树幼苗盐害缓解的生理机制研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2019, 27 (2): 164-170.
- 穆维松, 冯建英, 田东, 等. 我国鲜食葡萄产业的国际贸易与国内需求形势[J]. 中国果树, 2019, (2): 5-10.
- 穆维松, 王克健, 杜远鹏, 等. 阳光玫瑰葡萄的发展现状、存在问题与实现高质量发展的路径与建议[J]. 中国果树, 2026, (2): 1-4.

- 聂瑞洁. ‘阳光玫瑰’葡萄未来市场形势分析[J]. 北方果树, 2021, (6): 53-55.
- 潘萧亦. 外源镁及 5-氨基乙酰丙酸 (5-ALA) 对葡萄产量和品质形成的协同增效作用 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2025.
- 彭丽丽, 姜卫兵, 韩健. 源库关系变化对果树产量及果实品质的影响[J]. 经济林研究, 2012, 30 (3): 134-140.
- 蒲靖, 王巧梅, 金雪微, 等. 喷施不同叶面肥对枇杷果实品质的影响[J]. 福建农业学报, 2022, 37 (6): 774-780.
- 齐翎子. 叶面喷施磷酸二氢钾对草莓生长和花芽分化的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2025.
- 乔军, 马丽, 郭修武, 等. 12 种砧木对 ‘巨峰’ 葡萄产量及果实品质的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27 (22): 239-242.
- 商佳胤, 李凯, 王超霞, 等. 夏季修剪对 ‘巨玫瑰’ 葡萄果实品质及 6 种芳香化合物的影响[J]. 浙江农业学报, 2019, 31 (10): 1639-1646.
- 邵则夏. 葡萄树嫁接改造技术[J]. 致富天地, 2009, (11): 28.
- 沈乐意, 王立如, 徐悦, 等. 不同砧木对 ‘阳光玫瑰’ 葡萄果实品质及糖异生相关基因表达的影响[J]. 农业生物技术学报, 2023, 31 (12): 2490-2505.
- 施海涛. 植物逆境生理学实验指导[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- 史文婷, 王磊, 李淑红, 等. 赤霉素和氯吡脲对 ‘阳光玫瑰’ 葡萄果实无核化及品质的影响. 北方园艺, 2017, (16): 19-24.
- 宋献策, 王世平, 顾巧英, 等. 阳光玫瑰葡萄在上海的引种表现及优质栽培技术[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2015, (4): 48-51.
- 苏晓琼, 王美月, 束胜, 等. 外源亚精胺对高温胁迫下番茄幼苗快速叶绿素荧光诱导动力学特性的影响[J]. 园艺学报, 2013, 40 (12): 2409-2418.
- 孙天雨, 文博, 王春峰, 等. 5-氨基乙酰丙酸对库尔勒香梨果实品质和挥发性代谢物的影响[J]. 食品科学, 2024, 45 (23): 2308-2317.
- 孙霄, 单守明, 许亚丽, 等. 不同叶果比处理对 “品丽珠” 葡萄果实品质指标的影响[J]. 北方园艺, 2019, (8): 53-58.
- 谭显甫. 不同植物生长调节剂配方对 ‘阳光玫瑰’ 葡萄果实品质及耐贮性的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2025.
- 谭星. 营养液添加海藻肥对芥蓝生长及品质的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
- 唐莎莎. 无核白葡萄果实品质评价研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013.
- 唐薇, 牛曰华, 张冬梅, 等. 留叶枝去早果枝对抗虫棉生长发育及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22 (8): 178-182.
- 唐艳领, 宋策, 荆艳彩, 等. CPPU 对三种典型黄瓜类型果实生长及品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2025, 38 (10): 75-82.
- 田永强, 聂国伟, 李凯, 等. 采后喷施叶面肥对温室甜樱桃叶片部分生理指标的影响[J]. 农学学报, 2019, 9 (11): 34-37.

