

基于主成分与聚类分析综合评价杧果种质资源果实糖酸品质

代涛^{1,2}, 万嘉欣^{1,3a}, 黎洁华^{1,4}, 骆国亮^{1,4}, 李丽¹, 武红霞¹,
许文天¹, 郑斌¹, 王松标¹, 罗聪³, 梁清志^{1*}

(¹中国热带农业科学院亚热带作物研究所·海南省热带园艺产品采后保鲜重点实验室, 广东湛江 524091; ²云南农业大学热带作物学院, 云南普洱 665000; ³广西大学农学院, 广西南宁 530000; ⁴广东海洋大学滨海农业学院, 广东湛江 524000)

摘要:【目的】杧果是重要的热带水果,有‘热带果王’的美誉。我国的杧果种质资源丰富,杧果种质资源的优劣可以通过果实的糖酸品质性状来进行评价,研究杧果果实中糖酸组分含量及其遗传多样性,对于丰富种质资源具有重要意义。【方法】以148份杧果种质资源为实验材料,采用高效液相色谱法检测杧果果实的糖酸组成及其含量的多样性。【结果】148份杧果种质资源中柠檬酸含量和抗坏血酸含量与总酸含量呈极显著正相关,而蔗糖含量与总糖含量呈极显著正相关;通过主成分分析发现,酒石酸、总酸、糖酸比、果糖、葡萄糖和蔗糖含量是造成不同杧果种质资源之间多样性的主要原因;聚类分析结果表明,在遗传距离为2.5和5.0处分别按糖组分含量和酸组分含量可将148份种质资源分为四类。【结论】可为杧果种质资源保存和新品种植培育提供重要的信息参考。

关键词: 杧果; 种质资源; 糖酸; 主成分分析; 遗传多样性

中图分类号: S667.7

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2022)12-2253-11

Comprehensive evaluation of fruit sugar and acid quality of mango germplasm based on principal component and cluster analysis

DAI Tao^{1,2}, WAN Jiaxin^{1,3a}, LI Jiehua^{1,4}, LUO Guoliang^{1,4}, LI Li¹, WU Hongxia¹, XU Wentian¹, ZHENG Bin¹, WANG Songbiao¹, LUO Cong³, LIANG Qingzhi^{1*}

(¹South Subtropical Crops Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/Key Laboratory for Postharvest Physiology and Technology of Tropical Horticultural Products of Hainan Province, Zhanjiang 524091, Guangdong, China; ²College of Tropical Crops, Yunnan Agricultural University, Puer 665000, Yunnan, China; ³College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530000, Guangxi, China; ⁴College of Coastal Agricultural Sciences, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524000, Guangdong, China)

Abstract: 【Objective】Mango is an important tropical fruit and known as the ‘king of tropical fruits’. Mango germplasm resources are very rich in China. The composition and content of fruit sugar and acid directly affect the quality and commercial value of fruit. Therefore, it is necessary to study the composition and content of sugar and acid and their genetic diversity of mango germplasm. 【Methods】In current study, 148 mango germplasm resources were used as experimental materials and high performance liquid chromatography (HPLC) was used to detect the composition and content of sugar and acid in mango fruits. Individual sugars content: 1.0 g of the pulp was weighed, and, 5 mL of 80% ethanol solution was added, then it was centrifuged with 10 000 r·min⁻¹ at 4 °C for 10 min, and the supernatant was transferred to a 15 mL centrifuge tube, the residue was extracted twice with 2 mL of 80% ethanol solution, the supernatants were transferred again to the centrifuge tube, then the tube was put in a water bath

收稿日期: 2022-06-09

接受日期: 2022-08-10

基金项目: 海南省自然科学基金(2019CXTD410; 321MS076); 国家重点研发项目(2019YFD1000500; 2018YFD1000504); 国家自然科学基金(31471849); 农业农村部杧果种质资源精准评价(19221977)

作者简介: 代涛, 男, 研究实习员, 主要从事杧果果实品质研究。Tel: 15012193848, E-mail: dt15012193848@163.com。a 为共同第一作者。
万嘉欣, 男, 在读硕士研究生, 主要从事杧果果实品质研究。E-mail: 1817391018@st.gxu.edu.cn

*通信作者 Author for correspondence. Tel: 0759-2859194, E-mail: qingzhi2002@163.com

at 90 °C to evaporate to dryness, and it was diluted to 10 mL with ultrapure water. A 1 mL over 0.45 μm filter membrane was taken for HPLC analysis. Difference detector in HPLC is RI-1530: flow rate is 1.0 mL · min⁻¹, column temperature is 27 °C, sample intake amount is 10 μL, and the determination time is 15 min; organic acids content: 0.5 g of pulp sample was weighed, then it was ground with 5 mL of 0.2% metaphosphoric acid in ice bath, and was centrifuged with 10 000 r · min⁻¹ for 10 min, take the supernatant; the residue was fully washed with 4 mL of 0.2% metaphosphoric acid and then was centrifuged, take the supernatant; combine the supernatant, It was diluted to 10 mL with 0.2% metaphosphoric acid and mixed. A 1 ml sample was taken and filtered by a 0.45 μm filter membrane to be tested and then detected by HPLC using a C₁₈ column (250.0 mm × 4.6 mm × 5.0 μm) with a loading volume of 10 μL for 30 minutes. **【Results】** Mango fruit pulp mainly contained three kinds of individual sugars namely fructose, glucose and sucrose, and six kinds of organic acids, namely oxalic acid, tartaric acid, malic acid, ascorbic acid, citric acid and maleic acid; the content of citric acid and ascorbic acid were significantly and positively correlated with the total acid content, while the sucrose content was significantly and positively correlated with the total sugar content in 148 mango germplasm resources. It was found that the tartaric acid, total acid, sugar-acid ratio, fructose, glucose and sucrose content were the main reason of genetic diversity of fruit quality in mango germplasm resources by principal component analysis. According to the composition and contents of fruit sugars, the 148 mango germplasm resources could be divided into four categories at the genetic distance of 2.5 by the cluster analysis. The first category contained 111 accessions of germplasms and the second category had 34 accessions of germplasms, the third category had 2 accessions of germplasms and the fourth category had only 1 accessions of germplasm. According to the composition and contents of fruit acids, the 148 germplasm resources could be divided into four categories at the genetic distance of 5.0, The first category contained 113 accessions of germplasm resources, including 82 accessions of ascorbic acid-accumulating germplasms such as Cuba Sankre, Guifei 1 and Xiaojimang; and 28 accessions of malic acid-accumulating germplasms such as Jinlong, African Elephant and Liuzhou Luzon and Xiaoqingpi, Carrie, and Sandersha Sdg, the second category contained 27 accessions of mango germplasm resources, most of them were citric acid accumulation type, such as Ganhong, Hongmang No.6 and Guangxi No.4, the third category included Bao Zai'an, Zineya No.1, Guangxi No.4, Yuanjiang Ivory, and Dasanian, they did not contain malic acid or had extremely high content of malic acid, the fourth category contained only Amygdalus mango 1030 and Guangxi No.8, they were all ascorbic acid accumulation type. **【Conclusion】** The 148 mango germplasm resources could be divided into sucrose-accumulating type fruits and fructose-accumulating type fruits by the cluster analysis according to the content of sugar components; meanwhile, they could be divided into ascorbic acid-accumulating type fruits, malic acid-accumulating and citric acid type fruits according to the content of acid components. The components and contents of sugars and acids varied greatly with different mango germplasm resources, and the diversity index of each sugar and acid was over 5. The variation ranges of acid components in the fruits of different mango germplasm resources were much larger than those of the sugar components, peculiarly, the variation range of the citric acid was the largest. The content distribution of sugars followed the normal distribution, the acid components followed the normal distribution only in ascorbic acid. The correlation coefficient between the content of citric acid and the content of total acid was the largest; meanwhile, the correlation coefficient between the content of sucrose and the content of total sugar was the largest. The sucrose and citric acid contributed the most to the diversity of the 148 mango germplasms in the present experiment. These results would provide important information for the conservation of mango germplasm resources and the breed-

