

## 基于株高、产量、品质联合分析砂糖橘优良砧木的筛选<sup>1</sup>

彭杨<sup>1</sup>, 马晓燕<sup>1</sup>, 冯天乐<sup>2</sup>, 李彩琴<sup>2\*</sup>, 潘建君<sup>3</sup>, 高美玲<sup>3</sup>, 涂攀峰<sup>2</sup>, 李娟<sup>2\*</sup>, 陈杰忠<sup>4</sup>

(<sup>1</sup>仲恺农业工程学院农业与生物学院, 广东广州, 510220; <sup>2</sup>仲恺农业工程学院园艺园林学院, 广东广州, 510220; <sup>3</sup>广州市从化区农业技术推广中心, 广东广州, 510900; <sup>4</sup>华南农业大学园艺学院, 广东广州, 510642)

**摘要:** 【目的】通过联合分析不同砧木砂糖橘植株株高、产量、品质的相关指标, 构建砂糖橘优良砧木筛选的综合评价模型, 为砂糖橘优良砧木的选择提供依据。【方法】以 10 种不同的砧木嫁接砂糖橘, 对嫁接后的植株株高、产量、品质进行差异显著性分析、相关性分析及主成分分析, 获得筛选砂糖橘砧木的核心指标并构建综合评价模型, 根据模型评分进行排序。【结果】株高、产量、品质 22 个指标均表现出了显著的差异性并有着多组相关关系, 主成分分析筛选出了 6 个主成分, 累积贡献率达到了 93.407%, 共注释了包括果实质量及横纵径大小决定因子, 产量和果形指数决定因子, 果皮厚度决定因子等 6 个关键因子。【结论】综合评价模型得分表明, 红黎檬、香橙和粗籽柠檬可推荐为广东省适用的 3 个优选砂糖橘砧木。

**关键词:** 株高; 产量; 品质; 主成分分析; 砧木筛选

中图分类号: S666.2 文献标志码: A 文章编号: 1009-9980(2024)06-0001-08

## Selection of excellent rootstocks for 'Shatang mandarin' based on combined analysis of plant height, yield, and quality

PENG Yang<sup>1</sup>, MA Xiaoyan<sup>1</sup>, FENG Tianle<sup>2</sup>, LI Caiqin<sup>2\*</sup>, PAN Jianjun<sup>3</sup>, GAO Meiling<sup>3</sup>, TU Panfeng<sup>2</sup>, LI Juan<sup>2\*</sup>, CHEN Jiezhong<sup>4</sup>

(<sup>1</sup>College of Agriculture and Biology, Zhongkai University of Agricultural Engineering, Guangzhou 510220, Guangdong, China; <sup>2</sup>College of Horticultural and Landscape Architecture, Zhongkai University of Agricultural Engineering, Guangzhou 510220, Guangdong, China; <sup>3</sup>Guangzhou Conghua District Agricultural Technology Promotion Center, Guangzhou 510900, Guangdong, China; <sup>4</sup>College of Horticulture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

**Abstract:** 【Objective】 To establish a comprehensive evaluation model for the selection of superior rootstocks of 'Shatang mandarin' by jointly analyzing the plant height, fruit yield and fruit quality of 'Shatang mandarin' on different rootstocks under screen house cultivation, so as to provide a basis for the selection of grafting rootstocks of 'Shatang mandarin'. 【Methods】 Ten different rootstocks were used to graft 'Shatang mandarin', and the difference significance analysis and correlation analysis were carried out on 22 indexes of plant height, fruits weight per plant and fruit internal and external quality after fruit bearing, and the differences and correlations

收稿日期: 2024-01-04

接受日期: 2024-03-23

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(果树砧木类)(2022B0202070002); 广东省现代农业产业技术体系创新团队建设项目(柑橘芒果)(2023KJ108); 广州市民生科技攻关计划(201803020008)

作者简介: 彭杨, 男, 在读硕士研究生, 研究方向为果树栽培的生理与分子研究, E-mail:

pengyang@zhku.edu.cn

\*通信作者 Author for correspondence. 李娟, E-mail: 13751774213@139.com; 李彩琴, E-mail:

licaiqin@zhku.edu.cn

among plant height, fruits weight per plant and fruit quality after grafting on different rootstocks were discussed. Finally, the 22 indexes were analyzed by principal component analysis to obtain the core indexes for the screening of ‘Shatang mandarin’ rootstocks, and a comprehensive evaluation model was constructed to screen the excellent rootstocks based on the joint analysis of plant height, fruits weight per plant and fruit quality of ‘Shatang mandarin’. **【Results】** The results showed that there were significant differences in plant height, fruits weight per plant and fruit internal and external quality among the ten citrus rootstocks grafted with ‘Shatang mandarin’, among which the plant height of ‘Sour pummelo’ was not significantly different from the plant height of ‘Shatang mandarin’, while the plant height of ‘Flying dragon trifoliolate orange’ was significantly different from the plant height of ‘Shatang mandarin’. It was the shortest rootstock among the 10 rootstocks, and the average plant height was reduced by 50.79% compared with ‘Shatang mandarin’, which also showed that the dwarfing effect of ‘Flying dragon trifoliolate orange’ rootstocks was the best among the rootstocks tested. In the results of soil and plant analyzer development (SPAD) value, it could be seen that ‘Flying dragon trifoliolate orange’ rootstocks with the best dwarfing effect had the highest SPAD value, reaching 71.92, while ‘Shatang mandarin’ had the highest plant height. On the contrary, the SPAD value was the lowest, is 59.44, and the SPAD values of other rootstocks were higher than that of ‘Shatang mandarin’, which indicated that there was a certain correlation between plant height and SPAD value. Grafting ‘Shatang mandarin’ on different rootstocks will affect the fruits weight per plant. Excluding the interference of other factors, under the unified production management, the fruits weight per plant of ‘Shatang mandarin’ with ‘Goutou sour orange’ rootstocks is the highest. Different rootstocks had different effects on 19 indexes of fruit quality of ‘Shatang mandarin’. The single fruit weight and pulp weight of ‘Xiangcheng’ and ‘Red limonia’ were higher than the other 8 rootstocks, while the single fruit weight and pulp weight of ‘Goutou sour orange’ were the lowest among the 10 rootstocks. Based on the single fruit weight, pulp weight, fruit diameter, fruit volume and fruit shape index, the fruit of ‘Xiangcheng’ rootstocks and ‘Red limonia’ rootstocks were bigger, and the shape was round or nearly round, while the fruit of ‘Goutou sour orange’ rootstocks was the smallest, and the shape was oval or conical. Different rootstocks had different effects on the pericarp characteristics of ‘Shatang mandarin’. From the color of the pericarp, the fruits with rootstocks all showed shiny orange, but the fruit surface color of ‘Xiangcheng’ rootstocks was lighter. Of the 10 rootstocks, ‘Shatang mandarin’ rootstocks had the highest soluble solids content, and ‘Xiangcheng’ rootstocks had the lowest soluble solids content. The results showed that the soluble solids content of ‘Shatang mandarin’ fruit grafted on the other 9 rootstocks was lower than that of ‘Shatang mandarin’ rootstocks. Similarly, among the 10 rootstocks, the titratable acid content of ‘Shatang mandarin’ rootstocks was the highest, and the titratable acid content of ‘Goutou sour orange’ rootstocks, ‘Flying dragon trifoliolate orange’ rootstocks and ‘Rough lemon’ rootstocks was the lowest. Compared with ‘Shatang mandarin’ rootstocks, the titratable acid content of the fruits of the other 9 rootstocks grafted ‘Shatang

mandarin' decreased in different degrees, while the reducing sugar content of the fruits was lower than that of 'Shatang mandarin' rootstocks. The reducing sugar content of fruit was significantly increased after grafting with 9 rootstocks such as 'Wangcangdayezhi trifoliate orange'. In the correlation analysis, there was a significant negative correlation between plant height and SPAD value, indicating that dwarfing rootstocks could effectively improve photosynthesis by increasing the absorption of light energy by leaves, and there was a significant positive correlation between fruits weight per plant and plant height, indicating that the dwarfing caused by rootstocks would affect the fruits weight per plant; Single fruit weight was significantly positively correlated with pulp weight, fruit transverse and longitudinal diameter, and fruit volume, indicating that several indicators in measuring fruit weight and size would interact with each other. The correlation of 22 indicators shows that there are different degrees of correlation between indicators, which shows that there is information overlap between multiple indicators, and the evaluation indicators need to be simplified. In the principal component analysis, 6 principal components were extracted, and the cumulative contribution rate reached 93.407%, indicating that the 6 principal components could represent most of the information of the 22 indicators. The cumulative contribution rate of the first four principal components reached 80.258%, and the key factors in the all 6 principal components could be used as the core indicators to evaluate the 10 rootstocks. Finally, Construction of comprehensive evaluation model for selecting superior rootstocks of grafted 'Shatang mandarin'. According to the comprehensive score, the results showed that 'Red limonia' rootstocks had the highest score, followed by 'Xiangcheng' rootstocks and 'Rough lemon' rootstocks. **【Conclusion】** Through the determination of related indexes of 'Shatang mandarin' grafted with ten rootstocks under screen house cultivation, it was found that there were significant differences among plant height, fruits weight per plant and fruit quality, and there were also multiple correlations among the indexes. The joint analysis of these indexes was conducive to understanding the relationship among plant height, yield and fruit quality. The comprehensive evaluation model of rootstocks screening was established based on the 22 related indicators obtained by principal component analysis, and the 6 key factors in all 6 principal components could be used as the core indicators to evaluate the 10 rootstocks, and the comprehensive evaluation scores of the 10 rootstocks were calculated and sorted from high to low. The results indicate that 'Red limonia', 'Xiangcheng', and 'Rough lemon' can be recommended as the three preferred dwarfing rootstocks for 'Shatang mandarin' in Guangdong Province.

