

20 份黄皮种质资源果肉游离氨基酸对风味品质和药用价值的影响及其评价

罗睿雄¹, 魏玲², 王光瑛¹, 喻华平^{1,2}, 赵志常^{1*}, 高爱平¹

1. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所/国家热带果树品种改良中心, 海南海口 571101; 2. 海南大学园艺学院, 海南海口 570228

摘要: 为研究黄皮果实中游离氨基酸的组分特征、科学评价不同黄皮种质游离氨基酸对果实风味和药用价值的影响, 利用高效液相色谱法, 测定 20 份黄皮种质果肉的 20 种常见游离氨基酸, 采用味觉活度值、主成分分析和聚类分析等方法对各种质进行综合评价。结果表明: 在 20 份黄皮种质果肉中均含有除胱氨酸和精氨酸以外的 18 种游离氨基酸, 种类丰富, 且多数种质间含量差异显著; 各种质的总游离氨基酸质量浓度在 1309.7~9832.0 mg/kg 之间, 其中非必需氨基酸含量最高, 必需氨基酸含量次之, 半必需氨基酸含量最低; 药用氨基酸占总游离氨基酸的 6.3%~18.6%, 以天冬氨酸和谷氨酸为主; 根据氨基酸呈味特性的不同, 将 18 种氨基酸分为 3 大类呈味氨基酸, 发现种质 M1 的甜味氨基酸含量最高, G2 的鲜味氨基酸和苦味氨基酸含量最高; 仅 16 份种质中的丙氨酸与少数种质中的天冬酰胺、天冬氨酸的味觉活度值 (taste activity values, TAV) >1, 对黄皮果实风味有贡献; 大多数游离氨基酸呈显著或极显著正相关关系; 主成分分析提取到 4 个主成分, 累计贡献率达到 89.766%, 能较好地反映出黄皮果肉游离氨基酸的综合特征; 各黄皮种质的综合得分在-3.18~3.51 之间, M1 的综合得分最高; 聚类分析将 20 份黄皮种质聚为 3 大类, 其中第Ⅲ类群的 X2、Y-1、G2、M1 的总游离氨基酸、药用氨基酸、呈味氨基酸含量高, 氨基酸营养品质好, 风味品质佳。研究结果可为黄皮良种选育和品质评价提供参考依据。

关键词: 黄皮; 游离氨基酸; 风味品质; 药用价值; 评价

中图分类号: S666.6 文献标识码: A

Effect of Free Amino Acids of 20 Wampee Germplasm Resources Pulp on Flavor Quality and Medicinal Value and its Evaluation

LUO Ruixiong¹, WEI Ling², WANG Guangying¹, YU Huaping^{1,2}, ZHAO Zhichang^{1*}, GAO Aiping¹

1. Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / National Cultivar Improvement Center of Tropical Fruit Tree, Haikou, Hainan 571101, China; 2. College of Horticulture, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China

Abstract: To study the characteristics of free amino acids in wampee, the scientific evaluation of the effects of free amino acids in different wampee germplasm on fruit flavor and medicinal value, the contents of 20 common free amino acids were determined using HPLC with the pulp of 20 wampee germplasms. By using taste activity values, principal component analysis and cluster analysis were used to comprehensively evaluate each wampee germplasm. The results showed that the pulp contained 18 kinds of free amino acids except Cys and Arg. The content was significantly different among major wampee germplasm. The mass concentration of total free amino acids of the 20 wampee germplasms ranged from 1309.7 to 9832.0 mg/kg, among which the content of non-essential amino acids was the highest, the content of essential amino acids was the second, and the content of essential amino acid for children was the lowest. And the

收稿日期 2022-11-07; 修回日期 2022-12-26

基金项目 海南省重点研发计划项目 (No. ZDYF2020057); 海南省自然科学基金高层次人才项目 (No. 320RC728)。

作者简介 罗睿雄 (1987—), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 热带果树种质资源与育种。*通信作者 (Corresponding author): 赵志常 (ZHAO Zhichang), E-mail: zhaozhichang2001@163.com。

content of medicinal amino acids ranged from 6.3% to 18.6% of the total free amino acids, of which Asp and Glu were the major components. According to the different flavor characteristics of amino acids, 18 amino acids were divided into three categories of flavor amino acids, and found that M1 had the highest content of sweet amino acids, and G2 had the highest content of delicious and bitter amino acids. And the TAV of Ala in 16 wampee germplasm resources and Asp and Asn in a few wampee germplasm resources was greater than 1, which contributed to the flavor of wampee. Most free amino acid showed significant or highly significant positive relationships. Meanwhile, four principal components were extracted by principal component analysis, and the cumulative contribution reached 89.766%, which could better reflect the comprehensive characteristics of free amino acids of pulp. In general, the overall scores of each wampee germplasm ranged from -3.18 to 3.51, with M1 having the highest overall score. The 20 wampee germplasms were then clustered into three major groups by clustering analysis, among which X2, Y-1, G2 and M1 of group III had high contents of total free amino acids, medicinal amino acids and flavor amino acids, with good amino acid nutritional quality and flavor quality. The results could provide some reference for superior seed breeding and quality evaluation.