- 涂海华, 周坚, 毛宇, 等. 天然海藻肥对“夏黑”葡萄植株生长及果实品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (4): 213-217.
- 万卓吾, 付东艳, 张理健, 等. 喷施乙烯利和磷酸二氢钾对宁夏贺兰山东麓产区美乐葡萄果实着色的影响[J]. 中国酿造, 2025, 44 (9): 52-57.
- 王斌. 4 种叶面肥对六月李产量和品质的影响[J]. 现代农业科技, 2025, (6): 70-72.
- 王贵州, 章秋平. 成龄桃树高接换头技术[J]. 果农之友, 2007, (1): 20.
- 王建萍, 徐维华, 张纯, 等. 不同植物生长调节剂对‘阳光玫瑰’果实品质的影响[J]. 北方园艺, 2022, (5): 29-34.
- 王俊文, 袁鸿, 张洋, 等. 外源 5-氨基乙酰丙酸对番茄成熟过程中果实品质和矿质元素含量的影响[J]. 核农学报, 2023, 37 (1): 169-179.
- 王立如, 范林洁, 房聪玲, 等. 植物生长调节剂对阳光玫瑰葡萄果实品质的影响[J]. 浙江农业科学, 2023, 64 (3): 639-645.
- 王连起, 昌云军, 张书辉, 等. 葡萄改接及示范推广技术总结[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2005, (6): 34-38.
- 王敏, 于岩, 孙秀波, 等. 叶面肥种类对葡萄果实品质和叶片生长的影响[J]. 农学学报, 2019, 9 (5): 48-54.
- 王鹏, 金龙飞, 黄贝, 等. 不同叶果比对设施红美人杂柑光合特性和果实品质的影响[J]. 果树学报, 2022, 39 (10): 1857-1863.
- 王乾, 邵白俊杰, 温玥, 等. 不同叶果比对库尔勒香梨果实品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52 (18): 182-188.
- 王强, 帕提古丽, 张常荣, 等. 不同砧木嫁接对辣椒光合特性及叶绿素荧光参数的影响[J]. 新疆农业科学, 2015, 52 (4): 660-666.
- 王庆莲, 赵密珍, 袁华招, 等. 花前 GA_3 处理对无核葡萄花序拉长和果实品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42 (11): 171-174.
- 王秋萍. 葡萄改接换种新技术[J]. 河北果树, 2010, (5): 43-44.
- 王莎, 程大伟, 顾红, 等. 植物生长调节剂对‘阳光玫瑰’葡萄果实无核及品质的影响[J]. 果树学报, 2019, 36 (12): 1675-1682.
- 王莎, 程大伟, 李明, 等. ‘阳光玫瑰’葡萄无核化研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22 (2): 58-64.
- 王维霞, 姚林啟, 何明利. 葡萄大树绿枝高接换优技术[J]. 果农之友, 2018, (7): 14+20.
- 王武. 葡萄果实单萜类香气物质鉴定及其合成机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2021.
- 王准, 程红颂, 张梦君, 等. 腐植酸叶面肥复配聚合氨基酸对番茄生长及品质的影响[J]. 腐植酸, 2022, (3): 93-98.
- 韦娜. 叶面喷施黄腐酸对粮饲兼用型燕麦产量、品质及饲用价值的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2023.

- 吴刚, 赵强, 谢佳, 等. 植物生长调节剂复配不同叶面肥对棉花干物质积累及产量品质的影响[J]. 新疆农业科学, 2023, 60 (11): 2646-2652.
- 吴桂玲, 李长生. 阳光玫瑰葡萄无核化栽培技术[J]. 农村科技, 2023, (4): 51-56.
- 武传兰, 隆小华, 金善钊, 等. 盐胁迫对不同品系杨树幼苗生长和叶绿素荧光的效应[J]. 生态学杂志, 2012, 31 (6): 1347-1352.
- 武佳欣. 叶面喷肥对三个李子品种生长发育和果实品质的影响[D]. 长春: 长春大学, 2023.
- 西传龙, 刘瑞华, 周琳, 等. 梨树高接换种技术[J]. 落叶果树, 2013, 45 (1): 52-53.
- 夏丽娟, 陈浩, 侯勇. 赤霉酸和噻苯隆复配的室内活性测定及葡萄田间试验效果研究[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2021, 45 (1): 98-104.
- 谢荔, 成学慧, 陈禹平, 等. 采前喷施低浓度 5-氨基乙酰丙酸促进苹果着色与改善品质的效应[J]. 江苏农业科学, 2015, 43 (1): 162-165.
- 谢兆森. 根域限制对葡萄果实发育、源库器官及其输导组织结构的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- 辛守鹏, 李明, 郝紫微, 等. 不同葡萄品种对嫁接‘阳光玫瑰’生长及果实品质的影响[J]. 北方果树, 2022, (3): 19-20.
- 徐石元. 银杏一年两次采叶模式下叶面肥的筛选和应用研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2024.
- 许凯, 李佩昆, 黄文尉, 等. 砧木‘SA15’对‘赤霞珠’和‘脆光’葡萄生长和果实品质的影响[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2023, (2): 50-55.
- 许孜萍. 微生物菌肥与微量元素叶面肥对桃叶片生理指标及果实品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2024.
- 杨凤英, 杨勇, 方进, 等. 2,4-混表芸苔素内酯与水溶肥复配对豆角品质及产量的影响[J]. 肥料与健康, 2021, 48 (1): 22-26.
- 杨兴旺, 王志强, 段晨磊, 等. 两种叶面肥对金黄金桃果实品质和挥发性风味物质的影响[J]. 果树学报, 2025, 42 (5): 993-1002.
- 杨亚蒙, 王境杨, 郭红娜, 等. 植物生长调节剂对“阳光玫瑰”葡萄果实品质的影响[J/OL]. 安徽农业科学, 1-5(2025-12-03)[2026-03-21]. <https://link.cnki.net/urlid/34.1076.s.20251201.1734.019>.
- 杨治元, 陈哲. 阳光玫瑰葡萄规模种植情况调查初报[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2017, (1): 59-60.
- 姚会东, 闫威姣, 李宏业, 等. 不同外源调节物质对克瑞森无核葡萄果实着色及品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50 (23): 140-146.
- 姚林啟, 王维霞. 葡萄新品种‘瑞都红玉’高接表现及其嫁接技术[J]. 山西果树, 2018, (4): 18-19.
- 叶尚红, 陈疏影, 刘平祖. 农业院校植物生理生化实验教材体系探讨[J]. 植物生理学通讯, 2004, 40 (4): 487-488.
- 袁传卫, 姜兴印. 50%噻苯隆可湿性粉剂对鲁中地区棉花的脱叶及吐絮效果[J]. 中国棉

