

基于PCA分析和聚类分析的柑橘果实品质综合评价

张伟清, 林媚*, 王天玉, 孙立方, 冯先橘, 姚周麟, 徐程楠, 王玥

(浙江省柑橘研究所, 浙江台州 318020)

摘要:【目的】研究不同柑橘品种(系)的品质特性,并建立果实品质的综合评价方法。【方法】分别采用离子色谱法和高效液相色谱法测定柑橘果实糖、酸组分及含量,并采用常规方法测定果实理化品质、总黄酮含量、总酚含量等,通过相关性分析、PCA分析及热图聚类分析对果实品质进行综合评价。【结果】甜橙类、7个杂柑及火焰葡萄柚以己糖(葡萄糖和果糖)和蔗糖共同积累、宽皮柑橘类积累蔗糖为主,而莱檬积累己糖为主。春香以积累苹果酸为主,其余品种为柠檬酸。甜橙类果实维生素C含量高于杂柑,而宽皮柑橘类果实总黄酮和总酚含量均普遍高于甜橙类和莱檬,其中青瓯柑和茶枝柑果皮的总黄酮和总酚含量均较高。应用抗氧化能力综合评价法得到排名前3的依次为清峰、青瓯柑和媛小春。PCA分析得到5个主成分,累计方差贡献率为85.120%,并建立综合评价模型。【结论】PCA分析结合热图聚类分析将33个品系(株系)聚为6类,其中第4类的兴津60、媛小春、明日见杂柑果实品质最佳。两者结合分析可系统、科学地综合评价柑橘品质的优劣,同时直观地呈现数据结果,为柑橘品种结构调整、新品种选育及功能性成分的开发利用提供理论依据。

关键词:柑橘;果实品质;PCA分析;聚类分析;综合评价

中图分类号:S666

文献标志码:A

文章编号:1009-9980(2023)05-0902-17

Comprehensive evaluation of citrus fruit quality based on principal component and cluster analysis

ZHANG Weiqing, LIN Mei*, WANG Tianyu, SUN Lifang, FENG Xianju, YAO Zhoulin, XU Chengnan, WANG Yue

(Zhejiang Citrus Research Institute, Taizhou 318020, Zhejiang, China)

Abstract: 【Objective】 Fruit quality of citrus, including color, size and shape, easiness of peeling, seedlessness, flavor and nutritional value, is important to determine the market competitiveness of citrus. However, fruit quality shows great diversity among different citrus varieties. Therefore, objective, accurate and scientific analysis and evaluation of citrus fruit quality play an important role in facilitating breeding work. At present, most studies on the evaluation of citrus fruit quality depends upon conventional methods. To investigate the quality traits of 33 citrus varieties (strains) in the germplasm resource nursery, contents of sugars, acids, total flavonoids, and total phenols were quantified, and the antioxidant capacity of these citrus varieties (strains) were also examined. Then, these data were analyzed through multiple statistical methods to comprehensively evaluate the fruit quality, which included both principal component (PCA) analysis and heat map cluster analysis. 【Methods】 In this study, samples of all varieties (strains) were randomly collected from all around the periphery of each tree crown, when fruits of all varieties (strains) reached a commercial maturity. To determine its physical and chemical quality, all the fruits were washed clearly, wiped with gauze, peeled and seeded to extract juice from the pulp after harvest. At the same time, the peel was dried in an oven at 50 °C, crushed through a 60 mesh sieve, put into a plastic bottle, and stored at -20 °C. The composition and contents of sugars and acids

收稿日期:2022-11-11 接受日期:2022-12-12

基金项目:浙江“尖兵”“领雁”研发攻关计划资助(2022C02012);台州市科技计划项目(22nya13)

作者简介:张伟清,女,助理研究员,硕士,主要从事农产品加工与品质营养研究。Tel:13857606950,E-mail:282148424@qq.com

*通信作者 Author for correspondence. Tel:13968403809,E-mail:1311219778@qq.com

were determined by ion chromatography and high performance liquid chromatography, respectively. In addition to the physical and chemical quality indexes, total flavonoids and total phenol contents were also determined. Then, correlation analysis, principle component analysis (PCA) and heat map cluster analysis were used to comprehensively evaluate the fruit quality of different citrus varieties. **【Results】** The external appearance and internal quality of 33 citrus varieties (strains) were nonuniform. The average of the vertical and horizontal diameters was 66.56 mm and 74.71 mm, respectively. However, the diameters of mandarin were generally lower than the average values. The single fruit weight ranged from 90.57 g to 422.50 g, and the average value was 184.99 g. The single fruit weight of mandarin was lower than the average, while that of grapefruit was higher than the average. The peel thickness affects the fruit commercial value, and the consumers always prefer the fruit with thinner peel. Among all the different varieties (strains), Hu You had the thickest peel of 8.02 mm, while the peels of Sokitsu, Himekoharu, Hongmeiren, Orah and Asumi were relatively thinner. The total sugar contents ranged from 43.95 to 145.71 mg · g⁻¹. Moreover, the sucrose content accounted for 11.86%–69.12% of the total soluble sugars, and the content of fructose was generally higher than glucose. Besides, the sugar components in different varieties (strains) showed some differences. For example, sucrose was the major soluble sugar in mandarin, while sweet orange, 7 hybrid citrus and flamegrape fruit accumulated both hexose and sucrose, as well as lime mainly accumulated hexose. The citrus fruits contained citric acid, malic acid, tartaric acid, oxalic acid and shikimic acid. The total acid contents ranged from 6.36 to 37.93 mg · g⁻¹ and the citric acids accounted for 63.21 to 96.70% of the total acid. The Haruka mainly accumulated malic acid that accounted for 52.63%, and the other varieties (strains) accumulated citric acid. The average value of Vc content was 34.30 mg · 100 g⁻¹. The Vc content of sweet oranges was higher than that of citrus hybrid, while the contents of total flavonoids and total phenols in mandarin were generally higher than those in sweet oranges and lime. Among the different varieties (strains), Green Ougan had the highest total flavonoids content of 65.30 mg · g⁻¹, and that of Chachi Gan was the second highest one containing 56.30 mg · g⁻¹. The contents of total phenols ranged from 15.43 to 41.07 mg · g⁻¹, and the top 3 were Seihou (41.07 mg · g⁻¹), Green Ougan (36.30 mg · g⁻¹) and Chachi Gan (35.93 mg · g⁻¹). The antioxidant activity of citrus peel was positively correlated with the contents of total phenols and total flavonoids. DPPH free radical scavenging capacity, ABTS⁺ free radical scavenging capacity and FRAP iron reducing capacity of mandarin peel were generally higher than others. The top 3 of antioxidant capacities of all the different varieties (strains) were Seihou, Green Ougan and Himekoharu. In addition, there were some differences in the antioxidant capacities of the same variety (strains) from the three different testing methods. Five principal components were extracted by PCA analysis, where the cumulative contribution rate was 85.120%. The contents of fructose, Vc and sucrose, the single fruit weight, and fruit shape index were the key indicators to evaluate the citrus fruit quality. The evaluation model was established as below: $F=0.347 F_1+0.265 F_2+0.175 F_3+0.118 F_4+0.095 F_5$. **【Conclusion】** 33 citrus varieties (strains) were divided into 6 categories by cluster analysis. The fourth category, including Okitsu No. 60, Himekoharu and Asumi, had the best fruit quality. The combination of the heat map cluster and PCA analysis could evaluate the citrus quality systematically and scientifically, and present the results intuitively. Our results will provide a theoretical basis for the structural adjustment of citrus varieties, the breeding of new variety, and the development and utilization of functional components in citrus.

Key words: Citrus; Fruit quality; Principal component analysis; Cluster analysis; Comprehensive evaluation

柑橘(*Citrus reticulata* Blanco)属芸香科柑橘亚科,为世界第一大类水果,因其色香味兼优且营养价值高而深受消费者喜爱^[1]。柑橘果实富含糖类、有机酸、维生素、膳食纤维、矿物质及酚类物质(类黄酮、酚酸等),研究表明酚类物质具有抗炎^[2]、抗氧化^[3]、抗癌^[4]等功效。中国是柑橘的重要原产地之一,资源丰富^[5]。目前,我国主要柑橘产区有广西、湖南、湖北、广东、江西、浙江、福建、四川、重庆和云南等10个省份^[6],品种繁多,生产上主要栽培的有宽皮柑橘、甜橙、杂柑、柠檬等^[7]。2021年我国柑橘面积278.8多万 hm^2 ,产量约5 595.61万t。

柑橘果实品质包括色泽、果形、糖、酸、维生素C(Vc)、类黄酮、酚酸等外观品质、营养品质及风味品质^[8]。果实品质是决定柑橘市场竞争力的重要因素,而品种特性对柑橘果实品质起决定性作用^[9]。因此,客观、准确、科学地分析和评价柑橘果实品质,对品种选育、改良及结构调整极为重要。目前柑橘果实品质评价方面的研究大多利用简单的统计方法^[10-11],而综合评价方法的应用主要集中于优新品种的品质评价,李勋兰等^[12]对6个晚熟杂柑新品种果实品质指标进行检测分析,并采用因子分析法进行综合评价,但未考察柑橘果皮酚类物质。有研究^[13]报道对11个柑橘品种8种常规果实品质指标及果肉中20种酚类物质含量进行比较分析,利用因子分析法评价果实品质,但研究的品种相对较少。聚类分析是将数据进行分类,同类中的样本间相似,而不同类的样本间差异很大。热图分析是对数据分布情况进行分析的直观可视化方法,而热图聚类分析是将两者结合起来的分析方法,通过颜色深浅来反映样本中相应含量高低,更直观地呈现数据结果。王贵一等^[14]利用PCA分析法,建立芒果品质综合评价方法。姜璐等^[15]采用PCA分析法及可视化热图聚类分析法对蓝靛果的品质进行综合评价,并对蓝靛果进行分类。PCA分析法及聚类分析法已广泛用于梨^[16]、猕猴桃^[17]、蓝莓^[18]、樱桃^[19]、榴莲^[20]、西瓜^[21]等农产品品质差异的分析,但热图聚类分析法对柑橘品质的评价鲜见报道。笔者在本研究中对33个不同柑橘品种(系)的常规品质指标、糖酸组分含量、总黄酮含量、总酚含量及抗氧化性能进行检测,采用相关性分析、PCA分析、热图聚类分析等多元统计方法对果实品质进行综合评价,以期摸清不同柑橘品种的品质特性,丰富数据库,为柑橘品种结构调整、新

品种选育及功能性成分的开发利用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

试验共选取椪柑、胡柚、葡萄柚、红美人等33个不同柑橘品种(系)(见表1),样品均采自浙江省柑橘研究所种质资源圃,管理水平一致,采样时间为2021年10月27日至2022年4月10日,各个品种(系)样品均处于商业成熟期。每个品种(系)选取长势良好、树龄相似的果树3株。每株树冠外围东南西北方向随机采集大小一致、无病虫害、无机械损伤的柑橘果实12个,共36个果实,随机分成3组。果实采后立即运回浙江省柑橘研究所农产品检测实验室,清水洗净,用纱布擦干,去皮、籽,果肉榨汁取果汁进行理化品质测定。果皮置于50℃烘箱中烘干,粉碎过60目筛(0.25 mm),装入塑料瓶并密封,贮藏于-20℃冰箱中备用。