Keywords: wampee (*Clausena lansium*); free amino acids; flavor quality; medicinal value; evaluation

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.03.006

黄皮[*Clausena lansium* (Lour.) Skeels], 为芸香科黄皮属植物, 热带、亚热带珍稀果树, 其果实呈圆、椭圆、阔卵形, 富含糖、有机酸、维生素 C、黄酮苷等, 营养价值较高, 味感丰富, 具有酸、酸甜、清甜等多种风味, 适宜鲜食或加工, 具有理气化痰、行气止痛、润肺开胃、利尿消肿等药用价值, 属入药良材, 因此, 在民间被誉为“果中珍宝”, 受到众多消费者的喜爱^[1-2]。

游离氨基酸作为果实重要的生物活性成分之一, 对果实的营养价值、香气、口感以及促进人体健康等均具有一定作用, 但不同氨基酸的功能各有不同^[3]。如苯丙氨酸、谷氨酸、天冬氨酸及其衍生物可作为多种疾病的治疗药物^[4]; 某些氨基酸还参与支链脂肪族醇、酮、酯类等部分香气物质的合成^[5]; 各游离氨基酸还具有甜味、苦味、鲜味等不同味觉特性, 其含量对果实风味品质的形成具有重要影响^[6-7]。因此, 各类游离氨基酸经常被作为评价果实风味品质、营养价值、药用价值等的重要指标^[8]。

随着人类对常见大众水果中营养物质研究体系的逐步完善, 各类游离氨基酸的测定及组分分析也相继完成^[9]。而关于黄皮游离氨基酸的相关报道仍较少, 主要集中在黄皮干果游离氨基酸成分的研究或是对不同贮存条件下游离氨基酸的变化等方面的研究, 而对黄皮鲜果的相关报道主要是单一品种游离氨基酸的研究^[10-12], 尚未进行不同黄皮种质间游离氨基酸的比较、味觉活度值分析以及运用多元统计学方法对其游离氨基酸综合品质进行评价。

因此, 本研究以 20 份黄皮种质果肉为研究材料, 对 20 种常见游离氨基酸含量进行检测、比较、分类、味觉活度值分析及多元统计分析, 以期进

一步研究黄皮游离氨基酸的组分特征、风味品质、药用价值等, 为黄皮的开发利用、品质评价和良种选育提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试种质: 供试的 20 份黄皮种质由中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所国家热带果树品种改良中心基地提供, 种质编号分别为 300-2、A1、A2、A6、B1、G1、G2、H1、J1、J2、J3、M1、N-3、T1、X1、X2、X3、X4、Y-1、Z1, 涉及甜、酸甜、酸等不同果实风味类型, 所取样品分别来自树龄一致且长势健壮的黄皮树, 每个种质选取 3 株。在果实成熟期, 从果树不同方位, 选择 30 颗成熟度基本一致且具代表性的果实, 于实验室去梗洗净, 取果肉混合均匀并匀浆待测。

主要试剂: 20 种氨基酸对照品 (Sigma-Alorich); 色谱级乙腈、正己烷 (赛默飞世尔科技有限公司); 盐酸、三水合乙酸钠、三乙胺等 (国药集团化学试剂有限公司)。

主要仪器: E2695+2998PDA 液相色谱仪 (Waters), HH-1 水浴锅 (金坛市城东新瑞仪器), 1006 型超声波清洗机 (好顺超声设备), BS150M 分析天平 (上海友声衡器有限公司), ZGDCY-24 氮吹仪 (上海梓桂仪器有限公司), 有机滤膜 (13 mm, 0.22 μm , 天津市津腾实验设备有限公司), 5810R 高速冷冻离心机 (Eppendorf)。

1.2 方法

采用高效液相色谱法^[13]测定游离氨基酸。色谱参数: 柱前衍生试剂 0.1 mol/L 异硫氰酸苯酯-乙腈溶液; C18-H, 色谱柱为 4.6 mm $\times$ 250 mm $\times$