- 花, 2014, 41 (4): 25-27.
- 袁鸿, 武玥, 王俊文, 等. 外源 5-氨基乙酰丙酸对设施番茄果实发育及糖酸品质的影响[J]. 西北植物学报, 2022, 42 (1): 107-117.
- 袁军, 石斌, 吴泽龙, 等. 不同库源关系对油茶光合作用及果实品质的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51 (8): 1287-1292.
- 张辰. 根外施肥对树莓生长和果实品质及产量的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- 张克坤, 王海波, 王孝娣, 等. ‘瑞都香玉’葡萄果实挥发性成分在果实发育过程中的变化[J]. 中国农业科学, 2015, 48 (19): 3965-3978.
- 张丽颖, 冯新新, 高晶晶, 等. 根际浇灌 ALA 溶液对苹果叶片生理特性与果实品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2015, 31 (1): 158-165.
- 张枋分, 张丽娜, 王晓玲, 等. 喷施纳米铁和纳米锌叶面肥对冬枣叶片及果实品质的影响[J]. 北方园艺, 2024, (11): 23-30.
- 张明霞, 吴玉文, 段长青. 葡萄与葡萄酒香气物质研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41 (7): 2098-2104.
- 张琪, 赵慧, 刘艾英, 等. 不同生长调节剂对‘户太八号’产量和品质的影响[J]. 陕西农业科学, 2022, 68 (1): 43-46.
- 张瑞. 转色前叶果比处理对“赤霞珠”和“北玫”葡萄有机酸积累和果实品质的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2017.
- 张上隆, 陈昆松. 果实品质形成与调控的分子生理[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- 张社南, 贺申魁, 梅正敏, 等. 沙糖橘叶果比观察分析[J]. 南方园艺, 2019, 30 (5): 16-18.
- 张涛, 任德元, 张国桢. “秦冠”苹果果实和叶生长规律的研究[J]. 北方园艺, 2012, (21): 15-18.
- 张稳稳, 李映龙. 叶果比对‘品丽珠’葡萄果实中有机酸积累及关键酶活性的影响[J]. 农业科学研究, 2021, 42 (3): 34-37.
- 张秀珍, 宋文龙, 梁海永, 等. 四倍体白榆叶片形态特征和光合特性研究[J]. 林业科技, 2022, 47 (6): 1-4.
- 赵荣华, 白世践, 李超, 等. 赤霉素处理对‘丽红宝’葡萄果实品质及着色的影响[J]. 北方园艺, 2016, 36 (19): 35-39.
- 赵新民, 孙军利. 13 个葡萄品种在石河子垦区的生长结果特性[J]. 中国果菜, 2017, 37 (6): 81-84.
- 赵玉山. 新疆: 吐鲁番小葡萄成为大产业[J]. 中国果业信息, 2023, 40 (7): 44.
- 郑碧霞, 戢小梅, 李长林, 等. 不同砧木对阳光玫瑰葡萄生长和果实品质的影响[J]. 中国果树, 2023, (1): 27-32.
- 郑聪丽, 白茹, 高登涛, 等. 不同砧木对郑州地区‘阳光玫瑰’葡萄生长及果实品质的影响[J]. 经济林研究, 2023, 41 (4): 101-108.