1.2 试验方法

1.2.1 果实品质测定 外观品质:单果质量、果皮厚(果实赤道部)、果实横径和纵径,采用游标卡尺和电子天平测定,果形指数:果实纵径/果实横径。

可溶性固形物(TSS)含量用手持糖酸计(Atago PAL-1)法测定;TA含量用酸碱滴定法测定;固酸比:TSS/TA;维生素C含量用2,6-二氯酚靛滴定法测定。糖组分含量参照郑丽静等^[22]的方法略有改进,采用ICS5000离子色谱仪测定,色谱条件:色谱柱为PA10离子交换柱(4 mm×250 mm)和同款保护柱;流动相:H₂O和NaOH(200 mmol·L⁻¹),梯度洗脱;流速1.0 mL·min⁻¹;柱温30℃;进样量10 μL;酸组分含量参照姚改芳等^[23]的方法略有改进,采用10A高效液相色谱紫外分光光度法测定,色谱条件:LP-C18色谱柱(4.6 mm×300 mm, 5 μm)和同款保护柱;流动相:KH₂PO₄缓冲液(pH:2.65);流速0.5 mL·min⁻¹;柱温40℃;进样量10 μL;检测波长210 nm;采集时间35 min;总糖:蔗糖、葡萄糖和果糖的总和;总酸:柠檬酸、苹果酸、酒石酸、草酸和莽草酸的总和;糖酸比:总糖/总酸。

1.2.2 果皮测定 活性物质:利用超声辅助乙醇法制备供试样品果皮的提取液,总黄酮含量采用三氯化铝比色法测定,结果以芦丁计;提取物总酚含量采用Folin-Ciocalteu比色法测定,结果以没食子酸计。

抗氧化性能:采用boxbio试剂盒测定果皮提取

表1 样品采集信息

Table 1 Information of citrus samples

编号 Number	品种 Cultivar	类别 Classification	采样时间 Sampling date	编号 Number	品种 Cultivar	类别 Classification	采样时间 Sampling date
Z01	鸡尾葡萄柚 Cocktail grapefruit	葡萄柚 Grapefruit	12月10日 December 10th	Z18	胡柚 Huyou	杂柑 Citrus hybrid	12月10日 December 10th
Z02	火焰葡萄柚 Flame grapefruit	葡萄柚 Grapefruit	3月10日 March 10th	Z19	明日见 Asumi	杂柑 Citrus hybrid	2月10日 February 10th
Z03	青岛44 Aoshima No.44 unshu	宽皮柑橘 Mandarin	12月10日 December 10th	Z20	123-1	杂柑 Citrus hybrid	11月20日 November 20th
Z04	瓯柑 Ougan	宽皮柑橘 Mandarin	12月10日 December 10th	Z21	津之香 Tsunokaori Tangor	杂柑 Citrus hybrid	2月27日 February 27th
Z05	青瓯柑 Green Ougan	宽皮柑橘 Mandarin	12月10日 December 10th	Z22	春香 Haruka	杂柑 Citrus hybrid	12月27日 December 27th
Z06	椪柑 Ponkan	宽皮柑橘 Mandarin	12月10日 December 10th	Z23	沃柑 Orah	杂柑 Citrus hybrid	2月10日 February 10th
Z07	贡柑 Gonggan	宽皮柑橘 Mandarin	12月27日 December 27th	Z24	刘本橙 Liubencheng	杂柑 Citrus hybrid	12月10日 December 10th
Z08	茶枝柑 Chachi Gan	宽皮柑橘 Mandarin	12月27日 December 27th	Z25	脐橙 Navel orange	甜橙 Sweet orange	12月10日 December 10th
Z09	默科特 Murcott	宽皮柑橘 Mandarin	2月27日 February 27th	Z26	439	甜橙 Sweet orange	12月10日 December 10th
Z10	椪橘 Manju	宽皮柑橘 Mandarin	12月10日 December 10th	Z27	夏橙 Valencia orange	甜橙 Sweet orange	4月10日 April 10th
Z11	早橘 Sokitsu	宽皮柑橘 Mandarin	10月27日 October 27th	Z28	脐血橙 Washington Sanguine	甜橙 Sweet orange	2月10日 February 10th
Z12	媛小春 Himekoharu	杂柑 Citrus hybrid	2月10日 February 10th	Z29	塔罗科血橙 Tarocco blood orange	甜橙 Sweet orange	2月27日 February 27th
Z13	兴津60 Okitsu No.60	杂柑 Citrus hybrid	2月10日 February 10th	Z30	雪柑 Xuegan	甜橙 Sweet orange	12月27日 December 27th
Z14	红美人 Hongmeiren	杂柑 Citrus hybrid	12月10日 December 10th	Z31	锦橙 Jincheng	甜橙 Sweet orange	12月27日 December 27th
Z15	甜橘柚 Sweet Spring	杂柑 Citrus hybrid	12月10日 December 10th	Z32	摩洛血橙 Moro blood orange	甜橙 Sweet orange	1月10日 January 10th
Z16	高橙 Gaocheng	杂柑 Citrus hybrid	12月10日 December 10th	Z33	莱檬 Lime	莱檬 Lime	12月10日 December 10th
Z17	清峰 Seihou	杂柑 Citrus hybrid	2月10日 February 10th				

物DPPH自由基清除能力、ABTS⁺自由基清除能力及FRAP还原能力,DPPH法和ABTS法结果以维生素C摩尔表示,FRAP法结果以FeSO₄摩尔表示。参考李楠等^[24]的方法计算抗氧化综合评价值: $Y_i = \sum (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin})$,其中 X_{ij} :第*i*种柑橘,第*j*个抗氧化值; X_{jmin} 和 X_{jmax} 分别为第*i*种柑橘,第*j*个抗氧化值的最小值和最大值。

1.3 数据处理与分析

每个指标均重复测定3次取平均值,采用Excel 2010、SPSS 22和Origin 2022b对试验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同柑橘品种(系)果实品质

2.1.1 外观品质分析 由表2可知,各品种(系)柑橘果实外观品质指标存在不同程度差异。果形指数变化范围0.64~1.27,其中莱檬的最大,较早橘(最小)大了98.4%。除莱檬、摩洛血橙、塔罗科血橙和123-1外,其余品种(系)果形指数均小于1。果实纵径和横径均值分别为66.56 mm和74.71 mm,单果质量均值为184.99 g。葡萄柚类中鸡尾葡萄柚单果质量最大,达422.50 g,其果实纵径和横径也均较大。葡萄柚类果皮厚均值为4.64 mm,火焰葡萄柚的相对较厚。宽皮柑橘类(Z03~Z11)果实单果质量均值为134.62 g,变化范围为90.57~167.20 g,果实纵径和横径均值分别为58.58 mm和70.23 mm,果皮厚均值为3.36 mm。杂柑类(Z12~Z24)果实单果质量变化范围为104.03~340.80 g,均值为193.92 g,其中胡柚

表 2 不同柑橘品种(系)果实外观品质

Table 2 Exterior quality of different citrus varieties (strains)

品种 Cultivar	纵径 Vertical diameter/mm	横径 Horizontal diameter/mm	果形指数 Fruit shape index	单果质量 Single fruit mass/g	果皮厚 Peel thickness/mm
Z01	86.67±1.53 a	95.67±1.15 a	0.91±0.03 hijk	422.50±5.70 a	3.65±0.07 k
Z02	79.47±2.54 cd	90.33±2.19 cd	0.88±0.01 jklmn	308.43±5.35 c	5.63±0.12 e
Z03	55.87±1.80 op	77.33±2.52 h	0.72±0.00 r	150.53±5.16 l	4.27±0.16 hi
Z04	61.80±1.85 lm	66.67±1.67 klm	0.93±0.00 fgh	133.53±4.18 m	4.26±0.11 hij
Z05	59.60±1.93 mn	68.54±1.57 jkl	0.87±0.01 klmn	124.67±3.45 no	3.28±0.12 mn
Z06	63.73±2.05 kl	77.78±2.55 gh	0.82±0.01 opq	160.47±5.22 jk	3.20±0.16 mno
Z07	55.87±1.80 op	63.00±1.73 nop	0.89±0.04 hijklm	114.07±4.04 pq	2.75±0.09 p
Z08	62.00±2.17 lm	65.00±1.67 mno	0.95±0.01 efg	126.00±5.10 no	3.39±0.12 lm
Z09	58.20±1.85 no	68.44±1.68 jkl	0.85±0.01 mno	144.53±2.48 l	3.07±0.11 no
Z10	66.13±2.20 hijk	76.27±2.58 hi	0.87±0.01 lmn	167.20±2.45 ij	4.04±0.20 j
Z11	44.00±2.17 r	69.06±2.02 jk	0.64±0.02 s	90.57±2.84 s	2.02±0.12 r
Z12	49.53±2.14 q	60.83±0.83 pq	0.81±0.03 opq	104.03±4.19 r	2.25±0.18 q
Z13	56.97±2.11 no	69.72±2.10 j	0.82±0.01 opq	126.47±5.48 no	3.40±0.14 lm
Z14	71.53±1.25 fg	77.57±1.19 h	0.92±0.02 ghi	250.83±7.47 e	2.61±0.06 p
Z15	74.83±2.25 e	85.00±1.67 f	0.88±0.02 ijklm	252.77±6.33 e	5.63±0.10 e
Z16	72.67±2.75 ef	90.58±1.88 cd	0.80±0.03 pq	282.40±8.39 d	6.31±0.19 b
Z17	65.67±1.61 ijk	73.58±1.51 i	0.89±0.01 hijklm	172.27±3.66 i	4.67±0.16 g
Z18	86.93±1.90 a	94.75±1.64 ab	0.92±0.00 ghij	340.80±3.30 b	8.02±0.15 a
Z19	57.23±1.60 no	68.00±1.22 jkl	0.84±0.02 nop	148.30±2.21 l	2.74±0.08 p
Z20	59.63±1.89 mn	59.50±1.69 q	1.00±0.06 cd	112.10±1.73 q	4.19±0.17 ij
Z21	64.67±2.25 jkl	88.33±1.91 de	0.73±0.02 r	232.07±2.83 f	4.10±0.20 ij
Z22	78.20±1.85 d	80.72±2.15 g	0.97±0.01 def	229.97±1.89 f	6.03±0.17 cd
Z23	53.03±2.11 p	62.22±2.10 opq	0.85±0.01 mno	111.03±2.00 q	2.58±0.17 p
Z24	67.20±1.28 hij	67.61±2.34 jklm	0.99±0.02 cde	157.97±3.17 k	4.51±0.11 g
Z25	68.70±1.93 ghi	75.00±1.67 hi	0.91±0.02 hij	188.43±3.33 h	4.62±0.13 g
Z26	60.00±1.70 mn	61.50±2.49 pq	0.98±0.06 de	124.43±3.91 no	4.14±0.13 ij
Z27	73.10±1.85 ef	92.67±2.52 abc	0.79±0.04 q	340.40±4.39 b	4.95±0.14 f
Z28	79.00±1.67 d	86.89±1.68 ef	0.91±0.00 hijk	187.83±3.06 h	6.21±0.13 bc
Z29	69.17±1.96 gh	67.22±1.27 jklm	1.03±0.05 bc	147.20±2.51 l	3.80±0.13 k
Z30	65.80±1.93 ijk	67.11±2.36 jklm	0.98±0.03 de	129.13±2.51 mn	4.45±0.12 gh
Z31	82.40±2.35 bc	92.06±1.25 bc	0.90±0.03 hijkl	211.97±2.84 g	5.96±0.14 d
Z32	63.60±2.25 kl	60.83±1.48 pq	1.05±0.01 b	120.70±2.25 op	3.59±0.15 kl
Z33	83.33±1.65 b	65.56±0.96 lmn	1.27±0.03 a	190.97±6.64 h	2.98±0.14 o
均值 Average	66.56±10.70	74.71±11.35	0.90±0.11	184.99±79.55	4.16±1.35
CV/%	16.08	15.20	12.57	43.00	32.54