5 μm ；流动相：A 0.05 mol/L 三水合乙酸钠，B 乙腈：甲醇：水=6：2：2，梯度洗脱；波长为 254 nm；流速为 1 mL/min；柱温为 35 $^{\circ}\text{C}$ ；进样量为 10 μL 。

1.3 数据处理

运用 WPS office 软件整理数据，绘制雷达图，使用 SAS 软件进行差异显著性分析，应用 SPSS 18 软件进行相关性分析、主成分分析及聚类分析，利用 Heml 软件制作相关性热图。

2 结果与分析

2.1 不同黄皮种质果肉中游离氨基酸的含量分析

为研究黄皮种质果肉中所包含的游离氨基酸种类及含量，对 20 份黄皮种质果肉中常见的 20 种游离氨基酸进行检测与分析（表 1）。20 份黄皮种质果肉中除未检测出胱氨酸（Cys）和精氨酸（Arg）以外，均含有 18 种游离氨基酸，种类较为丰富。其中，在 20 份黄皮种质果肉中检测到的 18 种游离氨基酸包含苯丙氨酸（Phe）、甲硫氨酸（Met）、赖氨酸（Lys）、亮氨酸（Leu）、色氨酸（Trp）、苏氨酸（Thr）、缬氨酸（Val）、异亮氨酸（Ile）等 8 种必需氨基酸（essential amino acid, EAA），组氨酸（His）1 种半必需氨基酸（essential amino acid for children, CEAA），天冬氨酸（Asp）、丙氨酸（Ala）、甘氨酸（Gly）、谷氨酸（Glu）、谷氨酰胺（Gln）、酪氨酸（Tyr）、脯氨酸（Pro）、丝氨酸（Ser）、天冬酰胺（Asn）等 9 种非必需氨基酸（non-essential amino acid, NEAA）。其中 Phe、Met、Lys、Leu、Asp、Gly、Glu、Tyr 等 8 种氨基酸为药用氨基酸（medicinal amino acid, MAA）。

经进一步分析发现，各游离氨基酸含量在较多黄皮种质间存在显著差异，而在各种质间，脯氨酸和谷氨酰胺的差异性最大；各黄皮种质的总游离氨基酸（total free amino acid, TFAA）含量在 1309.7~9832.0 mg/kg，最高为最低的 7.51 倍，各黄皮种质依照 TFAA 含量排序依次为 A6<J1<N-3<T1<X1<H1<J2<G1<J3<Z1<X3<B1<X4<A2<300-2<A1<Y-1<X2<M1<G2；各种质资源的必需氨基酸含量介于 108.8~303.6 mg/kg 之间，而必需氨基酸与总游离氨基酸的比值（EAAs/TFAAs）为 3.0%~8.6%；药用氨基酸与总游离氨基酸的比值（MAAs/TFAAs）为 6.3%~18.6%，其中 Y-1 的药

用氨基酸含量最高为 1371.2 mg/kg，占 Y-1 总游离氨基酸的 17.0%，而 A6 的药用氨基酸含量最低，为 207.1 mg/kg，占 A6 总游离氨基酸的 15.8%，在 8 种药用氨基酸中，以天冬氨酸含量最高，谷氨酸次之，甲硫氨酸含量最低，表明黄皮果实内天冬氨酸和谷氨酸起主要的药用功效。

2.2 不同黄皮种质果肉中呈味氨基酸分析

根据氨基酸的呈味特性，可将检测到的黄皮果肉中的 18 种氨基酸分为 3 类，即甜味氨基酸（sweet amino acid, SAA），包括 Thr、Ala、Met、Ser、Pro、Gln、Gly 等 7 种氨基酸；苦味氨基酸（bitter amino acid, BAA），包括含 Ile、Val、Leu、Lys、His、Tyr、Phe、Trp 等 8 种氨基酸；鲜味氨基酸（delicious amino acid, DAA），包括 Asp、Glu、Asn 等 3 种氨基酸^[7, 14]。由表 2、图 1 所示，在不同黄皮种质的果肉中，SAA 均值最高，为 2716.69 mg/kg，其中 M1 的 SAA 含量最高为 5622.89 mg/kg，J1 的含量最低，仅 914.31 mg/kg，7 种呈味氨基酸的均值大小为 Ala>Pro>Ser>Gln>Thr>Gly>Met；DAA 均值为 1657.63 mg/kg，其中 G2 的含量最高，为 4593.70 mg/kg，A6 含量最低为 201.06 mg/kg，其变异系数最高，达 88.19%，说明在不同黄皮种质中其差异明显，3 种氨基酸的均值大小为 Asn>Asp>Glu；BAA 含量整体偏低，均值为 218.10 mg/kg，变异系数仅为 26.07%，在不同种质间其差异不太明显。同时，通过雷达图还可以看出 X2、Y-1、G2、M1 这 4 份种质的各类呈味氨基酸含量明显高于其他种质。