ing of new mango varieties.

Key words: *Mangifera indica* L.; Germplasm resources; Sugar and acid; Principal component analysis; Genetic diversity

杧果(*Mangifera indica* L.)属漆树科杧果属植物,原产于亚洲东南部的热带地区。我国的杧果种质资源丰富,栽培历史超过1300年^[1]。目前,我国有200多个杧果品种或品系,广泛分布于广西、海南、云南、广东、福建等热带亚热带省份。杧果因汁多味美而有“热带水果之王”的美称,除鲜食外还可以制作成罐头和果酱等。经过十几年的迅速发展,我国已成为世界第二大杧果生产国,同时也是世界最大的杧果消费市场^[2]。

周立等^[3]以广西大学杧果种质资源圃的39份杧果资源为实验材料,发现果实纵径、果实横径、单果质量、可食率及可溶性固形物、可溶性糖和可滴定酸含量是导致杧果种质遗传多样性的主要因子。解德宏等^[4]研究中国怒江流域和澜沧江流域杧果种质资源的果实性状,结果表明,这两个区域杧果种质资源的果实性状存在着丰富的优异性状,部分杧果种质资源可作为选育杧果新品种的亲本材料。刘荣等^[5]利用SRAP标记对13份杧果种质资源进行遗传多样性分析,分析表明Mi-8与桂热芒82号亲缘关系较近,Mi-9与红芒6号亲缘关系较近。

作为重要的果实品质性状因子,果实糖酸组分及其含量直接影响果实的风味和口感,进而决定果品的商品价值。迄今,基于果实糖酸组成及含量分析的果树种质资源遗传多样性研究已取得了一定进展。前人研究发现越橘、番茄、黑穗醋栗、草莓等果实中的主要有机酸均为柠檬酸,其次还含有苹果酸、草酸等有机酸组分^[6]。郭栋梁等^[7]分别对龙眼种质21个数量性状进行相关性研究,结果表明,龙眼果实内在品质性状指标中,蔗糖含量与总糖含量呈极显著正相关,与还原糖含量呈极显著负相关。有研究发现,果实的糖酸含量主要受环境和栽培条件的影响。姜妮等^[8]与石学根等^[9]研究发现:通过在地面上覆膜这种控水方式可以诱发渗透调节机制,使果实中糖分含量增加,但是有机酸积累影响并不明显;在苹果的研究中发现,果实中的可溶性糖含量可以通过施加氮肥来增加,并且氮肥还有利于降低有机酸含量,从而使果实的品质得到改善^[10];童盼盼等^[11]的试验结果表明,较强的光照和

昼夜温差可以提高苹果可溶性糖的含量,利于糖分的积累,有利于糖心的形成。笔者以国家热带果树种质资源圃统一管理下的杧果果实糖酸组成及含量进行评价所收集的种质资源果实糖酸品质性状的多样性,为客观评价和利用及培育新品种提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试的148份杧果种质资源来源于中国热带农业科学院南亚热带作物研究所国家热带果树(杧果)种质资源圃,树龄8 a(年),砧木为粤西一号,在各种种质资源九成熟后,每份种质采集5~10个成熟果实,在24 h内运回实验室,经 $0.213 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的异菌脲表面消毒晾干后贮于相对湿度81%~95%、温度25 °C的条件下任其自然成熟,沿每完熟果实腹缝线两侧上、中、下三个部位分别打直径1 cm的果肉肉柱,深达果核,每重复果肉混合,液氮冷冻后磨成粉装入50 mL离心管,置-40 °C冰箱待测。

1.2 糖的组成及含量的测定

准确称取样品果肉1.0 g加入5 mL 80%乙醇溶液研磨提取,4 °C $10\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心10 min,将上清液转移到15 mL离心管中,残渣分两次各加入2 mL 80%乙醇溶液再提取,上清液合并到15 mL离心管中在90 °C下水浴蒸干,用超纯水定容至10 mL。取1 mL过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜用于高效液相色谱分析。HPLC中示差检测器为RI-1530;流速 $1.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,柱温27 °C,进样量 $10 \mu\text{L}$,测定时间15 min^[12]。

1.3 有机酸含量的测定

准确称取果肉样品0.5 g,用5 mL 0.2%偏磷酸冰浴研磨, $10\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心10 min,取上清液;残渣加入4 mL 0.2%偏磷酸充分洗涤后离心,取上清液;合并上清液,用0.2%偏磷酸定容至10 mL,混匀。取1 mL样品,经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后待测。紫外检测器测定:色谱柱为 C_{18} 柱(250 mm×4.6 mm×5 μm),检测波长为210 nm,流动相为0.2%偏磷酸,流速 $1.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,柱温35 °C,进样量 $10 \mu\text{L}$,检测时间为30 min^[13]。

1.4 数据的处理与分析

总糖含量为各糖组分含量的相加值,总酸含量为各酸组分含量的相加值。用 Excel 2019 计算均值、标准差、变异系数和遗传多样性指数,多样性指数的计算方法采用 Shannon's 信息指数(H'), $H' = -\sum P_i \cdot \ln P_i$, 式中 P_i 表示某性状中第 i 级性状占总份数的百分比;用 SPSS 26.0 对数据进行相关性分析、正态分布检验和主成分分析;用 Origin 2021 绘制聚类系谱图和正态分布图。

