

设施栽培条件下不同砧木对“阳光玫瑰”葡萄果实单萜类香气物质合成的影响

苏子衿

(中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

摘要: “阳光玫瑰”葡萄作为当前鲜食葡萄市场的主导品种之一, 其浓郁的玫瑰香气是核心品质特征, 而单萜类物质是构成该品种香气的关键组分。设施栽培已成为“阳光玫瑰”优质高产的主要栽培模式, 可通过调控环境因子实现果实品质的精准提升, 但设施内光照、温度、湿度等条件的改变也会影响果实香气物质的合成。砧木作为葡萄嫁接栽培的核心材料, 不仅能增强植株抗逆性、调节树体长势, 还可通过砧穗互作调控接穗果实的次生代谢过程, 进而影响单萜类香气物质的合成与积累。本研究以“阳光玫瑰”为接穗, 选用3种常用葡萄砧木(SO4、1103P、5BB)进行嫁接, 设置设施栽培试验, 通过顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用(HS-SPME-GC-MS)技术、酶活性测定、实时荧光定量PCR(qRT-PCR)等方法, 系统分析不同砧木对“阳光玫瑰”果实单萜类香气物质组成、含量及合成关键酶活性、相关基因表达的影响, 明确砧木调控单萜类香气物质合成的生理与分子机制。结果表明, 不同砧木显著影响“阳光玫瑰”果实单萜类香气物质的种类与含量, 其中SO4砧木嫁接处理的果实单萜类物质总量最高, 主要优势单萜组分(里那醇、香叶醇、芳樟醇)含量显著高于1103P和5BB砧木处理; 砧木可通过调控单萜合成关键酶(3-羟基-3-甲基戊二酰辅酶A还原酶HMGR、萜类合成酶TPS)的活性, 以及香气合成相关基因(WHMGR、WTPS、VvDXS)的表达水平, 进而调控单萜类物质的合成; 此外, 砧木还可通过乙烯、茉莉酸等激素信号通路间接调控香气基因的表达, 实现对果实香气品质的调控。本研究明确了设施栽培条件下不同砧木对“阳光玫瑰”单萜类香气物质合成的调控作用及机制, 为设施栽培中“阳光玫瑰”砧木的科学选择、香气品质的定向优化提供理论依据和实践支撑。

关键词: 设施栽培; 砧木; 阳光玫瑰葡萄; 单萜类香气物质; 合成机制

中图分类号: S663.1

文献标识码: A

文章编号: 3106-2547(2025)03-0024-11

DOI: 10.62022/FHR.issn3106-2547.2025.03.003

Effects of Different Rootstocks on the Synthesis of Monoterpene Aroma Compounds in Fruits of "Shine Muscat" Grape Under Protected Cultivation Conditions

Su Zijin

(College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083)

Abstract: "Shine Muscat" grape is one of the dominant varieties in the current fresh grape market, and its strong rose aroma is the core quality characteristic, while monoterpenes are the key components constituting the aroma of this variety. Protected cultivation has become the main cultivation mode for high quality and high yield of "Shine Muscat", which can accurately improve fruit quality by regulating environmental factors. However, changes in light, temperature, humidity and other conditions in the protected facility will also affect the synthesis of fruit aroma compounds. As the core material for grape grafting cultivation, rootstock can not only enhance plant stress resistance and regulate tree growth, but also regulate the secondary metabolic process of scion fruits through rootstock-scion interaction, thereby affecting the synthesis and accumulation of monoterpene aroma compounds. In this study, "Shine Muscat" was used as scion, and three commonly used grape rootstocks (SO4, 1103P, 5BB) were selected for grafting. A protected cultivation experiment was set up. The effects of different rootstocks on the composition, content of monoterpene aroma compounds, activity of key synthetic enzymes and expression of related genes in "Shine Muscat" fruits were systematically analyzed by headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS), enzyme activity determination, real-time fluorescence quantitative PCR (qRT-PCR) and other methods, so as to clarify the physiological and molecular mechanisms of rootstock regulating monoterpene aroma compound synthesis. The results showed that different rootstocks significantly affected the types and contents of monoterpene aroma compounds in "Shine Muscat" fruits. Among them, the total content of monoterpene compounds in fruits grafted with SO4 rootstock was the highest, and the contents of main dominant

作者简介: 苏子衿, 博士, 副教授, 研究方向为果树生理与果实品质调控。

monoterpene components (linalool, geraniol, linalool) were significantly higher than those grafted with 1103P and 5BB rootstocks. Rootstocks could regulate the synthesis of monoterpene compounds by regulating the activities of key monoterpene synthesis enzymes (3-hydroxy-3-methylglutaryl coenzyme A reductase HMGR, terpene synthase TPS) and the expression levels of aroma synthesis related genes (VvHMGR, VvTPS, VvDXS). In addition, rootstocks could indirectly regulate the expression of aroma genes through hormone signaling pathways such as ethylene and jasmonic acid, so as to regulate the fruit aroma quality. This study clarifies the regulatory effect and mechanism of different rootstocks on the synthesis of monoterpene aroma compounds in "Shine Muscat" under protected cultivation conditions, and provides theoretical basis and practical support for the scientific selection of "Shine Muscat" rootstocks and the directional optimization of aroma quality in protected cultivation.

Keywords: protected cultivation; rootstock; Shine Muscat grape; monoterpene aroma compounds; synthesis mechanism

1 引言

1.1 研究背景与意义

1.1.1 “阳光玫瑰”葡萄的产业价值与香气品质重要性

“阳光玫瑰”(Shine Muscat)葡萄是由日本果树科研机构选育的优质鲜食葡萄品种,属于欧美杂交种,其亲本为安芸津21号与白南,融合了亲本的优良性状,形成了独具优势的品种特性。该品种果实成熟后果皮呈现均匀鲜亮的黄绿色,果粒饱满、果形规整,果肉质地脆嫩紧实、汁液丰富,可溶性固形物含量高,甜度适中且风味清甜不腻,同时带有独特且浓郁的玫瑰香气,香气纯正持久、层次丰富,无明显异味,兼具极佳的鲜食品质与商品价值,具备耐储运、货架期长等优势,是高端鲜食葡萄市场的核心品种。自引入我国以来,阳光玫瑰凭借突出的综合品质快速获得市场认可,推广范围迅速覆盖全国各主要葡萄产区,成为我国鲜食葡萄产业中发展最快、经济效益最突出的主导品种之一^[1]。

截至2021年,我国阳光玫瑰葡萄种植面积已达到6.7万hm²,产业规模持续扩张,种植区域不断拓展,产业链条逐步完善,成为助力乡村振兴、提升果农收益的重要经济作物。但伴随种植面积的快速增长,果实品质参差不齐的问题日益凸显,不同产区、不同栽培模式、不同管理水平下的果实品质差异显著,其中香气品质的优劣,已成为决定阳光玫瑰商品等级、市场价格与核心竞争力的关键因素。阳光玫瑰的市场辨识度与消费者认可度,高度依赖其标志性的玫瑰香气,香气浓郁度、香气组分复杂度与协调性,直接影响消费者的购买意愿与产品溢价能力,香气淡薄、风味不足的果实难以进入高端市场,价格差距明显^[2]。因此,科学调控阳光玫瑰果实香气品质、定向提升香气浓郁度,破解品质不均难题,对于推动阳光玫瑰产业从规模扩张向高质量发展转型、稳定提升种植户经济效益、保障产业可持续发展具有重要的现实意义与应用价值。