注:同列不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

的最大,果实纵径、横径及果皮厚差异均较大,其中胡柚的纵径(86.93 mm)、横径(94.75 mm)和果皮厚(8.02 mm)均最大,而媛小春的纵径(49.53 mm)和果皮厚(2.25 mm)均为最小,123-1的横径(59.50 mm)最小。甜橙类单果质量范围为120.70~340.40 g,其中最大的为夏橙,果实纵径差异相对较小,其中锦橙的最大(82.40 mm),而果实横径差异较大,其中夏橙的最大(92.67 mm),摩洛血橙的最小(60.83 mm),果

实果皮厚均值为4.72 mm,其中脐血橙的果皮最厚(6.21 mm),摩洛血橙的最薄(3.59 mm)。莱檬的果实纵径较大,而果皮相对较薄。

2.1.2 内在品质分析 由表3可知,各品种(系)柑橘果实维生素C含量(w ,后同)均值为 $34.30 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$,宽皮柑橘类果实维生素C含量均低于均值,而甜橙类除夏橙外,均高于均值,且甜橙类的普遍高于杂柑。维生素C含量最高的为123-1($63.98 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$),显

表3 不同柑橘品种(系)果实内在品质

Table 3 Fruit quality of different citrus varieties (strains)

品种 Cultivar	w(可溶性 固形物) TSS/%	w(可溶性 固形物) TA/ (g·100 mL ⁻¹)	w(可滴定酸) TA/ (g·100 mL ⁻¹)	固酸比 TSS/TA	w(维生素C) Vc/ (mg·100 g ⁻¹)	w(蔗糖) Sucrose/ (mg·g ⁻¹)	w(葡萄糖) Glucose/ (mg·g ⁻¹)	w(果糖) Fructose/ (mg·g ⁻¹)	w(总糖) Total sugar/(mg·g ⁻¹)	w(柠檬酸) Citric acid/ (mg·g ⁻¹)	w(苹果酸) Malic acid/ (mg·g ⁻¹)	w(酒石酸) Tartaric acid/ (mg·g ⁻¹)	w(总酸) Total acid/ (mg·g ⁻¹)	糖酸比 Sugar/Acid
Z01	11.7±0.2 h	0.78±0.02 n	15.0±0.6 fg	32.20±0.56 mm	80.57±0.85 b	24.27±0.62 fg	34.73±0.98 f	139.57±1.19 b	5.67±0.14 op	0.19±0.03 s	0.41±0.05 r	6.36±0.11 u	21.95±0.54 a	
Z02	8.5±0.2 p	1.29±0.02 f	6.6±0.1 n	40.56±0.61 i	34.19±0.65 s	17.52±0.58 no	22.81±0.57 no	74.52±0.99 t	14.26±0.28 e	0.62±0.06 o	0.32±0.03 s	15.29±0.20 g	4.88±0.13 pq	
Z03	8.1±0.1 q	0.99±0.02 j	8.2±0.2 m	20.44±0.43 v	31.78±0.53 u	13.50±0.31 r	20.52±0.40 p	65.80±0.55 u	11.34±0.27 h	0.25±0.03 rs	0.77±0.05 f	12.46±0.31 l	5.28±0.09 op	
Z04	9.2±0.3 no	0.60±0.01 pq	15.3±0.2 fg	30.11±0.57 o	46.30±0.55 lm	12.03±0.35 t	19.11±0.38 q	77.44±1.21 r	5.27±0.15 p	2.11±0.04 c	0.83±0.03 e	8.34±0.15 qrs	9.29±0.28 fgh	
Z05	8.4±0.2 p	0.54±0.02 r	15.6±0.5 f	28.37±0.52 q	45.18±0.38 no	15.55±0.45 p	20.67±0.56 p	81.41±0.51 q	6.40±0.13 m	1.35±0.06 de	0.75±0.03 fg	8.60±0.15 pqr	9.47±0.18 fg	
Z06	10.2±0.2 lm	0.62±0.02 p	16.6±0.3 e	24.97±0.37 s	52.13±0.38 f	19.81±0.49 i	26.64±0.47 i	98.58±0.55 k	7.30±0.12 l	0.88±0.09 lm	0.56±0.04 no	8.82±0.11 p	11.18±0.20 e	
Z07	10.5±0.2 kl	0.57±0.01 qr	18.2±0.6 d	22.54±0.45 u	49.63±0.51 j	22.15±0.48 j	30.55±0.44 i	102.33±0.63 i	6.32±0.28 mm	1.00±0.08 ij	0.63±0.02 klm	8.06±0.33 s	12.71±0.60 cd	
Z08	11.0±0.2 i	1.33±0.02 e	8.3±0.2 m	28.98±0.41 pq	53.78±0.46 e	19.59±0.51 l	25.60±0.50 m	98.97±0.84 jk	14.48±0.44 e	1.09±0.07 gh	0.65±0.03 ijkl	16.33±0.53 f	6.07±0.20 mn	
Z09	10.7±0.2 jk	0.92±0.02 l	11.6±0.1 i	25.28±0.24 s	54.41±0.39 e	18.74±0.42 m	27.00±0.74 kl	100.14±0.92 j	11.37±0.32 h	1.31±0.04 e	0.84±0.02 de	13.61±0.29 ij	7.37±0.16 k	
Z10	10.1±0.2 m	0.70±0.02 o	14.4±0.8 g	26.89±0.38 r	46.12±0.28 lm	13.09±0.33 rs	16.67±0.42 r	75.88±0.85 s	6.56±0.17 m	1.07±0.05 ghi	0.54±0.02 op	8.24±0.16 rs	9.20±0.23 gh	
Z11	12.7±0.2 def	0.49±0.04 s	25.7±1.8 a	11.64±0.28 y	87.35±0.35 a	16.19±0.32 p	22.83±0.49 no	126.37±0.66 e	5.67±0.28 op	2.15±0.05 c	0.66±0.04 hijk	8.59±0.38 pqr	14.74±0.65 b	
Z12	13.7±0.2 b	1.17±0.01 g	11.6±0.1 i	35.58±0.48 k	61.98±0.63 d	31.66±0.46 c	40.02±0.69 c	133.66±0.70 c	13.47±0.19 f	0.21±0.03 s	0.94±0.04 b	14.75±0.18 h	9.06±0.07 ghi	
Z13	15.3±0.2 a	1.54±0.03 d	10.0±0.2 l	31.55±0.20 n	51.06±0.73 gh	41.04±0.34 a	53.60±0.44 a	145.71±0.94 a	16.50±0.31 d	0.42±0.07 p	0.64±0.03 jkl	17.69±0.28 e	8.24±0.18 j	
Z14	12.8±0.2 d	0.66±0.03 o	19.4±1.2 bc	28.4±0.98 q	51.29±0.87 g	21.20±0.91 k	23.45±0.80 n	95.94±0.84 lm	5.94±0.18 no	1.41±0.09 d	0.67±0.03 hijk	8.51±0.31 pqr	11.29±0.52 e	
Z15	10.3±0.2 lm	0.57±0.02 qr	18.0±0.8 d	23.69±0.19 t	52.19±0.21 f	22.17±0.30 ij	28.62±0.54 j	102.98±0.73 hi	7.39±0.30 l	0.39±0.03 pq	0.50±0.02 pq	8.35±0.32 qrs	12.34±0.47 d	
Z16	12.6±0.1 defg	2.01±0.04 b	6.3±0.2 n	43.19±0.68 g	43.91±0.41 p	27.30±0.44 d	35.64±0.55 e	106.85±0.57 g	22.42±0.41 b	0.27±0.02 rs	0.42±0.02 r	23.23±0.42 b	4.60±0.06 q	
Z17	11.8±0.1 h	0.78±0.02 n	15.1±0.6 fg	32.86±0.50 lm	45.66±0.52 mm	27.08±0.51 d	22.73±0.50 no	95.46±0.54 m	9.27±0.33 j	0.60±0.04 o	0.88±0.03 de	10.88±0.33 n	8.78±0.21 i	
Z18	9.3±0.2 m	0.50±0.02 s	18.4±0.7 cd	29.68±0.40 op	50.25±0.59 hij	14.44±0.34 q	20.07±0.40 p	84.76±0.67 p	6.38±0.25 m	1.35±0.09 de	0.93±0.04 bc	8.78±0.14 pq	9.66±0.22 f	
Z19	13.5±0.2 bc	1.18±0.03 g	11.5±0.4 i	33.18±0.31 l	44.38±0.33 op	35.66±0.57 b	46.05±0.34 b	126.09±0.87 e	12.42±0.31 g	0.78±0.07 n	0.70±0.05 ghij	14.04±0.32 i	8.99±0.16 hi	
Z20	12.3±0.2 g	1.53±0.02 d	8.0±0.2 m	63.98±0.38 a	44.62±0.55 op	24.82±0.53 ef	34.17±0.48 f	103.6±0.61 h	16.43±0.28 d	0.97±0.05 jk	0.66±0.04 hijk	18.20±0.36 d	5.69±0.08 no	
Z21	9.1±0.2 no	0.81±0.02 mn	11.3±0.2 ij	38.54±0.34 j	44.77±0.56 o	12.40±0.35 st	16.17±0.31 r	73.34±0.87 t	8.39±0.25 k	1.12±0.04 g	0.59±0.04 mno	10.19±0.29 o	7.20±0.12 k	
Z22	9.3±0.2 m	0.48±0.03 s	19.6±1.3 b	17.72±0.22 w	49.94±0.36 ij	13.55±0.25 r	18.95±0.39 q	82.45±0.92 q	2.75±0.16 q	3.82±0.07 a	0.60±0.03 lmn	7.27±0.12 t	11.35±0.22 e	
Z23	13.3±0.2 c	0.69±0.02 o	19.4±0.3 b	20.89±0.36 v	75.10±0.41 c	22.71±0.54 hij	29.82±0.62 i	127.63±1.05 d	6.32±0.21 mm	2.61±0.04 b	0.71±0.06 gh	9.76±0.19 o	13.08±0.14 c	
Z24	10.2±0.2 lm	0.79±0.02 n	12.9±0.6 h	41.45±0.44 h	33.32±0.25 t	22.96±0.26 h	32.56±0.33 g	88.84±0.52 o	9.32±0.22 j	1.21±0.04 f	1.07±0.05 a	11.73±0.16 m	7.57±0.14 k	
Z25	9.2±0.2 m	0.93±0.02 lk	9.9±0.3 l	49.07±0.10 f	37.57±0.60 q	18.25±0.42 mn	25.65±0.49 m	81.47±0.30 q	10.45±0.31 i	1.00±0.05 hij	0.62±0.03 klm	12.19±0.28 l	6.68±0.13 l	
Z26	12.7±0.2 de	1.16±0.04 g	10.9±0.3 jk	61.57±0.29 b	51.02±0.58 gh	25.52±0.42 e	36.69±0.36 d	113.23±0.54 f	13.45±0.20 f	0.81±0.06 mm	0.83±0.04 de	15.22±0.28 g	7.44±0.16 k	
Z27	10.3±0.2 lm	1.64±0.03 c	6.3±0.1 n	23.85±0.63 t	37.75±0.55 q	23.82±0.35 g	29.79±0.31 i	91.36±0.43 n	18.40±0.31 c	0.31±0.03 qr	0.26±0.03 t	19.02±0.30 c	4.81±0.10 q	
Z28	12.4±0.2 fg	1.19±0.02 g	10.4±0.4 jkl	54.31±0.36 d	50.64±0.57 ghi	19.49±0.36 i	26.86±0.37 kl	96.99±0.44 i	12.28±0.24 g	0.46±0.04 p	0.71±0.04 gh	13.54±0.19 j	7.16±0.14 k	
Z29	10.4±0.2 l	1.04±0.03 i	10.0±0.4 kl	55.81±0.47 c	37.08±0.53 qr	17.22±0.59 o	27.56±0.50 k	101.86±0.63 q	11.41±0.23 h	0.84±0.03 lmn	0.60±0.03 lmn	12.95±0.25 k	6.32±0.09 lm	
Z30	12.5±0.2 efg	0.97±0.01 jk	12.9±0.3 h	50.93±0.67 e	48.23±0.40 k	22.90±0.35 hi	31.41±0.27 h	82.54±0.63 q	9.58±0.27 j	0.90±0.04 kl	0.89±0.04 cd	11.48±0.28 m	8.94±0.19 hi	
Z31	8.9±0.2 o	1.10±0.01 h	8.1±0.2 m	42.8±0.47 g	36.32±0.49 r	15.75±0.45 p	22.12±0.46 o	74.19±0.56 t	11.59±0.20 h	1.32±0.07 e	0.70±0.02 ghi	13.72±0.21 ij	5.41±0.05 o	
Z32	10.9±0.1 ij	0.83±0.02 m	13.0±0.3 h	48.4±0.46 f	46.66±0.50 l	23.72±0.50 g	32.75±0.56 g	103.12±0.64 hi	9.35±0.16 j	1.22±0.04 f	0.88±0.03 de	11.54±0.12 m	8.94±0.15 hi	
Z33	8.3±0.2 pq	3.58±0.02 a	2.3±0.0 o	12.51±0.34 x	5.21±0.19 v	15.87±0.33 p	22.86±0.31 no	43.95±0.55 v	36.59±0.44 a	0.84±0.06 lmn	0.45±0.03 qr	37.93±0.42 a	1.16±0.01 r	
均值	10.9±1.8	1.03±0.58	12.8±4.9	34.30±13.35	47.89±14.37	20.97±6.57	28.02±8.20	96.88±22.21	11.05±6.24	1.06±0.75	0.67±0.18	12.90±5.88	8.69±3.69	
Average														
CV/%	16.72	56.68	38.70	38.91	30.00	31.31	29.27	22.93	56.50	70.52	27.45	45.62	42.49	

