

## 51 份柚类种质果实品质分析与综合评价

毕光林, 陈林杨\*, 杨永智, 李 春, 丰国蕊, 李万云, 孙 英, 李永慧,  
赵东兴\*\*

云南省红河热带农业科学研究所, 云南河口 661300

**摘 要:** 为了分析不同类型柚类种质资源果实品质特点, 建立柚类果实品质的综合评价体系, 本研究测定了 51 份不同类型柚类果实的单果质量、果实纵径、横径、果皮厚度、可食率、可溶性固形物、可滴定酸等品质指标, 并利用相关性分析和主成分分析法对果实品质进行综合评价。结果表明: 果实纵径为 64.00~191.00 mm, 横径为 76.00~170.90 mm, 果形指数为 0.82~1.35, 单果质量为 220.00~1750.00 g, 果皮质量为 50.00~996.00 g, 可食率为 19%~81%, 果皮厚度为 4.00~39.67 mm, 囊瓣数为 10~20, 可溶性固形物为 4.50%~10.90%, 可滴定酸为 0.13%~2.96%, 固酸比为 2.70~41.70, 种子数为 0~224 粒, 可见, 云南省河口柚子种质资源的表型多样性丰富。采用 Pearson 法对其主要品质特性进行相关性分析发现, 纵径与果形指数、单果质量呈显著正相关, 横径与单果质量、果皮质量呈极显著正相关, 可食率与果皮厚度、可滴定酸与固酸比呈显著负相关; 聚类分析得出, 这些柚类种质大致分为 4 类, 每个类群在果实外观和内在品质方面均存在较大差异。利用主成分分析法将 13 个性状分成 4 个主成分因子: 第 1 主成分贡献率为 31.614%, 以果实形态为主, 纵径、横径、单果质量、果皮质量贡献较大; 第 2 主成分贡献率为 16.842%, 可食率、可溶性固形物、囊瓣数贡献较大; 第 3 主成分贡献率为 15.397%, 可滴定酸贡献较大; 第 4 主成分贡献率为 14.686%, 种子数量等贡献较大。经过果实品质分析与综合评价, 云青 1 号、青皮红心柚、黄金蜜柚、瑄溪红肉蜜柚、东试早柚和晚白柚为综合品质优异的种质资源, 可优选作为云南河口主栽品种或育种亲本材料。

**关键词:** 柚; 果实品质; 主成分分析; 聚类分析; 综合评价

中图分类号: S666.3 文献标志码: A

## Analysis and Comprehensive Evaluation of Fruit Quality of 51 Pomelo Germplasms

BI Guanglin, CHEN Linyang\*, YANG Yongzhi, LI Chun, FENG Guorui, LI Wanyun, SUN Ying,  
LI Yonghui, ZHAO Dongxing\*\*

Honghe Tropical Agricultural Sciences Institute, Hekou, Yunnan 661300, China

**Abstract:** The study determined quality indexes including single fruit mass, longitudinal and transverse fruit diameter, peel thickness, edible rate, soluble solids and titratable acid of 51 pomelo accessions to analyze the fruit quality characteristics of different pomelo germplasm resources and establish a comprehensive evaluation system. Correlation analysis and principal component analysis were employed to comprehensively evaluate the fruit quality. The fruit longitudinal diameter ranged from 64.00 to 191.00 mm, with transverse diameter measured between 76.00 and 170.90 mm. Fruit shape index values varied from 0.82 to 1.35, while single fruit mass spanned 220.00 to 1750.00 g. Peel mass was recorded between 50.00 and 996.00 g, with edible rates from 19% to 81%. Peel thickness measurements showed variation from 4.00 to 39.67 mm. Segment number per fruit was 10–20, soluble solids content ranged 4.50%–10.90%, and titratable acid level was 0.13%–2.96%. The solid-acid ratio

收稿日期 2025-04-01; 接受日期 2025-07-10

基金项目 云南省院士(专家)工作站项目(No. 202305AF150145); 云南省高层次科技人才及创新团队选拔专项(No. 202405AD-350031); 云南省红河热带农业科学研究所青年人才成长基金项目(No. HHS2024003)。

作者简介 毕光林(1993—), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 柑橘种质资源评价及应用; \*同等贡献作者: 陈林杨(1984—), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 资源收集评价及应用。\*\*通信作者(Corresponding author): 赵东兴(ZHAO Dongxing), E-mail: dongxingzhao11@126.com。

varied between 2.70 and 41.70, with number of seeds ranging from 0 to 224. It indicated that the phenotypic diversity of pomelo germplasm resources in Hekou, Yunnan was rich. Pearson correlation analysis revealed that longitudinal diameter exhibited significant positive correlations with fruit shape index and single fruit mass. Transverse diameter showed extremely significant positive correlations with single fruit mass and peel mass. Significant negative correlations were observed between edible rate and peel thickness, titratable acid and solid acid ratio. Cluster analysis grouped the resources into approximately four categories, with each group displaying substantial difference in both external appearance and internal quality. By principal component analysis (PCA), the 13 traits were integrated into 4 principal components, and the contribution rate of the first principal component was 31.614%. The longitudinal diameter, transverse diameter, single fruit mass and peel mass contributed more. The contribution rate of the second principal component was 16.842%, which was based on edible percentage, number of segments and soluble solid. The contribution rate of the third principal component was 15.397%, and the contribution rate of titratable acid was larger. The contribution rate of the fourth principal component was 14.686%, which was based on the number of seeds. After fruit quality analysis and comprehensive evaluation, Yunqing 1, Green peel and red flesh Pomelo, Huangjin pomelo, Guanxi red flesh pomelo, Dongshizao Pomelo, and Wanbai Pomelo demonstrated superior comprehensive quality and were recommended as candidate materials for main cultivars or breeding parents in Hekou, Yunnan.

**Keywords:** pomelo; fruit quality; principal component analysis; cluster analysis; comprehensive evaluation

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.11.009

柑橘属包括香橼（枸橼）、橘（宽皮橘）和柚 3 大基本物种。柚 [*Citrus maxima* (Burm.) Merr.] 作为其中之一，是甜橙、柠檬等栽培品种的主要来源<sup>[1]</sup>。中国云南是柚的起源地与遗传多样性分布中心，栽培历史逾 4000 a，现存种质资源丰富多样。研究表明，柚的遗传多样性源于长期自然选择，其从起源中心向次生多样性中心（如日本、印度、东南亚等地区）扩散分布，在此过程中，柚不断发生遗传分化，形成陆地性系统与海洋性系统<sup>[2]</sup>。张太平等<sup>[3]</sup>推测柚的起源原始祖先很可能是大翼橙。HUANG 等<sup>[2]</sup>通过对中国和东南亚的 290 个柚种质全基因组测序，进一步揭示柚的起源与进化历程，支持云南起源假说，并发现红河大翼橙和柚的亲缘关系，证实了其扩散形成多个次级多样化中心的过程。当前国内市场柚主要品种包括沙田柚、东试早柚（水晶蜜柚）、琯溪蜜柚（三红蜜柚）、文旦柚和玉环柚等<sup>[4]</sup>。我国柚品种结构不断变化，地方优良品种不断被发掘，红心柚在市场上异军突起，红肉琯溪蜜柚是白肉的芽变品种，在此基础上选育出的三红柚也得到迅速推广<sup>[5]</sup>。云南地区凭借其独特的地理位置和气候条件，拥有丰富多样的种质资源，随着柚类资源在云南不断被发掘，如东试早柚是云南本土选育品种，已逐渐形成了一个特殊的柚资源区域<sup>[5-6]</sup>。目前，研究人员已在滇南收集到的野生、半野生及农家品种等云南地方特色柚类资源开展了遗传多样性研究<sup>[6]</sup>，并从国内外引进了大量种质资源，为柚类资源的科学保护和创新发展奠定了基础。陈璞等<sup>[7]</sup>初步建立了柚类 25