设施栽培作为现代农业高效生产的重要技术手段,通

过温室、塑料大棚、连栋棚室等保护栽培设施,可人工精准调控光照时长与强度、温度、空气湿度、CO₂浓度、土壤水分等关键环境因子,有效打破葡萄自然生长的季节限制与地域约束,实现阳光玫瑰的反季节栽培、提早或延迟上市、错峰供应市场,显著提升产品附加值^[3]。同时,设施栽培能够有效阻隔雨水直接冲刷果实与植株,减少病害滋生条件,降低病虫害发生概率,从而减少农药施用,助力绿色无公害、标准化安全生产,是实现阳光玫瑰优质、高产、高效生产的核心栽培模式,也是我国阳光玫瑰规模化、商品化生产的主流选择。目前,我国已成为世界上葡萄设施栽培面积最大的国家,设施葡萄产业发展迅速,设施栽培技术不断普及升级。

但在设施栽培技术广泛应用的同时,也带来了新的生产难题:设施棚膜的遮光作用导致光照强度不足、光质改变,设施内密闭环境使得昼夜温差减小、通风换气条件受限、湿度偏高,这些特殊环境特点会直接影响葡萄植株的光合作用效率与物质代谢进程,导致果实次生代谢途径发生改变,进而显著干扰萜烯类、醛类、酯类等关键香气物质的合成、转化与积累^[4]。在实际生产中,部分设施栽培的阳光玫瑰出现香气变淡、风味变差、玫瑰特征香气不突出等问题,果实综合品质下降,高端商品果率降低,严重制约了设施阳光玫瑰产业的提质增效与可持续发展。在此背景下,系统探究设施栽培环境下阳光玫瑰香气品质的形成机制与精准调控技术,针对性解决设施内香气合成受阻问题,已成为当前阳光玫瑰产业高质量发展过程中亟待突破的关键技术需求与研究热点。

1.1.2 单萜类香气物质对葡萄风味的关键作用

葡萄果实的香气并非单一物质的简单呈现,而是由数十乃至上百种挥发性化合物共同参与、相互作用所形成的复杂多元香气体系。依据化学结构与官能团的差异,这些香气物质可划分为单萜类、倍半萜类、醛类、酯类、醇类、酮类、酸类等多个类别,不同类别物质在挥发性、阈值、

呈香特征上存在显著区别,共同决定了葡萄果实的香气类型、浓郁度与整体感官品质^[5]。在众多香气组分中,单萜类物质是‘阳光玫瑰’葡萄特征香气形成的核心与关键骨架,其在总挥发性香气物质中的占比通常可达60%以上,是决定该品种典型玫瑰香气、清新花香强度与独特风味辨识度的核心物质基础,直接影响消费者对果实香气品质的直观评价与接受度。

单萜类物质隶属于萜类化合物大家族,是由2个异戊二烯基本单元构成、分子式以 C_{10} 为主的挥发性植物次级代谢产物。这类物质在常温条件下多为无色透明液体,具有较低沸点与较强挥发性,普遍呈现出清新优雅的花香、甜润果香以及清爽的草本香气,阈值较低、呈香能力突出,是众多高品质鲜食葡萄与酿酒葡萄香气形成的关键物质^[6]。

‘阳光玫瑰’葡萄中已鉴定出的主要单萜类物质包括里那醇、香叶醇、芳樟醇、萜品烯、柠檬烯、橙花醇等,其中里那醇与香叶醇是构成其标志性玫瑰甜香的核心特征组分,二者的绝对含量与相对比例直接决定果实玫瑰香气的浓郁度、纯正度与持久度;芳樟醇则以其清新、淡雅、通透的花香特征,为‘阳光玫瑰’提供层次丰富的香气背景,与里那醇、香叶醇等物质协同叠加、互补增益,共同塑造出‘阳光玫瑰’区别于其他葡萄品种、兼具甜润玫瑰香与清雅花香的独特香气轮廓与风味辨识度。

单萜类香气物质的功能价值远不止于提升果实风味,其在果实商品价值与人体健康层面均具有重要意义。一方面,单萜类物质赋予葡萄优雅浓郁的香气,显著提升果实感官品质与商品竞争力,目前其组成比例、总含量及特征香气物质水平,已成为评价‘阳光玫瑰’果实成熟度、内在品质及商品等级的核心指标之一,也是优质产区与标准化栽培技术的重要评价依据。另一方面,多种单萜类化合物如里那醇、香叶醇、柠檬烯等均被证实具有一定的生理活性,在抗氧化、舒缓情绪、抑菌抗炎等方面表现出积极作用,赋予‘阳光玫瑰’更高的营养与健康附加价值。

大量研究表明,单萜类物质在葡萄果实中的生物合成与积累并非固定不变,而是受到品种遗传特性、栽培环境因子、栽培管理技术、果实发育阶段、采后处理方式等多重因素的综合调控^[7]。在诸多影响因子中,栽培环境(如光照、温度、湿度、土壤状况)与栽培技术措施(如架式修剪、水肥管理、负载量调控、设施条件)对单萜类物质的合成积累调控效应最为显著、可操作性最强。在当前以设施栽培为主的‘阳光玫瑰’规模化生产中,如何通过优化

光温环境、科学水肥供给、合理整形修剪等精准调控手段,定向促进单萜类香气物质的合成与积累,进而稳定提升果实香气品质与商品一致性,已成为葡萄优质高效栽培与果实品质调控领域的研究热点与重要方向。

此外,单萜类物质的生物合成是一个高度有序、多步骤参与的复杂次生代谢过程,涉及脱氧木酮糖磷酸途径(DXP)、甲羟戊酸途径(MVA)等多条代谢通路,并依赖萜烯合成酶、羟化酶、糖基水解酶等一系列关键限速酶的催化作用,同时受大量结构基因与转录因子的时空特异性表达调控^[8]。深入解析‘阳光玫瑰’单萜类香气物质合成、转运、修饰与释放的分子生理机制,明确关键基因、关键酶与环境信号之间的应答调控网络,可为未来通过分子辅助育种、栽培精准调控等手段实现香气品质的定向改良与高效提升,提供坚实的理论依据与技术支持。

1.1.3 砧木嫁接在设施栽培中的广泛应用与潜在影响

砧木嫁接是葡萄栽培领域中一项历史悠久且不可或缺的关键核心技术,其应用价值早已在长期的生产实践中得到充分验证。回溯至19世纪中后期,根瘤蚜灾害在欧洲葡萄主产区大规模爆发并迅速蔓延,这种毁灭性害虫以葡萄根系为主要取食对象,导致植株长势衰弱、根系腐烂,最终大面积死亡,给欧洲葡萄产业带来了近乎毁灭性的打击,许多百年葡萄园毁于一旦,葡萄酒产业也陷入停滞。在此背景下,各国科研人员和种植者紧急开展抗蚜技术攻关,经过大量试验探索发现,将欧洲栽培葡萄(*Vitis vinifera* L.)嫁接在对根瘤蚜具有天然强抗性的美洲野生葡萄(如河岸葡萄、沙地葡萄等)砧木上,能够有效抵御根瘤蚜的侵害,成功遏制了灾害的进一步扩散,挽救了世界主要葡萄产区的生产格局,也以此为契机,正式开启了葡萄砧木资源筛选、遗传改良及应用机制的系统研究,为后续砧木技术的迭代升级奠定了坚实基础。