**Key words:** Plant height; Fruit yield; Fruit quality; Principal component analysis; Rootstock selection

柑橘是全球最重要的经济作物之一，是世界第一大水果<sup>[1]</sup>，目前，中国柑橘产业规模位居世界首位，产量占世界的 1/3 左右<sup>[2]</sup>。生产上柑橘常用嫁接方式进行繁殖，砧木能有效调节植株的生长发育及抗性，并影响果实的产量和品质，不同砧木对接穗产生的影响不一样，受到嫁接品种、气候和土壤等差异影响，各产区的砧木选用也不一样<sup>[3-4]</sup>。整体而言，我国

砧木常用枳、红橘、酸柚、酸橘、香橙等，四川、重庆等地主要采用红橘、酸柚、香橙等砧木，浙江、福建多用枳、枳橙、枸头橙，两广地区则常用酸橘、红柠檬和朱橘<sup>[5]</sup>。其中枳砧具有矮化或半矮化，早结丰产，品质优良等特点，因此成为我国目前应用最多、最广泛的柑橘砧木<sup>[6]</sup>。但进一步研究表明，枳砧与其他砧木品种相比，有嫁接后期生长不亲和，易黄化，对碎叶病、裂皮病敏感，土地贫瘠抗性差等缺点<sup>[7-9]</sup>。因此，进行柑橘优良砧木品种筛选对提高柑橘产量和品质，进一步推动我国柑橘产业的发展具有重大意义。

前人在柑橘不同砧穗组合方面做了较多的研究，郭丽英等<sup>[10]</sup>利用 5 种砧木嫁接红江橙，通过对植株生长、光合特性和果实品质等研究分析，筛选出红橘、酸橘 2 种砧木为肇庆地区红江橙配套砧木的理想选择；洪丹丹等<sup>[11]</sup>利用红美人柑橘为试材，研究了 7 种砧木对其生长发育和果实品质的影响，筛选出朱栌为最适宜栽种在浙东海涂盐碱地上的优质砧木；李娟等<sup>[12]</sup>利用砂糖橘嫁接 5 种不同砧木，测量其生长势、光合作用及碳水化合物含量，结果表明，嫁接在香橙砧上的砂糖橘树势健壮、光合性能较强，可推荐为砂糖橘的优良备选砧木。综合前人对不同砧木砂糖橘果实品质的影响研究，多为一般性的综合评价，鲜有报道利用主成分分析对植株株高、果实产量和品质进行联合分析<sup>[13-14]</sup>，笔者利用 10 种砧木嫁接砂糖橘，对嫁接后网室栽培的砂糖橘植株株高、单株产量和果实品质进行相关性分析和主成分分析，筛选出满足果树矮化丰产及高质量果实品质的优良砧木，为柑橘种植生产上的砧木选择提供理论参考。

## 1 材料和方法

网室试验于 2023 年在广东省广州市从化区农业技术推广中心小坑基地进行。从化区位于广州东北部，地处低纬度地带，北回归线横跨境内，属亚热带季风气候，气候温和，雨量充沛，年平均气温为 19.5 °C~21.4 °C，年降水量 1297.5 mm，年日照时数 1976.8 h（信息来源广东省广州市从化区人民政府官网）。果实内外品质测定在仲恺农业工程学院海珠校区实验室进行。

### 1.1 试验材料

试验选取枳（Trifoliate orange, *Poncirus trifoliata* Raf.）、旺苍大叶枳（Wangcangdayezhi trifoliate orange, *P. trifoliata* Raf. cv. Wangcangdayezhi）、飞龙枳（Flying dragon trifoliate orange, *Poncirus trifoliata* Raf. var. *monstrosa*）、枸头橙（Goutou sour orange, *Citrus aurantium* L.）、粗柠檬（Rough lemon, *Citrus jambhiri* Lush）、酸柚（Sour pummelo, *Citrus grandis* Osbeck）、香橙（Xiangcheng, *Citrus junos* Sieb. ex Tanaka）、红黎檬（Red limonia, *Citrus limonia* Osbeck）、砂糖橘（Shatang mandarin, *Citrus reticulata* Blanco cv. Shatangju）和红橘（Red tangerine, *Citrus reticulata* Blanco cv. Red tangerine）10 种柑橘砧木材料，2015 年播种，2016 年分别嫁接砂糖橘接穗，2018 年 12 月移栽至从化区农业技术推广中心小坑基地，网室种植，常规管理，生长一致，均为无病虫害健康植株。本试验选取每种砧木各 8 株，5 株用于观察和果实数量统计，3 株用于采样，单株为一个重复。

## 1.2 试验方法

1.2.1 植株株高相关指标测量 于2023年1月，叶幕充分形成时，使用5 m量程卷尺量取地面至植株最高处的垂直距离，不同方位重复测量3次，单株为1个重复。从植株中部不同方位的枝条上随机选取枝梢顶端第4~6片成熟叶片各3片，用锡箔纸遮光10 min后，采用便携式叶绿素荧光测定仪（OPTI SCIENCE, OS-5p+, 美国）进行叶绿素含量（SPAD）测定，每叶测定3个点。

1.2.2 单株产量测定 于2023年1月上旬，采收果实统计结果数量，用机械台秤称量得出单株产量，其中每个砧木处理组有5株树，取平均值计算该组单株产量。

1.2.3 果实品质相关性状测定 在果树的树冠外围东、南、西、北、中5个方向，采集中等大小已成熟果实，混匀后随机挑选50个用于品质分析。用电子分析天平（METTLER TOLEDO, PL6001-L, 美国）测量单果质量及果肉质量。使用电子数显游标卡尺（SYNTEK, SY-04-200, 德国）测量果实横纵径、果皮厚度、果实汁胞横纵径；果形指数计算公式为果实纵径/果实横径。果实体积计算参考金开正等<sup>[15]</sup>的丁氏体积公式修正公式。参照高凝<sup>[16]</sup>的测定方法，使用数显式水果硬度计（Aipli, GY4, 中国）测量各部位的果肉硬度。果皮色差测定：据Stewart等<sup>[17]</sup>的方法，采用色差仪（KONICA MINOLTA, CR-400, 日本），在仪器上读取出 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 的数值，每个砧木类型进行20枚果实的测定并对每个受测果实进行3次重复，取其平均值，分别为 $\Delta L^*$ 、 $\Delta a^*$ 、 $\Delta b^*$ 。由手持数字糖度计（KEM, RA-250WE, 日本）测定可溶性固形物含量。参照《食品分析》的测定方法<sup>[18]</sup>，用氢氧化钠滴定法测定可滴定酸含量，采用2,6-二氯酚氧化还原滴定法测定维生素C含量，使用3,5-二硝基水杨酸法测定还原性糖含量。用直接烘干法测定果实含水率。

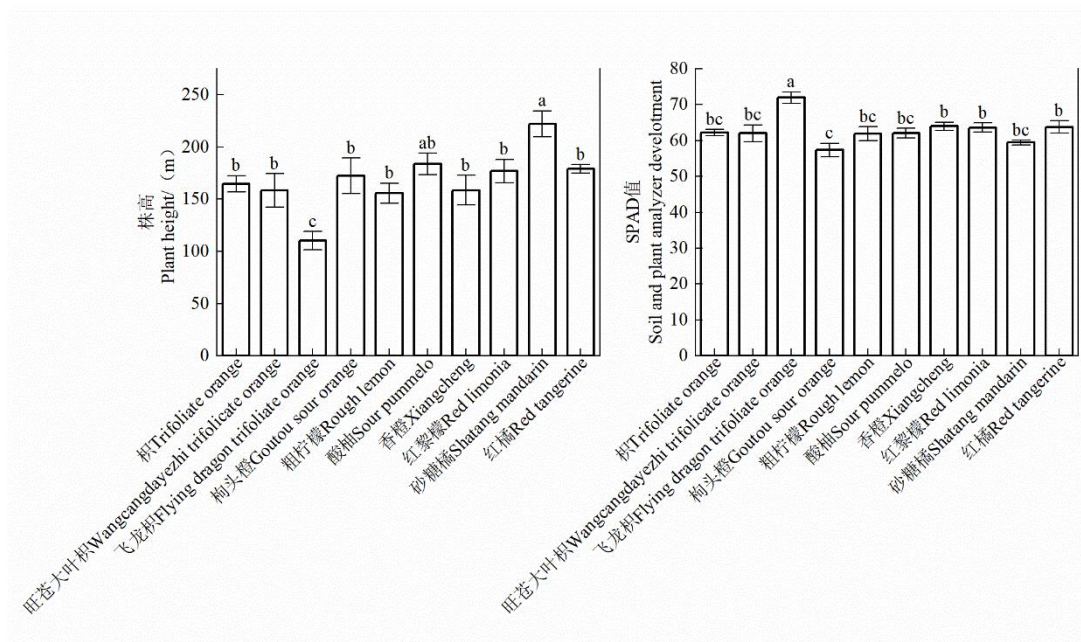
## 1.3 数据处理及分析

利用Excel对数据进行预处理，利用SPSS 26.0进行差异显著性分析、相关性分析、数据标准化和主成分分析，利用Origin Pro 8.5和R语言作图及数据可视化。

# 2 结果与分析

## 2.1 不同砧木对砂糖橘株高相关指标的影响

由图1-A可知，10种砧木对砂糖橘株高有不同程度的影响，砂糖橘本砧的株高最高，达222.23 cm，显著高于除酸柚外的其他砧木，其中飞龙枳株高最矮，较砂糖橘显著降低了50.79%，表明在供试砧木中，飞龙枳砧的矮化效果最好。由图1-B可知，矮化效果最好的飞龙枳砧有最高的SPAD值，达到了71.92，显著高于其他砧木，而株高最高的砂糖橘本砧，SPAD值反而最低，仅为59.44，表明株高与SPAD值存在着一定的相关关系。由此看出，砧木嫁接后可以提高砂糖橘接穗叶片对光能的利用，其中，以飞龙枳效果最明显。