个数量性状的分级指标，对品种评价、利用及良种选育具有指导意义。唐帅等<sup>[8]</sup>建立了一种冰糖橙果实品质综合评价量化模型。王贵元等<sup>[9]</sup>筛选出适合荆州栽培的柚品种为玉环柚和琯溪蜜柚。鉴于柚生长具有地域性，地理气候条件差异导致同一品种在不同地区（或不同品种在同一地区）出现显著表型差异。目前，针对收集到的柚种质资源在云南河口县独特热带湿热季风气候的品质表现，尚缺乏系统比较研究，因此，在该地区对不同柚类种质资源的果实品质进行评价具有重要意义。

本研究以栽培于云南河口的 51 份柚类种质资源为材料，测定其果实外观品质指标（单果质量、纵经、横径、果形指数等）和内在品质（可食率、可溶性固形物、可滴定酸、固酸比、种子数等），分析各供试柚种质资源的果实品质特征，此外，通过相关性分析、主成分分析等多种分析方法，明确指标间的相互关系，并对供试种质资源进行果实品质综合评价，旨在筛选优异种质，为后期云南河口柚类适栽品种选择及种质创新提供相关依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

在云南省红河热带农业科学研究所特色热带果树柚河口种质资源圃（103°52'E，22°34'N；海拔 75 m）选取 51 份长势良好的 7~8 a 生的柚种质资源为试验材料，供试柚种质资源具体信息见表 1。试验地属热带雨林季风气候，全年气温为

表 1 51 份供试柚种质资源信息  
Tab. 1 Information on 51 tested pomelo germplasm resources

| 序号<br>No. | 种质<br>Germplasm | 来源<br>Origin      | 序号<br>No. | 种质<br>Germplasm | 来源<br>Origin    |
|-----------|-----------------|-------------------|-----------|-----------------|-----------------|
| 1         | 强德勒柚            | 美国                | 27        | 胡柚              | 中国浙江省常山县青石乡澄潭村  |
| 2         | 沙暹柚             | 中国                | 28        | 梁平柚             | 中国重庆市梁平县        |
| 3         | 红宝石柚            | 泰国                | 29        | 五步红心柚           | 中国重庆市巴县五步乡      |
| 4         | 黄金蜜柚            | 中国福建省             | 30        | THANHLA         | 越南              |
| 5         | 龙安柚             | 中国四川省广安市广安区龙安乡群策村 | 31        | 三红蜜柚            | 中国福建省平和县        |
| 6         | 泉州文旦柚           | 中国福建省泉州市          | 32        | 实生青柚            | 中国              |
| 7         | 晚白柚             | 中国福建省             | 33        | 越南大果白柚          | 越南              |
| 8         | 下河蜜柚            | 中国福建省云霄县下河乡下河村    | 34        | 越南小果白柚          | 越南              |
| 9         | 坪山柚             | 中国福建省漳州市华安县新圩镇黄枣村 | 35        | 东风柚             | 中国云南省西双版纳州景洪市   |
| 10        | 东试早柚            | 中国云南省西双版纳州景洪市     | 36        | 刘铭顾青柚           | 中国云南省红河州河口县     |
| 11        | 龙柚 1 号          | 中国福建省漳州市芗城区       | 37        | 有核青皮红心柚         | 中国云南省红河州河口县     |
| 12        | 福鼎四季柚           | 中国福建省福鼎市          | 38        | 无核青皮红心柚         | 中国云南省红河州河口县     |
| 13        | 琯溪红肉蜜柚          | 中国福建省漳州市平和县       | 39        | 云青 1 号          | 中国云南省红河州河口县     |
| 14        | 漳州柚             | 中国福建省漳州市          | 40        | 泽拉青皮红心柚         | 越南              |
| 15        | 小甜柚             | 中国                | 41        | HB 柚            | 中国福建省漳州市平和五寨    |
| 16        | 琯溪白肉蜜柚          | 中国福建省漳州市平和县       | 42        | 青皮红心柚           | 中国云南河口汇友公司      |
| 17        | 四季柚             | 中国浙江省温州市苍南县马站镇    | 43        | 考雅              | 中国云南省西双版纳州景洪市   |
| 18        | 沙田柚             | 中国广西壮族自治区玉林市容县沙田村 | 44        | 蜂蜜香             | 中国云南省西双版纳州景洪市   |
| 19        | 桔柚              | 中国                | 45        | 早熟沙田柚           | 中国广西壮族自治区玉林市沙田村 |
| 20        | 彭州柚             | 中国四川省彭州市          | 46        | 桥头红心柚           | 中国云南省红河州河口县桥头乡  |
| 21        | 越南红柚            | 越南                | 47        | 金香柚             | 中国湘西            |
| 22        | 本地红柚            | 中国云南省红河州河口县       | 48        | 胶杯厂红心柚          | 中国云南河口胶杯厂地方野生种  |
| 23        | 白蜂蜜柚            | 泰国                | 49        | 暹罗红柚            | 泰国              |
| 24        | 火焰葡萄柚           | 美国                | 50        | 台湾柚             | 中国              |
| 25        | 高浦柚             | 泰国                | 51        | 台湾红肉柚           | 中国              |
| 26        | 金堂绿柚            | 中国四川省成都市金堂县       |           |                 |                 |

7.9~40.9 ℃（平均温度 22 ℃），年平均降雨量为 1780 mm，有效积温为 6300 ℃，年日照时数为 1605 h，年均相对湿度为 85%。试验地为砂壤土，土壤全氮平均含量约为 1.1 g/kg，水解氮为 81.4 mg/kg，有效磷平均含量约为 54.77 mg/kg，速效钾平均含量约为 191.3 mg/kg。

1.2 方法

2022—2024 年，连续 3 a 对供试柚单果质量、果实横径、纵径、果形指数、果皮厚度、囊瓣数、种子数进行测定，方法依据《柑桔鲜果检验方法》《植物新品种特异性、一致性和稳定性测试指南柑橘》《柑橘种质资源描述规范》<sup>[10-12]</sup>，用电子分析天平（梅特勒 ML6002T/02，精度 0.01 g）测

定单果质量，用数显游标卡尺（苏测 0.01 mm）测定果实横纵径和果皮厚度，计算果形指数。用日本爱拓糖酸度计（型号为 PAL-BX|ACID）测定可溶性固形物、可滴定酸含量。取样方法：每个种质选择 3 株生长状况一致的植株作为生物学重复，每株于树冠外围中部随机选取向阳面健康果实 3 个，每个种质共 9 个重复果实样本。

1.3 数据处理

计算每个种质各指标的 3 a 平均值作为分析数据，并使用 Excel 软件对数据进行整理，并计算平均值、标准差、变异系数。利用 SPSS 27 软件进行显著性分析、主成分分析，采用 Origin 软件进行相关性分析和聚类分析。