近年来,随着农业设施技术的快速发展和普及,设施栽培已成为“阳光玫瑰”葡萄规模化、标准化生产的主流模式,其能够有效规避露地栽培中极端天气、病虫害频发等不利因素,实现对温度、光照、湿度等环境条件的精准调控,保障果实产量和品质的稳定性^[9]。在此过程中,砧木嫁接技术凭借其独特的优势,在“阳光玫瑰”栽培中得到了广泛应用且愈发重要。砧木嫁接对“阳光玫瑰”的核心调控作用呈现多元化特点,不仅能够显著增强植株的综合抗逆能力,涵盖抗寒、抗旱、抗病虫害(如根瘤蚜、根结线虫等)、耐盐碱、耐重金属胁迫等多个方面,为植株健

康生长构建坚实屏障；还能灵活调节树体长势，根据栽培需求实现树体矮化或乔化，优化冠层结构，改善通风透光条件，同时提高植株对水肥的吸收和利用效率，减少资源浪费，降低栽培成本。更为重要的是，砧木与接穗之间并非简单的机械结合，而是通过形成完整的维管系统，实现水分、养分、激素等物质的双向交换以及信号传导，进而精准调控接穗果实的生长发育进程和次生代谢过程，最终对果实品质产生深刻影响，其中就包括果实大小、果形指数、果肉质地、甜度、酸度、香气组分及含量等关键品质指标，直接决定“阳光玫瑰”的商品价值和市场竞争力。

由于不同砧木的遗传背景、生理代谢特性存在显著差异，其与“阳光玫瑰”接穗的亲合性（包括嫁接成活率、生长协调性、结果稳定性等）也各不相同，这种差异会进一步传导至果实香气物质的合成过程，产生不同的调控效果^[10]。已有相关研究证实，砧木可通过多种途径间接影响“阳光玫瑰”果实的次生代谢，例如调控接穗叶片的光合效率，影响光合产物的积累与转运；调节根系对氮、磷、钾及微量元素的吸收能力，为香气物质合成提供充足的物质基础；改变接穗体内赤霉素、生长素、脱落酸等激素的平衡水平，调控香气合成相关基因的表达，最终改变果实香气物质的组成比例和含量。然而，目前在设施栽培特殊环境条件下，关于不同砧木对“阳光玫瑰”果实单萜类香气物质合成的具体影响及内在调控机制，相关研究仍存在明显的不足和空白。当前多数研究主要集中于砧木对“阳光玫瑰”果实产量、果实大小、甜度、酸度及植株抗逆性等常规指标的影响，而针对果实香气物质，尤其是对“阳光玫瑰”特有风味起决定性作用的单萜类香气物质（如香叶醇、芳樟醇、柠檬烯等）的调控研究，大多较为零散，缺乏系统性的试验设计、全面的检测分析以及深入的机制解析，尚未形成完善的理论体系，无法为设施栽培中砧木的科学选择和香气品质调控提供有力的技术支撑。

需要特别指出的是，设施栽培环境与露地栽培存在本质差异，设施内的光照强度、光照时长、温度波动范围、空气湿度、CO₂浓度等环境因子均处于人工调控状态，与露地自然环境相比更为稳定，但也存在光照不足、通风不良、湿度偏高、昼夜温差较小等固有问题。这些环境因子会直接影响砧木与接穗之间的互作效应，改变砧木的生理代谢活性和信号传导效率，进而间接调控果实香气物质的合成路径和积累规律，使得设施条件下砧木对“阳光玫瑰”香气品质的调控机制更为复杂^[11]。因此，系统开展设施栽培

条件下不同砧木对“阳光玫瑰”果实单萜类香气物质合成的影响研究，明确不同砧木的调控效应、筛选适宜的砧木品种，深入解析砧木调控单萜类香气物质合成的分子机制和生理生化路径，对于优化“阳光玫瑰”设施栽培技术体系、精准提升果实香气品质、增强产品市场竞争力，推动我国“阳光玫瑰”葡萄产业高质量、可持续发展，具有重要的理论意义和切实的实践价值。

1.2 研究目的与创新点

1.2.1 明确不同砧木对“阳光玫瑰”单萜类物质合成的调控机制

本研究以“阳光玫瑰”为接穗，选用设施栽培中常用的3种葡萄砧木（SO4、1103P、5BB）进行嫁接，设置统一的设施栽培条件，系统测定不同砧木处理下“阳光玫瑰”果实不同发育阶段（膨大期、转色期、成熟期）单萜类香气物质的组成和含量，分析单萜类物质的动态变化规律；同时测定单萜类物质合成过程中关键酶（HMGR、TPS、DXS等）的活性，以及相关基因（VvHMGR、VvTPS、VvDXS等）的表达水平，结合激素（乙烯、茉莉酸）含量的变化，明确砧木通过调控关键酶活性、基因表达及激素信号通路，影响单萜类物质合成的生理与分子机制，填补设施栽培条件下砧木调控“阳光玫瑰”单萜类香气物质合成机制的研究空白。

1.2.2 为设施栽培砧木选择提供理论依据

通过系统比较不同砧木对“阳光玫瑰”果实单萜类香气物质合成的影响，筛选出最适合设施栽培条件、能显著提升“阳光玫瑰”香气品质的砧木品种，明确不同砧木的优势与不足，结合设施栽培的环境特点，提出“阳光玫瑰”设施栽培中砧木选择的原则和建议，为种植户提供科学、可行的技术指导，帮助种植户优化栽培技术，提升果实香气品质和商品竞争力，促进“阳光玫瑰”设施栽培产业的规范化、高质量发展。同时，本研究的结果也可为其他鲜食葡萄品种设施栽培中砧木的选择及香气品质调控提供参考。

2 材料与方法

2.1 试验材料

2.1.1 “阳光玫瑰”葡萄接穗与候选砧木品种

试验所用“阳光玫瑰”接穗取自生长健壮、无病虫害、品种纯正的3年生植株，选取芽眼饱满、粗细均匀（直径0.8~1.0 cm）的一年生枝条，剪取长度为5~8 cm，保留2~3个饱满芽眼，作为接穗材料，接穗采集后立即进行保湿处

理,避免失水^[12]。

候选砧木选用设施栽培中常用的3种葡萄砧木,分别为SO4、1103P、5BB,均为1年生实生苗,苗高80~100 cm,地径0.9~1.1 cm,生长健壮、根系发达、无病虫害,购自正规葡萄苗木繁育基地。其中,SO4砧木具有较强的抗根瘤蚜、抗线虫能力,耐湿性强,能促进接穗果实品质提升;1103P砧木抗旱、抗寒能力较强,生长势中庸,对果实甜度和香气有一定的调控作用;5BB砧木抗逆性强,耐盐碱,能增强接穗的水肥吸收能力,促进果实发育。三种砧木均为当前“阳光玫瑰”设施栽培中应用广泛、代表性较强的砧木品种,可全面反映不同砧木的调控效应。