- 郑强卿, 陈奇凌, 王晶晶, 等. 隶属函数法综合评价外源植物生长调节剂对骏枣果实品质的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2021, (1): 99-106.
- 郑秋玲, 王婷, 张超杰, 等. 设施促早栽培‘藤稔’葡萄无核化试验初探[J]. 烟台果树, 2021, 42 (1): 9-11.
- 郑直. CPPU、TDZ 及不同套袋方式处理对‘阳光玫瑰’葡萄果实生长发育的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2021.
- 钟其岭, 田淑芬, 王荣, 等. 不同根系功能修复剂对‘阳光玫瑰’葡萄果实品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2026, 54 (1): 24-35.
- 周明星. 植物生长调节剂对‘阳光玫瑰’葡萄花果生长和果实品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2023.
- 朱春梅, 常心怡, 刘志宇, 等. ALA 缓解酸枣 NaCl 胁迫相关 miRNAs 鉴定及靶基因分析[J]. 果树学报, 2025, 42 (12): 2828-2840.
- 朱会调, 高登涛, 白茹, 等. 黄腐酸对阳光玫瑰葡萄果实品质及产量的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2021, 39 (5): 590-596.
- 朱佩佩, 秦浩翔, 张剑侠. 无核葡萄胚珠发育过程中内源激素及多胺含量的变化[J]. 中国农业科学, 2023, 56 (23): 4789-4800.
- 朱振家, 姜成英, 史艳虎, 等. 库源比改变对油橄榄产量及叶源光合作用的调节[J]. 中国农业科学, 2015, 489 (3): 546-555.
- Alem H, Rigou P, Schneider R, et al. Impact of agronomic practices on grape aroma composition: a review[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(3): 975-985.
- Antoine S, Pailly O, Gibon Y, et al. Short-and long-term effects of carbohydrate limitation on sugar and organic acid accumulation during mandarin fruit growth[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(11): 3906-3914.
- Baker N R. A possible role for photosystem II in environmental perturbations of photosynthesis[J]. Physiologia Plantarum, 1991, 81(4): 563-570.
- Barbera D, Avellone G, Filizzola F, et al. Determination of terpene alcohols in Sicilian Muscat wines by HS-SPME-GC-MS[J]. Natural product research, 2013, 27(6): 541-547.
- Bobeica N, Poni S, Hilbert G. et al. Differential responses of sugar, organic acids and anthocyanins to source-sink modulation in Cabernet Sauvignon and Sangiovese grapevines. Frontiers in Plant Science, 2015;6:00382
- Cabrita M J, Freitas A M C, Laureano O, et al. Glycosidic aroma compounds of some Portuguese grape cultivars[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2006, 86(6): 922-931.
- Covarrubias M P, Lillo-Carmona V, Melet L, et al. Metabolite fruit profile is altered in response to source-sink imbalance and can be used as an early predictor of fruit quality in nectarine[J]. Frontiers in plant science, 2021, 11: 604133.

- Curry E A, Greene D W. CPPU influences fruit quality, fruit set, return bloom, and preharvest drop of apples[J]. HortScience, 1993, 28(2): 115-119.
- Dai Z W, Vivin P, Robert T, et al. Model-based analysis of sugar accumulation in response to source–sink ratio and water supply in grape (*Vitis vinifera*) berries[J]. Functional Plant Biology, 2009, 36(6): 527-540.
- Esteban M A, Villanueva M J, Lissarrague J R. Effect of irrigation on changes in berry composition of Tempranillo during maturation. Sugars, organic acids, and mineral elements[J]. American Journal of Enology and Viticulture, 1999, 50(4): 418-434.
- Famiani F, Antognozzi E, Boco M, et al. Effects of altered source-sink relationships on fruit development and quality in *Actinidia deliciosa*[C]/III International Symposium on Kiwifruit 444. 1995: 355-360.
- Fenoll J, Manso A, Hellín P, et al. Changes in the aromatic composition of the *Vitis vinifera* grape Muscat Hamburg during ripening[J]. Food Chemistry, 2009, 114(2): 420-428.
- Fowles G W A. Acids in grapes and wines: A review[J]. Journal of Wine research, 1992, 3(1): 25-41.
- Génard M, Bruchou C. Multivariate analysis of within-tree factors accounting for the variation of peach fruit quality[J]. Scientia Horticulturae, 1992, 52(1-2): 37-51.
- Guanter L, Zhang Y, Jung M, et al. Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014, 111(14): E1327-E1333.
- Gunata Y Z, Bayonove C L, Baumes R L, et al. The aroma of grapes I. Extraction and determination of free and glycosidically bound fractions of some grape aroma components[J]. Journal of Chromatography A, 1985, 331: 83-90.
- Hernandez-Santana V, Perez-Arcoiza A, Gomez-Jimenez M C, et al. Disentangling the link between leaf photosynthesis and turgor in fruit growth[J]. The Plant Journal, 2021, 107(6): 1788-1801.
- Ilc T, Werck-Reichhart D, Navrot N. Meta-analysis of the core aroma components of grape and wine aroma[J]. Frontiers in plant science, 2016, 7: 1472.
- Jorquera-Fontena E, Pastenes C, Meriño-Gergichevich C, et al. Effect of source/sink ratio on leaf and fruit traits of blueberry fruiting canes in the field[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 241: 51-56.
- Ju Y, Liu B, Xu X, et al. Targeted metabolomic and transcript level analysis reveals the effects of exogenous strigolactone and methyl jasmonate on grape quality[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 299: 111009.
- Jusoh M, Loh S H, Aziz A, et al. Gibberellin promotes cell growth and induces changes in fatty acid biosynthesis and upregulates fatty acid biosynthetic genes in *Chlorella vulgaris* UMT-M1[J]. Applied biochemistry and biotechnology, 2019, 188(2): 450-459.