2 结果与分析

2.1 果实外观品质指标

云南河口柚类种质资源果实外观品质特征呈现显著多样性。具体表现：果皮颜色包含绿色（青皮红心柚、红宝石柚、越南白柚）、绿黄色（福鼎四季柚、桔柚、小甜柚、晚白柚、白峰蜜柚）、淡黄色（龙柚 1 号、沙田柚、三红蜜柚、考雅、蜂蜜香）、黄色（坪山柚、强德勒柚、本地红柚、福建漳州柚、台湾红肉蜜柚、胡柚、金堂绿柚、五步红心柚）、橙色（琯溪蜜柚、东试早柚、金香柚、黄金柚、东风柚、沙田柚、台湾柚）和红色（暹罗红、越南红柚）等多样化特征；果肉颜色涵盖白色（晚白柚、THANHLA、梁平柚、越南白柚、琯溪白肉蜜柚、东试早柚）、淡绿（金堂绿柚）、黄白（龙柚 1 号、考雅、金香柚）、橙黄色（黄金柚、台湾柚）、粉红色（云青 1 号、青皮红心柚、强德勒柚、福鼎四季柚）、浅红（本地红柚、下河蜜柚、四季柚）、红色（暹罗红、琯溪红肉蜜柚、越南红柚、台湾红肉蜜柚、泉州文旦柚、福建漳州柚、胶杯厂红心柚、红宝石柚）、玫瑰红色（三红蜜柚）、紫红色（火焰葡萄柚）等多样化类型；果实形状包含

倒卵形（东试早柚、琯溪蜜柚、晚白柚等）、梨形（红宝石柚、沙田柚等）、高扁圆形（梁平柚、坪山柚、金堂绿柚等）、扁圆形（火焰葡萄柚）、球形/近球形（青柚、强德勒柚等）、卵圆形（福建漳州柚、考雅、蜂蜜香）、扁圆锥形（金堂绿柚、龙柚 1 号）、椭圆形（金香柚），其中，青皮红心柚具典型绿皮粉红肉特征，红宝石柚绿皮密被白色茸毛，成熟后果肉呈现深红色泽。红宝石柚具明显矮颈特征，早熟沙田柚果蒂长颈分化明显。

51 份柚类种质资源的果实纵径范围为 64.00~191.00 mm，横径为 76.00~170.90 mm，单果质量为 220.00~1750.00 g，果皮质量为 50.00~996.00 g，囊瓣数为 10~20。供试柚种质资源果实的果形指数在 0.82~1.35 之间，果形以球形和倒卵形居多。果形指数小于 0.9 时果形通常为扁圆形，果形指数为 1 时果形近球形，果形指数大于 1 时为高扁圆形、倒卵形或梨形，果形大多呈卵圆形。果皮厚度为 4.00~39.67 mm。一些桔柚或葡萄柚品种果皮较薄，易于剥离，方便食用，较厚的果皮有助于保护果实免受病虫害和机械损伤，但在一定程度上会影响果实的可食率（表 2）。

表 2 51 份柚种质资源果实外观品质多样性分析  
Tab. 2 Diversity analysis of 51 pomelo germplasm resources for fruit extrinsic quality

| 性状<br>Parameter | 最小值<br>Minimum value | 最大值<br>Maximum value | 平均值<br>Average value | 标准差<br>Standard deviation | 变异系数<br>Variable coefficient/% |
|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------------|
| 纵径/mm           | 64.00                | 191.00               | 143.40               | 21.77                     | 15                             |
| 横径/mm           | 76.00                | 170.90               | 142.58               | 17.16                     | 12                             |
| 果形指数            | 0.82                 | 1.35                 | 1.01                 | 0.11                      | 11                             |
| 单果质量/g          | 220.00               | 1750.00              | 1133.82              | 300.68                    | 27                             |
| 果皮质量/g          | 50.00                | 996.00               | 431.44               | 155.33                    | 36                             |
| 果皮厚度/mm         | 4.00                 | 39.67                | 16.33                | 5.50                      | 34                             |
| 囊瓣数             | 10                   | 20                   | 14.65                | 2.19                      | 15                             |

2.2 果实内在品质指标

由表 3 可知，不同柚类种质资源果实可食率为 0.19%~0.81%，可溶性固形物位于 4.50%~10.90%之间，变异系数为 16%；可滴定酸为 0.13%~2.96%，变异系数达 60%；固酸比在 2.70~41.7 之间，变异系数为 58%；种子数为 0~224 粒。云南河口供试柚果肉质有脆嫩、柔软之分，东试早柚果肉脆嫩多汁，口感爽脆；青皮红心柚脆嫩化渣，口感脆甜；三红蜜柚汁胞柔软多汁，清甜微酸；红宝石柚果肉相对柔软，化渣性较好，

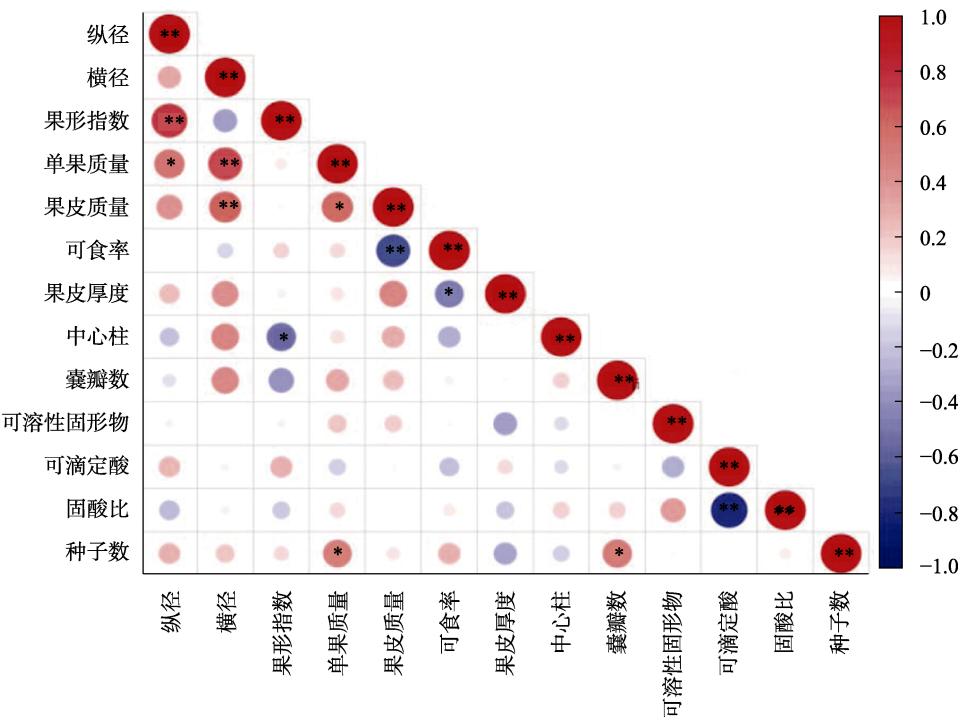
水分充足。琯溪蜜柚、黄金柚酸甜可口，果肉质地与细胞结构、细胞壁成分以及果胶含量等因素有关。果肉风味以小甜柚为纯甜品种，沙田柚较甜，柚（实生）口感酸，其余多数品种口感酸甜。大多柚种质表现为多籽（100 粒以上）。

2.3 相关性分析

采用 Pearson 法对河口资源圃柚种质资源的主要植物学特征及品质特性进行相关性分析（图 1），结果表明，纵径与果形指数呈极显著正相关，与单果质量呈显著正相关；横径与单果质量、果

表 3 51 份柚种质资源果实内在品质的多样性分析  
Tab. 3 Diversity analysis of fruit intrinsic quality of 51 pomelo germplasm resources

| 性状<br>Trait | 最小值<br>Minimum value | 最大值<br>Maximum value | 平均值<br>Average value | 标准差<br>Standard deviation | 变异系数<br>Variable coefficient/% |
|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------------|
| 可食率/%       | 19                   | 81                   | 62                   | 10                        | 17                             |
| 种子数         | 0                    | 224                  | 107.48               | 46.54                     | 43                             |
| 可溶性固形物/%    | 4.50                 | 10.90                | 8.71                 | 1.42                      | 16                             |
| 可滴定酸/%      | 0.13                 | 2.96                 | 0.83                 | 0.50                      | 60                             |
| 固酸比         | 2.70                 | 41.70                | 13.53                | 7.89                      | 58                             |



\*表示显著相关 ( $P<0.05$ ), \*\*表示极显著相关 ( $P<0.01$ )。  
\* indicates significant correlation ( $P<0.05$ ), \*\* indicates extremely significant correlation ( $P<0.01$ ).