显著高于其他品种(系)($p < 0.05$),是早橘(最低, $11.64 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$)的5.5倍。TSS含量的均值为10.9%,变化范围为8.1%~15.3%,其中兴津60(最高)是青岛44(最低)的1.9倍。葡萄糖和果糖含量的均值分别为 $20.97 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $28.02 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,变化范围分别为 $12.03 \sim 41.04 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $16.17 \sim 53.60 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。兴津60的葡萄糖和果糖含量均最高,瓯柑的葡萄糖含量最低,津之香的果糖含量最低。葡萄糖/果糖的比值为0.62~1.19,除清峰外,葡萄糖/果糖的比值均小于1,说明果糖含量普遍高于葡萄糖。蔗糖含量均值为 $47.89 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,其中早橘最高为 $87.35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,莱檬最低为 $5.21 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,最高为最低的16.8倍。总糖含量变化范围为 $43.95 \sim 145.71 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,变异系数为22.93%,兴津60(最高)为莱檬(最低)的3.3倍。3种糖占总糖的比值结果见图1-A,蔗糖占总糖含量的11.86%~69.12%,其不同品种(系)果实中的积累存在一定的差异,其中甜橙类除脐血橙外,蔗糖含量均低于50%,果糖和葡萄糖的含量总和超过50%,由此说明甜橙类以己糖(葡萄糖和果糖)和蔗糖共同积累。宽皮柑橘类除青岛44和贡柑外,蔗糖含量高于50%,说明宽皮柑橘类以积累蔗糖为主。而莱檬葡萄糖和果糖的含量总和达88.14%,说明以积累己糖为主。

各品种(系)柑橘果实均含有柠檬酸、苹果酸、酒石酸、草酸和莽草酸。除春香外,柠檬酸含量最高,其次为苹果酸和酒石酸,而草酸($0.036 \sim 0.093 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)和莽草酸($0.013 \sim 0.091 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)含量极低未列入表中。柠檬酸的含量范围为 $2.75 \sim 36.59 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,变异系数为56.50%,其中莱檬的柠檬酸含量最高,显著高于其他品种(系)($p < 0.05$),是最低(春香)的13.3倍。苹果酸的均值为 $1.06 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,其中春香最高为 $3.82 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,显著高于其他品种(系)($p < 0.05$),鸡尾葡萄柚最低为 $0.19 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。酒石酸的均值为 $0.67 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,变异系数为27.45%,刘本橙最高为 $1.07 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,夏橙最低为 $0.26 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。总酸含量的变异系数为45.62%,变化范围为 $6.36 \sim 37.93 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,莱檬(最高)含量为最低(鸡尾葡萄柚)的6.0倍。可滴定酸含量均值为 $1.03 \text{ g} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$,莱檬最高为 $3.58 \text{ g} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ 。TSS/TA最高和最低分别为早橘(25.7)和莱檬(2.3),而糖酸比最高和最低分别为鸡尾葡萄柚(21.95)和来檬(1.16)。有机酸组分占总酸含量的比值见图1-B,其中草酸和莽草酸含量极低,未列入图中。除春香(37.89%)外,柠檬酸的比值为

63.21%~96.70%,前三的依次为夏橙、高橙和莱檬,而春香的苹果酸占比高达52.63%,为最高。

2.1.3 果皮活性物质分析 由表4可知,各品种(系)果实中总黄酮和总酚含量存在差异,总黄酮含量均值为 $35.76 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,其中宽皮柑橘类和大多杂柑类总黄酮含量均高于均值,甜橙类均低于均值。说明宽皮柑橘类和杂柑类总黄酮含量普遍较高。总黄酮含量为 $21.71 \sim 65.30 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,变异系数28.29%,最高为青瓯柑 $65.30 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,次高为茶枝柑 $56.30 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,最低为鸡尾葡萄柚 $21.71 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,最高是最低的3.0倍。总酚含量均值为 $27.22 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,大多宽皮柑橘类和杂柑类总酚含量高于均值,而甜橙类大多低于均值,说明宽皮柑橘类和杂柑类总酚含量相对较高,而甜橙类含量较低。总酚含量为 $15.43 \sim 41.07 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,其中排在前三的依次为清峰($41.07 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)、青瓯柑($36.30 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)和茶枝柑($35.93 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$),最高为最低(春香)的2.7倍。

2.1.4 体外抗氧化能力 酚类物质因含酚羟基而可清除自由基^[25]。由表5可知,不同品种(系)果皮提取物的3种体外抗氧化能力(清除ABTS⁺自由基能力、FRAP还原能力、清除DPPH自由基能力)存在明显差异。清除ABTS⁺自由基能力均值为 $94.13 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,其中清峰最高为 $159.12 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,次高火焰葡萄柚为 $149.37 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。甜橙类除夏橙和摩洛哥血橙外,清除ABTS⁺自由基能力均低于均值,而宽皮柑橘类除青岛44、默科特和早橘外,均高于均值。DPPH自由基清除能力均值为 $5.96 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,宽皮柑橘类和杂柑类大多高于均值,而甜橙类均低于均值。DPPH自由基清除能力前三的依次为椪柑、高橙和青瓯柑,分别为 $8.72 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $8.54 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $8.35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,三者间差异不显著($p > 0.05$),最低为春香 $3.03 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。FRAP还原能力的变化范围为 $99.66 \sim 406.24 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,均值为 $222.64 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,宽皮柑橘类除默科特、椪橘和早橘外,FRAP还原能力均高于均值,而甜橙类均低于均值,说明宽皮柑橘类普遍较高。媛小春FRAP还原能力为最高,是最低火焰葡萄柚的4.1倍。综上所述,宽皮柑橘类3种抗氧化能力普遍较高。此外,3种不同抗氧化能力测定方法评价同一品种果皮提取物的抗氧化能力存在一定的差异,因此利用综合评价法得到抗氧化综合评价值。果皮抗氧化综合评价值的变化范围为0.09~2.32,排在前三的依次为清峰、青瓯柑和媛小春。

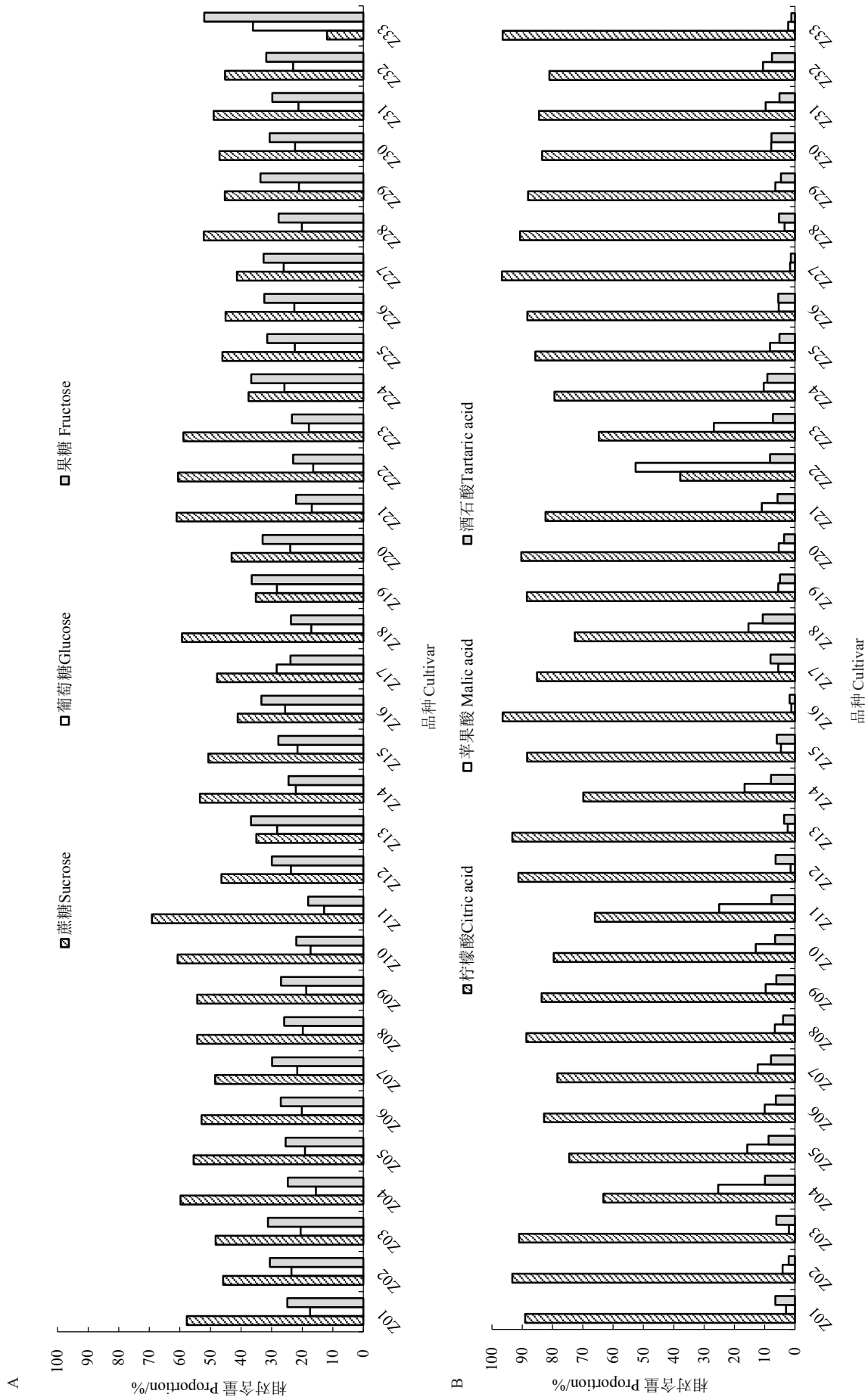


图1 果实中各糖组分与总糖的比值及各酸组分与总酸的比值
Fig. 1 The proportion of each sugar component and the proportion of each acid component in fruits