不同小写字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ )。下同。

Different small letters indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

图 1 不同砧木对砂糖橘株高及 SPAD 值的影响

Fig.1 Effect of different rootstocks on the plant height and SPAD value of 'Shatang mandarin'

## 2.2 不同砧木对砂糖橘单株产量的影响

由图 2 可知，枸头橙砧的单株产量高于其他砧木，达到了 11.70 kg，飞龙枳砧的单株产量最低，仅为 1.46 kg，粗柠檬砧木的单株产量排在第二，为 9.80 kg，其他 8 种砧木的单株产量都小于 8.0 kg。由此可见，不同砧木嫁接砂糖橘会影响单株产量，排除其他因素的干扰，在统一生产管理下，由单株产量估算 667 m<sup>2</sup> 产量，枸头橙砧的砂糖橘产量最高。

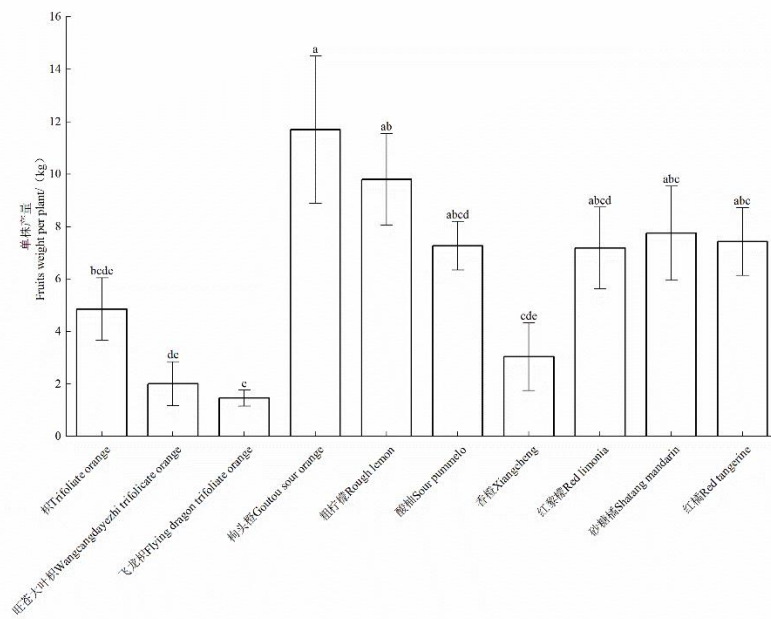


图 2 不同砧木对对砂糖橘单株产量的影响

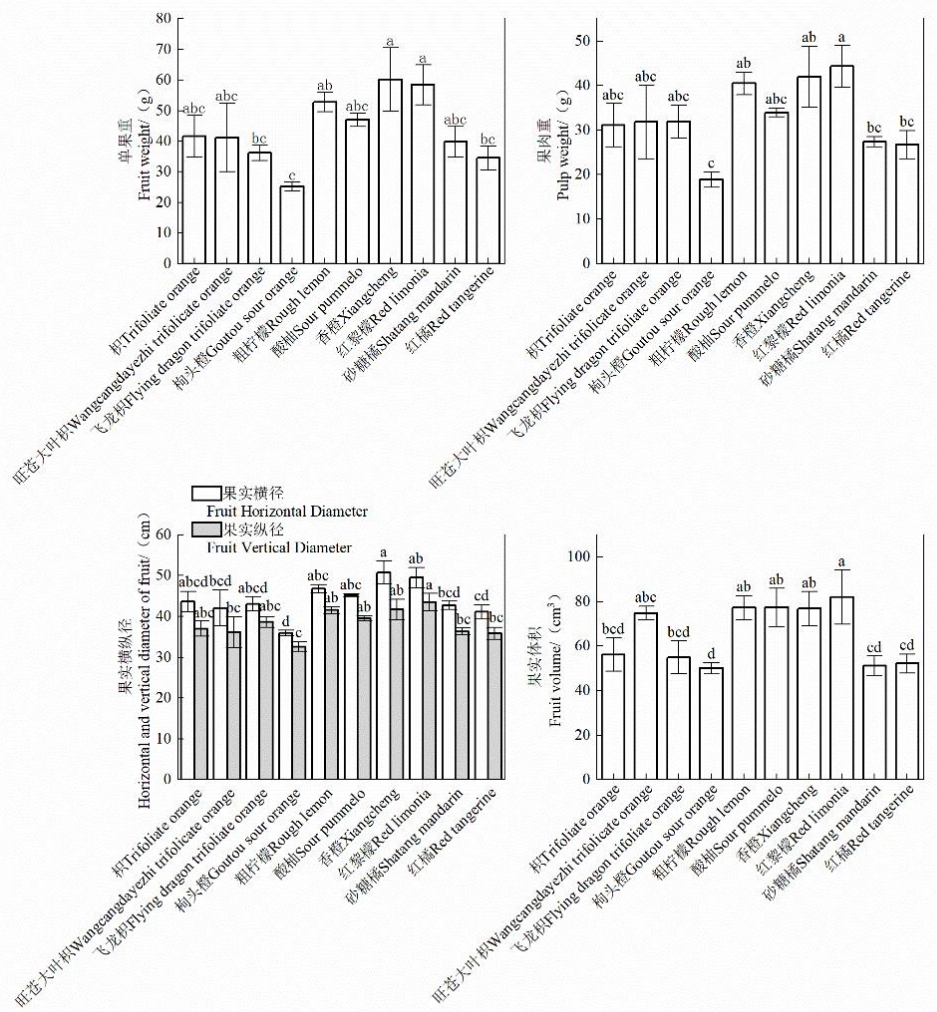
Fig. 2 Effect of different rootstocks on single plant yield of 'Shatang mandarin'

### 2.3 不同砧木对砂糖橘外在品质相关指标的影响

由图 3-A 可知，香橙砧的单果质量最高，为 60.16 g，枸头橙砧最低，为 25.22 g，二者呈显著差异。红黎檬砧的果肉质量最高，为 44.34 g，香橙砧次之，为 42.03 g，枸头橙砧的果肉质量最低，仅为 18.86 g，显著低于红黎檬砧、香橙砧和粗柠檬砧（图 3-B）。

果实横纵径、果实体积和果形指数是评价果实外观品质的基础，一般果形指数 1.0 以上为长圆形，0.9~1.0 为椭圆形或圆锥形，0.8~0.9 时为圆形或近圆形，0.6~0.8 为扁圆形。由图 3-C 可知，香橙砧的果实横径大于其他砧木，红黎檬砧的果实纵径大于其他砧木，结合果实体积结果（图 3-D）来看，红黎檬砧的果实体积最大，达到了 81.96 cm<sup>3</sup>，而枸头橙砧的果实横纵径和果实体积均小于其他砧木。由图 3-E 可知，枸头橙砧的果形指数与香橙砧呈显著差异，枸头橙砧的果形指数为 0.91，是椭圆形或圆锥形果实，而香橙砧的果形指数为 0.82，是圆形或近圆形果实。综合单果质量、果肉质量、果实横纵径、果实体积和果形指数，香橙砧和红黎檬砧的果实较大，形状为圆形或近圆形，而枸头橙砧的果实最小，形状为椭圆形或圆锥形。

由图 3-F 可知，酸柚砧果实汁胞横径最大，其次为枳砧、飞龙枳砧，三者差异不显著，砂糖橘本砧的果实汁胞横径最小，显著小于酸柚砧、枳砧和飞龙枳砧；红黎檬砧的果实汁胞纵径最大，为 3.36 mm，而旺苍大叶枳砧的果实汁胞纵径最小，为 2.09 mm，二者呈显著差异。从果皮厚度来看（图 3-G），酸柚砧的果皮厚度最大，为 2.05 mm，红橘砧的果皮厚度最小，为 1.60 mm，二者呈显著差异。枸头橙砧木的果实果肉硬度最大，其次为酸柚砧和旺苍大叶枳砧，枳砧的果肉硬度在 10 种砧木中最小（图 3-H）。





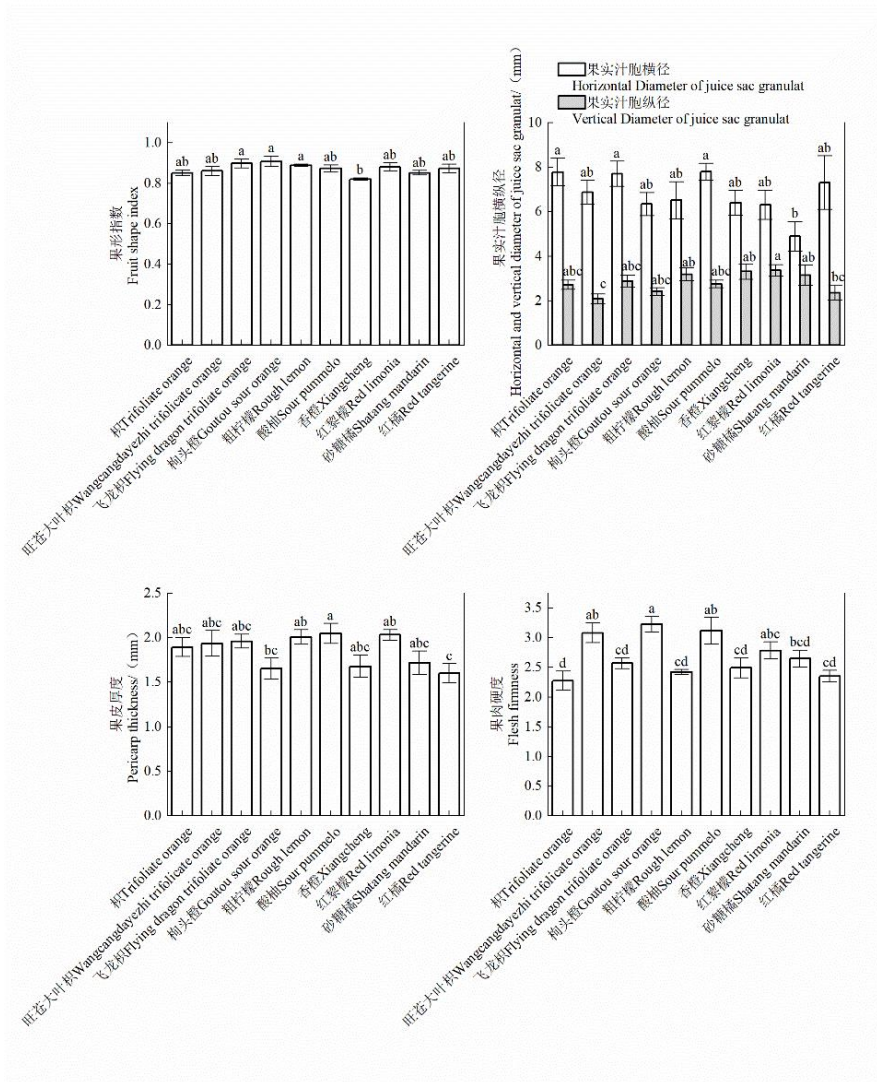


图 3 不同砧木对砂糖橘外在品质相关指标的影响

Fig.3 Effect of different rootstocks on the external quality related indicators of 'Shatang mandarin'