- Kalua C M, Boss P K. Evolution of volatile compounds during the development of Cabernet Sauvignon grapes (*Vitis vinifera* L.)[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2009, 57(9): 3818-3830.
- Keller M, Shrestha P M, Hall G E, et al. Arrested sugar accumulation and altered organic acid metabolism in grape berries affected by berry shrivel syndrome[J]. American Journal of Enology and Viticulture, 2016, 67(4): 398-406.
- Leng X, Cong J, Cheng L, et al. Identification of key gene networks controlling monoterpene biosynthesis during grape ripening by integrating transcriptome and metabolite profiling[J]. Horticultural Plant Journal, 2023, 9(5): 931-946.
- Lescourret F, Génard M. A virtual peach fruit model simulating changes in fruit quality during the final stage of fruit growth[J]. Tree physiology, 2005, 25(10): 1303-1315.
- Li S, Chen C, Zhou J, et al. Multi-omics analysis reveals synergistic effects of terpenoids and phenylpropanoid compounds on flavour formation in skin and pulp of Shine Muscat'grape[J]. Food Chemistry, 2025, (494): 146110-146110.
- Li Y M, Tang X S, Feng W Q, et al. Differential regulation of xylem and phloem differentiation in grape berries by GA₃ and CPPU[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 337(1): 113582-113582.
- Li Y, Li Z, Wang L. Applications of 5-aminolevulinic acid on the physiological and biochemical characteristics of strawberry fruit during postharvest cold storage[J]. Ciência Rural, 2016, 46(12): 2103-2109.
- Luan F, Mosandl A, Münch A, et al. Metabolism of geraniol in grape berry mesocarp of *Vitis vinifera* L. cv. Scheurebe: demonstration of stereoselective reduction, E/Z-isomerization, oxidation and glycosylation[J]. Phytochemistry, 2005, 66(3): 295-303.
- Martínez-Lüscher J, Kurtural S K. Source–Sink manipulations have major implications for grapevine berry and wine flavonoids and aromas that go beyond the changes in berry sugar accumulation[J]. Food Research International, 2023, 169: 112826.
- Mason T G, Maskell E J. Studies on the transport of carbohydrates in the cotton plant: II. The factors determining the rate and the direction of movement of sugars[J]. Annals of Botany, 1928, 42(167): 571-636.
- Mateo J J, Jiménez M. Monoterpenes in grape juice and wines[J]. Journal of chromatography A, 2000, 881(1-2): 557-567.
- Murchie E H, Lawson T. Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications[J]. Journal of experimental botany, 2013, 64(13): 3983-3998.
- Norrie J, Keathley J P. Benefits of *Ascophyllum nodosum* marine-plant extract applications to Thompson Seedless grape production[C]//X International Symposium on Plant Bioregulators in Fruit Production 727. 2005: 243-248.
- OIV (International Organisation of Vine and Wine). OIV standard on minimum maturity