表 4 不同柑橘品种(系)总黄酮和总酚含量

Table 4 The contents of total flavonoids and phenolics in citrus of different varieties (strains)

品种 Cultivar	w(总黄酮) Total flavonoids/(mg·g ⁻¹)	w(总酚) Total phenolics/(mg·g ⁻¹)	品种 Cultivar	w(总黄酮) Total flavonoids/(mg·g ⁻¹)	w(总酚) Total phenolics/(mg·g ⁻¹)
Z01	21.71±3.60 p	25.03±3.05 jkl	Z18	24.37±0.59 nop	30.40±4.44 defg
Z02	44.97±2.48 de	33.47±0.23 bc	Z19	27.33±1.23 lmn	28.90±3.15 fghi
Z03	37.57±2.47 gh	32.83±0.72 cd	Z20	42.47±1.21 def	26.43±0.68 ijk
Z04	51.50±2.36 c	31.77±1.37 cde	Z21	39.67±0.75 fgh	34.33±0.65 bc
Z05	65.30±3.08 a	36.30±1.59 b	Z22	23.93±1.18 nop	15.43±0.32 p
Z06	46.13±6.04 d	31.67±2.37 cdef	Z23	37.57±1.46 gh	27.57±0.60 ghij
Z07	41.10±2.09 efg	27.70±0.61 ghij	Z24	24.30±0.30 nop	19.23±0.64 o
Z08	56.30±3.87 b	35.93±1.14 b	Z25	29.30±0.00 jklm	21.23±0.42 mno
Z09	40.10±0.56 fgh	25.30±0.53 jkl	Z26	31.27±3.86 jkl	20.10±0.78 no
Z10	36.93±0.42 hi	25.13±1.74 jkl	Z27	28.87±4.51 klm	21.07±1.44 mno
Z11	37.03±0.76 ghi	22.97±0.35 lm	Z28	29.87±0.57 jklm	26.33±0.71 ijk
Z12	41.80±2.81 ef	33.07±2.21 cd	Z29	29.43±2.80 jklm	29.63±2.52 efgh
Z13	33.03±2.55 ij	26.83±2.67 hijk	Z30	31.43±2.12 jk	24.70±1.13 kl
Z14	27.40±4.33 klmn	23.23±3.91 lm	Z31	23.17±0.68 op	19.30±0.53 o
Z15	33.30±0.95 ij	22.77±1.58 lmn	Z32	31.33±1.86 mno	27.33±1.27 hijk
Z16	43.20±0.85 def	32.57±0.87 cd	Z33	26.40±0.90 mno	18.77±0.76 o
Z17	41.93±3.96 ef	41.07±1.16 a			

2.2 相关性分析

2.2.1 不同柑橘品种(系)品质指标的相关性分析
由表6可知,柑橘果实品质指标之间存在相关性,其中总酸含量与柠檬酸含量的相关系数最高为0.993。TSS含量与蔗糖、果糖、葡萄糖、总糖含量及糖酸比呈极显著正相关($p<0.01$)。TA含量与柠檬酸和总酸含量呈极显著正相关($p<0.01$),相关系数分别为0.986和0.985;而TA含量与TSS/TA、蔗糖含量和糖酸比呈极显著负相关($p<0.01$),相关系数分别为-0.780、-0.576和-0.640;维生素C与TSS/TA、苹果酸含量和糖酸比呈极显著负相关($p<0.01$),而与果形指数和果皮厚呈极显著正相关($p<0.01$)。总黄酮和总酚含量均与纵径和果形指数呈极显著负相关($p<0.01$),而两者间也呈极显著正相关($p<0.01$),相关系数为0.690。由此说明,各指标之间存在不同程度的相关性,即20项品质指标之间的信息存在重叠。

2.2.2 果皮抗氧化性能与活性物质相关性分析
由表7可知,果皮总黄酮、总酚含量均与ABTS⁺、DPPH及FRAP呈极显著正相关($p<0.01$)。其中总酚含量与ABTS⁺、DPPH和FRAP的相关系数分别为0.669、0.671和0.556,总黄酮含量与ABTS⁺、DPPH和FRAP的相关系数分别为0.550、0.597和0.514。说明酚类物质对抗氧化能力起非常重要的作用,其中总酚含量与抗氧化能力的相关性极显著。果皮抗

氧化综合评价与总黄酮和总酚含量的相关系数分别为0.671和0.774,这进一步证实了以上结论。此外,3种体外抗氧化评价方法两两之间均呈极显著正相关($p<0.01$),说明各品种(系)柑橘果皮提取物清除DPPH自由基和ABTS⁺自由基以及FRAP还原铁离子的效果基本一致。

2.3 不同柑橘品种(系)果实品质的主成分分析

由表8可知,PCA分析得到5个主成分特征值大于1,累计方差贡献率达85.120%,说明这5个主成分能反映20个指标的绝大部分信息。PC1方差贡献率为29.518%,贡献较大的为TSS/TA、蔗糖、糖酸比,其中以蔗糖的贡献最大,载荷值0.852,其次是TSS/TA,载荷值为0.842,与果实口感相关,PC1可命名为口感因子。而PC2方差贡献率为22.588%,贡献较大的为TSS、葡萄糖和果糖,与PC2呈正载荷,果糖正载荷值最大为0.839,PC2主要反映果实甜味,可命名为甜味因子;PC3方差贡献率为14.905%,贡献较大的为单果质量,载荷值为0.723,可命名为质量因子。而PC4贡献最大的为果形指数,方差贡献率为10.034%,主要反映果实的外观形状,可命名为果形因子;第PC5方差贡献率为8.075%,贡献最大的为维生素C,载荷值为0.789,主要与果实的抗氧化品质相关,可命名为抗氧化因子。PC1和PC2累计贡献率达52.106%,反映了柑橘果实品质的主要信息,因此,PC1

表5 不同柑橘品种(系)果实抗氧化能力

Table 5 Antioxidant capacities in different varieties (strains) of citrus

品种 Cultivar	ABTS ⁺ 自由基清除能力 ABTS ⁺ free radical scavenging ability/($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)	DPPH 自由基清除能力 DPPH free radical scavenging ability/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	FRAP 还原能力 Iron reduction ability/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)	抗氧化综合评价值 Comprehensive antioxidant capacity	排名 Ranking
Z01	94.71±4.77 ghi	6.80±0.30 fg	261.69±6.22 fg	1.47	10
Z02	149.37±2.63 b	4.56±0.11 lm	99.66±3.02 p	1.10	17
Z03	85.01±8.10 jklm	5.90±0.10 gh	304.31±25.92 e	1.37	12
Z04	96.10±6.67 ghi	7.38±0.37 def	310.25±20.56 de	1.71	9
Z05	113.55±4.26 d	8.35±0.27 ab	342.89±24.83 bc	2.11	2
Z06	107.09±14.81 de	8.72±0.57 a	316.06±46.07 cde	2.03	4
Z07	132.57±6.85 c	8.34±0.46 ab	252.06±15.26 gh	2.00	6
Z08	113.88±3.62 d	7.92±0.54 bcd	335.35±9.04 cd	2.02	5
Z09	93.66±4.40 hijk	5.48±0.32 ijk	127.24±4.77 mnop	0.85	22
Z10	95.79±2.81 ghi	4.87±0.29 kl	186.07±25.53 kl	0.95	18
Z11	79.32±2.08 lmn	4.43±0.03 lm	198.89±5.46 jkl	0.78	25
Z12	110.95±4.22 de	7.16±0.47 ef	406.24±25.59 a	2.09	3
Z13	84.62±4.62 klm	6.50±0.12 gh	251.87±13.52 gh	1.30	14
Z14	88.06±7.31 ijkl	7.72±0.88 cde	365.02±24.00 b	1.86	7
Z15	74.17±4.64 no	4.51±0.32 lm	196.44±11.54 jkl	0.74	27
Z16	126.04±1.49 c	8.54±0.75 a	213.86±11.42 ijk	1.86	7
Z17	159.12±8.74 a	8.25±0.28 abc	288.86±2.52 ef	2.32	1
Z18	103.86±3.93 efg	4.22±0.20 mn	115.66±4.20 op	0.71	28
Z19	74.69±2.80 no	7.71±0.54 cde	227.74±3.38 hi	1.34	13
Z20	81.40±1.91 lmn	7.36±0.23 def	209.05±9.05 ijkl	1.29	15
Z21	80.75±1.35 lmn	7.51±0.09 de	264.24±25.93 fg	1.47	10
Z22	52.20±3.49 q	3.03±0.05 p	119.03±12.6 nop	0.09	33
Z23	106.30±1.13 def	5.75±0.14 ij	220.85±11.71 ij	1.28	16
Z24	67.08±3.64 op	3.68±0.30 no	154.61±11.11 m	0.43	32
Z25	80.44±2.23 lmn	4.94±0.03 kl	184.94±29.02 l	0.83	23
Z26	66.62±4.69 op	4.56±0.49 lm	190.89±6.11 kl	0.67	29
Z27	97.74±7.99 fgh	3.57±0.40 op	128.18±11.71 mno	0.59	30
Z28	78.25±1.07 mn	5.28±0.23 jk	209.51±6.08 ijkl	0.93	20
Z29	81.81±4.63 lmn	5.25±0.10 jk	196.81±25.60 jkl	0.92	21
Z30	78.00±3.43 mn	4.89±0.12 kl	183.12±10.64 l	0.79	24
Z31	62.25±4.26 p	4.38±0.39 lm	145.75±2.55 mn	0.47	31
Z32	96.96±3.52 ghi	4.36±0.31 lm	209.78±2.76 hijk	0.95	18
Z33	94.15±13.01 hij	4.89±0.65 kl	130.24±8.90 mno	0.77	26
均值 Average	94.13±4.70	5.96±0.32	222.64±13.84		
CV/%	25.36	28.51	35.35		

和PC2的代表性指标对果实品质的影响起主要作用。

2.4 不同柑橘品种(系)品质综合评价

PCA分析中的5个主成分反映了柑橘品质指标原数据的大部分信息,因此,可用这5个主因子进行柑橘品质综合评价。PCA分析得到的F1、F2、F3、F4、F5这5个主成分来代替20个指标对柑橘品质进行分析,根据各主成分模型获得得分,并以相应的相对方差贡献率为权重建立综合评价模型为 $F=$

$0.347F_1+0.265F_2+0.175F_3+0.118F_4+0.095F_5$,获得各品种综合得分及排名,得分高低反映果实综合品质的高低。由表9可知,综合得分排名前三的分别为兴津60、媛小春、明日见,表明这些品种果实风味相对较好,维生素C含量丰富。