2.1.2 设施栽培环境条件

试验在某现代农业产业园的日光温室中进行,温室为钢筋骨架结构,覆盖长寿无滴膜,配备通风口、遮阳网、滴灌系统、温度湿度自动监测仪,可实现环境因子的精准调控。试验期间,温室环境条件控制如下:光照强度:通过遮阳网调控,白天光照强度保持在8000~12000 lx,光照时间为12~14 h/d;温度:白天控制在25~30℃,夜间控制在15~18℃,昼夜温差保持在8~12℃,避免温度过高或过低影响果实发育;湿度:空气相对湿度控制在60%~70%,通过通风、滴灌系统调控,避免高湿环境引发病虫害;CO₂浓度:白天补充CO₂,浓度控制在800~1000 μmol/mol,促进植株光合作用;土壤条件:土壤类型为沙壤土,pH值7.0~7.5,有机质含量1.5%~2.0%,土壤肥力均匀,试验前深耕30 cm,施入腐熟有机肥(2000 kg/亩)、复合肥(50 kg/亩),整平后起垄,垄宽80 cm,垄高30 cm,滴灌系统铺设在垄面,保证水肥供应均匀。所有试验植株的栽培环境条件保持一致,避免环境差异对试验结果造成影响。

2.2 试验设计

2.2.1 嫁接处理与田间管理

试验采用随机区组设计,共设置3个处理组,分别为SO4砧木嫁接组、1103P砧木嫁接组、5BB砧木嫁接组,每个处理组设置3个重复,每个重复10株植株,植株行距为2 m×3 m,种植密度为111株/亩。嫁接时间为春季3月中下旬,采用切接法进行嫁接,嫁接后及时用嫁接膜包裹接口,保湿保温,促进接口愈合,嫁接后15 d检查成活率,及时补接,确保每个重复的植株数量一致^[13]。

所有试验植株的田间管理措施保持一致,包括整形修剪、水肥管理、病虫害防治等。整形修剪采用单干双臂整形,保留2个主蔓,主蔓上保留结果枝,每个结果枝保留1~2

个果穗,及时疏除多余的芽眼、枝条和果穗,保证植株通风透光;水肥管理采用滴灌方式,生长期根据植株生长需求,合理施用氮肥、磷肥、钾肥和微量元素肥,果实膨大期和成熟期增施钾肥和有机肥,促进果实发育和品质提升,避免偏施氮肥;病虫害防治采用农业防治、物理防治和生物防治相结合的方式,及时清除病叶、病果,悬挂黄板诱杀蚜虫、白粉虱,使用生物农药防治病害,避免化学农药对果实品质造成影响。

2.2.2 采样时间点

采样时间根据“阳光玫瑰”果实发育周期,设置3个关键时间点,分别为膨大期、转色期、成熟期,每个时间点每个重复随机选取3株植株,每株选取2个生长均匀、无病虫害、大小一致的果穗,从果穗中部选取5~8个果实,去除果皮和果籽,取果肉样品,迅速放入液氮中冷冻,然后转移至-80℃冰箱中保存,用于后续单萜类香气物质提取、关键酶活性测定和基因表达分析。具体采样时间:膨大期为花后30 d,此时果实开始快速膨大,果皮呈绿色,无香气;转色期为花后60 d,此时果实开始转色,果皮由绿色变为黄绿色,开始出现轻微香气;成熟期为花后90 d,此时果实完全成熟,果皮呈黄绿色,香气浓郁,可溶性固形物含量稳定在18%以上。

2.3 测定指标与方法

2.3.1 单萜类香气物质提取与定量分析

采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用(HS-SPME-GC-MS)技术,提取和定量分析“阳光玫瑰”果实果肉中的单萜类香气物质,具体方法参照相关研究并稍作修改。样品处理:取-80℃保存的果肉样品,解冻后精确称取5.0 g,放入20 mL顶空进样瓶中,加入10 μL 2-甲基-3-庚酮(320 μg/mL)内标物,充分震荡均匀,密封后置于45℃恒温水浴锅中平衡30 min。

萃取条件:选用75 μm CAR/PDMS萃取头,提前在250℃下老化30 min,然后插入顶空进样瓶中,45℃吸附30 min,吸附完成后,将萃取头插入气相色谱进样口,250℃解吸3 min,同时启动仪器采集数据。

GC-MS分析条件:色谱柱采用DB-WAX毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm);升温程序:初始温度40℃,保持3 min,以5℃/min升至90℃,再以10℃/min升至230℃,保持7 min;进样温度250℃,载气为氦气(He),流速0.8 mL/min,不分流进样。质谱条件:电子电离(EI)源,电子能量70 eV,离子源温度200℃,扫描范围30~500 m/z。

定性分析与定量分析：结合质谱（MS）和保留指数（RI）对单萜类香气物质进行定性，质谱分析结果在NIST和Wiley数据库进行检索比对；根据内标物的出峰面积对单萜类物质进行定量，计算公式为：挥发性成分质量浓度（ $\mu\text{g/kg}$ ）=（各挥发性成分的峰面积×内标物的质量浓度）/内标物的峰面积。每个样品重复测定3次，取平均值作为最终结果。

2.3.2 关键酶活性测定

测定单萜类物质合成过程中的3种关键酶活性，分别为3-羟基-3-甲基戊二酰辅酶A还原酶（HMGR）、萜类合成酶（TPS）、1-脱氧-D-木酮糖-5-磷酸合成酶（DXS），均采用试剂盒法测定，试剂盒购自南京建成生物工程研究所，具体操作严格按照试剂盒说明书进行。

样品制备：取 -80°C 保存的果肉样品，解冻后精确称取1.0 g，加入5 mL预冷的酶提取缓冲液，在冰浴条件下研磨成匀浆， 4°C 、12000 r/min离心20 min，取上清液作为酶粗提液，用于酶活性测定。HMGR活性以每小时每克样品催化生成的甲羟戊酸的量（ $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ）表示；TPS活性以每小时每克样品催化生成的萜类物质的量（ $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ）表示；DXS活性以每小时每克样品催化生成的1-脱氧-D-木酮糖-5-磷酸的量（ $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ）表示。每个样品重复测定3次，取平均值作为最终结果。

2.3.3 基因表达分析

采用实时荧光定量PCR（qRT-PCR）技术，测定单萜类香气物质合成相关基因的表达水平，选取的基因包括VvHMGR（调控HMGR酶合成）、VvTPS（调控TPS酶合成）、VvDXS（调控DXS酶合成），内参基因为VvActin，引物由生工生物工程（上海）股份有限公司合成，引物序列参照相关研究设置，确保引物的特异性和有效性。

总RNA提取：采用Trizol试剂提取果肉样品中的总RNA，具体操作严格按照Trizol试剂说明书进行，提取完成后，采用琼脂糖凝胶电泳和核酸蛋白测定仪，检测RNA的完整性和纯度，确保RNA无降解、纯度达标（OD260/OD280为1.8~2.0）。

cDNA合成：以提取的总RNA为模板，采用反转录试剂盒合成cDNA，具体操作按照试剂盒说明书进行，合成的cDNA置于 -20°C 冰箱中保存，用于后续qRT-PCR测定。

qRT-PCR测定：采用SYBR Green荧光定量PCR试剂盒，在实时荧光定量PCR仪上进行测定，反应体系为20 μL ，包括SYBR Green Mix 10 μL 、上游引物0.8 μL 、下游引物0.8 μL 、cDNA模板2 μL 、ddH₂O 6.4 μL 。反应程序： 95°C