2 结果与分析

2.1 杧果果实中糖酸组分及含量分析

所检测的 148 份杧果种质资源中,由表 1 可知,不同糖酸组成的变异系数为 23.46%~88.26%,遗传多样性指数为 5.15~7.17,杧果种质之间糖酸组分的差异明显。最多的品种是秋芒,总酸含量(w , 后同)为 $18.18 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,含量最少的是 Bambaroo, 仅为 $0.78 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,供试验的杧果种质总酸含量平均值为 $5.26 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,遗传多样性指数为 6.87,变异系数为 71.68%。杧果果实酸含量较高的组分是抗坏血酸、柠檬酸和苹果酸,分别占总酸的 43.25%、29.63% 和 19.43%,而草酸、酒石酸和马来酸的含量较低。果实中草酸含量变化范围在 $0.01 \sim 0.25 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,变异系数为 88.26%,遗传多样性指数为 6.69,含量较高的杧果种质资源有泰国生食芒、秋芒、Banganpalli、Valencia Pride 等;苹果酸含量变化范围在 $0.18 \sim 2.85 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,变异系数为 62.54%,遗传多样性指数为 6.89,含量较高的杧果种质资源有扁桃芒、广西八号、四季芒 2 等;柠檬酸含量变化范围在 $1.70 \sim 12.85 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,变异系数为 50.79%,变化幅度最大,遗传多样性指数为 5.15,含量高的杧果种质资源有大三年、秋芒、广西四号、齐内亚 1 号等;酒石酸含量变化范围在 $0.11 \sim 1.27 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,变异系数为 53.58%,含量较高的杧果种质资源有小青皮、齐内亚 2 号、菠萝香芒、Edward;马来酸含量变化范围在 $0.002 \sim 0.040 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,变异系数为 63.70%,遗传多样性指数为 6.54,其中海豹芒的马来酸含量最高。此外,古巴三克里、贵妃 1、红金龙、非洲大象牙、古巴 3 号、苹果芒等 41 份杧果种质资源含柠檬酸而不含酒石酸,而柳州吕

表 1 148 份杧果种质资源果实糖酸组分含量分析
Table 1 Analysis of fruit sugar and acid components among 148 mango germplasm resources

参数 Parameter	w(草酸) Oxalic acid content/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	w(苹果酸) Malic acid content/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	w(抗坏血酸) Ascorbic acid content/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	w(柠檬酸) Citric acid content/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	w(酒石酸) Tartaric acid content/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	w(马来酸) Maleic acid content/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	w(总酸) Total acids content/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	w(果糖) Fructose content/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	w(葡萄糖) Glucose content/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	w(蔗糖) Sucrose content/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	w(总糖) Total sugars content/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	糖酸比 Sugar-acid ratio
最大值 Max	0.25	2.85	10.20	12.85	1.27	0.040	18.18	97.95	100.59	142.55	272.45	187.60
最小值 Min	0.01	0.18	0.04	1.7	0.11	0.002	0.78	1.90	2.74	1.82	4.64	5.44
平均值 Mean	0.06	0.98	2.15	5.39	0.44	0.010	5.26	48.41	28.64	57.67	133.94	42.78
标准差 SD	0.05	0.61	1.80	2.74	0.23	0.010	3.77	14.61	14.80	32.98	31.43	34.53
变异系数 CV/%	88.26	62.54	84.06	50.79	53.58	63.70	71.68	30.17	51.67	57.18	23.26	80.86
多样性指 数 Diversity index	6.69	6.89	6.74	5.15	6.52	6.540	6.87	7.14	7.03	6.93	7.17	6.81

宋、桂香芒、龙眼香芒、金龙、变良2号、圣德龙等104份杧果种质含有酒石酸而不含柠檬酸。

总糖含量的变异范围在 $4.64\sim 272.45\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,变异系数为23.64%,遗传多样性指数为7.17,总糖含量最多的是非洲大象牙($272.45\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$),含量最少的是泰国白花芒(仅 $4.64\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$);葡萄糖含量的变异范围在 $2.74\sim 100.59\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,变异系数为51.67%,遗传多样性指数为7.03,含量较高的有非洲大象牙和小鸡芒,含量分别为 $100.59\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $61.59\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$;蔗糖含量最多的是Chocanon品种,含量为 $142.55\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,而泰国白花芒、Anderson和Julie这3个品种未检测到蔗糖,所测的种质中蔗糖含量变异系数为57.18%,品种间的含量差异较大。

糖酸比是评价果实品质的重要指标,这148份种质之间的糖酸比差异较大,范围在 $5.44\sim 187.60$,平均值为42.78,变异系数为80.86%,遗传多样性指数为6.81,Bambaroo、红芒9号和Turpentin的糖酸比较高,分别为187.60、168.27和167.92。

2.2 杧果果实酸组分的频率分布情况

所检测的杧果种质资源中,由表2和图1可知,抗坏血酸的含量呈正态分布,马来酸和草酸呈非正态分布,其他酸组分呈偏正态分布。在本次测验的148份杧果种质资源中,有73%的杧果种质未检测到柠檬酸,所以样本量不足以进行正态分布检

验^[14]。如表2所示,正态分布检验显示各酸组分的偏度均大于0,说明右侧的高酸的离散程度相比于左侧的低酸的离散程度更大,而抗坏血酸的峰度为-0.67,小于0,说明抗坏血酸含量分布比较离散,而其他组分为正值,含量分布比较集中。杧果种质中苹果酸含量主要分布在20%左右;酒石酸含量主要集中在0%~10%,所占含量低;抗坏血酸含量主要集中在40%~60%,约占总体的36%;草酸含量集中分布在0%~20%,约占总体的74%;马来酸含量最低,主要分布在0%~2%,约占总体的70%。

表2 酸组分含量正态分布检验的偏度和峰度

Table 2 The skewness and kurtosis of the normal distribution test of the acid component content

性状 Trait	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
草酸 Oxalic acid	2.25	5.80
苹果酸 Malic acid	0.90	0.32
酒石酸 Tartaric acid	1.28	2.53
马来酸 Maleic acid	1.66	2.93
抗坏血酸 Ascorbic acid	0.07	-0.67

从总体上看,这些杧果种质的抗坏血酸和苹果酸含量比较高。抗坏血酸是高效的抗氧化剂,能清除体内的一些活性氧基团和自由基,很好地保护细胞免受氧化损害,同时还能增强免疫功能和预防癌症,这使杧果的营养价值得到大大的提高。而苹果