2.5 聚类分析

不同品种(系)柑橘20个品质指标的热图分析结果见图2,将33个品种(系)划分为6类。第1类是

表 6 柑橘果实品质相关性分析
Table 6 Correlation analysis of fruit quality of citrus

品质指标 Quality indices	可溶性 固形物 含量 TSS content	可滴定 酸含量 TA content	固酸比 TSS/TA	维生素 C含量 Vc content	纵径 Vertical diameter	横径 Horizon- tal diameter	果形 指数 Fruit shape index	单果 质量 Single fruit mass	果皮厚 Peel thick- ness	蔗糖 含量 Sucrose content	葡萄糖 含量 Glucose content	果糖 含量 Fructose content	总糖 含量 Total sugar content	柠檬酸 含量 Citric acid content	苹果酸 含量 Malic acid content	酒石酸 含量 Tartaric acid content	总酸 含量 Total acid content	糖酸比 Sugar/ Acid	总黄酮 含量 Total fla- vonoids content	总酚含量 Total phenolics content	
可溶性固形物含量 1																					
TSS content	0.024	1																			
可滴定酸含量	0.163	-0.780**	1																		
TA content	0.210*	0.056	-0.388**	1																	
固酸比 TSS/TA	-0.404**	0.230*	-0.248*	0.099	1																
维生素 C 含量	-0.306**	-0.058	-0.069	-0.093	0.712**	1															
Vc content	-0.180	0.440**	-0.308**	0.269**	0.446**	-0.304**	1														
纵径	-0.259**	0.068	-0.109	-0.090	0.788**	0.870**	-0.033	1													
Vertical diameter	-0.344**	-0.024	-0.176	0.272**	0.692**	0.670**	0.081	0.560**	1												
横径	0.535**	-0.576**	0.691**	-0.154	-0.359**	-0.028	-0.499**	-0.045	-0.283**	1											
Horizontal diameter	0.805**	0.212*	-0.145	0.215*	-0.275**	-0.246*	-0.066	-0.130	-0.253*	0.182	1										
果形指数	0.758**	0.245*	-0.199*	0.287**	-0.279**	-0.294**	-0.007	-0.168	-0.264**	0.175	0.937**	1									
Fruit shape index	0.863**	-0.220*	0.331**	0.070	-0.417**	-0.199*	-0.345**	-0.129	-0.355**	0.765**	0.759**	0.760**	1								
单果质量	0.025	0.986**	-0.798**	0.086	0.181	-0.069	0.391**	0.036	-0.005	-0.591**	0.243*	0.269**	-0.211*	1							
Single fruit mass	-0.155	-0.380**	0.552**	-0.308**	-0.099	-0.191	0.072	-0.216*	-0.031	0.235*	-0.429**	-0.402**	-0.123	-0.444**	1						
果皮厚	0.163	-0.359**	0.268**	0.216*	-0.362**	-0.483**	0.092	-0.531**	-0.080	0.105	0.074	0.072	0.117	-0.320**	0.188	1					
Peel thickness	0.016	0.985**	-0.766**	0.060	0.167	-0.114	0.427**	-0.006	-0.014	-0.593**	0.208*	0.238*	-0.234*	0.993**	-0.337**	-0.282**	1				
蔗糖含量	0.275**	-0.640**	0.781**	-0.285**	-0.090	0.074	-0.270**	0.158	-0.252*	0.812**	0.081	0.079	0.578**	-0.698**	0.230*	0.033	-0.708**	1			
Sucrose content	-0.105	-0.106	0.003	-0.102	-0.466**	-0.283**	-0.259**	-0.382**	-0.259**	0.085	-0.115	-0.172	-0.042	-0.060	-0.012	0.018	-0.066	-0.104	1		
葡萄糖含量	0.008	-0.137	-0.049	0.018	-0.273**	-0.037	-0.313**	-0.117	-0.080	0.076	0.066	-0.073	0.042	-0.088	-0.290**	0.110	-0.127	-0.051	0.690**	1	
Glucose content																					
果糖含量																					
Fructose content																					
总糖含量																					
Total sugar content																					
柠檬酸含量																					
Citric acid content																					
苹果酸含量																					
Malic acid content																					
酒石酸含量																					
Tartaric acid content																					
总酸含量																					
Total acid content																					
糖酸比 Sugar/Acid																					
Sugar/Acid																					
总黄酮含量																					
Total flavonoids content																					
总酚含量																					
Total phenolics content																					

注: * 表示在 0.05 水平下显著相关, ** 表示在 0.01 水平下极显著相关。下同。Note: * . Indicate significant correlation at the 0.05 level; ** . Indicate significant correlation at the 0.01 level. The same below.

表7 柑橘果皮抗氧化能力与总黄酮、总酚含量相关性分析

Table 7 Correlation analysis of antioxidant capacities and contents of total flavonoids and phenolics in citrus peel

指标 Indices	总黄酮含量 Total flavo- noids content	总酚含量 Total pheno- lics content	ABTS ⁺ 自由基 清除能力 ABTS ⁺ free radical scavenging ability	DPPH自由 基清除能力 DPPH free radical scavenging ability	FRAP还 原能力 Iron reduction ability	抗氧化综 合评价 Comprehensive antioxidant capacity
总黄酮含量 Total flavonoids content	1					
总酚含量 Total phenolics content	0.690**	1				
ABTS ⁺ 自由基清除能力 ABTS ⁺ free radical scavenging ability	0.550**	0.699**	1			
DPPH自由基清除能力 DPPH free radical scavenging ability	0.597**	0.671**	0.493**	1		
FRAP还原能力 Iron reduction ability	0.514**	0.556**	0.266**	0.753**	1	
抗氧化综合评价 Comprehensive antioxidant capacity	0.671**	0.774**	0.681**	0.932**	0.838**	1

表8 主成分载荷矩阵、特征值及贡献率

Table 8 Factor loading, coefficient eigenvalues and variance contribution rates of principal components

品质指标 Quality indices	主成分1 PC1	主成分2 PC2	主成分3 PC3	主成分4 PC4	主成分5 PC5
可溶性固形物含量 TSS content	0.420	0.732	0.374	0.081	0.021
可滴定酸含量 TA content	-0.815	0.451	0.020	0.001	-0.301
固酸比 TSS/TA	0.842	-0.339	0.010	0.196	-0.153
维生素C含量 Vc content	-0.194	0.275	0.113	0.147	0.789
纵径 Vertical diameter	-0.570	-0.527	0.500	0.167	0.094
横径 Horizontal diameter	-0.248	-0.605	0.639	-0.332	0.027
果形指数 Fruit shape index	-0.512	0.074	-0.150	0.620	0.085
单果质量 Single fruit mass	-0.310	-0.501	0.723	-0.181	-0.072
果皮厚 Peel thickness	-0.391	-0.516	0.357	-0.003	0.473
蔗糖含量 Sucrose content	0.852	0.042	0.300	-0.071	-0.138
葡萄糖含量 Glucose content	0.141	0.822	0.433	-0.027	0.084
果糖含量 Fructose content	0.110	0.839	0.425	0.081	0.080
总糖含量 Total sugar content	0.633	0.580	0.479	-0.024	-0.035
柠檬酸含量 Citric acid content	-0.817	0.486	-0.003	-0.057	-0.241
苹果酸含量 Malic acid content	0.361	-0.406	-0.337	0.480	-0.247
酒石酸含量 Tartaric acid content	0.368	0.159	-0.383	0.353	0.532
总酸含量 Total acid content	-0.807	0.470	-0.057	0.013	-0.270
糖酸比 Sugar/Acid	0.787	-0.190	0.378	0.089	-0.198
总黄酮含量 Total flavonoids content	0.182	0.097	-0.575	-0.645	0.020
总酚含量 Total phenolics content	0.153	0.096	-0.271	-0.768	0.289
特征值 Eigenvalues	5.904	4.518	2.981	2.007	1.615
方差贡献率 Rate of variance/%	29.518	22.588	14.905	10.034	8.075
累计贡献率 Rate of cumulative variances/%	29.518	52.106	67.011	77.045	85.120

莱檬,得分最低,果实TA、柠檬酸、总酸含量高且果形指数大,说明莱檬与其他品种(系)差异显著。第2类为春香和胡柚,果实TSS/TA较高,纵径较大,且果皮相对较厚,得分较低。第3类为沃柑和早橘,蔗糖、总糖、糖酸比及苹果酸含量相对较高,得分相对较高。第4类为明日见,兴津60和媛小春,综合得分

排名前三,果实TSS、葡萄糖、果糖和总糖含量较高,这几个品种均属于杂柑类,亲本间存在一定的关联。第6类为鸡尾葡萄柚,果实蔗糖、总糖含量及糖酸比较高,纵、横径及单果质量较大,得分排名第四。其余24个品种(系)柑橘均为第5类,说明杂柑类、宽皮柑橘类及甜橙类间关联性较强。结合PCA

表9 不同柑橘品种(系)主成分得分及综合得分

Table 9 Principal component score and comprehensive score of different varieties (strains) of citrus

品种 Cultivar	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F	排名 Ranking
Z01	0.854	-0.608	3.251	-0.176	-0.804	0.607	4
Z02	-1.298	-0.854	0.340	-1.646	0.266	-0.786	32
Z03	-0.439	-0.538	-1.184	-1.370	0.129	-0.652	31
Z04	0.496	-0.867	-1.625	-0.075	0.309	-0.322	25
Z05	0.576	-0.570	-1.800	-1.330	0.175	-0.406	28
Z06	0.651	-0.315	-0.257	-0.996	-0.474	-0.065	18
Z07	0.957	0.139	-0.589	-0.013	-0.654	0.202	13
Z08	-0.176	0.562	-1.165	-1.065	-0.273	-0.268	24
Z09	0.298	0.218	-0.752	0.070	-0.411	-0.001	17
Z10	0.154	-0.969	-0.515	-0.143	-0.404	-0.349	26
Z11	2.235	-0.087	-0.368	0.012	-2.207	0.480	7
Z12	0.821	1.950	-0.163	-0.615	0.274	0.727	2
Z13	0.301	2.474	1.250	-0.221	-0.344	0.920	1
Z14	0.639	-0.437	0.510	0.790	-0.630	0.229	11
Z15	0.301	-0.764	1.182	-0.145	-0.246	0.068	16
Z16	-1.279	0.780	1.290	-1.731	0.125	-0.204	23
Z17	0.342	0.118	-0.345	-0.976	1.097	0.079	15
Z18	-0.083	-1.937	1.016	0.295	1.354	-0.201	21
Z19	0.401	1.664	0.682	0.085	-0.137	0.696	3
Z20	-0.507	1.312	-0.476	0.411	0.945	0.227	12
Z21	-0.120	-1.091	-0.433	-1.432	0.274	-0.549	30
Z22	0.433	-2.009	0.144	2.123	-0.999	-0.201	21
Z23	1.640	0.435	-0.324	0.599	-1.263	0.578	6
Z24	-0.106	0.094	-0.285	1.785	1.140	0.257	10
Z25	-0.521	-0.386	-0.089	0.566	0.612	-0.174	20
Z26	-0.009	1.203	0.086	1.242	1.110	0.583	5
Z27	-1.321	-0.144	1.423	-0.946	-1.260	-0.479	29
Z28	-0.502	-0.120	0.869	0.104	1.400	0.091	14
Z29	-0.551	0.088	-0.476	0.510	0.943	-0.101	19
Z30	0.184	0.519	-0.030	0.998	1.187	0.427	8
Z31	-1.013	-1.058	0.424	0.744	0.680	-0.405	27
Z32	0.237	0.549	-0.479	1.150	0.969	0.372	9
Z33	-3.595	0.649	-1.112	1.397	-2.885	-1.379	33

分析可知,第4类样本的果实品质最佳,第3类和第6类的果实品质较好。由此说明明日见,兴津60和媛小春果实品质相似,品质佳。沃柑和早橘的品质相近,品质较佳。

3 讨 论

随着人们对健康的日益关注,富含生物活性物质的柑橘品种将越来越受消费者青睐。本研究结果表明,甜橙类果实中维生素C含量高于杂柑,这与李勋兰等^[13]、朱丽莎等^[10]、洪林等^[11]的研究结果一致。柑橘果皮富含酚类物质,且不同品种(系)间含