由图 4 可知，砂糖橘果实色度受砧木的影响程度不同。 $\Delta L^*$ 、 $\Delta a^*$ 、 $\Delta b^*$ 分别为果实亮度指标、红色度指标、黄色度指标。从 $\Delta L^*$ 和 $\Delta b^*$ 来看，10 种砧木的果实亮度和黄色度差异不显著；以枳砧的红色度指标最高，其次为红黎檬砧、砂糖橘砧、红橘砧，以香橙砧的果实最低。总体来看，所有砧木的果实均表现出有光泽的橙黄色，但香橙砧的果实果面颜色较浅。

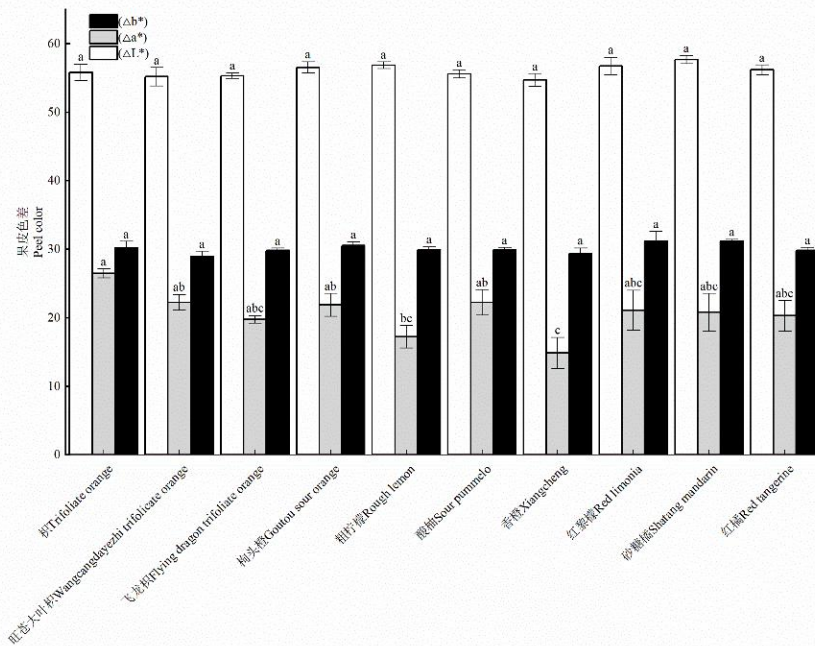


图 4 不同砧木对砂糖橘果皮色差的影响

Fig 4. Effect of different rootstocks on the peel color of 'Shatang mandarin'

#### 2.4 不同砧木对砂糖橘内在品质相关指标的影响

由图 5 可知，10 种砧木的可溶性固形物含量以砂糖橘本砧最高，为 15.32%，显著高于除枳砧和旺苍大叶枳砧外的其他砧木，香橙砧的果实可溶性固形物含量最低，为 13.00%，比砂糖橘砧显著降低了 15.14%。可滴定酸含量也以砂糖橘本砧最高，为 0.43%，其次为红黎檬砧，为 0.41%，与砂糖橘本砧相比，其他砧木果实的可滴定酸含量均有不同程度的降低，其中枸头橙砧、飞龙枳砧和粗柠檬砧的可滴定酸含量最低，均为 0.30%，比砂糖橘砧显著降低了 30.23%。果实固酸比最高的是飞龙枳砧，其次为粗柠檬砧，二者显著高于香橙砧、红黎檬砧和砂糖橘砧，其中香橙砧最低。砂糖橘本砧的果实维生素 C 含量最高，显著高于其他砧木，比含量第二高的粗柠檬砧高 0.09 mg·100 g<sup>-1</sup>，含量最低的砧木是旺苍大叶枳砧，为 0.25 mg·100<sup>-1</sup>，显著低于除飞龙枳砧和红橘外的其他砧木，比砂糖橘砧显著降低了 44.44%。果实还原糖含量最高的 3 种砧木依次是香橙砧、粗柠檬砧、酸柚砧，分别为 13.10、12.93 和 12.79 g·100<sup>-1</sup>，均显著高于含量最低砂糖橘本砧。从果实含水率看，红橘砧的果实含水率最高，为 88.72%，显著高于其他砧木，飞龙枳砧的果实含水率最低，为 82.39%，比红橘砧显著降低了 6.33 个百分点。

综上，不同砧木嫁接砂糖橘会对树体株高、单株产量及果实品质的多项指标产生不同程度的影响，分析各指标间的相关关系可以更好地反映出不同砧木嫁接砂糖橘所导致的内在联系。

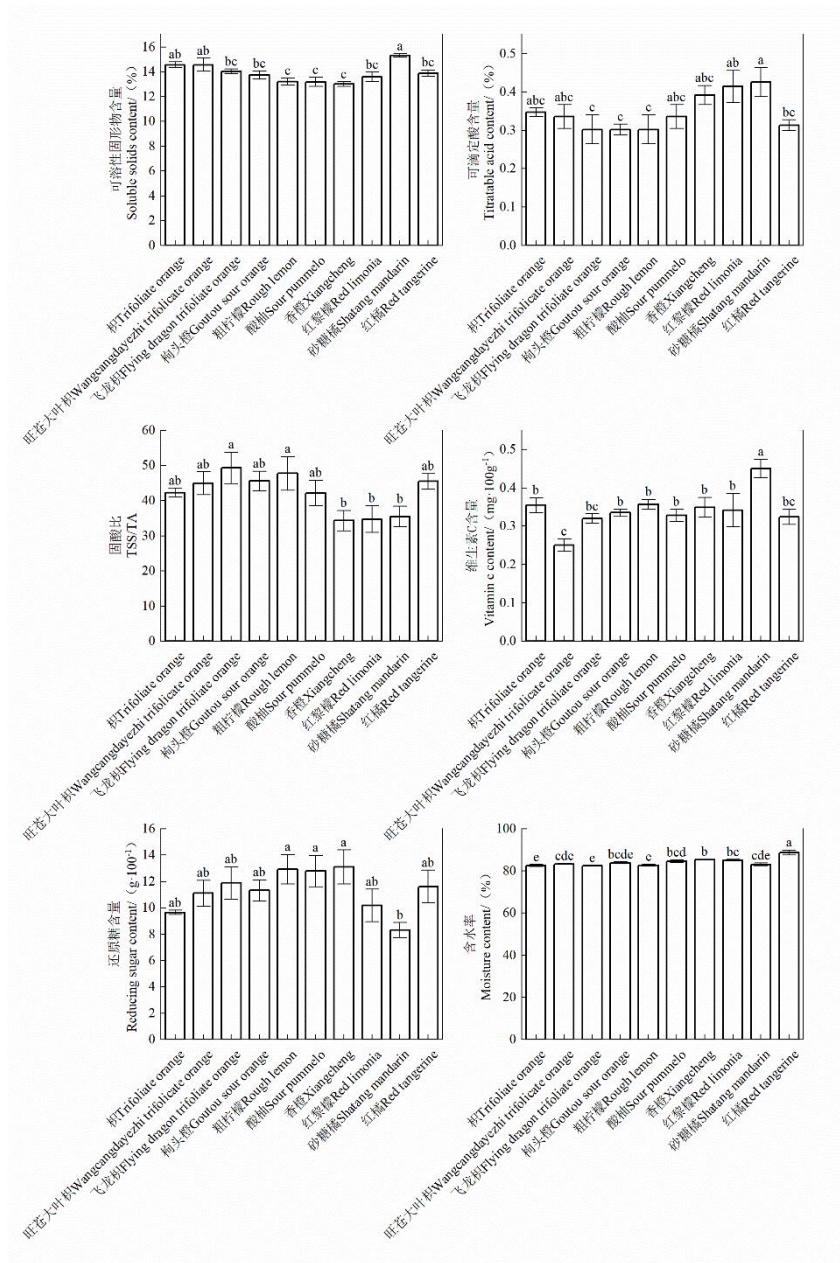


图 5 不同砧对砂糖橘内在品质的影响

Fig.5 Effect of different rootstocks on the intrinsic quality of 'Shatang mandarin'

## 2.5 株高、产量、品质指标间的相关性分析

由表 1 及图 6 可知，株高和 SPAD 值呈极显著负相关，表明矮化砧木能够通过增加叶片对光能的吸收有效提高光合作用，矮化砧木往往受到外界的遮挡而得不到充足的阳光，提高叶片对光能的吸收效率，有助于弥补矮化造成的阳光不足的问题，使树体维持正常生长。同时株高还与单株产量、 $\Delta L^*$ 和可滴定酸含量呈显著正相关，与固酸比呈显著负相关，单株产量和株高呈显著正相关，表明砧木所导致的树体矮化会影响到树体的单株产量。单果质量与果肉质量、果实横径、果实体积呈极显著正相关，表明在衡量果实质量和大小方面的几个指标会相互影响。果皮厚度与果肉质量、果实体积、果实纵径、果实汁胞横径均呈显著