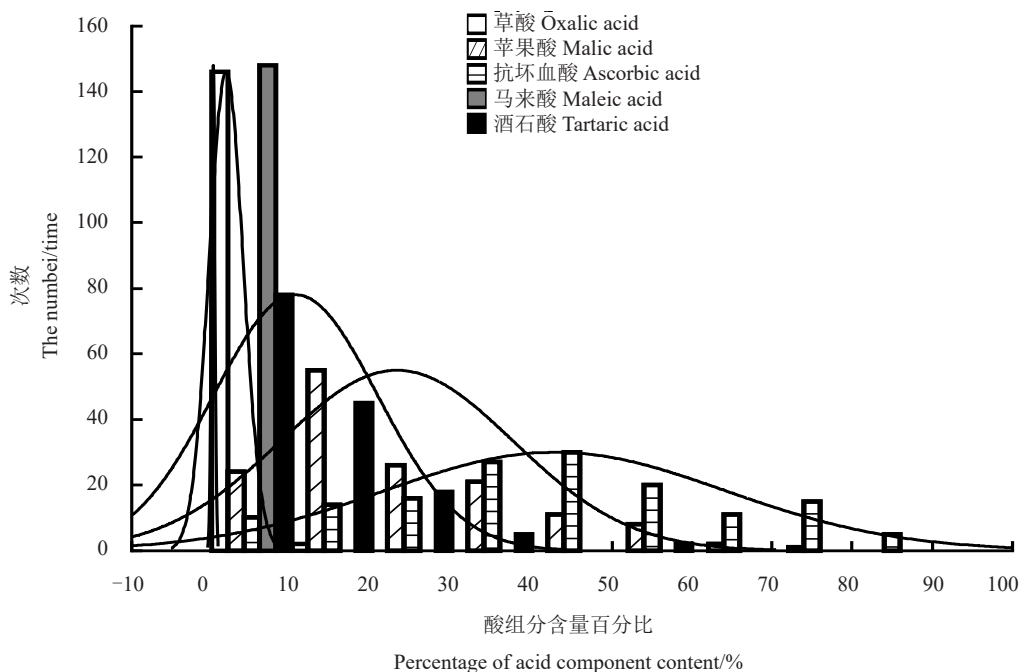


图1 杧果种质资源果实酸组分的频率分布

Fig. 1 Frequency distribution of fruit acid components in mango germplasm resources

酸酸味圆润,微有涩苦,刺激缓慢但持久,有一定的抗褐变作用。

2.3 杧果果实糖组分的频率分布情况

果糖、葡萄糖和蔗糖含量均呈正态分布。如表3和图2所示,正态分布检验所得果糖、葡萄糖和蔗糖含量的偏度分别为0.20、0.53和-0.18,蔗糖的偏度呈负值,说明右侧高糖含量的离散程度比左侧低酸含量的离散程度小,各糖组分的峰值分别为-0.63、-0.01和-0.92,均为负值,说明各糖组分的含量分布比较离散,各品种的糖组分含量差异较大,体现种质之间的多样性。检测的杧果种质中,果糖含量集中分布在30%~40%,占总体的35%;葡萄糖含

量分布在20%~30%的种质资源最多,占供试种质的35%;蔗糖含量主要分布在40%~60%,占总体的35%。这三者中,蔗糖占总糖的百分比最大,说明杧果果实主要积累的是蔗糖,在148份种质中,华坪优选2和Herman这两个品种的蔗糖含量占总糖百分比

表3 糖组分含量正态分布检验的偏度和峰度

Table 3 The skewness and kurtosis of the normal distribution test of the sugar component content

性状 Trait	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
果糖 Fructose	0.20	-0.92
葡萄糖 Glucose	0.53	-0.01
蔗糖 Sucrose	-0.18	-0.63

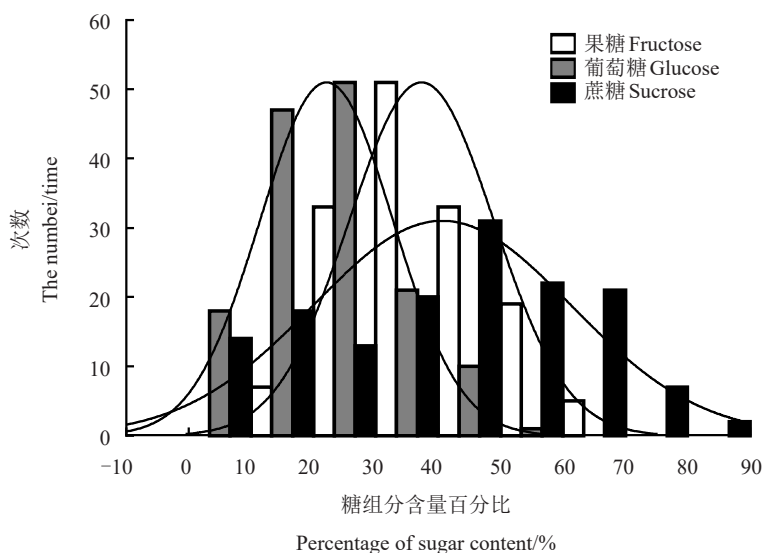


图2 杧果果实糖组分的频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of fruit sugar components in mango germplasm resources

最大,分别为81.07%和80.79%,属于典型的蔗糖积累型品种。

2.4 杧果果实中糖酸组分相关性分析

对所检测的杧果种质资源的糖酸指标进行相关性分析,由表4可看出,供试杧果种质之间存在复杂的相关性。果糖含量与葡萄糖含量相关性最大,相关系数为0.78,此外果糖含量与草酸含量、柠檬酸含量、总酸含量和总糖含量亦呈极显著正相关,而与蔗糖含量呈极显著负相关;葡萄糖含量与草酸含量、苹果酸含量、抗坏血酸含量、柠檬酸含量、总酸含量和总糖含量呈极显著正相关,与蔗糖含量呈极显著负相关,与糖酸比呈显著正相关;蔗糖含量与草酸含量、柠檬酸含量和总酸含量呈极显著负相关,与抗坏血酸呈显著负相关,与总糖含量和糖酸比之间存在

极显著正相关;草酸与酒石酸之间存在极显著正相关,但与抗坏血酸含量的相关性系数为0,说明两者的含量之间并没有相关性,含量互不影响;苹果酸含量与马来酸含量、柠檬酸含量之间存在显著或极显著正相关;酒石酸含量与马来酸含量之间呈极显著正相关,与柠檬酸含量呈极显著负相关。

由上述相关关系可知,杧果果实中果糖的含量随葡萄糖含量的增加而增加,而蔗糖的含量随着葡萄糖和果糖两种还原糖含量的增加而减少。杧果种质中酒石酸含量高的品种,其草酸和马来酸的含量也高;苹果酸含量高的品种,其马来酸和柠檬酸的含量一般也会比较高;柠檬酸含量和抗坏血酸含量与总酸含量之间的相关系数较大,分别为0.84和0.64;蔗糖与总糖之间的相关系数最大,为0.64,说

表4 148份杧果种质糖酸组分相关性

Table 4 Correlation of fruit sugar and acid components in 148 mango germplasm resources