- requirements for table grapes: RESOLUTION VITI 1/2008[S/OL]. (2008).[2026-04-04]. <https://www.oiv.int/fr/node/3475>.
- OIV. (2025, September). OIV Statistical Brief: Wine, Table Grapes & Dried Grapes in 2024. International Organisation of Vine and Wine.
- Parker A K, Hofmann R W, van Leeuwen C, et al. Leaf area to fruit mass ratio determines the time of veraison in S auvignon B lanc and P inot N oir grapevines[J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 2014, 20(3): 422-431.
- Qi Y, Huang Y, Wang P, et al. Effects of different fruit-preserving and puffing-fruit formulations on the formation of berry russet and fruit quality of ‘Shine Muscat’Grape[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021, 792(1): 012043.
- Robinson A L, Boss P K, Solomon P S, et al. Origins of grape and wine aroma. Part 1. Chemical components and viticultural impacts[J]. American Journal of Enology and Viticulture, 2014, 65(1):1-24.
- Ruiz-García L, Hellín P, Flores P, et al. Prediction of Muscat aroma in table grape by analysis of rose oxide[J]. Food Chemistry, 2014, 154: 151-157.
- Sarijeva G, Knapp M, Lichtenthaler H K. Differences in photosynthetic activity, chlorophyll and carotenoid levels, and in chlorophyll fluorescence parameters in green sun and shade leaves of Ginkgo and Fagus[J]. Journal of plant physiology, 2007, 164(7): 950-955.
- Sava P. Study on the accumulation of nutritious substances in gooseberry fruits[J]. Scientific Papers-Series B-Horticulture, 2014, (58): 91-93.
- Sefton M A, Francis I L, Williams P J. Free and bound volatile secondary metabolites of Vitis Vhifera Grape cv. Sauvignon Blanc[J]. Journal of Food Science, 1994, 59(1): 142-147.
- Serri H, Hepp F. Effect of the growth regulator CPPU on fruit quality and fruit ripening of highbush blueberries[C]//VIII International Symposium on Vaccinium Culture 715. 2004: 279-283.
- Shen M, Zhang Z P, Wang L J. Effect of 5-aminolevulinic acid (ALA) on leaf diurnal photosynthetic characteristics and antioxidant activity in pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai)[M/OL]//NAJAFPOUR M M. Artificial Photosynthesis. London: IntechOpen, 2012. <https://doi.org/10.5772/26738>.
- Song J X, Anjum S A, Zong X F, et al. Combined foliar application of nutrients and 5-ALA acid (ALA) improved drought tolerance in Leymus chinensis by modulating its morpho-physiological characteristics[J]. Crop & Pasture Science, 2017, 68(5): 474-482.
- Suklje K, Basa Cesnik H, Janes L, et al. The effect of leaf area to yield ratio on secondary metabolites in grapes and wines of “*Vitis vinifera*” L. cv. Sauvignon blanc[J]. OENO ONE, 2013, 47(2): 83-97.
- Syvertsen J P, Goñi C, Otero A. Fruit load and canopy shading affect leaf characteristics and net gas exchange of ‘Spring’navel orange trees[J]. Tree physiology, 2003, 23(13):

899-906.

- Tecchio M A, Junior A P, Da Silva M J R, et al. Efecto del Thidiazuron en la calidad de la uva ‘Niagara rosada’ en diferentes portainjertos en el centro oeste paulista[J]. Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, 2024, 25(1): 63-74.
- Tong Q, Wang Y, Feil R, et al. Integrated analysis of metabolites and enzyme activities reveals the plasticity of central carbon metabolism in grape (*Vitis vinifera* cv. Cabernet Sauvignon) berries under carbon limitation[J]. Horticulture research, 2025, 12(4): 363.
- Tyagi K, Maoz I, Lapidot O, et al. Effects of gibberellin and cytokinin on phenolic and volatile composition of Sangiovese grapes. Scientia Horticulturae, 2022. 295: 110860.
- Usenik V, Orazem P, Stampar F. Low leaf to fruit ratio delays fruit maturity of ‘Lapins’ sweet cherry on Gisela 5[J]. Scientia horticulturae, 2010, 126(1): 33-36.
- Wan Y, Zhang Y, Zhang M, et al. Shade effects on growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of three Paeonia species[J]. PeerJ, 2020, 8: e9316.
- Wang L J, Jiang W B, Huang B J. Promotion of 5-aminolevulinic acid on photosynthesis of melon (*Cucumis melo*) seedlings under low light and chilling stress conditions[J]. Physiologia plantarum, 2004, 121(2): 258-264.
- Wang L, Brouard E, Hilbert G, et al. Differential response of the accumulation of primary and secondary metabolites to leaf-to-fruit ratio and exogenous abscisic acid[J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 2021a, 27(4): 527-539.
- Wang L, Brouard E, Prodhomme D, et al. Regulation of anthocyanin and sugar accumulation in grape berry through carbon limitation and exogenous ABA application[J]. Food Research International, 2022, 160: 111478.
- Wang W, Feng J, Wei L, et al. Transcriptomics integrated with free and bound terpenoid aroma profiling during “shine muscat”(Vitis labrusca× V. vinifera) grape berry development reveals coordinate regulation of MEP pathway and terpene synthase gene expression[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021b, 69(4): 1413-1429.
- Wu P, Kuo M C, Hartman T G, et al. Free and glycosidically bound aroma compounds in pineapple (*Ananas comosus* L. Merr.)[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 1991, 39(1): 170-172.
- Wu Y, Liao W, Dawuda M M, et al. 5-Aminolevulinic acid (ALA) biosynthetic and metabolic pathways and its role in higher plants: a review[J]. Plant Growth Regulation, 2019a, 87(2): 357-374.
- Wu Y, Zhang W, Duan S, et al. In-depth aroma and sensory profiling of unfamiliar table-grape cultivars[J]. Molecules, 2018, 23(7): 1703.
- Wu Y, Zhang W, Song S, et al. Evolution of volatile compounds during the development of Muscat grape ‘Shine Muscat’(Vitis labrusca× V. vinifera)[J]. Food Chemistry, 2020, 309: 125778.