图 1 不同种质柚果实品质性状相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of fruit quality traits of different germplasms

皮质量呈极显著正相关；果形指数与中心柱呈显著负相关；单果质量与果皮质量、种子数呈显著正相关；果皮质量与可食率呈极显著负相关；可食率与果皮厚度呈显著负相关；囊瓣数与种子数呈显著正相关；可滴定酸与固酸比呈极显著负相关。

2.4 不同品种柚果实主成分分析及综合评价

对不同品种柚果实品质的 13 个指标进行主成分分析，结果如表 4 所示。将不同种质柚果实品质指标划分为若干主成分，以特征值>1 为标准提取到 4 个主成分，累计方差贡献率达 78.539%，第 1 主成分特征值为 4.110，方差贡献率为 31.614%，以果实形态指标为主，主要是纵径、横

径、单果质量、果皮质量；第 2 主成分特征值为 2.189，方差贡献率为 16.842%，主要是可食率、可溶性固形物为主；第 3 主成分特征值为 1.872，方差贡献率为 15.397%，主要是可滴定酸；第 4 主成分特征值为 1.519，方差贡献率为 14.686%，主要是种子数。

2.5 果实品质综合评价

将柚类 13 个内在品质指标，即  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$ 、 $X_8$ 、 $X_9$ 、 $X_{10}$ 、 $X_{11}$ 、 $X_{12}$ 、 $X_{13}$  分别为纵经、横径、果形指数、单果质量、果皮质量、可食率、果皮厚度、中心柱直径、囊瓣数、可溶性固形物、可滴定酸、固酸比、种子数，以特征向量为权重，得到 4 个主成分的函数表达式：

表 4 云南河口 51 份柚种质果实品质主成分分析  
Tab. 4 Principal component analysis of fruit quality of 51 pomelo germplasm samples in Hekou, Yunnan

| 项目<br>Item | 主成分 1<br>PCA1 | 主成分 2<br>PCA2 | 主成分 3<br>PCA3 | 主成分 4<br>PCA4 |
|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 纵径         | 0.815         | 0.092         | 0.363         | -0.353        |
| 横径         | 0.860         | -0.003        | 0.049         | 0.372         |
| 果形指数       | 0.248         | 0.144         | 0.434         | -0.791        |
| 单果质量       | 0.889         | 0.251         | 0.042         | 0.077         |
| 果皮质量       | 0.822         | -0.491        | -0.030        | -0.015        |
| 可食率        | -0.199        | 0.846         | 0.118         | 0.071         |
| 果皮厚度       | 0.638         | -0.645        | 0.146         | 0.092         |
| 中心柱        | 0.059         | 0.113         | 0.235         | 0.522         |
| 囊瓣数        | 0.498         | 0.459         | -0.009        | 0.167         |
| 可溶性固形物     | 0.326         | 0.437         | -0.180        | -0.340        |
| 可滴定酸       | -0.341        | -0.132        | 0.813         | 0.034         |
| 固酸比        | 0.430         | 0.230         | -0.752        | -0.065        |
| 种子数        | 0.250         | 0.473         | 0.388         | 0.221         |
| 特征值        | 4.110         | 2.189         | 1.872         | 1.519         |
| 贡献率/%      | 31.614        | 16.842        | 15.397        | 14.686        |
| 累计贡献率/%    | 31.614        | 48.456        | 63.853        | 78.539        |

$F_1=0.402X_1+0.424X_2+0.122X_3+0.439X_4+0.405X_5-0.098X_6+0.315X_7+0.059X_8+0.246X_9+0.161X_{10}-0.168X_{11}+0.212X_{12}+0.123X_{13};$

$F_2=0.062X_1-0.002X_2+0.097X_3+0.170X_4-0.332X_5+0.572X_6-0.436X_7+0.113X_8+0.310X_9+0.295X_{10}-0.089X_{11}+0.155X_{12}+0.320X_{13};$

$F_3=0.265X_1+0.036X_2+0.317X_3+0.031X_4-0.022X_5+0.086X_6+0.107X_7+0.235X_8-0.007X_9-0.132X_{10}+0.594X_{11}-0.550X_{12}+0.284X_{13};$

$F_4=-0.286X_1+0.302X_2-0.642X_3+0.062X_4-0.012X_5+0.058X_6+0.075X_7+0.522X_8+0.135X_9-0.276X_{10}+0.028X_{11}-0.053X_{12}+0.179X_{13}。$

由 4 个主成分的因子得分，各项指标数据进行标准化处理，代入 4 个主成分得分函数（ $F_1\sim F_4$ ），可计算得出各主成分得分（表 5）。根据各主成分方差贡献率的权重，以此构建柚果实内在品质综合评价模型，则综合得分公式为：  
 $F=(0.316F_1+0.168F_2+0.144F_3+0.117F_4)/0.745。$

表 5 51 份柚种质在云南河口品质性状主成分得分和综合评价得分  
Tab. 5 Principal component scores and comprehensive evaluation scores of quality traits of 51 pomelo germplasms in Hekou, Yunnan

| 种质 Germplasm | $F_1$  | $F_2$  | $F_3$  | $F_4$  | $F$   | 排名 Ranking |
|--------------|--------|--------|--------|--------|-------|------------|
| 云青 1 号       | 3.351  | 1.972  | -0.927 | 3.070  | 2.169 | 1          |
| 青皮红心柚        | 2.142  | 1.392  | 0.988  | -0.588 | 1.321 | 2          |
| 黄金蜜柚         | 1.253  | 1.278  | 3.783  | -1.925 | 1.249 | 3          |
| 三红蜜柚         | 0.118  | 3.600  | 1.134  | 0.922  | 1.227 | 4          |
| 琯溪红肉蜜柚       | 2.112  | 0.172  | 0.257  | -0.154 | 0.960 | 5          |
| 晚白柚          | 4.823  | -2.556 | -2.918 | 0.083  | 0.917 | 6          |
| 东试早柚         | 2.003  | -0.100 | -0.198 | 0.588  | 0.881 | 7          |
| 蜂蜜香          | 0.802  | -0.046 | 1.642  | 1.264  | 0.845 | 8          |
| 台湾红肉柚        | 1.233  | 1.446  | -0.633 | 0.286  | 0.772 | 9          |
| 刘铭顾青柚        | 1.379  | -0.062 | 1.369  | -0.541 | 0.750 | 10         |
| 下河蜜柚         | 1.075  | 1.180  | 0.303  | -0.403 | 0.718 | 11         |
| 暹罗红柚         | 0.359  | -1.454 | 2.022  | 2.498  | 0.606 | 12         |
| 彭州柚          | 1.150  | 2.222  | -2.092 | 0.095  | 0.601 | 13         |
| 有核青皮红心柚      | 1.136  | 0.347  | -0.283 | 0.492  | 0.583 | 14         |
| 泽拉青皮红心柚      | 1.029  | -0.595 | 1.094  | 0.438  | 0.582 | 15         |
| 红宝石柚         | 1.473  | 0.250  | 0.044  | -0.802 | 0.564 | 16         |
| 高浦柚          | -0.025 | 1.634  | 0.302  | 0.241  | 0.455 | 17         |
| 越南小果白柚       | 0.419  | 0.471  | 0.062  | 0.734  | 0.411 | 18         |
| 实生青柚         | 0.050  | 0.135  | 1.109  | 0.922  | 0.410 | 19         |
| 无核青皮红心柚      | 0.253  | -0.590 | 2.655  | -0.754 | 0.369 | 20         |
| 台湾柚          | 1.474  | -0.253 | 0.007  | -2.020 | 0.252 | 21         |
| 沙田柚          | 1.192  | 1.774  | -1.802 | -2.146 | 0.222 | 22         |
| 越南红柚         | 0.474  | -0.247 | -0.451 | 0.650  | 0.160 | 23         |
| 早熟沙田柚        | 0.828  | 1.016  | -1.519 | -1.145 | 0.108 | 24         |