量存在差异,总黄酮和总酚含量变化范围分别为21.71~65.30 mg·g⁻¹和15.43~41.07 mg·g⁻¹。宽皮柑橘类果实总黄酮和总酚含量均普遍高于甜橙类和莱檬,这与左龙亚等^[26]和郑洁等^[27]的研究结果基本一致。甜橙类品种间果实总黄酮、总酚及维生素C含量差异较宽皮柑橘和杂柑品种间的含量差异小,这可能由于样本中的甜橙类品种亲本具有相似性,而杂柑类亲本来源相对较复杂。青瓯柑和茶枝柑果皮的总黄酮和总酚含量明显高于其他品种(系),可作为功能性成分开发的原料。近年来,柑橘果实酚类物质的抗氧化活性是研究热点。高炜等^[28]和李娟等^[29]研究发现

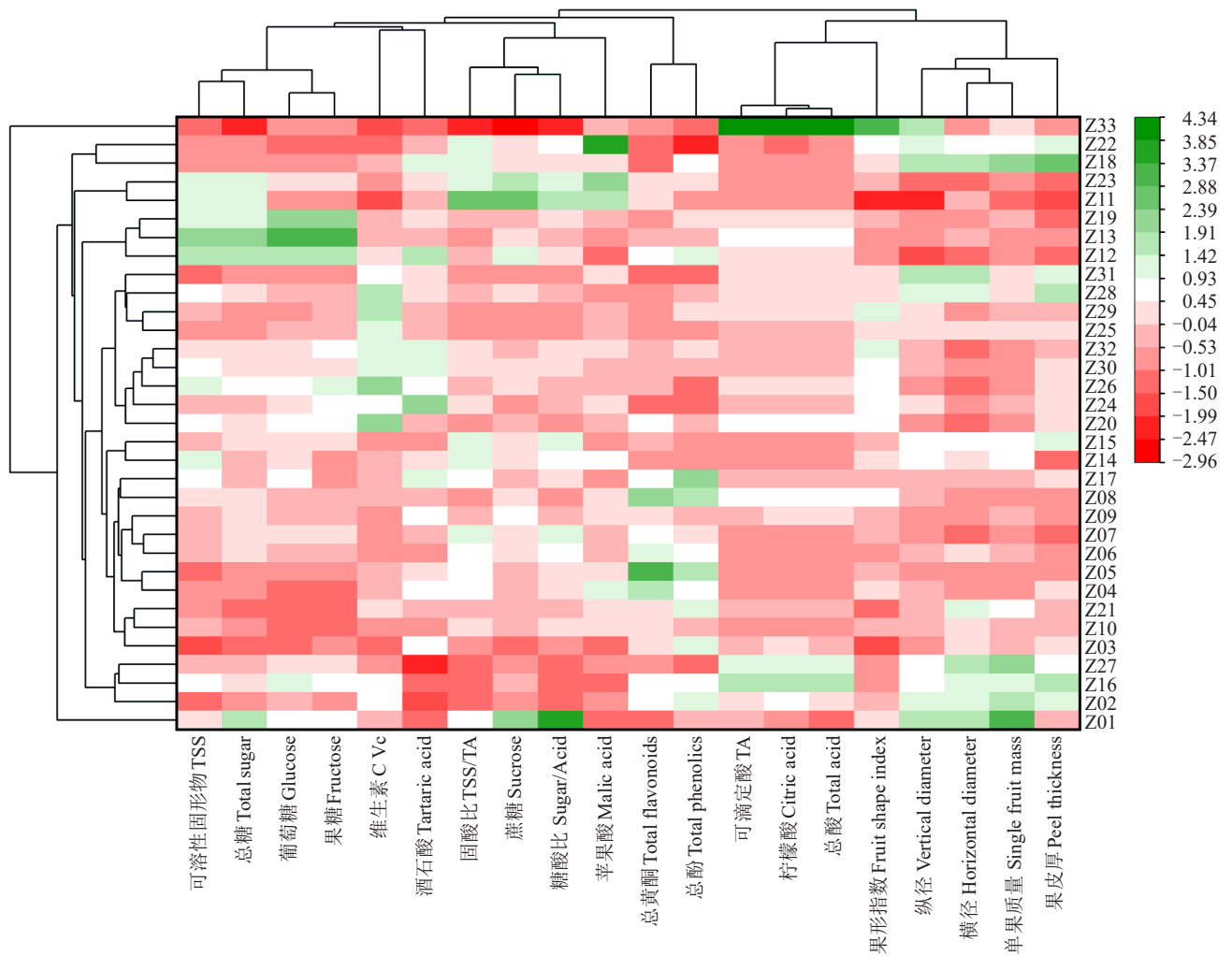


图2 不同柑橘品种(系)聚类分析热图

Fig. 2 Cluster analysis heat maps of different varieties (strains) of citrus

柑橘果皮对清除 DPPH 自由基、ABTS⁺ 自由基以及还原铁离子均有一定的促进作用, 本研究结果与之一致。但 3 种抗氧化能力检测方法评价同一品种果实的抗氧化活性存在一定的差异, 这可能是由于抗氧化机制不同造成的。此外, 结果还表明, 柑橘果实抗氧化活性与酚类物质含量呈正相关, 与前人研究结果一致^[30], 这可能与多酚是起抗氧化作用的主要物质有关。

糖、酸是柑橘果实风味物质的主要成分, 其含量和构成比例决定果实甜、酸味^[31-32]。本研究通过对 33 个柑橘品种(系)的糖、酸组分及含量进行分析测定, 结果表明, 柑橘果实中可溶性糖主要为蔗糖、果糖和葡萄糖。莱檬、明日见和兴津 60 中果糖占总糖含量比值为最高, 其余品种(系)果实中蔗糖比值最高, 这与前人研究结果基本一致^[33]。此外, 本研究还发现宽皮柑橘类以积累蔗糖为主, 甜橙类、7 个杂柑

及火焰葡萄柚以己糖(葡萄糖和果糖)和蔗糖共同积累, 而莱檬以积累己糖为主, 该结果与孙达^[9]、林媚等^[34]、吴孔杰等^[35]、Echeverria 等^[36]的基本一致。柑橘果实中含有柠檬酸、苹果酸、酒石酸、草酸等多种组分, 但大多数品种以其中的 1~2 种为主^[9, 37]。本研究中春香的苹果酸含量很高(占总酸含量的比值为 52.63%), 其余品种(系)均以柠檬酸和苹果酸为主, 其中柠檬酸比值为 63.21%~96.70%, 这与前期研究结果基本一致^[9, 34, 38]。

本研究中对 20 个柑橘果实品质指标进行 PCA 分析, 得到 5 个主成分, 累计贡献率达 85.120%, 蔗糖含量、果糖含量、单果质量、果形指数和维生素 C 含量是综合评价果实品质的主要指标。建立综合评价模型为 $F=0.347F_1+0.265F_2+0.175F_3+0.118F_4+0.095F_5$, 得到各品种(系)的综合得分及排名, 得分越高说明果实综合品质越好。兴津 60、媛小春、明日见、鸡尾葡

葡萄柚、439、沃柑、早橘排名前7,果实品质优良,可作为品种选育及推广种植的材料。总体上,杂柑综合得分较甜橙和宽皮柑橘高,说明杂柑果实品质更好,该结果与李勋兰等^[12]的不一致,可能是由供试材料及综合评价中所选用的果实品质指标不同所造成的。通过热图聚类分析将33个柑橘品种(系)分为6类,其中果实品质最佳的是第4类,由明日见、兴津60和媛小春组成,这3个品种有相同的亲本(清见);较好的是第6类的鸡尾葡萄柚;而相对较好的为沃柑和早橘组成的第3类。从热图聚类结果可看出,多数样本亲缘关系相近的品种聚为一类,说明遗传因素在影响柑橘果实品质的因素中起决定性作用。第5类的青瓠柑和茶枝柑得分排名靠后,品质较差,而果皮生物活性物质含量很高,可能由于本研究选取的大多与鲜食相关的品质指标还不够全面,后续应结合种植及消费需求,筛选出如功能因子、加工因子、特征因子等品质评价指标,建立更全面系统的评价体系。

4 结 论

通过对33个柑橘品种(系)20个品质指标进行检测分析,结果表明,品种间果实品质存在差异,而品质评价指标间有交叉性,蔗糖含量、果糖含量、单果质量、果形指数和维生素C含量是综合评价果实品质的主要指标。甜橙类果实维生素C含量较高,而宽皮柑橘类和杂柑类果皮酚类物质含量较高,抗氧化性较强,其中综合抗氧化评价价值排名前3的依次为清峰、青瓠柑和媛小春。热图聚类分析与PCA分析结果基本一致,两者结合可更系统、科学地评价不同品种柑橘果实品质的优劣。本研究结果可为柑橘品种结构调整、新品种选育及功能性成分的开发利用提供理论依据。

参考文献 References:

- [1] 邓秀新. 世界柑橘品种改良的进展[J]. 园艺学报, 2005, 32(6): 1140-1146.
DENG Xiuxin. Advances in world wide citrus breeding[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2005, 32(6): 1140-1146.
- [2] CHEN X M, TAIT A R, KITTS D D. Flavonoid composition of orange peel and its association with antioxidant and anti-inflammatory activities[J]. Food Chemistry, 2017, 218: 15-21.
- [3] 姚旭, 郇萍, 顾青. 4种甜橙皮黄酮类化合物体外抗氧化活性及降糖降脂功能研究[J]. 中国食品学报, 2022, 22(1): 49-57.
YAO Xu, LI Ping, GU Qing. Studies on antioxidant activity, hypoglycemic and lipid-lowering capacity of flavonoids in sweet orange peels *in vitro*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(1): 49-57.
- [4] SONG M Y, WU X, CHAROENSINPHON N, WANG M Q, ZHENG J K, GAO Z L, XU F, LI Z Z, LI F, ZHOU J Z, XIAO H. Dietary 5-demethylnobiletin inhibits cigarette carcinogen NNK induced lung tumorigenesis in mice[J]. Food & Function, 2017, 8(3): 954-963.
- [5] 单杨. 我国柑橘工业现状及发展趋势[J]. 农业工程技术(农产品加工业), 2014(4): 13-17.
SHAN Yang. Present situation and development trend of citrus industry in China[J]. Agricultural Engineering Technology (Agricultural Products Processing Industry), 2014(4): 13-17.
- [6] 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.
YIN Hualin, LIU Huiyu. Distribution characteristics of citrus varieties and selection of varieties suitable for planting in China[J]. China Fruits, 2022(1): 1-7.
- [7] 黄振东, 王鹏, 徐建国, 鹿连明, 陈国庆, 温明霞, 林媚. 浙东地区红美人杂柑果实品质与土壤和叶片养分的关系[J]. 果树学报, 2020, 37(1): 88-97.
HUANG Zhendong, WANG Peng, XU Jianguo, LU Lianming, CHEN Guoqing, WEN Mingxia, LIN Mei. Relationship between fruit quality and nutrients in soil and leaves of 'Hongmeiren' citrus hybrid cultivated in eastern Zhejiang province[J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(1): 88-97.
- [8] 曾秀丽. 不同生境下甜橙果实的质地研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2007.
ZENG Xiuli. Studies on the effects of habitats to sweet orange [*Citrus sinensis*(L.) Osbeck] fruit texture[D]. Chengdu: Sichuan Agriculture University, 2007.
- [9] 孙达. 不同柑橘种质资源中可溶性糖和有机酸含量的评价[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
SUN Da. Soluble sugar and organic acid contents evaluation of different citrus germplasm resources[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013.
- [10] 朱丽莎, 董超, 赵静, 江东, 王成秋, 焦必宁. 重庆主栽甜橙品种果实品质比较分析[J]. 中国南方果树, 2018, 47(5): 128-135.
ZHU Lisha, DONG Chao, ZHAO Jing, WANG Dong, WANG Chengqiu, JIAO Bining. Comparative analysis of fruit quality of main sweet orange varieties in Chongqing[J]. South China Fruits, 2018, 47(5): 128-135.
- [11] 洪林, 李勋兰, 杨蕾, 王武, 韩国辉, 程昌凤, 谭平. 重庆5个新引进晚熟杂柑品种品质表现初步评价[J]. 中国南方果树, 2018, 47(6): 25-30.
HONG Lin, LI Xunlan, YANG Lei, WANG Wu, HAN Guohui, CHENG Changfeng, TAN Ping. Preliminary evaluation of quality performance of five new introduced late-maturing mandarin cultivars in Chongqing[J]. South China Fruits, 2018, 47(6): 25-30.
- [12] 李勋兰, 洪林, 王武, 杨蕾, 谭平. 晚熟杂柑新品种果实品质综