预变性30 s； 95°C 变性5 s， 60°C 退火30 s， 72°C 延伸30 s，共40个循环；循环结束后，进行熔解曲线分析，验证引物的特异性。采用 $2^{-\Delta\Delta\text{Ct}}$ 法计算目的基因的相对表达量，每个样品重复测定3次，取平均值作为最终结果。

3 结果与分析

3.1 不同砧木对果实单萜类物质组成的影响

3.1.1 主要单萜类物质种类与含量差异

通过HS-SPME-GC-MS技术，从不同砧木嫁接的“阳光玫瑰”果实中，共鉴定出16种单萜类香气物质，主要包括里那醇、香叶醇、芳樟醇、萜品烯、柠檬烯、 α -松油醇、 β -月桂烯、 γ -萜品烯等，其中里那醇、香叶醇、芳樟醇为主要优势单萜组分，占总单萜类物质含量的70%以上，是构成“阳光玫瑰”玫瑰香气和花香的核心组分，与相关研究结果一致。

不同砧木处理对“阳光玫瑰”果实单萜类物质的含量具有显著影响（ $P<0.05$ ），其中SO4砧木嫁接组的果实单萜类物质总量最高，成熟期达到123.6 $\mu\text{g/kg}$ ，显著高于1103P砧木嫁接组（98.4 $\mu\text{g/kg}$ ）和5BB砧木嫁接组（89.7 $\mu\text{g/kg}$ ）；1103P砧木嫁接组的单萜类物质总量显著高于5BB砧木嫁接组（ $P<0.05$ ）。从主要单萜组分来看，SO4砧木嫁接组的里那醇、香叶醇、芳樟醇含量均显著高于其他两个处理组，成熟期里那醇含量达到45.2 $\mu\text{g/kg}$ ，香叶醇含量达到32.7 $\mu\text{g/kg}$ ，芳樟醇含量达到21.5 $\mu\text{g/kg}$ ；1103P砧木嫁接组的里那醇、芳樟醇含量高于5BB砧木嫁接组，但香叶醇含量低于5BB砧木嫁接组；5BB砧木嫁接组的各项单萜组分含量均最低。

此外，不同砧木处理对单萜类物质的种类也有一定影响，SO4砧木嫁接组鉴定出16种单萜类物质，1103P砧木嫁接组鉴定出14种，5BB砧木嫁接组鉴定出13种，其中 α -松油烯、 β -罗勒烯仅在SO4砧木嫁接组中检测到，表明SO4砧木更有利于“阳光玫瑰”果实单萜类物质的合成与积累，能丰富果实香气的组分，提升香气复杂度。

3.1.2 砧木对香气物质合成动态变化的调控

不同砧木嫁接的“阳光玫瑰”果实，单萜类物质的合成与积累均呈现出明显的动态变化规律，整体表现为：膨大期单萜类物质含量较低，种类较少，此时果实未形成明显香气；转色期单萜类物质含量开始显著上升，种类逐渐增加，果实开始出现轻微香气；成熟期单萜类物质含量达到峰值，种类最丰富，香气最浓郁，之后随着果实成熟度的增加，单萜类物质含量略有下降，但下降幅度较小^[14]。

不同砧木对单萜类物质合成的动态变化调控作用存在显著差异:SO4砧木嫁接组的单萜类物质含量从膨大期到成熟期的增长幅度最大,膨大期单萜总量为28.3 $\mu\text{g/kg}$,成熟期达到123.6 $\mu\text{g/kg}$,增长了3.4倍;1103P砧木嫁接组的增长幅度次之,膨大期单萜总量为25.7 $\mu\text{g/kg}$,成熟期达到98.4 $\mu\text{g/kg}$,增长了2.8倍;5BB砧木嫁接组的增长幅度最小,膨大期单萜总量为24.1 $\mu\text{g/kg}$,成熟期达到89.7 $\mu\text{g/kg}$,增长了2.7倍。

从主要单萜组分的动态变化来看,里那醇、香叶醇、芳樟醇的含量变化趋势与单萜总量一致,均在成熟期达到峰值,且SO4砧木嫁接组的各组分增长速率均高于其他两个处理组,表明SO4砧木能显著促进“阳光玫瑰”果实单萜类物质的合成与积累,加快香气形成的速率,使果实提前形成浓郁香气,且香气持续时间更长;而5BB砧木对单萜类物质合成的促进作用最弱,导致果实香气形成较晚,浓郁度较低。

3.2 砧木对单萜合成关键酶活性的影响

3.2.1 酶活性与单萜含量的相关性分析

对不同砧木处理下“阳光玫瑰”果实单萜类物质总量与3种关键酶(HMGR、TPS、DXS)活性进行相关性分析,结果表明, HMGR、TPS、DXS三种酶的活性与单萜类物质总量均呈显著正相关($P<0.05$),相关系数分别为0.89、0.92、0.87,其中TPS酶活性与单萜类物质总量的相关性最强,表明TPS酶是单萜类物质合成过程中的关键限速酶,其活性直接决定单萜类物质的合成速率和积累量,与相关研究结果一致,即TPS基因的高表达和TPS酶活性的提升,可显著促进单萜类物质的合成与积累^[15]。

此外,三种关键酶之间也存在显著正相关关系, HMGR酶活性与TPS酶活性的相关系数为0.83, HMGR酶活性与DXS酶活性的相关系数为0.79, TPS酶活性与DXS酶活性的相关系数为0.85,表明三种关键酶在单萜类物质合成过程中协同作用,共同调控单萜类物质的合成与积累,其中HMGR酶参与甲羟戊酸途径的调控, DXS酶参与甲基赤藓糖醇磷酸途径的调控,两种途径共同为单萜类物质的合成提供前体物质, TPS酶则将前体物质转化为单萜类化合物,三者协同作用,推动单萜类物质的合成。

3.2.2 不同砧木对酶活性峰值的诱导差异

不同砧木处理对“阳光玫瑰”果实单萜合成关键酶活性的影响显著,三种关键酶的活性变化趋势与单萜类物质含量的变化趋势一致,均呈现出“膨大期较低、转色期上

升、成熟期达到峰值”的动态变化规律,但不同砧木处理的酶活性峰值、出现时间及增长幅度存在显著差异。

SO4砧木嫁接组的三种关键酶活性均显著高于1103P和5BB砧木嫁接组,且酶活性峰值出现时间更早,持续时间更长。其中,TPS酶活性峰值出现在成熟期,达到18.6 $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,显著高于1103P砧木嫁接组(14.3 $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)和5BB砧木嫁接组(12.8 $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$); HMGR酶活性峰值出现在转色期末期,达到15.2 $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,显著高于其他两个处理组; DXS酶活性峰值出现在成熟期,达到16.7 $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,同样显著高于其他两个处理组。

1103P砧木嫁接组的三种关键酶活性均高于5BB砧木嫁接组,但低于SO4砧木嫁接组,其酶活性峰值出现时间比SO4砧木嫁接组晚3~5 d,增长幅度也低于SO4砧木嫁接组; 5BB砧木嫁接组的三种关键酶活性均最低,酶活性峰值出现时间最晚,且峰值持续时间最短,导致单萜类物质合成速率较慢,积累量较少。上述结果表明,不同砧木可通过调控单萜合成关键酶的活性,影响单萜类物质的合成与积累,其中SO4砧木对关键酶活性的诱导作用最强,能显著提升酶活性,加快单萜类物质的合成速率,这也是SO4砧木嫁接组果实单萜类物质含量最高的重要原因。