续表 5 51 份柚种质在云南河口品质性状主成分得分和综合评价得分  
Tab. 5 Principal component scores and comprehensive evaluation scores of  
quality traits of 51 pomelo germplasms in Hekou, Yunnan (continued)

| 种质 Germplasm | F <sub>1</sub> | F <sub>2</sub> | F <sub>3</sub> | F <sub>4</sub> | F      | 排名 Ranking |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|------------|
| 泉州文旦柚        | 0.921          | -1.428         | -0.559         | 0.758          | 0.079  | 25         |
| 本地红柚         | 0.134          | 0.196          | 0.311          | -1.054         | -0.004 | 26         |
| 坪山柚          | 1.498          | -2.351         | -0.047         | -0.649         | -0.007 | 27         |
| THANHLA      | -0.210         | 0.379          | -0.225         | 0.245          | -0.008 | 28         |
| 四季柚          | 3.427          | -5.993         | 0.118          | -0.968         | -0.030 | 29         |
| 龙安柚          | -0.279         | 1.019          | -0.529         | -0.338         | -0.043 | 30         |
| HB 柚         | -0.157         | 1.440          | -2.524         | 0.744          | -0.112 | 31         |
| 福鼎四季柚        | 0.245          | -1.032         | 0.492          | -0.608         | -0.130 | 32         |
| 越南大果白柚       | -0.613         | 0.757          | -0.920         | 0.813          | -0.139 | 33         |
| 小甜柚          | 0.289          | -1.386         | -0.727         | 1.080          | -0.162 | 34         |
| 白蜂蜜柚         | -1.166         | -0.461         | -0.055         | 2.474          | -0.221 | 35         |
| 强德勒柚         | -1.536         | -1.143         | 1.287          | 2.498          | -0.269 | 36         |
| 沙暹柚          | -1.180         | 0.328          | 0.728          | 0.0350         | -0.280 | 37         |
| 梁平柚          | -1.132         | 0.810          | -0.318         | 0.439          | -0.289 | 38         |
| 五步红心柚        | -2.271         | 0.363          | 3.749          | -0.845         | -0.290 | 39         |
| 东风柚          | -0.280         | -0.463         | 0.221          | -2.333         | -0.546 | 40         |
| 胡柚           | -0.777         | 0.059          | -1.690         | 0.612          | -0.547 | 41         |
| 火焰葡萄柚        | -0.869         | 0.346          | -0.068         | -1.731         | -0.575 | 42         |
| 桔柚           | -1.145         | 0.094          | -0.533         | -0.183         | -0.596 | 43         |
| 琯溪白肉蜜柚       | -1.009         | 0.367          | -0.296         | -1.414         | -0.624 | 44         |
| 考雅           | -0.202         | -0.344         | -0.779         | -2.125         | -0.647 | 45         |
| 彰州柚          | -1.606         | -0.820         | -0.464         | 1.587          | -0.707 | 46         |
| 桥头红心柚        | -3.153         | -1.218         | 1.720          | 1.113          | -1.106 | 47         |
| 胶杯厂红心柚       | -2.864         | 0.587          | -1.217         | -0.557         | -1.404 | 48         |
| 金香柚          | -4.338         | -0.554         | -0.985         | -0.618         | -2.252 | 49         |
| 金堂绿柚         | -6.027         | 0.225          | -0.790         | -0.525         | -2.740 | 50         |
| 龙柚 1 号       | -5.805         | -2.760         | -1.846         | -0.258         | -3.483 | 51         |

主成分分析可以将多个品质指标简化为几个主要的综合指标，从而直观地比较不同品种间的品质差异。以上模型可计算出各品种主成分的综合得分，结果表明，综合得分较高的是云青 1 号、青皮红心柚、黄金蜜柚、三红蜜柚、琯溪红肉蜜柚、晚白柚、东试早柚，品质分析排名结果与实际感官分析情况基本一致。该品质分析结果可在实际生产中结合树势、产量等指导当地适栽柚类品种的选择、引种与品种选育和改良。

聚类分析则根据品质特征的相似性将品种进行分类，有助于筛选出具有相似优良品质特征的品种群，为种质资源的分类管理、品种选育和开发利用提供参考。本研究将 51 份柚种质资源在云南河口的内在品质指标和外在品质指标进行标准化处理，使用组间联接的树状图进行聚类分析，

将其划分为 4 个特征类群（图 2）。各类群在果实大小、形状、品质等方面差异显著。

第 1 类近球形，中等果形，呈圆形或扁圆形，具有高酸度、部分高可溶性固形物含量及可食率，风味浓郁酸甜适口。包含金香柚、东风柚、五步红心柚、梁平柚、越南红柚、沙田柚、桔柚、考雅、火焰葡萄柚、胡柚、下河蜜柚。

第 2 类果实纵径较长呈高圆形，果形指数较高，中大果形，肉质脆嫩多汁，包含四季柚、汇友青柚、漳州柚、青皮红心柚、金堂绿柚、暹罗红、云青 1 号、琯溪红肉蜜柚、琯溪白肉蜜柚。

第 3 类为果实梨形或倒卵形，果形适中，风味酸甜适中平衡，包含较多种类，有龙柚 1 号、越南大果白柚、坪山柚、泉州文旦柚、白蜂蜜柚、泽拉青皮红心柚、黄金蜜柚、蜂蜜香、有核青皮