性状 Trait	果糖 Fr	葡萄糖 Gl	蔗糖 Su	草酸 OA	苹果酸 MA	抗坏血酸 AA	马来酸 MAA	柠檬酸 CA	酒石酸 TA	总酸 TAC	总糖 TSC	糖酸比 SAR
果糖 Fr	1											
葡萄糖 Gl	0.78*	1										
蔗糖 Su	-0.40**	-0.48**	1									
草酸 OA	0.25**	0.29**	-0.36**	1								
苹果酸 MA	0.03	0.21**	-0.04	-0.14	1							
抗坏血酸 AA	0.08	0.17*	-0.17*	0.00	0.16	1						
马来酸 MAA	-0.05	0.11	0.12	0.12	0.18*	0.01	1					
柠檬酸 CA	0.22**	0.24**	-0.34**	0.07	0.26**	0.15	-0.04	1				
酒石酸 TA	-0.09	-0.01	0.20*	0.25**	-0.02	-0.03	0.31**	-0.59**	1			
总酸 TAC	0.21**	0.31**	-0.34**	0.06	0.45**	0.64**	0.03	0.84**	-0.38**	1		
总糖 TSC	0.40**	0.32**	0.64**	-0.13	0.07	-0.07	0.15	-0.15	0.16	-0.12	1	
糖酸比 SAR	0.03	0.17*	0.43**	-0.15	-0.44**	-0.57**	-0.10	-0.49**	0.15	-0.71**	0.35**	1

注:**在 0.01 级别(双尾),相关性显著;*在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

Note:**Correlation was significant at level 0.01 (two-tailed); *correlation was significant at level 0.05 (two-tailed).

Fr. fructose; Gl. glucose; Su. sucrose; OA. oxalic acid; MA. malic acid; AA. Ascorbic acid; MAA. maleic acid; CA. Citric acid; TA. Tartaric acid; TAC. total acids content; TSC. Total sugars content; SAR. Sugar-acid ratio.

明总酸的含量很大程度上分别由柠檬酸和抗坏血酸的含量决定,而总糖的含量主要由蔗糖的含量决定。

2.5 杧果果实中糖酸组分主成分分析

主成分分析法已广泛应用于荔枝^[15]、杧果^[16]、杏^[17]、苹果^[18]等种质资源遗传多样性分析。对 148 份杧果种质进行主成分分析,结果如表 5 所示,在分析

表5 148份杧果种质资源果实糖酸主成分分析

Table 5 Analysis of fruit sugar and acid principal components in 148 mango germplasm resources

性状 Trait	PC1	PC2	PC3	PC4
果糖 Fructose	0.21	0.54	-0.10	-0.25
葡萄糖 Glucose	0.27	0.53	0.04	-0.07
蔗糖 Sucrose	-0.34	-0.04	0.51	-0.10
草酸 Oxalic acid	0.11	0.27	-0.38	0.35
苹果酸 Malic acid	0.22	-0.01	0.43	0.12
抗坏血酸 Ascorbic acid	0.29	-0.07	0.21	0.23
马来酸 Maleic acid	-0.01	0.17	0.29	0.45
柠檬酸 Citric acid	0.40	-0.12	0.06	-0.27
酒石酸 Tartaric acid	-0.22	0.24	0.05	0.57
总酸 Total acids content	0.47	-0.10	0.22	-0.02
总糖 Total sugars content	-0.14	0.45	0.46	-0.24
糖酸比 Sugar-acid ratio	-0.41	0.18	-0.10	-0.29
特征值 Characteristic value	3.67	2.09	1.68	1.53
贡献率 Contribution/%	30.61	17.38	14.01	12.77
累计贡献率 Cumulative contribution/%	30.61	47.98	62.00	74.77

过程中提取了特征值大于 1 的四个主成分,其中第一主成分的特征值为 3.67,贡献率达到 30.61%,第二主成分的特征值为 2.09,贡献率达 17.38%。第一主成分和第四主成分特征向量值的绝对值较大的有总酸、糖酸比和酒石酸,特征向量值都大于或等于 0.40,由此可见第一和第四主成分与杧果果实的含糖量关系密切。而第二和第三主成分特征向量值的绝对值较大的有果糖、葡萄糖和蔗糖,所以这两个主成分主要反映的是杧果种质中果实的含糖量。前四个主成分的累计贡献率达到 74.77%,基本能反映指标的大部分信息,可以解释酒石酸、总酸、糖酸比、果糖、葡萄糖和蔗糖含量是造成不同杧果种质之间多样性的主要原因,为杧果种质综合评价提供了一定的依据。

2.6 杧果果实中酸组分聚类分析

对收集的 148 份杧果种质资源的各酸组分和含量进行聚类分析,发现在遗传距离为 5.0 处可将种质分为四大类(图 3)。由图 3 可知第一类所包含的杧果种质最多,有 113 份资源,这一类的杧果种质主要包括古巴三克里、贵妃 1 和小鸡芒等 82 份抗坏血酸积累型品种,金龙、非洲大象牙和柳州吕宋等 28 份苹果酸积累型种质,小青皮、Carrie、Sander-sha Sdg 这 3 份酒石酸积累类型,是所划分的四大类中酸积累类型最多的一类;第二类含有 27 份杧果