正相关，与果实含水率呈显著负相关，这可能是因为表皮对果实的保护，影响了果实的水分散失，导致果实含水率发生变化。果肉硬度与可溶性固形物含量、固酸比、维生素 C 含量和含水率等多个果实内在品质指标呈负相关，表明果实风味品质和营养品质间存在着一定的相关关系。 $\Delta L^*$ 、 $\Delta a^*$ 和 $\Delta b^*$ 都与单果质量、果肉质量和果实横径呈负相关，其中 $\Delta L^*$ 的负相关更为显著。可溶性固形物含量和果实含水率呈负相关，可滴定酸含量和还原糖含量呈负相关，维生素 C 含量与可滴定酸含量呈极显著正相关，与还原糖含量呈显著负相关，与含水率呈负相关，这些表明了果实内在品质间的各项指标存在一定的相关关系，各指标间相互影响。22 项指标相关性分析表明，多个指标之间存在着信息重叠的情况，可以对评价的指标进行简化。







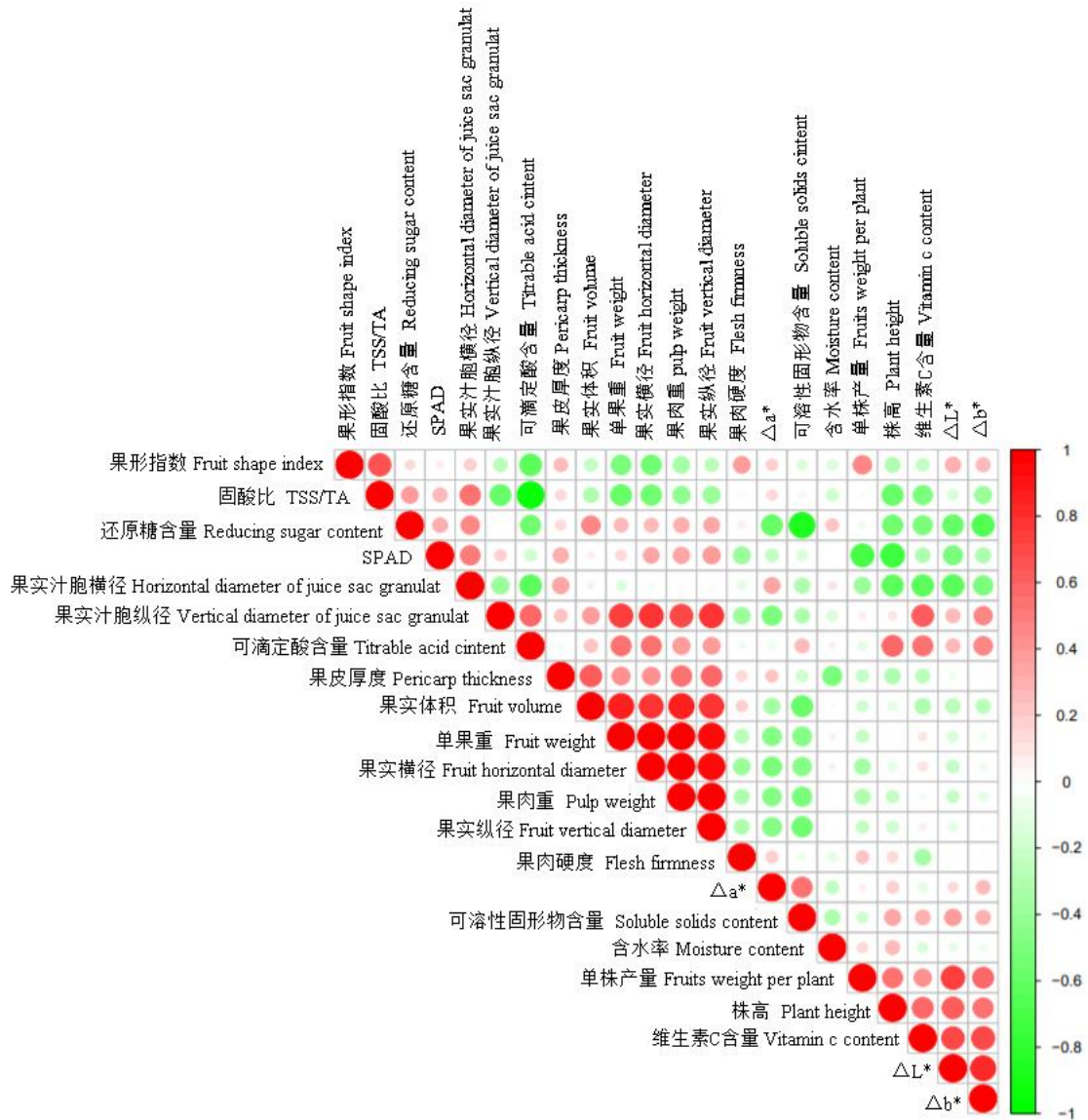


图 6 22 个指标的相关性分析可视化

Fig.6. Visualization of correlation analysis of 22 indicators

## 2.6 株高、产量、品质指标间的主成分分析

对植株株高、单株产量和果实品质的 22 个指标进行主成分分析，提取了 6 个主成分，累积贡献率达到了 93.407%，表明这 6 个主成分能够代表 22 个指标的绝大部分信息。其中第 1 主成分贡献率为 31.910%，其主要是由单果质量、果肉质量、果实横纵径和果实体积组成，这些成分主要代表果实的质量及大小，同时在相关性分析中也表现出极显著的相关性，可以将第 1 主成分注释为果实质量及横纵径大小决定因子；第 2 主成分贡献率为 26.910%，主要由株高、 $\Delta L^*$ 、 $\Delta b^*$ 、可滴定酸和维生素 C 含量组成，这些指标与树体株高、果皮亮度及色泽和果实一些内在品质有关，结合相关性分析结果，株高与  $\Delta L^*$ 、可滴定酸和维生素 C 含量呈显著正相关，可以将该主成分注释为株高、果皮亮度及可滴定酸和维生素 C 含

量决定因子；第 3 主成分贡献率为 11.255%，正向载荷权数最大的两个指标为单株产量和果形指数，可注释为产量和果形指数决定因子；第 4 主成分贡献率为 10.183%，主要由果皮厚度和 $\Delta a^*$ 两个因子组成，但由于果皮色差由 $\Delta L^*$ 、 $\Delta a^*$ 和 $\Delta b^*$ 综合分析，而 $\Delta L^*$ 和 $\Delta b^*$ 都在第 2 主成分中有更高的正向载荷权数，因此笔者将第 4 主成分主要集中在果皮厚度上面，可以注释为果皮厚度因子；第 5 主成分贡献率为 8.392%，其中果肉硬度占有最大的正向载荷权数，为第 5 主成分的核心指标，可以将第 5 主成分注释为果肉硬度因子；第 6 主成分贡献率为 4.757%，含水率在其中占有最大的正向载荷权数，可以将该主成分注释为含水率因子。6 个主成分中，第 1 主成分贡献率最高，比最小的第 6 主成分贡献率高出 27.153 个百分点。

表 2 各主成分的特征值和贡献率

Table 2 Eigenvalues and contribution rates of each principal component

指标	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 5	主成分 6
Index	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
株高						
Plant height (X1)	-0.278	0.806	0.010	-0.269	0.304	0.182
SPAD (X2)	0.427	-0.506	-0.260	0.317	-0.477	0.074
单株产量						
Single plant yield (X3)	-0.395	0.404	0.762	-0.195	0.011	0.165
单果质量						
Single fruit mass (X4)	0.946	0.263	0.028	-0.004	0.125	0.041
果肉质量						
Pulp mass (X5)	0.967	0.097	0.066	0.140	0.044	0.064
果实横径						
Fruit horizontal diameter (X6)	0.969	0.220	-0.058	0.036	-0.018	0.079
果实纵径						
Fruit vertical diameter (X7)	0.948	0.139	0.177	0.171	-0.051	0.119
果形指数						
Fruit shape index (X8)	-0.413	-0.338	0.698	0.346	-0.124	0.012
果实体积						
Fruit volume (X9)	0.823	-0.046	0.230	0.003	0.491	-0.024
果皮厚度						
Pericarp thickness (X10)	0.458	-0.210	0.243	0.720	0.349	0.088
果肉硬度						
	-0.286	-0.101	0.318	-0.043	0.731	-0.312



Flesh firmness (X11)						
果实汁胞横径						
Horizontal diameter of juice sac granulat	0.083	-0.803	-0.100	0.155	0.026	0.481
(X12)						
果实汁胞纵径						
Vertical diameter of juice sac granulat (X13)	0.666	0.566	0.197	0.179	-0.345	-0.080
$\Delta L^*$ (X14)						
	-0.377	0.717	0.428	0.218	-0.153	0.091
$\Delta a^*$ (X15)						
	-0.559	-0.027	-0.236	0.472	0.404	0.447
$\Delta b^*$ (X16)						
	-0.256	0.754	0.312	0.328	-0.131	0.236
可溶性固形物含量						
Soluble solids content (X17)	-0.584	0.338	-0.570	0.376	0.008	-0.109
可滴定酸含量						
Titration acid content (X18)	0.322	0.818	-0.376	0.027	0.215	-0.029
固酸比						
TSS/TA (X19)	-0.400	-0.774	0.271	0.200	-0.219	-0.032
维生素 C 含量						
Vitamin C content (X20)	-0.077	0.830	0.094	0.069	-0.409	-0.092
还原糖含量						
Reducing sugar content (X21)	0.461	-0.641	0.393	-0.403	-0.059	-0.117
含水率						
Moisture content (X22)	0.050	0.002	-0.015	-0.745	-0.058	0.558
特征值						
Eigenvalues	7.020	5.920	2.476	2.240	1.846	1.047
贡献率						
Rate of variance/%	31.910	26.910	11.255	10.183	8.392	4.757
累积方差贡献率						
Rate of commulative variance %	31.910	58.820	70.075	80.258	88.650	93.407