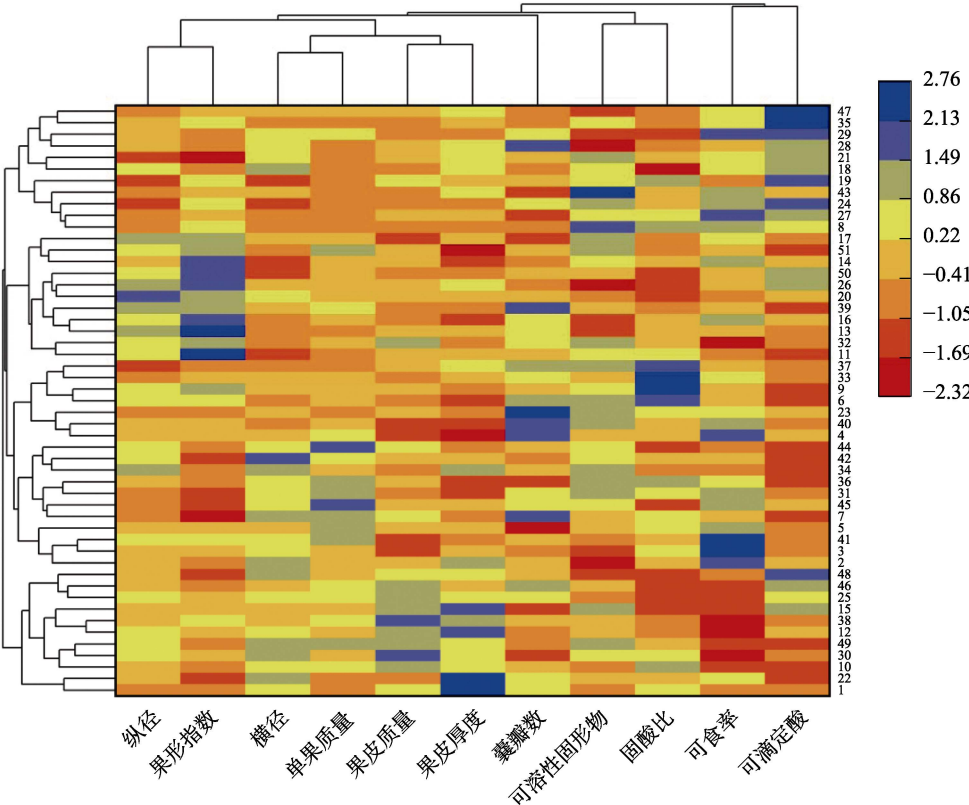


图 2 51 份柚类种质在云南河口聚类分析热图  
Fig. 2 Heatmap of cluster analysis of 51 pomelo germplasm in Hekou, Yunnan

红心柚、越南小果白柚、刘铭顾青柚、三红蜜柚、晚白柚、HB 柚、实生青柚、红宝石柚、沙暹柚。

第 4 类为果皮厚、质地较粗糙等特征，包含胶杯厂红心柚、桥头红心柚、高浦柚、小甜柚、无核青皮红心柚、福鼎四季柚、台湾柚、THANH LA、东试早柚、本地红柚、强德勒柚。

3 讨论

云南作为全国柑橘特色产区<sup>[13]</sup>，柚产业发展前景广阔、市场潜力巨大。柚类种质资源有着丰富的表型多样性<sup>[14]</sup>，其果实品质的形成，除受生态条件、土壤养分、管理水平等因素影响外，品种自身的遗传特性起着决定性作用<sup>[15]</sup>。品种是影响果实品质的关键因素，而果实品质的优劣又直接影响品种的筛选和推广<sup>[16]</sup>。作为环境与基因共同作用的结果，果实品质是决定市场竞争力的关键，也是良种选育和果品评价的重要依据。本研究着眼于探讨不同柚类种质自身遗传特性对其果实品质的影响，研究收集的 51 份柚种质资源均集中保存于云南省红河热带农业科学研究所资源圃。得益于统一的管理条件（如气候、栽培管理

条件等），样本间的环境差异得以控制。为最大限度减少单一年份环境波动（如极端气候）的偶然性影响，本研究采用 3 a 平均值作为各项品质指标进行分析。这一方法较稳定地反映了种质本身的固有特性，使得所观测到的果实品质差异主要归因于种质遗传特性的差异。因此，本研究结果能较好地反映云南河口地区栽培柚类种质的品质状况，对云南地区柚类品种的适地适栽筛选及育种材料的选择具有实际指导意义。

果实外观品质一般包括果实大小、果实形状，果皮颜色及光泽度、果皮厚度、剥皮难易程度及果实整齐度等<sup>[1]</sup>。本研究选用的 51 份国内外柚种质资源在果实外观品质上表现出丰富的多样性，果皮颜色涵盖绿色、绿黄、淡黄、橙黄至红色等。果肉颜色则包括浅橙、黄色、白色、粉红或红色等。其中红色果肉因富含番茄红素而备受青睐<sup>[2, 4]</sup>。果形指数范围在 0.82~1.35 之间，果实形态多样，包括高扁圆形、球形、倒卵形或梨形等。果形指数 <0.9 时通常为扁圆形（如葡萄柚）等；果形指数为 1 时果形近球形（如青柚）等，果形较端正；果形指数 >1 为高扁圆形，如琯溪蜜柚、沙田柚，



倒卵形(如东试早柚)或梨形(如红宝石柚)。此外,金香柚为椭圆柱形,红宝石柚具明显矮颈特征,早熟沙田柚果蒂长颈分化明显。果实内在品质则包括甜酸风味、质地、香气、色泽及囊瓣化渣性、可食率和维生素 C 等,这些指标是衡量其营养价值和食用品质的关键依据<sup>[1]</sup>。可溶性固形物含量作为评价柑橘内部品质的重要指标之一,对口感的影响显著,它与可滴定酸含量的比值(固酸比)可以用来评价果实的甜酸风味,本研究可溶性固形物大于 10% 的有云青 1 号、三红蜜柚、早熟沙田柚、下河蜜柚。固酸黄金比例为 18~25,固酸比较高的柚种质有云青 1 号,青皮红心柚、三红蜜柚、黄金柚、琯溪红肉蜜柚。本研究 51 份柚类种质品质与其他地区的报道存在差异,可能与云南河口独特的湿热热带季风气候(高温高湿、昼夜温差较小)显著影响柚类果实品质如糖酸等有关。在云南河口地区,云青 1 号等青柚表现为脆嫩化渣,东试早柚纯正清甜细腻,三红蜜柚汁胞柔软多汁,清甜微酸,而红宝石柚果肉相对柔软,化渣性较好,水分充足。琯溪蜜柚、黄金蜜柚等呈现酸甜可口的风味。

变异系数是衡量数据离散程度的重要指标,能够评估单一数据集内的变异性及跨数据集的变异程度。本研究 51 份柚种质在云南河口单果质量变异系数达 27%,果皮厚度差异达 34%,显著高于邓素枫等<sup>[17]</sup>报道的湖南柚类资源变异水平(单果质量的变异系数为 18.4%),充分表明了这些柚种质资源果实具有较高的表型多样性。云南柚种质呈现更高水平的表型多样性及更显著的生态适应性差异,可能与其所处的独特湿热热带气候环境有关,高温高湿环境可能加速了柚类的表型分化,也可能源于其作为起源中心的遗传分化背景<sup>[6]</sup>。不同地理来源和类型的柑橘性状存在差异,宽皮柑橘种质资源<sup>[18]</sup>及印度柚子品种<sup>[19]</sup>均表现出较高的表型多样性。云南柚种质资源可能主要源自本土演化,具有较高的遗传多样性与遗传分化程度。这与云南作为柚类起源中心特殊遗传背景密切相关。HUANG 等<sup>[2]</sup>基于基因组研究表明,云南柚种质在向东南亚扩散过程中产生了丰富的遗传分化,本研究通过表型数据进一步支持了这一结论。