- 合评价[J]. 果树学报, 2018, 35(2): 195-203.
- LI Xunlan, HONG Lin, WANG Wu, YANG Lei, TAN Ping. Comprehensive evaluation of fruit quality of new late-maturing mandarin cultivars[J]. Journal of Fruit Science, 2018, 35(2): 195-203.
- [13] 李勋兰, 洪林, 杨蕾, 王武, 韩国辉, 农江飞, 谭平. 11个柑橘品种果实营养成分分析与品质综合评价[J]. 食品科学, 2020, 41(8): 228-233.
- LI Xunlan, HONG Lin, YANG Lei, WANG Wu, HAN Guohui, NONG Jiangfei, TAN Ping. Analysis of nutritional components and comprehensive quality evaluation of citrus fruit from eleven varieties[J]. Food Science, 2020, 41(8): 228-233.
- [14] 王贵一, 孟嘉璐, 许文静, 陈昌琳, 刘思琪, 吕远平. 不同品种芒果的营养成分及风味物质分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(1): 71-79.
- WANG Guiyi, MENG Jiajun, XU Wenjing, CHEN Changlin, Liu Siqi, LÜ Yuanping. Analysis of nutritional components and flavor substances of different varieties of mangoes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(1): 71-79.
- [15] 姜璐, 包怡红, 贾雨彤, 赖章飞, 徐福成. 18个品种蓝靛果营养成分分析及综合品质评价[J]. 农业工程学报, 2022, 38(7): 326-335.
- JIANG Lu, BAO Yihong, JIA Yutong, LAI Zhangfei, XU Fucheng. Nutritional component analysis and comprehensive quality evaluation of 18 different varieties of *Lonicera caerulea*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(7): 326-335.
- [16] 严鑫, 吴巨友, 贡鑫, 焦玉茹, 袁凯莉, 鲁彬, 王苗苗, 陶书田, 王然, 张绍铃. 不同产地圆黄梨果实品质差异分析[J]. 果树学报, 2021, 38(12): 2082-2090.
- YAN Xin, WU Juyou, GONG Xin, JIAO Yuru, YUAN Kaili, LU Bin, WANG Miaomiao, TAO Shutian, WANG Ran, ZHANG Shaoling. Analysis of fruit quality of Wonhwang pear from different regions[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(12): 2082-2090.
- [17] 付勋, 张海彬, 聂青玉, 冯婷婷, 刘丹, 张艳, 李翔. 猕猴桃品质指标差异分析及GC-IMS分析果汁中挥发性物质[J]. 食品科学, 2022, 43(10): 247-254.
- FU Xun, ZHANG Haibin, NIE Qingyu, FENG Tingting, LIU Dan, ZHANG Yan, LI Xiang. Different varieties of kiwifruit: Analysis of differences in quality indexes and volatile components in juice by gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food Science, 2022, 43(10): 247-254.
- [18] 许文静, 陈昌琳, 邓莎, 刘怡君, 吕远平. 基于主成分分析和聚类分析的蓝莓品质综合评价[J]. 食品工业科技, 2022, 43(13): 311-319.
- XU Wenjing, CHEN Changlin, DENG Sha, LIU Yijun, LÜ Yuanping. Comprehensive evaluation of blueberry quality based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(13): 311-319.
- [19] 吴澎, 贾朝爽, 范苏仪, 孙玉刚. 樱桃品种果实品质因子主成分分析及模糊综合评价[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 291-300.
- WU Peng, JIA Chaoshuang, FAN Suyi, SUN Yugang. Principal component analysis and fuzzy comprehensive evaluation of fruit quality in cultivars of cherry[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(17): 291-300.
- [20] 陈妹姑, 林兴娥, 李新国, 刘咲岷, 高宏茂, 明建鸿, 戴敏洁, 周兆禧. 基于主成分分析和聚类分析的榴莲品质综合评价[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 278-286.
- CHEN Meigu, LIN Xing'e, LI Xinguo, LIU Xiaodi, GAO Hong-mao, MING Jianhong, DAI Minjie, ZHOU Zhaoxi. Comprehensive evaluation of durian quality based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 278-286.
- [21] 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.
- [22] 郑丽静, 聂继云, 闫震, 徐国锋, 王昆, 高源, 叶孟亮. 苹果可溶性糖组分及其含量特性的研究[J]. 园艺学报, 2015, 42(5): 950-960.
- ZHENG Lijing, NIE Jiyun, YAN Zhen, XU Guofeng, WANG Kun, GAO Yuan, YE Mengliang. Studies on the characteristics of the composition and content of soluble sugars in apple fruit[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2015, 42(5): 950-960.
- [23] 姚改芳, 张绍铃, 吴俊, 曹玉芬, 刘军, 韩凯, 杨志军. 10个不同系统梨品种的可溶性糖与有机酸组分含量分析[J]. 南京农业大学学报, 2011, 34(5): 25-31.
- YAO Gaifang, ZANG Shaoling, WU Jun, CAO Yufen, LIU Jun, HAN Kai, YANG Zhijun. Analysis of components and contents of soluble sugars and organic acids in ten cultivars of pear by high performance liquid chromatography[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2011, 34(5): 25-31.
- [24] 李楠, 杨欣, 孙元琳, 周素梅. 20种花茶黄酮、总酚及抗氧化活性分析[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(18): 34-39.
- LI Nan, YANG Xin, SUN Yuanlin, ZHOU Sumei. Flavones, total polyphenols and *in vitro* antioxidant activity in twenty kinds of herbal teas[J]. Food Research and Development, 2021, 42(18): 34-39.
- [25] ELENA G M, MORENO D A, CRISTINA G V. Comparison of 'Verna' lemon juice quality for new ingredients and food products[J]. Scientia Horticulturae, 2009, 120: 353-359.
- [26] 左龙亚. 柑橘亚属植物果皮多酚类物质提取及其抗氧化、抑菌活性检测[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- ZUO Longya. Polyphenols extraction and antioxidant, antifun-

- gal activities test of subgenus citrus[D]. Chongqing: Southwest University, 2018.
- [27] 郑洁, 赵其阳, 张耀海, 焦必宁. 超高效液相色谱法同时测定柑橘中主要酚酸和类黄酮物质[J]. 中国农业科学, 2014, 47(23):4706-4717.
ZHENG Jie, ZHAO Qiyang, ZHANG Yaohai, JIAO Bining. Simultaneous determination of main flavonoids and phenolic acids in citrus fruit by ultra performance liquid chromatography[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(23):4706-4717.
- [28] 高炜, 刘剑波, 朱明扬, 朱冬香, 李浪, 丁胜华, 单杨. 4种柠檬不同组织的酚类物质分布及其抗氧化特性[J]. 中国食品学报, 2019, 19(2):281-289.
GAO Wei, LIU Jianbo, ZHU Mingyang, ZHU Dongxiang, LI Lang, DING Shenghua, SHAN Yang. Distribution of phenolics in different tissues of four kinds of lemon and their antioxidant activity[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(2):281-289.
- [29] 李娟, 牛泽宇, 岳湘齐, 谢璇, 付鑫景, 陆俊. 不同产地甜橙果皮提取物抗氧化活性成分及能力研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(9):156-162.
LI Juan, NIU Zeyu, YUE Xiangqi, XIE Xuan, FU Xinjing, LU Jun. Study on antioxidant components and antioxidant activities of peels extracts from sweet orange in Hunan province[J]. Food and Machinery, 2019, 35(9):156-162.
- [30] ZHANG H, YANG Y F, ZHOU Z Q. Phenolic and flavonoid contents of mandarin (*Citrus reticulata* Blanco) fruit tissues and their antioxidant capacity as evaluated by DPPH and ABTS methods[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(1):256-263.
- [31] BALTAZARI A, MTUI H D, MWATAWALA M W, HOVE L M, MSOGOYA T, SAMWEL J, SUBRAMANIAN J. Effects of storage conditions, storage duration and post-harvest treatments on nutritional and sensory quality of orange [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck] fruits[J]. International Journal of Fruit Science, 2020, 20(4):737-749.
- [32] 沈胜男. 伦晚和红肉脐橙果实发育过程中主要品质变化的研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2009.
SHEN Shengnan. Study on the fruit quality changes during fruit development of Lane late and Cara cara navel orange[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009.
- [33] 杨阳, 唐宁, 李正国, 黄涛江. 5个晚熟柑橘品种果实发育期品质变化研究[J]. 西南农业学报, 2014, 27(1):263-267.
YANG Yang, TANG Ning, LI Zhengguo, HUANG Taojiang. Quality changes of five late-maturing citrus varieties during fruit development and maturity[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2014, 27(1):263-267.
- [34] 林媚, 姚周麟, 王天玉, 徐阳, 徐建国, 张伟清. 8个杂交柑橘品种的糖酸组分含量及特征研究[J]. 果树学报, 2021, 38(2):202-211.
LIN Mei, YAO Zhoulin, WANG Tianyu, XU Yang, XU Jianguo, ZHANG Weiqing. A study on the components and characteristics of sugars and acids in 8 hybrid citrus cultivars[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(2):202-211.
- [35] 吴孔杰, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 赵小虎, 武松伟. 柑橘果实糖积累特征及蔗糖转运机制研究进展[J]. 园艺学报, 2022, 49(12):2543-2558.
WU Kongjie, HU Chengxiao, TAN Qiling, SUN Xuecheng, ZHAO Xiaohu, WU Songwei. Research advanced on character of sugar accumulation and mechanism of sucrose transport in *Citrus* fruit[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2022, 49(12):2543-2558.
- [36] ECHEVERRIA E, GONZALEZ P C, BRUNE A. Characterization of proton and sugar transport at the tonoplast of sweet lime (*Citrus limmetioides*) juice cells[J]. Physiologia Plantarum, 1997, 101(2):291-300.
- [37] 陈发兴, 刘星辉, 陈立松. 果实有机酸代谢研究进展[J]. 果树学报, 2005, 22(5):526-531.
CHEN Faxing, LIU Xinghui, CHEN Lisong. Advances in research on organic acid metabolism in fruits[J]. Journal of Fruit Science, 2005, 22(5):526-531.
- [38] 张伟清, 林媚, 孙立方, 冯先桔, 平新亮. 不同产地‘红美人’杂柑的糖酸特征及品质比较[J]. 分子植物育种, 2022, 20(10):3386-3394.
ZHANG Weiqing, LIN Mei, SUN Lifang, FENG Xianju, PING Xinliang. Comparison of sugar and acid characteristics and fruit quality of ‘Hongmeiren’ hybrid citrus from different habitats[J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20(10):3386-3394.