## 2.7 基于主成分分析的 10 种砧木综合评价

利用主成分分析, 构建筛选嫁接砂糖橘优良砧木的综合评价模型, 通过表 2 中每个指标的因子载荷值除以特征值的平方根<sup>[19]</sup>, 得到该指标所对应的特征向量 (或系数), 以特征向量为权重得到 6 个主成分的得分公式:

$$FI = -0.105ZX1 + 0.175ZX2 - 0.251ZX3 + 0.632ZX4 + 0.712ZX5 + 0.947ZX6 + 0.358ZX7 - 0.170ZX8 +$$

0.523ZX9+0.306ZX10-0.210ZX11+0.081ZX12+0.251ZX13-0.155ZX14-0.356ZX15-0.171ZX16-0.430ZX17+0.315ZX18-0.151ZX19-0.032ZX20+0.293ZX21+0.034ZX22

$F_2=0.331ZX1-0.322ZX2+0.270ZX3+0.194ZX4+0.095ZX5+0.090ZX6+0.088ZX7-0.226ZX8-0.034ZX9-0.206ZX10-0.042ZX11-0.511ZX12+0.378ZX13+0.528ZX14-0.027ZX15+0.310ZX16+0.215ZX17+0.547ZX18-0.570ZX19+0.811ZX20-0.263ZX21+0.001ZX22$

$F_3=0.006ZX1-0.174ZX2+0.561ZX3+0.028ZX4+0.042ZX5-0.038ZX6+0.130ZX7+0.682ZX8+0.146ZX9+0.162ZX10+0.234ZX11-0.098ZX12+0.125ZX13+0.286ZX14-0.174ZX15+0.305ZX16-0.362ZX17-0.251ZX18+0.199ZX19+0.092ZX20+0.250ZX21-0.010ZX22$

$F_4=-0.179ZX1+0.233ZX2-0.190ZX3-0.003ZX4+0.103ZX5+0.035ZX6+0.114ZX7+0.255ZX8+0.003ZX9+0.481ZX10-0.032ZX11+0.151ZX12+0.120ZX13+0.161ZX14+0.461ZX15+0.219ZX16+0.277ZX17+0.026ZX18+0.134ZX19+0.051ZX20-0.394ZX21-0.498ZX22$

$F_5=0.224ZX1-0.467ZX2+0.008ZX3+0.122ZX4+0.032ZX5-0.017ZX6-0.037ZX7-0.121ZX8+0.362ZX9+0.341ZX10+0.538ZX11+0.025ZX12-0.254ZX13-0.150ZX14+0.298ZX15-0.128ZX16+0.06ZX17+0.210ZX18-0.161ZX19-0.399ZX20-0.043ZX21-0.057ZX22$

$F_6=0.177ZX1+0.072ZX2+0.161ZX3+0.040ZX4+0.063ZX5+0.077ZX6+0.116ZX7+0.012ZX8-0.023ZX9+0.086ZX10-0.305ZX11+0.470ZX12-0.078ZX13+0.089ZX14+0.437ZX15+0.231ZX16-0.106ZX17-0.028ZX18-0.031ZX19-0.090ZX20-0.114ZX21+0.546ZX22$

以上  $F_1\sim F_6$  代表的是不同砧木在主成分 1 到 6 中的得分值，其中  $ZX1\sim ZX22$  为株高、SPAD、单株产量等 22 个评价指标的标准化值。

以主成分对应的方差贡献率为权重，主成分得分与相应权重乘积的和建立砧木筛选综合评价模型，得到公式：

$$F=0.3191 \times F_1+0.2691 \times F_2+0.11255 \times F_3+0.10183 \times F_4+0.08392 \times F_5+0.04757 \times F_6。$$

利用该模型公式计算得出 10 种供试砧木的综合评价得分，根据综合得分从高到低对其进行排序，筛选出基于该模型下最优的砂糖橘砧木。由表 3 可知，红黎檬砧的综合评价得分最高，其次为香橙砧和粗柠檬砧。这 3 种砧木在单果质量、果肉质量、果实横纵径和果实体积这些果实外品质指标上有着很好的表现，而在果实还原糖和维生素 C 含量这两个果实内品质指标上也具有优势，果实品质综合表现较好，而在株高方面，3 种砧木对比砂糖橘本砧均有矮化的效果，树体株高比砂糖橘砧、酸柚砧和红橘砧低，3 种砧木中粗柠檬砧的矮化效果最好；在单株产量上，粗柠檬砧的单株产量仅次于枸头橙砧。综合评价得分最低的砧木为枸头橙砧，其次是红橘砧和飞龙枳砧，枸头橙砧在果实单果质量、果肉质量、果实体积指标上都低于其他砧木，表明枸头橙砧的果实质量及大小不具优势，同时枸头橙砧的果肉硬度最大，综合来看，枸头橙砧木的果实口感欠佳；红橘砧的果皮厚度较小，果实可滴定酸含量较低，飞龙枳砧的株高最低但单株产量也最低，因此从综合表现来看，这 3 种砧木并不推荐作为砂糖橘的嫁接砧木。

表 3 10 种砧木的各主成分得分和综合评价

**Table 3 Principal component scores and comprehensive evaluation of 10 rootstocks**

砧木类型 Rootstock	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F</i>	排名 Ranking
枳 Trifoliate orange	-1.68	0.141	2.194	2.023	0.024	1.141	0.563	6
旺苍大叶枳 Wangcangdayezhi trifoliate orange	0.895	3.982	2.019	0.282	2.686	0.971	1.376	7
飞龙枳 Flying dragon trifoliate orange	0.099	5.012	-0.42	2.086	2.223	-0.61	1.431	8
枸头橙 Goutou sour orange	7.889	0.583	2.586	1.061	0.286	0.732	2.502	10
粗柠檬 Rough lemon	3.406	0.117	3.021	0.187	0.965	0.511	1.309	3
酸柚 Sour pummelo	1.74	1.576	1.046	0.173	1.955	0.723	0.43	5
香橙 Xiangcheng	7.275	1.24	1.889	2.873	0.435	0.929	2.069	2
红黎檬 Red limonia	4.907	3.584	1.273	1.241	0.91	1.057	2.926	1
砂糖橘 Shatang mandarin	3.625	8.325	0.892	0.62	0.713	-0.84	0.946	4
红橘 Red tangerine	-3.14	1.737	0.512	2.332	1.477	1.672	1.809	9

### 3 讨论

研究表明,不同砧木嫁接砂糖橘对株高、产量和品质均有不同程度的影响,前人研究表明,在嫁接过程中选择合适的砧木,能够显著促进植株营养吸收,增强植株的抗性<sup>[20-21]</sup>,改变植株的表型<sup>[22]</sup>,影响果实的生长发育和品质<sup>[23]</sup>。在本研究中,10种砧木嫁接砂糖橘后,株高差异显著,其中飞龙枳的株高最低,这与前人的研究结果一致<sup>[24-25]</sup>。而株高又与单株产量、 $\Delta L^*$ 和可滴定酸含量呈显著正相关,证实了砧穗结合对株高、产量和品质的影响。砧

穗结合对植株生长和果实品质影响的相关研究众多,例如葡萄<sup>[26-28]</sup>、苹果<sup>[29-31]</sup>、石榴<sup>[32]</sup>、薄皮甜瓜<sup>[33]</sup>等。通过研究砧穗结合,可以筛选出使植株更具适应性的砧木品种,获得更高的果实产量和品质。

在园艺生产上,矮化密植已经成为了现代果树栽培中的主要发展趋势,对于矮化砧木的选择和利用也越来越受到人们的重视<sup>[34]</sup>。矮化柑橘砧木被世界各地的柑橘种植者和研究人员所青睐<sup>[35]</sup>,因为矮化的柑橘砧木往往具有产量高、密度大的特点,是高密度果园的理想选择,不仅如此,矮化的柑橘砧木还具有更高的光合效率<sup>[36]</sup>,本研究相关性分析中株高与SPAD值的结果也证实了这一点。种植上使用矮化的柑橘砧木品种,能够使他们在生产上提早结果,加快产品上市,保证果实的产量和品质,提高生产总值,减少果树在栽培中的修剪和打药工作量,便于生产管理,降低生产成本等<sup>[37]</sup>,特别是随着现代土地资源的匮乏、劳动力的日益紧缺、人民生活水平的提高转而对果实品质的要求越来越高,以及机械化逐渐成为现代农业发展的趋势,果树的矮化和适度密植成为解决这些问题不可或缺的重要途径<sup>[38]</sup>。

但是砧木的选择并不能仅限于矮化这一个指标,作为世界范围内公认的矮化砧木飞龙枳,研究表明他与某些接穗嫁接后并不能得到良好的产量及果实品质<sup>[39]</sup>,因此从多指标筛选优良的柑橘砧木很有必要。陈东升等<sup>[40]</sup>联合分析5种砧木对小果型西瓜生长、果实品质及产量的影响,筛选得到北京地区适宜小果型西瓜嫁接的砧木品种。相关性分析是树体生长发育情况和果实品质综合分析的常用方法,笔者将株高、产量和品质的22个指标进行相关性分析,得到多组相关关系,其中株高与固酸比呈显著负相关,表明树体的生长发育与果实品质也有密切的联系,再次表明除了矮化指标之外,也要对果实品质综合指标进行联合分析,选择出最适合的柑橘砧木。除此之外,通过分析多组相关关系还可以探讨各指标间的内在联系,将植株生长与果实产量和品质联系在一起,有利于更全面地筛选出优良的砂糖橘矮化砧木。