主成分分析(PCA)结合聚类分析能有效区分不同柚种质果实品质特性,为主栽品种或育种亲本选择提供依据。李先信等<sup>[20]</sup>对 47 个湖南柚

类品种资源的 37 个花器官和果实形态学性状进行了主成分分析,为湖南柚类种质的合理开发利用和柚类种质多指标数量分类提供科学依据。张慧艺等<sup>[21]</sup>利用层次分析法对 18 份胡柚种质果实品质进行综合评价,筛选出 5 份综合品质优异的种质。赵东兴等<sup>[22]</sup>通过对 47 份青皮红心柚果实农艺性状进行综合分析,明确了种质间差异并筛选出优良种质用于选育和生产。邓素枫等<sup>[17]</sup>评价了湖南 30 个柚品种(资源)果实品质,基于主成分综合得分筛选出慈利金香柚、早熟高糖香柚 3 号等综合品质较优的品种。在孟加拉国, Bog-6、Din-29 和 Pab-42 等柚品种因兼顾高可溶性固形物与适中果形而表现突出<sup>[23]</sup>。陶星星等<sup>[16]</sup>以 10 份柚种质为材料,测定单果质量、可滴定酸等 9 项指标并结合相关性与主成分(PCA)综合评价,认为桂柚 1 号和沙田柚可作为梅州市柚的优良育种亲本。本研究通过主成分(PCA)将 13 项品质指标降维为 4 个主成分,构建了基于纵径、横径、单果质量等外观指标和可溶性固形物、可滴定酸等内在指标的综合评价模型。与传统单一指标评价相比,该方法更综合系统地反映了柚果实品质的多维特征。本研究的相关性分析发现,柚类品种主要果实性状间存在显著关联,如可食率与果皮厚度呈显著负相关、可滴定酸与固酸比呈显著负相关等,这与卢华琼等<sup>[24]</sup>的研究结果较为一致。可滴定酸越高则固酸比越低,也与李俭等<sup>[25]</sup>关于 8 个柚品种的研究结果,单果质量与果形指数呈极显著正相关,皮厚与可食率、可滴定酸与固酸比呈极显著负相关相符。聚类分析则根据品质特征的相似性对品种进行分类,有助于筛选具有相似优良品质特征的品种群,为种质资源的分类管理、品种选育和开发利用提供参考。陈竹生等<sup>[26]</sup>根据单果质量将 23 个品种划分为大、中、小果型;张太平等<sup>[27]</sup>按成熟期分为特早熟至晚熟 4 类,按风味分为甜、甜酸、酸 3 类;曹立新<sup>[28]</sup>利用 43 个形态学性状对 18 个柚资源聚类分为 6 组;刘勇等<sup>[29]</sup>建立的评价体系主要由沙田柚、文旦柚及杂种柚品种群组成。本研究采用聚类分析将 51 份云南河口柚种质资源分为 5 个类群,各类群在果实形状大小、单果质量、内在品质等方面均表现出显著差异特征。后续研究可进一步利用 SSR<sup>[30-31]</sup>、SRAP<sup>[32]</sup>等分子标记对这些资源进行遗传多样性分析和鉴定。

本研究收集的 51 份柚类种质在云南河口表

现出的丰富表型多样性,为种质创新与品种改良提供宝贵的遗传基础。种质资源是植物改良的基础,通过对广泛的材料进行性状表现观察分析,了解性状的多样性、相关性及其遗传规律,进而指导新品种培育。本研究首次系统评价收集的柚类种质资源在云南河口的表现,结合主成分分析与综合得分,成功筛选出云青 1 号等青柚优良种质,该种质在云南河口表现出显著优势,具有相对高可溶性固形物(>10%)与低酸特性,高固酸比和适中的可食率;其果肉清甜细嫩、脆嫩化渣的特征与感官评价较一致。同时,其绿皮红肉的外观新颖独特,深受消费者青睐,符合市场需求,具有作为主栽品种推广的潜力。综上所述,本研究不仅明确了不同柚类种质在云南河口地区果实品质上的差异,更筛选出一批具有实际应用前景的优良种质,这些种质为适应云南河口当地湿热气候提供材料基础,有望实现一定的产业应用规模,同时也为中国柚类育种及产业的发展提供宝贵的资源,为打造云南高原柑橘特色产区、促进云南柚产业的可持续发展奠定基础。

## 参考文献

- [1] 邓秀新,彭抒昂.柑橘学[M].北京:中国农业出版社,2013.
- [2] DENG X X, PENG S A. Citrus science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013. (in Chinese)
- [3] HUANG Y, MAKUMRAI W, FU J L, DENG C L, WU Q J, WANG S H, WANG L, WU X X, GAO J Y, CHEN C W, GUO L N, CHEN P, WU F F, DENG X X, WANG X, XU Q. Genomic analysis provides insights into the origin and divergence of fruit flavor and flesh color of pummelo[J]. The New Phytologist, 2025, 245(1): 378-391.
- [4] 张太平,彭少麟.柚的起源、演化及分布初探[J].生态学杂志,2000(5): 58-61, 66.
- [5] ZHANG T P, PENG S L. Origin, evolution and distribution of pomelo[J]. Chinese Journal of Ecology, 2000(5): 58-61, 66. (in Chinese)
- [6] 邓秀新.中国柑橘品种[M].北京:中国农业出版社,2023.
- [7] DENG X X. Citrus varieties in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2023. (in Chinese)
- [8] YU H W, YANG X M, GUO F, JIANG X L, DENG X X, XU Q. Genetic diversity and population structure of pummelo (*Citrus maxima*) germplasm in China[J]. Tree Genetics & Genomes, 2017, 13: 1-10.
- [9] 刘慧宇.云南柚类种质资源的遗传多样性分析[D].武汉:华中农业大学,2017.
- [10] LIU H Y. Genetic diversity analysis of pomelo germplasm resources in Yunnan[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [11] 陈璞,徐振江,江东,易静,苏穆清,邓超,饶得花.柚类种质资源 DUS 测试数量性状分级研究[J].果树学报,2024(9): 1885-1902.
- [12] CHEN P, XU Z J, JIANG D, YI J, SU M Q, DENG C, RAO D H. Classification study on quantitative characteristics of pomelo germplasm resources for DUS test[J]. Journal of Fruit Science, 2024(9): 1885-1902. (in Chinese)
- [13] 唐帅,易自力,李娜,谢一顾,邓子牛,李立志.冰糖橙果实品质综合评价量化模型的建立及应用[J].果树学报,2018(7): 889-897.
- [14] TANG S, YI Z L, LI N, XIE Y G, DENG Z N, LI D Z. A quantitative model for the comprehensive evaluation of the fruit quality of the Bingtang sweet orange[J]. Journal of Fruit Science, 2018(7): 889-897. (in Chinese)
- [15] 王贵元,倪丽.荆州地区 6 个柑橘品种成熟期果实品质的比较[J].天津农业科学,2014,20(1): 99-101.
- [16] WANG G Y, NI L. Comparative of the fruit quality of six varieties of citrus in the Jinzhou area[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2014, 20(1): 99-101. (in Chinese)
- [17] 广西出入境检验检疫局.柑桔鲜果检验方法:20020316-T-424[S].北京:中国标准出版社,2011.
- [18] Guangxi Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau. Inspection methods for fresh citrus fruits: 20020316-T-424[S]. Beijing: China Standard Press, 2011. (in Chinese)
- [19] 全国植物新品种测试标准化技术委员会.植物新品种特异性、一致性和稳定性测试指南 柑橘:NY/T 2435—2013[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [20] National Technical Committee for Standardization of New Plant Variety Testing. Specificity, consistency and stability testing guidelines for new plant varieties of citrus: NY/T 2435—2013[S]. Beijing: China Standard Press, 2014. (in Chinese)
- [21] 全国植物新品种测试标准化技术委员会.柑橘种质资源描述规范:NY/T 2930—2016[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [22] National Technical Committee for Standardization of New Plant Variety Testing. Specification for the description of citrus germplasm resources: NY/T 2930—2016[S]. Beijing: China Standard Press, 2017. (in Chinese)
- [23] 伊华林,刘慧宇.我国柑橘品种分布特点及适地适栽品种选择探讨[J].中国果树,2022(1): 1-7.
- [24] YI H H, LIU H Y. Discussion characteristics of citrus varieties and selection of varieties suitable for planting in China[J]. China Fruits, 2022(1): 1-7. (in Chinese)