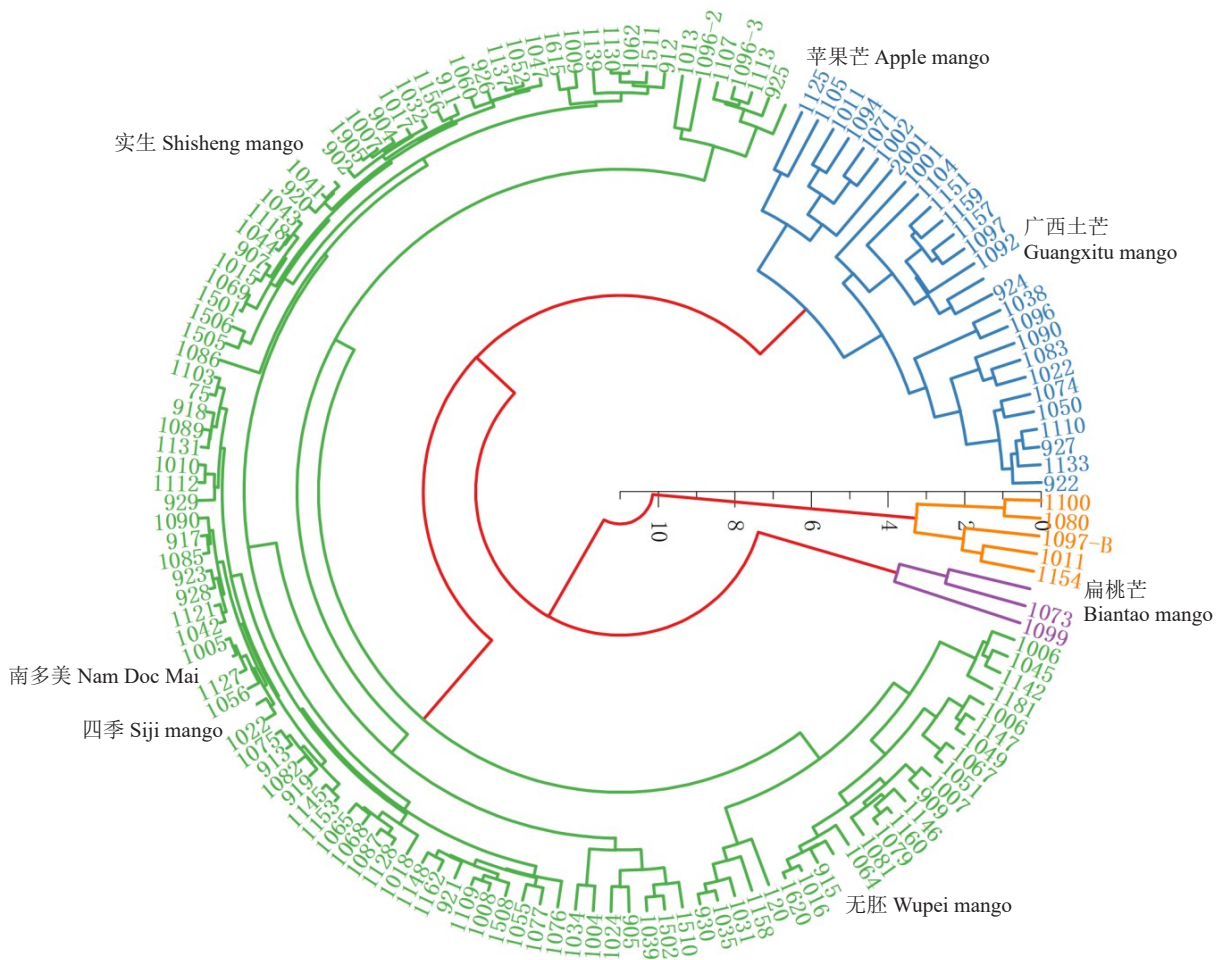


图 3 杧果种质酸组分含量聚类谱系

Fig. 3 Clustering lineage diagram of fruit acid components in 148 mango germplasm resources

种质资源,柠檬酸积累型杧果种质在这一大类中占主要的地位,主要的柠檬酸积累型有甘红、红芒6号和广西四号等;第三类有保仔庵、齐内亚1号、广西四号、元江象牙、大三年这5份杧果种质资源,而这一类的品种不含马来酸或者马来酸含量极低;第四类所包含的杧果种质资源最少,仅有扁桃芒、1030和广西八号这3份种质,这一类杧果种质资源均是抗坏血酸积累型,抗坏血酸的含量比其他种质都要高,其中扁桃芒是所有种质中抗坏血酸含量最高的。

2.7 杧果果实中糖组分聚类分析

所检测的148份杧果种质糖组分聚类分析结果如图4所示。在遗传距离为2.5处可以将148份杧果种质资源按糖组分含量分为四类。第一类含有111份杧果种质,包含的种质数量最多,第二类有34份

杧果种质,第三类有两份杧果种质,第四类含有的杧果种质最少,仅有一份种质。第一类的111份杧果种质中,主要包括的是Chocanon、南多美、华坪优选2和9401等蔗糖积累型杧果种质资源,杧果果实中蔗糖含量对总糖含量的贡献率比较高,所以这一类杧果种质的甜度一般都比较比较高;第二类34份杧果种质资源中,主要是果糖积累型,代表性的种质有泰国吕宋、Peach、海豹芒和桂香芒等;第三类杧果种质有2份,分别是泰国白花芒和Julie,这两份种质含糖量极低,风味较差,后续需要进行品种改良以改善果实的品质;第四类仅有非洲大象牙这1份杧果种质资源,属于葡萄糖积累型品种,其葡萄糖的含量也是这148份杧果种质中最高的。在148份杧果种质中,蔗糖积累型大约占77%,由此可见,杧果以非还原性糖积累型为主。

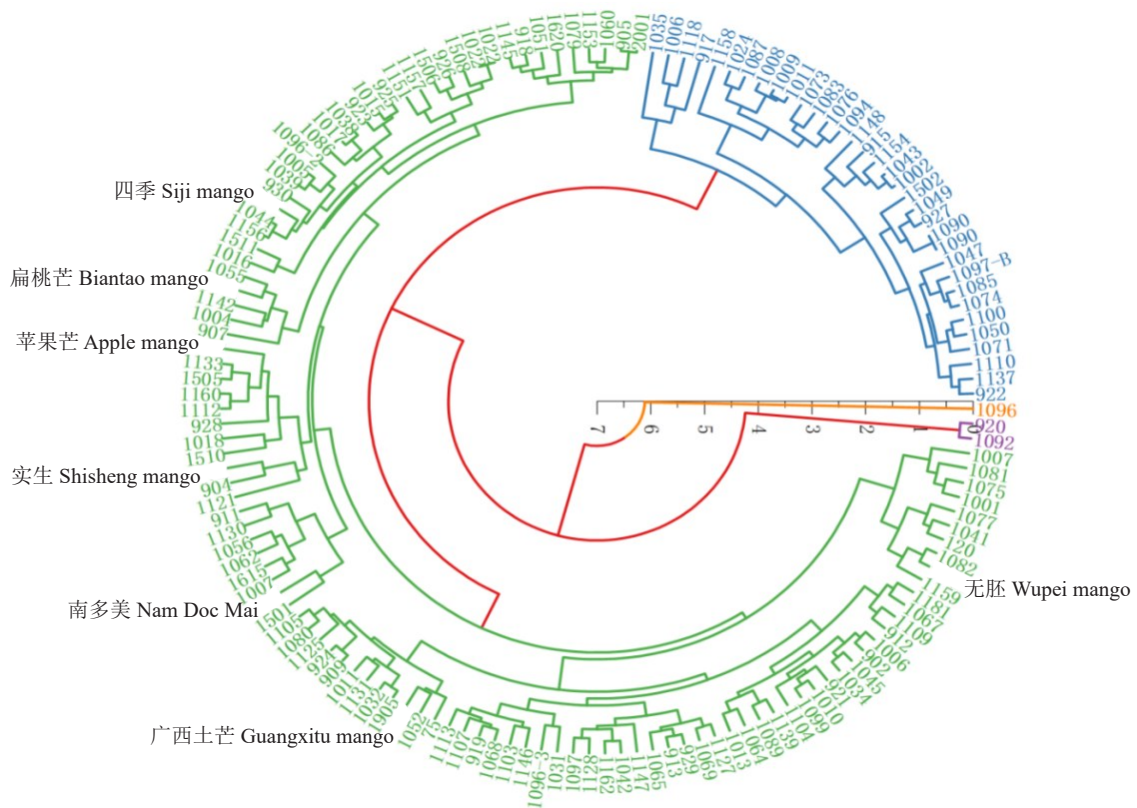


图4 杧果种质糖组分聚类谱系

Fig. 4 Clustering lineage diagram of fruit sugar components in 148 mango germplasm resources