笔者利用主成分分析共提取到6个主成分,可以分别注释为不同的决定因子,前4个主成分累计贡献率达到了80.258%,所有6个主成分里的关键因子可作为评价10种供试砧木的核心指标,其中果实质量及横纵径大小决定因子贡献率最高,而与果实品质相关的关键因子,总贡献率超过了42.093%,表明在优良砧木的筛选上,果实的果品质量显得尤为重要,这也符合水果市场的需求,株高和单株产量两个指标分别对应在第2和第3个主成分中,但这两个指标都没有足够大的正向载荷权数以作为单独的主成分,表明了柑橘生产上,选择优良砧木首要考虑的还是果品质量,在满足果品质量的关键前提下选择矮化且高产的柑橘砧木。主成分分析利用综合评分的模型对研究对象进行筛选,在优良砧木筛选上也常用这种方法,徐美隆等<sup>[41]</sup>利用主成分分析对不同砧木嫁接欧梨的成活率和果实品质进行综合评价以筛选出最适宜的优良砧木;何满<sup>[42]</sup>利用主成分分析的方法对4种柑橘砧木嫁接爱媛28号橘橙幼树后的指标进行综合评价,从而筛选出最优的柑橘砧木;白世践等<sup>[43]</sup>对不同砧木影响吐鲁番地区克瑞森无核葡萄生长特性及果实品质相关指标进行主成分分析,筛选出吐鲁番产区克瑞森无核葡萄的优选砧木。参照前人的研究方法,笔者对株高、产量、品质的22个指

标建立主成分分析综合评价模型，筛选出优良的砂糖橘砧木。

砂糖橘是广东省传统特色优良品种，在生产上矮化高产优质的砂糖橘能带来更为丰厚的经济效益，而对于消费者而言，果实风味品质和营养品质更好的砂糖橘更受青睐，本研究将树体株高与产量、品质进行联合分析，并通过主成分分析的方法，筛选出满足条件的砂糖橘优良矮化砧木，为柑橘优良砧木的筛选提供了理论支撑，为进一步通过分子层面阐明优良砧木的矮化机制及果实品质间的影响途径提供了理论参考。

#### 4 结论

通过主成分分析筛选出贡献率最高的果实质量及横纵径大小决定因子，其次为株高、果皮亮度和可滴定酸含量、维生素 C 含量决定因子、产量和果形指数决定因子等 6 个关键因子可作为评价砂糖橘砧木的核心指标。综合评价得分表明，红黎檬、香橙和粗柠檬可推荐为广东省砂糖橘优良砧木。

#### 参考文献 Reference:

- [1] 祁春节, 顾雨檬, 曾彦. 我国柑橘产业经济研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(1): 58-69.  
QI Chunjie, GU Yumeng, ZENG Yan. Progress of citrus industry economy in China[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(1): 58-69.
- [2] 邓秀新. 中国柑橘育种 60 年回顾与展望[J]. 园艺学报, 2022, 49(10): 2063-2074.  
DENG Xiuxin. A review and perspective for citrus breeding in China during the last six decades[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2022, 49(10): 2063-2074.
- [3] 淳长品, 彭良志, 雷霆, 唐海涛, 曹立, 江才伦, 凌丽俐. 不同柑橘砧木对锦橙果实品质的影响[J]. 园艺学报, 2010, 37(6): 991-996.  
CHUN Changpin, PENG Liangzhi, LEI Ting, TANG Haitao, CAO Li, JIANG Cailun, LING Lili. Effects of rootstocks on fruit quality of ‘Jincheng’ sweet orange[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2010, 37(6): 991-996.
- [4] GISBERT-MULLOR R, CECCANTI C, GARA PADILLA Y, LÓPEZ-GALARZA S, CALATAYUD Á, CONTE G, GUIDI L. Effect of grafting on the production, physico-chemical characteristics and nutritional quality of fruit from pepper landraces[J]. Antioxidants, 2020, 9(6): 501.
- [5] 沈兆敏. 我国柑橘砧木的现状、问题及对策建议(上)[J]. 科学种养, 2017(6): 5-6.  
SHEN Zhaomin. Current situation, problems, and countermeasures of citrus rootstocks in China (Part 1)[J]. Kexue Zhongyang, 2017(6): 5-6.
- [6] 杨惠栋, 彭震宇, 彭良志, 袁梦, 淳长品, 袁高鹏. 不同砧木对纽荷尔脐橙嫁接苗生长和生理指标的影响[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(3): 575-583.  
YANG Huidong, PENG Zhenyu, PENG Liangzhi, YUAN Meng, CHUN Changpin, YUAN Gaopeng. Effect of growth and physiological indexes of navel orange budlings grafted on seven *Citrus rootstock* cultivars[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(3): 575-583.
- [7] 杨方云, 戴胜根, 赵学源, 唐科志, 黄森. “低酸甜橙不能用枳作砧木” 质疑[J]. 中国南方果树, 2001, 30(1): 12-13.  
YANG Fangyun, DAI Shenggen, ZHAO Xueyuan, TANG Kezhi, HUANG Sen. Doubts on “Low acidity sweet oranges cannot be used as rootstocks with Trifoliate orange” [J]. South China Fruits, 2001, 30(1): 12-13.

[8] 周开兵, 郭文武, 夏仁学, 王贵元, 沈婷. 不同砧木对脐橙幼树生长和叶片养分含量变化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 657-662.

ZHOU Kaibing, GUO Wenwu, XIA Renxue, WANG Guiyuan, SHEN Ting. Effects of two kinds of rootstock on growth and change of nutrient contents in leaf of young tree of navel orange[J]. Plant Nutrition and Fertilizing Science, 2004, 10(6): 657-662.

[9] 邓秀新, 彭抒昂. 柑橘学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.

DENG Xiuxin, PENG Shu'ang. Citrus science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013.

[10] 郭丽英, 吉前华, 郭雁君, 蒋惠, 杨凤梅. 不同砧木对红江橙植株生长、果实品质及光合特性的影响[J]. 山西农业科学, 2023, 51(7): 735-741.

GUO Liying, JI Qianhua, GUO Yanjun, JIANG Hui, YANG Fengmei. Effects of different rootstocks on plant growth, fruit quality, and photosynthetic characteristics of Hongjiang orange[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2023, 51(7): 735-741.

[11] 洪丹丹, 张琮, 王鹏, 柯甫志, 徐阳. 不同砧木对浙东海涂地红美人柑橘生长发育和果实品质的影响[J]. 中国果树, 2023(7): 65-68.

HONG Dandan, ZHANG Cong, WANG Peng, KE Fuzhi, XU Yang. Effects of different rootstocks on the growth and fruit quality of 'Hongmeiren' citrus on the coastal soil of Eastern Zhejiang[J]. China Fruits, 2023(7): 65-68.

[12] 李娟, 贺世雄, 涂攀峰, 潘建君, 高美玲, 吴韞里, 陈杰忠, 徐海权, 姚青. 不同砧木对砂糖橘生长势、光合作用和碳水化合物含量的影响[J]. 热带作物学报, 2023, 44(9): 1810-1816.

LI Juan, HE Shixiong, TU Panfeng, PAN Jianjun, GAO Meiling, WU Yunli, CHEN Jiezhong, XU Haiquan, YAO Qing. Effects of rootstocks on tree growth, photosynthesis and carbohydrate content of 'Shatangju' tangerine[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(9): 1810-1816.

[13] 刘振, 洪励伟, 李娟, 陈杰忠, 罗小燕, 覃燕. 不同柑橘砧木对砂糖橘果实品质的影响[J]. 广东农业科学, 2016, 43(8): 39-44.

LIU Zhen, HONG Liwei, LI Juan, CHEN Jiezhong, LUO Xiaoyan, QIN Yan. Effects of different rootstocks on fruit quality of 'Shatangju' mandarin[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2016, 43(8): 39-44.

[14] 陈敏, 吴天利, 吕远达, 姜波, 闫化学, 李娟, 钟云. 不同砧木红江橙容器栽培生长和果实品质分析[J]. 园艺学报, 2023, 50(7): 1547-1562.

CHEN Min, WU Tianli, LÜ Yuanda, JIANG Bo, YAN Huaxue, LI Juan, ZHONG Yun. Analysis on growth, physiology and fruit quality of 'Hongjiang' orange grafted with different rootstocks under container culture[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2023, 50(7): 1547-1562.

[15] 金开正, 刘茂泉, 王高林. 柑桔果实体积测定的一种新方法[J]. 安徽农业科学, 2001, 29(4): 522-524.

JIN Kaizheng, LIU Maoquan, WANG Gaolin. Study on the measuring method of orange fruit volume[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2001, 29(4): 522-524.

[16] 高凝. 不同地面覆盖对黄河故道地区苹果树体生长及果实品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.

GAO Ning. Effects of different mulching on the growth and fruit quality of apple trees in yellow river area[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2020.

[17] STEWART I, WHEATON T A. Carotenoids in citrus[C]. Proceedings of 1st International Citrus Congress, 1973(3): 325-330.

[18] 李秀霞, 孙协军, 蔡路昀. 食品分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.

LI Xiuxia. Food analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019.