- [14] 胡安华, 窦万福, 祁静静, 雷天刚, 陈善春, 邹修平, 彭爱红, 许兰珍, 姚利晓, 何永睿, 李强. 柚类种质资源表型多样性分析及综合评价[J]. 分子植物育种, 2020, 18(2): 650-664.
- HU A H, DOU W F, QI J J, LEI T G, CHEN S C, ZOU X P, PENG A H, XU L Z, YAO L X, HE Y R, LI Q. Phenotypic diversity analysis and comprehensive evaluation of pomelo germplasms[J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(2): 650-664. (in Chinese)
- [15] 鲍江峰, 夏仁学, 邓秀新, 彭抒昂, 刘永忠, 马湘涛, 张红艳. 湖北省纽荷尔脐橙果实品质状况的研究[J]. 武汉植物学研究, 2005(6): 583-587.
- BAO J F, XIA R X, DENG X X, PENG S A, LIU Y Z, MA X T, ZHANG H Y. Research on the fruit quality of newhall navel orange of Hubei province[J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 2005(6): 583-587. (in Chinese)
- [16] 陶星星, 刘蕊, 谭烨欢, 曾莎芮, 周芬. 梅州市不同柚种质资源果实品质分析[J]. 果树资源学报, 2024, 5(6): 39-42.
- TAO X X, LIU R, TAN Y H, ZENG S R, ZHOU F. Fruit quality analysis of different pomelo germplasm resources in Meizhou city[J]. Journal of Fruit Resources, 2024, 5(6): 39-42. (in Chinese)
- [17] 邓素枫, 廖炜, 龚碧涯, 李先信, 曾斌, 杨水芝. 湖南 30 个柚类品种(资源)果实品质分析与评价[J]. 中国南方果树, 2021, 50(3): 36-41, 45.
- DENG S F, LIAO W, GONG B Y, LI X X, ZENG B, YANG S Z. Fruit quality analysis and evaluation of 30 pomelo varieties (resources) in Hunan[J]. South China Fruits, 2021, 50(3): 36-41, 45. (in Chinese)
- [18] 孙珍珠, 李秋月, 王小柯, 赵婉彤, 薛杨, 冯锦英, 刘小丰, 刘梦雨, 江东. 宽皮柑橘种质资源表型多样性分析及综合评价[J]. 中国农业科学, 2017, 50(22): 4362-4383.
- SUN Z Z, LI Q Y, WANG X K, ZHAO W T, XUE Y, FENG J Y, LIU X F, LIU M Y, JIANG D. Comprehensive evaluation and phenotypic diversity analysis of germplasm resources in mandarin[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(22): 4362-4383. (in Chinese)
- [19] SINGH S K, SINGH I P, SINGH A, PARTHASARATHY V A. Pummelo [*Citrus grandis* (L.) Osbeck] diversity in India[J]. Indian Journal of Plant Genetic Resources, 2015, 28(1): 44-49
- [20] 李先信, 杨迎花, 邹学校, 邓子牛. 湖南柚类种质的数量分类与主成分分析[J]. 浙江农业学报, 2013, 25(6): 1243-1249.
- LI X X, YANG Y H, ZOU X X, DENG Z N. Numerical taxonomy and principal component analysis of pummelo germplasm in Hunan province[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2013, 25(6): 1243-1249. (in Chinese)
- [21] 张慧艺, 汪丽霞, 吴伊静, 毕旭灿, 王刚, 赵四清, 徐昌杰, 陈昆松. 18 份胡柚种质果实品质分析与综合评价[J]. 果树学报, 2024, 41(6): 1033-1043.
- ZHANG H Y, WANG L X, WU Y J, BI X C, WANG G, ZHAO S Q, XU C J, CHEN K S. Fruit quality analysis and comprehensive evaluation of 18 Huyou (*Citrus changshanensis*) accessions[J]. Journal of Fruit Science, 2024, 41(6): 1033-1043. (in Chinese)
- [22] 赵东兴, 岳建伟, 赵志昆, 杨永智, 陈林杨, 陈鸿洁, 李春, 张荣琴, 毕光林. 47 份青皮红心柚果实农艺性状的综合分析与优异种质筛选[J]. 果树学报, 2022, 39(9): 1553-1561.
- ZHAO D X, YUE J W, ZHAO Z K, YANG Y Z, CHEN L Y, CHEN H J, LI C, ZHANG R Q, BI G L. Comprehensive analysis of fruit agronomic traits of 47 pomelos with green skin and red pulp as well as screening of excellent germplasm[J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(9): 1553-1561. (in Chinese)
- [23] ARA N, BASHAR M K, UDDIN M K, KHALEQUZZAMAN K M. Evaluation of pummelo, *Citrus grandis* L. cultivars in northern area of Bangladesh[J]. Journal of Agricultural Research, 2008, 46(1): 65-75.
- [24] 卢华琼, 苏智先. 部分柚类品种主要果实性状变异及相关性研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(12): 220-222.
- LU H Q, SU Z X. Variation and correlation research of main fruit characters of pummelo cultivars[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(12): 220-222. (in Chinese)
- [25] 李俭, 周小娟, 钟灶发, 游晓商, 吴昱, 彭婷. 南康不同柚子品种果实品质分析[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(14): 216-219.
- LI J, ZHOU X J, ZHONG Z F, YOU X S, WU Y, PENG T. Fruit quality analysis of different grapefruit varieties in Nankang[J]. Anhui Agricultural Science, 2019, 47(14): 216-219. (in Chinese)
- [26] 陈竹生, 陈全友, 江才伦, 吴云伦, 郭天池, 聂华堂, 计玉, 甘俊新. 二十三个柚品种特性评价[J]. 中国柑桔, 1993, 22(2): 3-7.
- CHEN Z S, CHEN Q Y, JIANG C L, WU Y L, GUO T C, NIE H T, JI Y, GAN J X. Characterization of twenty-three pomelo varieties[J]. China Citrus, 1993, 22(2): 3-7. (in Chinese)
- [27] 张太平, 彭少麟, 王峥峰, 陈碧琛. 柚类种质资源研究与保护概况[J]. 生态科学, 2001, 20(3): 8-13.
- ZHANG T P, PENG S L, WANG Z F, CHEN B C. Overview of research and conservation of pomelo germplasm resources[J]. Ecological Science, 2001, 20(3): 8-13. (in Chinese)
- [28] 曹立新. 江西省广丰县柚资源调查与马家柚起源分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- CAO L X. The investigation of pomelo germplasms and the

- origin analysis of Majiayou in Guangfeng, Jiangxi province[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [29] 刘勇, 刘德春, 吴波, 孙中海. 利用 SSR 标记对中国柚类资源及近缘种遗传多样性研究[J]. 农业生物技术学报, 2006(1): 90-95.
- LIU Y, LIU D C, WU B, SUN Z H. Genetic diversity of pummelo and their relatives based on SSR markers[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2006(1): 90-95. (in Chinese)
- [30] 汪奇. 我国柚品种(系)选育分析及海南柚种质资源收集、鉴定与初步评价[D]. 海口: 海南大学, 2021.
- WANG Q. Breeding analysis of pomelo varieties (lines) in China and collection, identification and preliminary evaluation of pomelo germplasm resources of Hainan[D]. Haikou: Hainan University, 2021. (in Chinese)
- [31] 陈巍, 郭秀珠, 黄品湖, 徐文荣, 林绍生. 浙南柚类地方资源遗传多样性分析和鉴定[J]. 植物遗传资源学报, 2012, 13(4): 643-646.
- CHEN W, GUO X Z, HUANG P H, XU W R, LIN S S. Genetic diversity analysis and identification of pummelo germplasms in southern Zhejiang province[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2012, 13(4): 643-646. (in Chinese)
- [32] CORAZZA-NUNES M J, MACHADO M A, NUNES W M, CRISTOFANI M, TARGON M L. Assessment of genetic variability in grapefruits (*Citrus paradisi* Macf.) and pummelos (*C. maxima* (Burm.) Merr.) using RAPD and SSR markers[J]. Euphytica, 2002, 126: 169-176.