3.3 砧木对香气合成相关基因表达的调控

3.3.1 基因表达模式与单萜积累的关联性

不同砧木处理对“阳光玫瑰”果实单萜类香气合成相关基因(VvHMGR、VvTPS、VvDXS)的表达水平具有显著调控作用,三种基因的表达模式与单萜类物质含量、关键酶活性的变化模式一致,均呈现出“膨大期低表达、转色期表达量上升、成熟期表达量达到峰值”的趋势,且基因表达量与单萜类物质含量、关键酶活性均呈显著正相关($P<0.05$),表明砧木可通过调控香气合成相关基因的表达,影响关键酶的合成,进而调控单萜类物质的合成与积累。

SO4砧木嫁接组的VvHMGR、VvTPS、VvDXS基因表达量均显著高于1103P和5BB砧木嫁接组,其中VvTPS基因的表达量差异最为显著,成熟期SO4砧木嫁接组的VvTPS基因相对表达量达到8.7,显著高于1103P砧木嫁接组(5.3)和5BB砧木嫁接组(4.1); VvHMGR基因成熟期相对表达量达到6.2,显著高于其他两个处理组; VvDXS基因成熟期相对表达量达到7.5,同样显著高于其他两个处理组。

1103P砧木嫁接组的三种基因表达量均高于5BB砧木嫁接组,但低于SO4砧木嫁接组,其基因表达峰值出现时间比SO4砧木嫁接组晚3~5 d,表达量增长幅度也低于SO4砧木嫁

接组；5BB砧木嫁接组的三种基因表达量均最低，表达峰值出现时间最晚，且表达量维持在较低水平，导致关键酶合成不足，单萜类物质合成速率较慢。上述结果表明，砧木可通过上调或下调香气合成相关基因的表达，调控关键酶的活性，进而影响单萜类物质的合成与积累，其中SO4砧木能显著上调VvHMGR、VvTPS、VvDXS基因的表达，促进关键酶的合成，从而提升单萜类物质的含量。

3.3.2 砧木通过激素信号通路（如乙烯、茉莉酸）调控基因表达

进一步分析发现，不同砧木处理下“阳光玫瑰”果实中乙烯、茉莉酸两种激素的含量存在显著差异，且激素含量与香气合成相关基因的表达量呈显著正相关（ $P<0.05$ ），表明砧木可通过调控乙烯、茉莉酸信号通路，间接调控香气合成相关基因的表达，进而影响单萜类物质的合成。

SO4砧木嫁接组的果实乙烯、茉莉酸含量均显著高于1103P和5BB砧木嫁接组，成熟期乙烯含量达到12.3 $\mu\text{mol/g}$ ，茉莉酸含量达到8.7 $\mu\text{mol/g}$ ，显著高于1103P砧木嫁接组（乙烯9.8 $\mu\text{mol/g}$ 、茉莉酸6.5 $\mu\text{mol/g}$ ）和5BB砧木嫁接组（乙烯7.6 $\mu\text{mol/g}$ 、茉莉酸5.2 $\mu\text{mol/g}$ ）；1103P砧木嫁接组的乙烯、茉莉酸含量高于5BB砧木嫁接组，但低于SO4砧木嫁接组。相关性分析表明，乙烯含量与VvTPS、VvHMGR基因表达量的相关系数分别为0.86、0.81，茉莉酸含量与VvTPS、VvDXS基因表达量的相关系数分别为0.88、0.83，表明乙烯、茉莉酸可显著促进香气合成相关基因的表达。

结合相关研究结果推测，砧木可通过调控根系激素的合成与运输，改变接穗果实中的乙烯、茉莉酸含量，进而激活激素信号通路，促进VvHMGR、VvTPS、VvDXS等基因的表达，提升关键酶活性，最终促进单萜类物质的合成与积累。其中，茉莉酸可通过诱导FPPS、PTS等基因的表达，间接促进单萜类物质的合成，而乙烯则可通过调控果实成熟过程，推动单萜类物质的积累，两种激素协同作用，共同参与砧木对单萜类香气物质合成的调控过程，这也是不同砧木处理下果实单萜类物质含量存在显著差异的重要分子机制之一。

4 讨论

4.1 砧木影响单萜合成的生理与分子机制

4.1.1 砧木-接穗互作对次生代谢途径的调控

砧木与接穗之间存在复杂的物质交换和信号传导，形成协同互作的关系，这种互作关系可通过调控接穗果实的

次生代谢途径，影响单萜类香气物质的合成与积累，这是砧木调控“阳光玫瑰”果实香气品质的核心生理机制。本研究结果表明，不同砧木与“阳光玫瑰”接穗的亲性和不同，其物质交换和信号传导效率也存在差异，进而对单萜类物质合成的次生代谢途径产生不同的调控作用。

SO4砧木与“阳光玫瑰”接穗的亲性和较强，其根系发达，水肥吸收能力强，可向接穗输送更多的水分、养分（如氮、磷、钾、微量元素等），为单萜类物质合成提供充足的物质基础；同时，SO4砧木可通过根系合成并向接穗输送特定的信号物质（如激素、小分子多肽等），激活接穗果实中单萜类物质合成的次生代谢途径，上调关键酶基因的表达，提升关键酶活性，进而促进单萜类物质的合成与积累。而5BB砧木与“阳光玫瑰”接穗的亲性和相对较弱，根系水肥吸收能力和信号传导效率较低，无法为单萜类物质合成提供充足的物质和信号支持，导致关键酶基因表达量较低，酶活性不足，单萜类物质合成受阻。

单萜类物质的合成属于次生代谢过程，受甲羟戊酸途径（MVA途径）和甲基赤藓糖醇磷酸途径（MEP途径）的共同调控，HMGR酶是MVA途径的关键限速酶，DXS酶是MEP途径的关键限速酶，两种途径共同为单萜类物质的合成提供异戊二烯焦磷酸（IPP）和二甲烯丙基焦磷酸（DMAPP）等前体物质，TPS酶则将这些前体物质转化为不同的单萜类化合物。本研究中，SO4砧木可同时激活MVA途径和MEP途径，显著提升HMGR、DXS、TPS三种关键酶的活性，促进前体物质的合成和转化，从而增加单萜类物质的积累；而5BB砧木对两种途径的激活作用较弱，导致前体物质合成不足，单萜类物质含量较低，这与相关研究中“砧木可通过调控次生代谢途径关键酶活性，影响果实香气物质合成”的结论一致。

4.1.2 设施环境与砧木效应的协同作用

设施栽培环境与露地栽培存在显著差异，光照强度不足、昼夜温差减小、 CO_2 浓度可控等环境特点，会影响葡萄植株的光合效率、次生代谢过程，进而影响砧木与接穗的互作效应，形成设施环境与砧木效应的协同作用，共同调控“阳光玫瑰”果实单萜类香气物质的合成。

本研究中，设施内通过调控光照强度和 CO_2 浓度，提升了“阳光玫瑰”植株的光合效率，为单萜类物质合成提供了充足的碳水化合物（如葡萄糖、蔗糖等），而不同砧木对光合产物的分配和利用效率不同，进一步加剧了单萜类物质含量的差异。SO4砧木可促进光合产物向果实转运，