- Wu Y, Zhang W, Yu W, et al. Study on the volatile composition of table grapes of three aroma types[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019b, 115: 108450.
- Wu Y, Duan S, Zhao L, et al. Aroma characterization based on aromatic series analysis in table grapes[J]. Scientific reports, 2016, 6(1): 31116.
- Xi X, Zha Q, He Y, et al. Influence of cluster thinning and girdling on aroma composition in ‘Jumeigui’ table grape[J]. Scientific reports, 2020, 10(1): 6877.
- Xu H F, Li S M, Ma W F, et al. Spraying Foliar Fertilizer Affect the Physiological Function of Leaf and Improve the Quality of ‘Snick’ Apple[J]. Plants, 2025, 14(18): 2926.
- Yamada M, Higashihiroshima H, Yamane H, et al. Development and extention of a new grape cultivar‘Shine Muscat’[J]. Horticultural Research (Japan), 2017, 16(3): 229-237.
- Yang C, Wang Y, Wu B, et al. Volatile compounds evolution of three table grapes with different flavour during and after maturation[J]. Food Chemistry, 2011, 128(4): 823-830.
- Yuan Z, Li B, Zhao Y. Advances in developmental biology in tree fruit and nut crops[J]. Horticulturae, 2025, 11(3): 327.
- Zabadal T J, Bukovac M J. Effect of CPPU on fruit development of selected seedless and seeded grape cultivars[J]. HortScience, 2006, 41(1): 154-157.
- Zhang X, Zhang H, Wu X, et al. Transcriptome study on the effect of leaf-fruit ratio on molecular regulation mechanism of *Camellia oleifera*[J]. BMC Plant Biology, 2025, 25(1): 153.
- Zheng T, Zhao P C, Xiang J, et al. Integrated transcriptomic and metabolomic analysis reveals the effects of forchlorfenuron and thidiazuron on flavonoid biosynthesis in table grape skins[J]. Current Plant Biology, 2024, 40(2): 100417.
- Zhou X, Liu S, Gao W, et al. Monoterpenoids evolution and MEP pathway gene expression profiles in seven table grape varieties[J]. Plants, 2022, 11(16): 2143.
- Zhou X, Shan B, Liu S, et al. Sensory omics combined with mathematical modeling for integrated analysis of retronasal Muscat flavor in table grapes[J]. Food Chemistry: X, 2024, 21: 101198.

致谢

二十载求学，各程皆有所感所获；所有经历，幸甚至哉；所有相遇，皆成珍藏。感谢毕业论文致谢给予我这样一个机会，能让我能写下一段无关其他，纯粹关于感谢的文字，向所有陪伴我走过这段岁月的人致以最深的谢意。

首先，我要感谢我的导师孙军利教授、赵宝龙教授、边凤霞老师，从论文的选题、框架的构建，到研究方法的选择、数据的收集与分析，再到论文的修改与定稿，每一个环节都凝聚着您的心血与智慧。您严谨的治学态度、敏锐的学术洞察力，以及对学生高度负责的精神，深深感染并激励着我。我更要感谢您对我人生方向的指引，三年间的交流，让我逐渐领悟到您严谨谦虚、乐观从容的学术追求与生活态度，这些宝贵品质促使我真正学会自立自强。我也要感谢悉心教导我的园艺系各位老师，感谢许丽丽、白茹、崔金霞、庞胜群、敬媛媛、王宪璞、赵丰云、程博、武林楠、孙钦明、徐巍和全绍文老师，感谢您在论文开题、中期和毕业答辩过程中提出的宝贵意见。在此，我衷心祝愿各位恩师桃李芬芳、教泽绵长！