3 讨论

果实糖酸的成分和含量是评价杧果果实品质的重要指标。糖酸组分及含量的不同会造成不同杧果果实品质的差异,也影响果实的风味。主成分分析和聚类分析作为作物品种综合评价较常用的方法,已广泛应用于许多农作物育种研究中^[15-18],现阶段,一些学者已通过聚类及主成分分析法等开展无籽西瓜种质资源遗传多样性的研究,从而为栽培西瓜品种的选育和利用提供理论依据^[19]。本实验的148份杧果种质资源中,积累抗坏血酸和苹果酸的杧果种质占绝大部分。马小卫等^[20]研究发现杨桃果实中可溶性糖以葡萄糖和果糖为主,分别占总糖含量的44%和47%,蔗糖含量很低,占总糖含量的0.08%,本次试验结果表明南多美和华坪优选2等110多份杧果种质为蔗糖积累型;泰国吕宋、海豹芒和桂香芒等34份种质为果糖积累型,仅有非洲大象牙这一份种质为葡萄糖积累型。此外,Bambaroo、红芒9号和Turpentine这三个品种糖酸比最高,因此这三个品种果实成熟时风味浓甜,深受大众喜爱。

相关性分析结果表明,果糖与葡萄糖含量呈显著正相关,相关系数为0.78,蔗糖含量与总糖含量和糖酸比呈极显著正相关,而柠檬酸、苹果酸和抗坏血酸含量则与总酸含量呈极显著正相关,与高贤玉等^[21]对云南10个杧果中糖酸组分的研究结果基本相同;通过主成分分析发现前四个成分累计贡献率达到74.77%,基本可以解析造成不同杧果种质之间多样性的主要原因。第一主成分的特征值为3.67,贡献率达到30.61%,第二主成分的特征值为2.09,贡献率达17.38%。第一主成分和第四主成分特征向量值的绝对值较大的有总酸、糖酸比和酒石酸。而第二和第三主成分特征向量值的绝对值较大的有果糖、葡萄糖和蔗糖;马玉华等^[22]和赵家桔^[23]的研究结果显示,杧果各种质中积累的主要有机酸为苹果酸和柠檬酸,本试验发现在遗传距离为5.0处可按酸组分含量将种质分为四类,第一类包括古巴三克里、贵妃1和小鸡芒等82份抗坏血酸积累型品种,金龙、非洲大象牙和柳州吕宋等28份苹果酸积累型品种和小青皮、Carrie、Sandersha Sdg这3份酒石酸积累类型品种。第二类有甘红、红芒6号和广西四号等

27份柠檬酸积累型品种。第三类有保仔庵、齐内亚1号、广西四号、元江象牙、大三年这5份不含马来酸或马来酸含量极低的类型,最后一类是抗坏血酸含量极高型,仅有扁桃芒、1030和广西八号这3份种质。按糖组分含量划分则在遗传距离为2.5处分为蔗糖含量高、果糖含量高、总糖含量高和总糖含量极低类型;按酸组分含量划分,各种质亲缘关系会比较远。

4 结 论

148份杧果种质资源中,根据果实糖组分的含量主要可划分为蔗糖积累型品种、果糖积累型品种;根据酸组分含量主要可分为抗坏血酸积累型品种、苹果酸积累型品种和柠檬酸积累型品种。且不同品种之间的糖酸组分含量差异较大,各糖酸指标的多样性指数均大于5,本试验的148份杧果种质资源在果实糖酸品质方面有着丰富的遗传多样性。可为今后杧果种质资源收集保存、评价利用和新品种培育提供重要的参考依据。

参考文献 References:

- [1] 马小卫,李丽,武红霞,王松标,姚全胜,詹儒林.不同品种杧果果实品质、糖组分及抗氧化性的分析[J].广东农业科学,2011,38(20):38-39.
MA Xiaowei, LI Li, WU Hongxia, WANG Songbiao, YAO Quansheng, ZHAN Rulin. Analysis of fruit quality, sugar compositions and antioxidant activities of different mango cultivars[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(20):38-39.
- [2] 钟勇,黄建峰,罗睿雄.海南省杧果产业化发展现状、存在问题及对策[J].中国热带农业,2016(3):19-22.
ZHONG Yong, HUANG Jianfeng, LUO Ruixiong. Development status, existing problems and countermeasures of mango industrialization development in Hainan province[J]. Chinese Tropical Agriculture, 2016(3):19-22.
- [3] 周立,罗聪,何堂熹,余海霞,何新华.杧果种质资源果实性状的多样性分析与评价[J].基因组学与应用生物学,2020,39(6):2683-2691.
ZHOU Li, LUO Cong, HE Tangxi, YU Haixia, HE Xinhua. Diversity analysis and evaluation of mango germplasm resources based on fruit traits[J]. Genomics and Applied Biology, 2020, 39(6):2683-2691.
- [4] 解德宏,张翠仙,张永超,尼章光,陈于福,张发明,柏天琦,赵秀华.澜沧江流域杧果种质资源果实性状多样性分析[J].南方农业学报,2018,49(2):214-221.
XIE Dehong, ZHANG Cuixian, ZHANG Yongchao, NI Zhangguang, CHEN Yufu, ZHANG Faming, BAI Tianqi, ZHAO Xihua. Fruit trait diversity of mango (*Mangifera indica* L.) germplasm resources in Lancang River basin[J]. Journal of Southern Agriculture, 2018, 49(2):214-221.
- [5] 刘荣,龚德勇,刘清国,黄海,范建新.基于SRAP分子标记的13份贵州杧果种质资源遗传多样性分析[J].热带作物学报,2019,40(1):87-91.
LIU Rong, GONG Deyong, LIU Qingguo, HUANG Hai, FAN Jianxin. Genetic diversity analysis of thirteen mango germplasm resources based on SRAP molecular markers[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(1):87-91.
- [6] 刘有春,陶承光,魏永祥,刘成,王兴东,刘威生,杨艳敏.越橘果实糖酸含量和不同发育阶段的变化及其与叶片中可溶性糖含量的相关关系[J].中国农业科学,2013,46(19):4110-4118.
LIU Youchun, TAO Chengguang, WEI Yongxiang, LIU Cheng, WANG Xingdong, LIU Weisheng, YANG Yanmin. Fruit sugar and acid content, variation at different fruit development stages and their relationship with leaf soluble sugar content of blueberry[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(19):4110-4118.
- [7] 郭栋梁,王静,黄石连,韩冬梅,李建光.龙眼种质资源果实性状多样性分析[J].广东农业科学,2022,49(1):30-41.
GUO Dongliang, WANG Jing, HUANG Shilian, HAN Dongmei, LI Jianguang. Analysis on fruit character diversity of longan (*Dimocarpus longan* Lour.) germplasm resources[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2022, 49(1):30-41.
- [8] 姜妮,高海文,金龙飞,刘永忠,彭抒昂.地表覆膜对柑橘果实糖积累及蔗糖代谢酶活性的影响[J].中国农业科学,2013,46(2):317-324.
JIANG Ni, GAO Haiwen, JIN Longfei, LIU Yongzhong, PENG Shu'ang. The impact of plastic film mulching on citrus fruit sugar accumulation and sucrose metabolism-related enzymes[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(2):317-324.
- [9] 石学根,陈俊伟,徐红霞,刘春荣,郑江程,吴慧,谢鸣.透湿性反光膜覆盖对椪柑果实品质的影响[J].果树学报,2011,28(3):418-422.
SHI Xuegen, CHEN Junwei, XU Hongxia, LIU Chunrong, ZHENG Jiangcheng, WU Hui, XIE Ming. Effects of vapor-permeable reflective film mulch on fruit quality of Ponkan tangerine[J]. Journal of Fruit Science, 2011, 28(3):418-422.
- [10] 刘丽,王张民,牛慈琼,袁林喜,刘娟桃,刘志奎,李全.土壤施富硒有机肥对‘嘎拉’苹果果实硒含量和品质的影响[J].中国果树,2020(1):27-35.
LIU Li, WANG Zhangmin, NIU Ciqiong, YUAN Linxi, LIU Juantao, LIU Zhikui, LI Quan. Effects of soil applied selenium on selenium content and quality of ‘Gala’ apple fruits[J]. China Fruits, 2020(1):27-35.
- [11] 童盼盼,张亚若,汤蕾,张帅,徐强,王江波.光照和温度条件对富士苹果糖心形成的影响[J].西北农业学报,2020,29(4):579-586.
TONG Panpan, ZHANG Yaru, TANG Lei, ZHANG Shuai, XU Qiang, WANG Jiangbo. Effects of light and temperature on sug-