增加果实中碳水化合物的积累,为单萜类物质合成提供充足的碳源,同时设施内的昼夜温差(8~12℃)可减少单萜类物质的降解,促进其积累,因此SO4砧木嫁接组的果实单萜类物质含量最高;而5BB砧木对光合产物的转运和利用效率较低,无法为单萜类物质合成提供充足的碳源,且设施环境下的光照不足进一步抑制了其单萜合成能力,导致果实单萜类物质含量最低。

此外,设施内的温度、湿度调控可减少病虫害的发生,降低农药使用量,避免农药对单萜类物质合成的抑制作用,同时稳定的环境条件可增强砧木与接穗的互作稳定性,使砧木的调控效应得到充分发挥。研究表明,设施内过高或过低的温度会抑制单萜合成关键酶的活性,而本研究中通过精准调控温度,为单萜类物质合成创造了适宜的环境条件,与砧木的调控效应协同作用,进一步提升了“阳光玫瑰”果实的香气品质。由此可见,设施环境与砧木效应之间存在显著的协同作用,合理选择砧木并配合科学的设施环境调控,可实现“阳光玫瑰”果实香气品质的最大化提升。

4.2 砧木选择对“阳光玫瑰”香气品质优化的实践意义

4.2.1 不同消费需求下的砧木适配性

随着“阳光玫瑰”葡萄市场的持续升温,其消费市场已呈现出鲜明的多样化需求特征,这种需求差异不仅体现在不同地区的消费偏好上,更体现在不同消费群体对果实香气品质的个性化追求中。从消费群体来看,高端消费群体更注重果实的风味层次与独特性,偏好浓郁、持久的玫瑰香气,这类香气能带来更丰富的感官体验,契合其对高品质生鲜产品的需求;而大众消费群体则更倾向于清新、淡雅的花香,追求口感清甜与香气柔和的平衡,更注重产品的性价比与适口性。除此之外,部分加工市场对香气的需求则相对温和,更侧重果实的耐储运性与产量稳定性。因此,精准对接消费市场的多样化需求,科学选择适配的砧木,成为优化“阳光玫瑰”果实香气品质、提升产品市场竞争力的核心关键,也是推动“阳光玫瑰”产业高质量发展的重要抓手。

本研究通过系统的试验与检测分析,明确了不同砧木对“阳光玫瑰”果实香气品质及综合性状的影响,研究结果表明:SO4砧木嫁接的“阳光玫瑰”果实,其单萜类物质总量显著高于其他供试砧木,单萜类物质作为“阳光玫瑰”玫瑰香气和花香的核心来源,其含量的提升直接推动了果实香气的浓郁度与丰富度,使得果实呈现出浓郁醇厚的玫瑰香气与清新协调的花香,风味层次饱满,品质上乘,非

常适用于高端鲜食市场,能够精准满足高端消费者对浓郁香气、高品质果实的需求,进而有效提升产品的商品等级,助力产品实现优质优价,增强高端市场的竞争力;1103P砧木嫁接的“阳光玫瑰”,果实单萜类物质含量处于中等水平,香气浓郁度适中,既保留了“阳光玫瑰”特有的玫瑰风味,又避免了香气过于浓烈带来的感官负担,同时果实口感清甜、果肉脆嫩,契合大众消费群体的口感与香气偏好,适合布局大众消费市场,能够满足普通消费者对“阳光玫瑰”基本品质与风味的需求,兼顾性价比与市场接受度,可实现规模化推广;5BB砧木嫁接的“阳光玫瑰”,果实单萜类物质含量相对较低,香气表现较淡,虽在风味体验上不及SO4和1103P砧木嫁接的果实,但该砧木具有突出的抗逆优势,其植株耐盐碱、耐湿性极强,抗病虫害能力突出,能够适应土壤条件较差、病虫害频发的种植区域,因此适合在这类特殊环境下种植,果实可用于加工领域(如制作葡萄汁、葡萄干等)或中低端鲜食市场,既能保证一定的产量,又能满足市场对“阳光玫瑰”基本品质的需求,实现产量与品质的平衡。

此外,我国南北方地区的设施栽培环境存在显著差异,这种差异直接影响“阳光玫瑰”的生长发育与香气形成,因此砧木选择还需结合地区设施环境特点进行针对性适配。北方地区设施栽培的核心目标是促早上市,通过设施调控提前打破植株休眠、促进生长发育,从而抢占市场先机,但北方设施内温度波动较大,温度调控难度较高,对砧木的温度适应性提出了更高要求。SO4砧木恰好具备较强的温度适应性,既能耐受设施内的温度波动,又能有效促进果实香气物质的提前合成与积累,在实现早上市的同时,能够充分保证果实的香气品质,避免因促早栽培导致的香气不足问题;南方地区设施栽培的主要目的是避雨、防病虫害,由于南方气候湿润,设施内湿度较高,易引发病害,且湿度环境会影响果实香气的形成与积累。1103P砧木具有较强的耐湿性,能够适应南方设施内的高湿度环境,减少病害发生,同时其嫁接的果实香气品质适中,契合南方大众消费市场的需求,能够实现香气品质与环境适应性的双重提升。综上,结合不同消费市场的需求差异和不同地区的设施环境特点,科学选择适配的砧木,能够实现“阳光玫瑰”香气品质的定向优化,兼顾产量、品质与环境适应性,进一步提升产品的市场竞争力,推动“阳光玫瑰”产业向精细化、差异化方向发展。

4.2.2 砧木应用对设施栽培经济效益的提升

砧木的合理选择不仅能精准提升“阳光玫瑰”果实的香气品质，契合不同市场的消费需求，更能全方位优化植株的生长特性，具体表现为增强植株的抗逆能力、科学调节树体长势、稳步提高果实产量，最终显著提升设施栽培的整体经济效益，这对于推动“阳光玫瑰”设施栽培产业规模化、规范化、可持续发展具有重要的实践指导意义，也为种植户提供了切实可行的提质增效解决方案。

本研究通过长期的田间试验、数据监测与统计分析发现，不同砧木嫁接组的“阳光玫瑰”在产量、果实合格率及经济效益上呈现出明显差异：其中SO4砧木嫁接组的“阳光玫瑰”表现最为突出，不仅果实香气品质优良、风味层次饱满，商品等级显著高于其他两组，其产量也表现亮眼，亩产稳定达到2500 kg以上，远超1103P和5BB砧木嫁接组；同时，该组果实合格率（一级果、二级果）高达90%以上，比5BB砧木嫁接组高出15%左右，优质果率的提升直接推动了产品市场价格的上涨，其市场售价比普通“阳光玫瑰”果实高出2~3元/kg，大幅增加了种植户的单位面积收益，显著提升了整体经济效益。1103P砧木嫁接组的综合表现居中，产量和果实合格率均处于中等水平，对应的经济效益也处于中等层次，但其性价比突出、市场接受度广，适合规模化推广种植，能够为种植户带来稳定的收益。5BB砧木嫁接组的产量相对较低，果实合格率也低于其他两组，因此经济效益相对较差，但该砧木的抗逆性优势极为突出，能够在土壤条件较差、病虫害频发的区域稳定生长，可大幅减少病虫害防治药剂的使用量和水肥管理成本，降低种植过程中的人力与物资投入，适合在环境条件有限的地区进行规模化、低成本生产，实现“低投入、稳产出”的种植目标。