- [19] 张彦山, 肖正璐, 顾群英, 豆丽萍, 何博. 宁县黄甘桃果实品质综合评价[J]. 果树学报, 2024, 41(1): 65-75.
- ZHANG Yanshan, XIAO Zhenglu, GU Qunying, DOU Liping, HE Bo. Comprehensive evaluation of the fruit quality of yellow-flesh peaches in Ningxian[J]. Journal of Fruit Science, 2024, 41(1): 65-75.
- [20] GOLDSCHMIDT E E. Plant grafting: new mechanisms, evolutionary implications[J]. Frontiers in Plant Science, 2014, 5: 727.
- [21] STOVER E, INCH S, RICHARDSON M L, HALL D G. Conventional citrus of some scion/rootstock combinations show field tolerance under high huanglongbing disease pressure[J]. HortScience, 2016, 51(2): 127-132.
- [22] 吴洋. ‘浦江香橙’砧嫁接不同柑橘品种生长表现及幼苗抗旱性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2022.
- WU Yang. Study on seedling growth and drought resistance of different citrus cultivars grafted on ‘Pujiang Xiangcheng’ [D]. Ya’an: Sichuan Agricultural University, 2022.
- [23] 陈招芳. 不同砧木对‘塔罗科血橙3号’果肉花色苷合成的影响研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2022.
- CHEN Zhaofang. Effects of different rootstocks on the anthocyanin biosynthesis of ‘Tarocco’ blood orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck) during fruit development[D]. Ya’an: Sichuan Agricultural University, 2022.
- [24] 贺世雄. 不同砧穗组合柑橘生长差异及矮化机理研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
- HE Shixiong. Study on growth difference and dwarfing mechanism of various *Citrus rootstock/scion* combinations[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019.
- [25] 李有芳, 张超博, 陈焱, 黄梓洋, 凌丽俐, 曹立, 何义仲, 彭良志. 不同砧木金秋砂糖桔生长结果比较[J]. 中国南方果树, 2019, 48(4): 4-9.
- LI Youfang, ZHANG Chaobo, CHEN Yan, HUANG Ziyang, LING Lili, CAO Li, HE Yizhong, PENG Liangzhi. Comparison of the growth and fruit bearing of Jinqiu shatangju tangelo on different rootstocks[J]. South China Fruits, 2019, 48(4): 4-9.
- [26] 郝燕, 朱燕芳, 王元元, 白耀栋. 不同砧木对‘小芒森’和‘维欧尼’酿酒葡萄生长及果实品质的影响[J/OL]. 甘肃农业大学学报, 1-10[2024-03-23](2023-12-06).  
<https://link.cnki.net/urlid/62.1055.S.20231205.1658.098>.
- HAO Yan, ZHU Yanfang, WANG Yuanyuan, BAI Yaodong. Effects of different rootstocks on the shoot growth and fruit quality of ‘Petit Manseng’ and ‘Viognier’ wine grape in Hexi Corridor[J/OL]. Journal of Gansu Agricultural University, 1-10[2024-03-23] (2023-12-06). <https://link.cnki.net/urlid/62.1055.S.20231205.1658.098>.
- [27] 沈乐意, 王立如, 徐悦, 陈天池, 徐涛, 郭雁飞, 房聪玲, 范林洁, 吴月燕. 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.
- SHEN Leyi, WANG Liru, XU Yue, CHEN Tianchi, XU Tao, GUO Yanfei, FANG Congling, FAN Linjie, WU Yueyan. Effect of different rootstocks on fruit quality and expression of genes related to gluconeogenesis in ‘Shine Muscat’ grapes (*Vitis vinifera*)[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2023, 31(12): 2490-2505.
- [28] 朱燕芳, 王元元, 郝燕, 李翠艳, 王玉安. 不同砧木对河西走廊酿酒葡萄枝条及果实品质的影响[J/OL]. 西北农业学报, 1-12[2024-03-23](2023-11-09). <https://link.cnki.net/urlid/61.1220.S.20231108.1450.002>.
- ZHU Yanfang, WANG Yuanyuan, HAO Yan, LI Cuiyan, WANG Yu’an. Effects of different rootstocks on shoot growth and fruit quality of wine grape in the Hexi Corridor[J/OL]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 1-12[2024-03-23](2023-11-09). <https://link.cnki.net/urlid/61.1220.S.20231108.1450.002>.
- [29] 曹珊, 王淼, 刘丽媛, 景奇, 李高潮, 陈善美, 查养良, 赵小弟. 不同砧穗组合对富士苹果苗木生长发育的影响[J]. 西北农业学报, 2023, 32(11): 1806-1812.

CAO Shan, WANG Miao, LIU Liyuan, JING Qi, LI Gaochao, CHEN Shanmei, ZHA Yangliang, ZHAO Xiaodi. Effects of different rootstock-scion combinations on growth and development of fuji apple seedlings[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2023, 32(11): 1806-1812.

[30] 何平, 王森, 何晓文, 王海波, 常源升, 宁斯逸. 不同砧木对鲁丽苹果生长及果实品质的影响[J]. *落叶果树*, 2022, 54(3): 20-23.

HE Ping, WANG Sen, HE Xiaowen, WANG Haibo, CHANG Yuansheng, NING Siyi. Effects of different dwarfing interstocks on shoot growth and fruit quality for Luli apple[J]. *Deciduous Fruits*, 2022, 54(3): 20-23.

[31] 王来平, 薛晓敏, 董放, 聂佩显, 王金政. 不同砧穗组合对富士苹果生产与果实品质的影响[J]. *果树学报*, 2022, 39(9): 1607-1618.

WANG Laiping, XUE Xiaomin, DONG Fang, NIE Peixian, WANG Jinzheng. Effects of different rootstock-scion combinations on tree development, photosynthetic production, yield and quality of Fuji apple[J]. *Journal of Fruit Science*, 2022, 39(9): 1607-1618.

[32] 任军玲, 赵倩兮, 张曼, 陈妮. 不同砧木嫁接对突尼斯软籽石榴果实性状影响初报[J]. *西北园艺*, 2022(2): 43-46.

REN Junling, ZHAO Qianxi, ZHANG Man, CHEN Ni. Preliminary report on the effects of different rootstock grafting on the fruit characteristics of Tunisian soft seed pomegranate[J]. *Northwest Horticulture*, 2022(2): 43-46.

[33] 丁晓晨, 李梦竹, 丰崇然, 别之龙, 成金桃. 砧穗生理苗龄对断根贴接薄皮甜瓜幼苗质量的影响[J]. *中国瓜菜*, 2023, 36(12): 64-70.

DING Xiaochen, LI Mengzhu, FENG Chongran, BIE Zhilong, CHENG Jintao. Effects of rootstock and scion physiological seedling age on the quality of oriental melon root-cut splice grafted seedlings[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2023, 36(12): 64-70.

[34] 刘梦梦, 洪励伟, 李娟, 陈杰忠, 姚青. 不同砧木嫁接的砂糖橘解剖结构及酶活性研究[J]. *热带作物学报*, 2018, 39(2): 209-216.

LIU Mengmeng, HONG Liwei, LI Juan, CHEN Jiezhong, YAO Qing. The anatomical structure and enzyme activity of 'Shatangju' mandarin grafted on different rootstocks[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2018, 39(2): 209-216.

[35] LAVAGI-CRADDOCK I, DANG T, COMSTOCK S, OSMAN F, BODAGHI S, VIDALAKIS G. Transcriptome analysis of *Citrus* dwarfing viroid induced dwarfing phenotype of sweet orange on trifoliate orange rootstock[J]. *Microorganisms*, 2022, 10(6): 1144.

[36] ARENAS-ARENAS F J, DURAN-VILA N, QUINTO J, HERVALEJO Á. Is the presence of *Trioza erytrae*, vector of huanglongbing disease, endangering the Mediterranean citrus industry? Survey of its population density and geographical spread over the last years[J]. *Journal of Plant Pathology*, 2018, 100(3): 567-574.

[37] 沙守峰, 张绍铃, 李俊才. 梨矮化砧木的选育及其应用研究进展[J]. *北方园艺*, 2009(8): 140-143.

SHA Shoufeng, ZHANG Shaoling, LI Juncai. Progresses on the breeding and application of dwarfing rootstocks of pear[J]. *Northern Horticulture*, 2009(8): 140-143.

[38] 董翠翠. 三种柑橘砧木及其嫁接苗矮化性状相关参数研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.

DONG Cuicui. Study on related parameters of dwarfing traits of three kinds of *Citrus rootstocks* and their grafted seedlings[D]. Chongqing: Southwest University, 2017.

[39] HAYAT F, LI J, IQBAL S, PENG Y, HONG L M, BALAL R M, KHAN M N, NAWAZ M A, KHAN U, FARHAN M A, LI C Q, SONG W P, TU P F, CHEN J Z. A mini review of *Citrus rootstocks* and their role in high-density orchards[J]. *Plants*, 2022, 11(21): 2876.



- [40] 陈东升, 王洪旭, 王振雨, 黄健, 陈宗光. 北京地区 5 种砧木对小果型西瓜生长、果实品质及产量的影响[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(5): 66-71.
- CHEN Dongsheng, WANG Hongxu, WANG Zhenyu, HUANG Jian, CHEN Zongguang. Effects of five rootstocks on growth, fruit quality and yield of mini-watermelon in Beijing[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2023, 36(5): 66-71.
- [41] 徐美隆, 乔改霞, 刘玉娟, 王荣, 谢军, 马龙. 不同砧木对欧李嫁接成活及果实品质的影响[J]. 核农学报, 2023, 37(12): 2503-2509.
- XU Meilong, QIAO Gaixia, LIU Yujuan, WANG Rong, XIE Jun, MA Long. Influence of different rootstock-scion combinations on the grafting survival rate and fruit quality of *Prunus humilis*[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2023, 37(12): 2503-2509.
- [42] 何满. 不同砧木对“爱媛 28 号” 橘橙幼树生长发育的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2023.
- HE Man. Effects of different rootstocks on the growth and development of chime No. 28 orange young trees[D]. Chongqing: Southwest University, 2023.
- [43] 白世践, 户金鸽, 吴久赞, 张雯, 谢辉, 赵荣华, 陈光, 蔡军社. 不同砧木对吐鲁番地区‘克瑞森无核’葡萄生长特性及果实品质的影响[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(8): 76-87.
- BAI Shijian, HU Jinge, WU Jiuyun, ZHANG Wen, XIE Hui, ZHAO Ronghua, CHEN Guang, CAI Junshe. Effects of rootstocks on the growth characteristics and fruit quality of ‘Crimson seedless’ grapes in Turpan region[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(8): 76-87.