- ar core formation of Fuji apple[J]. *Acta Agriculture Bureali-occidentalis Sinica*, 2020, 29(4): 579-586.
- [12] 孙涛, 赵子刚, 刘圣红, 古丽斯坦, 刘河疆, 王成. 高效液相色谱法测定鲜枣中糖的组成[J]. *分析仪器*, 2015(1): 38-41.
SUN Tao, ZHAO Zigang, LIU Shenghong, GULI Sitan, LIU Hejiang, WANG Cheng. Determination of saccharides components in fresh jujube by HPLC[J]. *Analytical Instruments*, 2015(1): 38-41.
- [13] 张娥珍, 崔素芬, 辛明, 何全光, 廖芬. HPLC法测定不同种类杧果中10种有机酸的研究[J]. *食品科技*, 2014, 39(3): 276-280.
ZHANG Ezhen, CUI Sufen, XIN Ming, HE Quanguang, LIAO Fen. Determination of 10 organic acid in different kinds of mango by HPLC[J]. *Food Science and Technology*, 2014, 39(3): 276-280.
- [14] 周晓凤. 基于果实糖酸分析的枣种质资源遗传多样性研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2019.
ZHOU Xiaofeng. Genetic diversity reserach based on fruit sugar and acid of jujube germplasm[D]. Alar: Tarim University, 2019.
- [15] WU J F, ZHANG C Y, CHEN J Z, CAI C H, WANG L M, FU D W, QU L X. Morphological diversity within litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) based on leaf and branch traits[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 207: 21-27.
- [16] SHI S, MA X W, XU W, ZHOU Y, WU H, WANG S. Evaluation of 28 mango genotypes for physicocheical characters, antioxidant capacity, and mineral content[J]. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 2015, 88: 264-273.
- [17] 刘硕, 刘宁, 章秋平, 张玉萍, 张玉君, 徐铭, 马小雪, 刘威生. 中国华北和东北地区杏种质资源遗传多样性分析[J]. *园艺学报*, 2019, 46(6): 1045-1056.
LIU Shuo, LIU Ning, ZHANG Qiuping, ZHANG Yuping, ZHANG Yujun, XU Ming, MA Xiaoxue, LIU Weisheng. Genetic diversity of the apricot germplasms from North & Northeast China[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2019, 46(6): 1045-1056.
- [18] 匡立学, 聂继云, 李志霞, 关棣锴, 毋永龙, 闫震, 程扬. 不同苹果品种果实矿质元素含量的因子分析和聚类分析[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(14): 2807-2815.
KUANG Lixue, NIE Jiyun, LI Zhixia, GUAN Dikai, WU Yonglong, YAN Zhen, CHENG Yang. Factor analysis and cluster analysis of mineral elements contents in different apple varieties[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(14): 2807-2815.
- [19] 侯东颖, 苏东涛, 郝科星, 张曼, 张涛, 侯富恩. 基于主成分和聚类分析的无籽西瓜果实性状的综合评价[J]. *中国瓜菜*, 2022, 35(5): 37-41.
HOU Dongying, SU Dongtao, HAO Kexing, ZHANG Man, ZHANG Tao, HOU Fuen. Comprehensive evaluation of fruit characters of seedless watermelon based on principal component and cluster analysis[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2022, 35(5): 37-41.
- [20] 马小卫, 苏穆清, 李栋梁, 郑斌, 邹明宏. 杨桃种质果实品质性状遗传多样性分析[J]. *食品科学*, 2020, 41(17): 68-74.
MA Xiaowei, SU Muqing, LI Dongliang, ZHENG Bin, ZOU Minghong. Genetic diversity of carambola germplasm based on fruit quality[J]. *Food Science*, 2020, 41(17): 68-74.
- [21] 高贤玉, 张发明, 柏天琦, 解德宏, 张翠仙, 张予福, 尼章光, 罗心平. 云南10个杧果栽培品种糖酸组分分析[J]. *中国热带农业*, 2019(5): 54-59.
GAO Xianyu, ZHANG Faming, BAI Tianyi, XIE Dehong, ZHANG Cuixian, ZHANG Yufu, NI Zhangguang, LUO Xinpings. Analysis of sugar and acid components in 10 mango cultivars in Yunnan[J]. *Chinese Tropical Agriculture*, 2019(5): 54-59.
- [22] 马玉华, 马小卫, 武红霞, 周毅刚, 许文天, 王松标. 不同类型杧果果肉类胡萝卜素、香气和糖酸品质分析[J]. *热带作物学报*, 2015, 36(12): 2283-2290.
MA Yuhua, MA Xiaowei, WU Hongxia, ZHOU Yigang, XU Wentian, WANG Songbiao. Analysis of carotenoid, volatile, sugar and organic acid in different types of mango flesh[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2015, 36(12): 2283-2290.
- [23] 赵家桔. 杧果品质构成及其发育规律的研究[D]. 海口: 海南大学, 2010.
ZHAO Jiaju. Study on the development of mango (*Mangifera indica* L.) fruit quality characteristics[D]. Haikou: Hainan University, 2010.