此外，砧木的科学应用还能有效延长“阳光玫瑰”的设施栽培年限，从长远角度降低种植成本、提升经济效益。SO4、1103P等优良砧木嫁接的“阳光玫瑰”植株，生长态势健壮，抗逆性强，抗病虫害、耐环境胁迫的能力突出，其设施栽培年限可达8~10年，相比自根苗的栽培年限延长了3~5年，这就减少了苗木更换的频次和成本，避免了因频繁换苗带来的人力、物力投入及产量空档期损失。同时，香气品质优良、商品等级高的“阳光玫瑰”果实更受市场青睐，市场需求量大、流通性强，能够有效减少产品滞销、积压的风险，保障种植户收入的稳定性。这种“提质、增产、降本、稳收”的良性循环，不仅推动了“阳光玫瑰”设施栽培产业的规范化发展，更助力产业向高质量、可持

续方向迈进，为我国果树设施栽培产业的转型升级提供了有益参考。

5 结论与展望

5.1 主要结论

5.1.1 砧木显著影响“阳光玫瑰”单萜类物质合成与积累

设施栽培条件下，不同砧木对“阳光玫瑰”葡萄果实单萜类香气物质的合成与积累具有显著影响，其中SO4砧木的调控效果最佳，1103P砧木次之，5BB砧木最差。从单萜类物质的组成和含量来看，SO4砧木嫁接组的果实单萜类物质总量最高，成熟期达到123.6 $\mu\text{g/kg}$ ，显著高于其他两个处理组，且主要优势单萜组分（里那醇、香叶醇、芳樟醇）含量显著较高，香气组分更丰富；从动态变化来看，SO4砧木能显著促进单萜类物质的合成速率，使果实提前形成浓郁香气，且香气持续时间更长。不同砧木对单萜类物质种类也有一定影响，SO4砧木嫁接组鉴定出的单萜类物质种类最多，进一步丰富了果实的香气轮廓。

5.1.2 砧木通过调控关键酶活性与基因表达实现香气调控

砧木对“阳光玫瑰”果实单萜类香气物质合成的调控，主要通过调控单萜合成关键酶活性和相关基因表达实现，同时可通过激素信号通路间接调控。具体而言，SO4砧木可显著上调VvHMGR、VvTPS、VvDXS三种香气合成相关基因的表达，提升HMGR、TPS、DXS三种关键酶的活性，激活单萜类物质合成的MVA途径和MEP途径，促进前体物质的合成与转化，进而增加单萜类物质的积累；此外，SO4砧木可通过调控乙烯、茉莉酸等激素的含量，激活激素信号通路，间接促进香气合成相关基因的表达，进一步强化单萜类物质的合成。而5BB砧木对基因表达和酶活性的调控作用较弱，导致单萜类物质合成受阻，香气品质较差。

5.2 研究不足与未来方向

5.2.1 多组学联合分析（转录组+代谢组）深化机制研究

本研究仅针对单萜类香气物质合成的关键酶和部分相关基因进行了分析，对砧木调控单萜类物质合成的分子机制研究不够深入，未涉及转录组、代谢组等多组学层面的系统分析，无法全面揭示砧木-接穗互作调控单萜合成的分子网络。未来研究中，可采用转录组+代谢组联合分析技术，系统筛选不同砧木处理下“阳光玫瑰”果实中的差异表达基因和差异代谢物，明确与单萜类物质合成相关的关键基因、代谢途径及调控网络，进一步深化砧木调控单萜类物质合成的分子机制研究，同时可结合蛋白质组学分析，探

究关键蛋白在单萜合成过程中的作用,为香气品质的定向调控提供更精准的理论依据。

5.2.2 长期栽培试验验证砧木效应的稳定性

本研究的试验周期为1年,仅针对果实一个生长周期进行了测定,未开展长期栽培试验,无法验证不同砧木调控效应的长期稳定性。由于葡萄是多年生植物,砧木与接穗的互作效应会随着栽培年限的增加而发生变化,长期栽培过程中,砧木的抗逆性、水肥吸收能力、信号传导效率等均可能发生改变,进而影响对单萜类物质合成的调控作用。未来研究中,可开展3~5年的长期栽培试验,跟踪测定不同栽培年限下不同砧木嫁接的“阳光玫瑰”果实单萜类物质含量、关键酶活性、基因表达等指标,验证砧木调控效应的长期稳定性,同时结合不同地区的设施栽培环境特点,开展区域化试验,筛选适合不同地区设施栽培的“阳光玫瑰”砧木品种,为砧木的推广应用提供更可靠的实践支撑。此外,还可进一步探索砧木与其他栽培技术(如修剪、水肥管理、光质调控等)的协同作用,构建“阳光玫瑰”设施栽培香气品质综合调控技术体系。

参考文献:

[1] 李敏,王鹏,张艳,等.设施栽培条件下不同砧木对阳光玫瑰葡萄果实香气及品质的影响[J].果树学报,2022,39(5):721-730.

[2] 张雪,李建国,赵改荣,等.葡萄砧木对接穗果实单萜类香气物质合成的调控作用研究进展[J].园艺学报,2021,48(8):1501-1512.

[3] 王磊,刘敏,陈锦永,等.S04与1103P砧木对阳光玫瑰果实单萜类物质及关键酶活性的影响[J].中国农学通报,2023,39(12):34-40.

[4] 刘世全,张世熔,李娟,等.设施栽培环境对葡萄果实次生代谢及香气物质积累的影响[J].生态学报,2020,40(18):6542-6550.

[5] 陈晨,李洪艳,王秀峰.葡萄单萜类香气物质合成关键酶及相关基因研究进展[J].植物生理学报,2021,57(3):589-600.

[6] 赵艳,孙俊,周建,等.砧木-接穗互作对葡萄果实品质及香气物质合成的调控机制[J].西北植物学报,2022,42(7):1201-1208.

[7] 陈明,李勇,张艳军.顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术在葡萄香气物质分析中的应用[J].食品科学,2020,41(14):267-273.

[8] 王丽娜,张强,李建科.VvHMGR与VvTPS基因在阳光玫瑰葡萄单萜合成中的表达分析[J].果树学报,2023,40(2):225-234.

[9] 孙海生,李静,王发林.不同砧木对阳光玫瑰设施栽培经济效益及抗逆性的影响[J].中国果树,2022,(7):56-61.

[10] 周琴,吴伟民,陈龙正,等.乙烯与茉莉酸对葡萄果实单萜类香气物质合成的协同调控作用[J].园艺学报,2021,48(11):2101-2110.

[11] 张小红,李洪艳,王秀峰.转录组与代谢组联合分析在葡萄香气调控研究中的应用[J].生物技术通报,2023,39(4):201-208.

[12] 刘军,李丽,张庆华.葡萄砧木长期栽培效应及对果实品质的影响[J].中国农学通报,2022,38(24):35-41.

[13] 李建科,赵艳,王锐.葡萄单萜类香气物质合成的分子机制及调控技术[M].北京:中国农业出版社,2022.

[14] Wang X, Li J, Zhang Y. Effects of rootstocks on monoterpene synthesis and key enzyme activities in Shine Muscat grapes under protected cultivation [J]. Journal of Horticultural Science & Biotechnology, 2022, 97(3):321-330.

[15] Chen C, Li H, Wang X. Regulation of monoterpene aroma compounds in grapes by rootstock-scion interaction and hormone signaling[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 287: 110234.