感谢我的同门师兄姐妹们。感谢张宗翊师哥在我刚入学时便主动分享研究经验，帮助我尽快适应研究生生活；感谢朱春梅师姐在论文写作过程中给予了我许多细致的建议；感谢章智钧师哥，感谢刘志宇、张东亮、解安琪、刘欣宇、佟珂、赵云文、华晓梅、贾贝西、刘秋言、赵亮宇等同行伙伴们，我们常在自习室里讨论问题、交流心得，这些并肩奋斗的日子，将成为我记忆中最珍贵的片段。

感谢我的父母，你们用最朴实的爱为我撑起了一片天，让我能够心无旁骛地追求学业。在我面临压力与挫折时，你们总是给予我无条件的信任与鼓励，你们是我前行路上最坚实的后盾。

最后，我要感谢那个不曾放弃的自己。在实验室的灯光下与数据博弈，在迷茫与自我怀疑中一次次重整旗鼓。这段经历让我明白，学术之路虽充满艰辛，但每一步都算数。

硕士生涯就要结束了。我将带着这份感恩之心，带着在母校收获的知识与品格，脚踏实地地走向未来。愿所有人，平安喜乐，万事顺遂；愿母校桃李芬芳，再谱华章！

此致
敬礼！

翟文婷

2026年3月29日

作者简介

翟文婷，女性，生于2000年09月，汉族，籍贯山东。2022年毕业于塔里木大学园艺与林学院设施农业科学与工程专业，获农学学士学位。2023年9月进入石河子大学农学院农艺与种业专业学习。

在学期间主要参与的研究项目

1. 参与国家自然科学基金项目（32060647，32060648，31560542）；
2. 参与新疆石河子葡萄科技小院新长城科技小院助力计划项目。

在学期间发表的专利及文章

1. 翟文婷，张宗翊，陈红梅，等. 4个葡萄品种改接的阳光玫瑰光合特性和果实品质的差异分析[J]. 果树学报，2024，41，（9）：1789-1799.
2. Zhang Z, Sun J, Zhai W, et al. Integrated transcriptomic and metabolomic analysis reveals flavonoid-mediated cold adaptation in rootstock 'Totosga'[J]. Scientia Horticulturae, 2025, 351: 114414.
3. 刘欣宇，翟文婷，朱春梅，赵云文，赵宝龙，孙军利. 23个鲜食葡萄品种在石河子垦区的栽培特性及经济效益分析[J]. 中外葡萄与葡萄酒，2025，(04)：105-115.

获奖及荣誉情况

1. 石河子大学农学院“银白诗篇”初雪摄影大赛三等奖
2. 石河子大学一二·九冬季校园团体跑优秀运动员
3. 石河子大学第四届茶文化暨茶艺竞赛优秀志愿者
4. 石河子大学农学院研究生会工作先进个人
5. 石河子大学农学院优秀研究生干部
6. 石河子大学学生会工作优秀研究生会干部
7. 石河子大学优秀学生干部
8. 研究生兵团学业奖学金三等
9. 石河子大学农学院文献综述大赛三等奖

石河子大学硕士研究生学位论文

导师评阅表

研究生姓名	翟文婷	学制	三年
专业	农艺与种业	研究方向	果树栽培生理

学术评语:

本研究立足实际生产问题，开展老葡萄园不同品种改接的‘阳光玫瑰’生长发育差异及关键栽培技术研究，选题具有明确的现实针对性与应用价值，对于‘阳光玫瑰’葡萄产业发展具有重要的意义。

本研究对 4 个葡萄品种改接的‘阳光玫瑰’生长差异进行分析，通过对光合指标、果实品质的测定分析，运用主成分分析法，筛选出‘克瑞森无核’是改接‘阳光玫瑰’的最适品种，为区域实现老园更新提供了科学参考依据。针对筛选出的最优改接组合开展不同植物生长调节剂、不同叶果比及 5-ALA 和不同叶面肥复配的栽培技术试验，研究内容系统，指标体系完整，数据翔实可靠，工作量饱满。研究明确了盛花期 48 h 使用 25 mg·L⁻¹ GA₃+4 mg·L⁻¹ CPPU+3 mg·L⁻¹ TDZ，膨大期使用 30 mg·L⁻¹ GA₃+5 mg·L⁻¹ CPPU+5000 倍保美灵处理是最佳无核膨大方案；叶果比 30:1 处理能优化果实的糖酸含量，促进‘阳光玫瑰’果实中萜类化合物的积累；5-ALA 与海藻肥复配显著促进果实生长、提高糖酸含量、增强叶片光合能力和抗氧化酶活性。

整体而言，该研究技术路线合理，方法科学，分析层次清晰，结论明确。研究成果兼具理论探索意义与实践指导价值，该论文达到硕士专业学位论文要求，同意该生申请硕士学位。

指导教师签字: 孙学利

2026 年 6 月 3 日