2.3 游离氨基酸味觉活度值分析

呈味氨基酸含量越高并不意味着对食品风味的贡献越大，不同氨基酸具有不同的滋味感知阈值^[15]。因此，采用味觉活度值（taste activity values, TAV）进一步研究各呈味氨基酸对黄皮果实风味的影响，当 TAV>1 时，则认为该氨基酸对果实风味的影响有贡献。如表 3 所示，同一氨基酸对不同黄皮种质的风味贡献不同，且变异系数均大于 10%，其中 Asn 的变异系数最大，达到 96.242%，表明不同种质间味感差异较大，具备较高的发展潜力，可为育种提供丰富的母本材料。不同黄皮种质中 18 种呈味氨基酸的 TAV 值也存在较大差异，在 20 份黄皮种质中，5 种甜味氨基酸（Thr、Ser、Met、Pro、Gly、Gln）、所有苦味氨基酸（Ile、Leu、Val、His、Lys、Tyr、Phe、Trp）及 1 种鲜味氨基酸（Glu）的 TAV 值均小于 1，表明这些呈

表 1 20 份黄皮种质果肉的游离氨基酸组成

Tab. 1 Free amino acids composition of 20 wampee germplasms pulp											mg/kg	
指标 Index	300-2	A1	A2	A6	B1	G1	G2	H1	J1	J2		
苯丙氨酸 Phe	28.8±0.3 ^d	29.1±0.1 ^d	28.1±0.4 ^{de}	16.3±0.3 ^k	43.7±0.5 ^a	26.6±0.7 ^{fg}	33.7±0.9 ^c	15.8±0.2 ^k	15.3±0.2 ^k	17.9±0.2 ^j		
甲硫氨酸 Met	4.3±0.0 ^e	4.4±0.0 ^{de}	3.9±0.1 ^f	3.0±0.1 ⁱ	4.8±0.1 ^c	3.7±0.1 ^g	4.9±0.1 ^c	3.2±0.0 ^{hi}	3.1±0.0 ⁱ	3.4±0.0 ^h		
赖氨酸 Lys	17.2±0.2 ^{ef}	16.1±0.1 ^{gh}	17.9±0.2 ^{de}	13.6±0.3 ^{ijk}	22.2±0.2 ^a	15.5±0.4 ^h	18.6±0.5 ^{cd}	13.3±0.2 ^{jk}	13.0±0.1 ^k	14.1±0.1 ⁱ		
亮氨酸 Leu	19.5±0.2 ^{fg}	21.3±0.1 ^{cd}	20.3±0.3 ^{ef}	11.6±0.2 ^k	25.7±0.3 ^a	19.0±0.5 ^g	26.1±0.7 ^a	12.0±0.2 ^k	12.3±0.1 ^k	13.9±0.1 ^j		
色氨酸 Trp	50.1±0.5 ^e	41.9±0.2 ^f	27.1±0.4 ^h	15.0±0.3 ^{lm}	26.7±0.3 ^h	20.9±0.5 ^{jk}	56.3±1.6 ^a	20.3±0.3 ^k	13.8±0.1 ^m	15.8±0.2 ^l		
苏氨酸 Thr	57.7±0.6 ^d	61.0±0.3 ^e	56.3±0.7 ^d	18.6±0.4 ^k	39.7±0.4 ^g	27.4±0.7 ⁱ	69.7±1.9 ^b	18.4±0.2 ^k	26.3±0.3 ⁱ	22.9±0.2 ^j		
缬氨酸 Val	59.1±0.6 ^{cd}	57.1±0.3 ^d	45.1±0.6 ^{fg}	19.4±0.4 ^m	67.8±0.7 ^b	38.8±1.0 ^j	72.3±2.0 ^a	23.1±0.3 ^l	24.2±0.3 ^l	33.4±0.3 ^j		
异亮氨酸 Ile	14.3±0.1 ^h	16.0±0.1 ^g	17.0±0.2 ^f	11.2±0.2 ^{jk}	21.0±0.2 ^c	17.1±0.4 ^f	22.0±0.6 ^b	11.0±0.1 ^k	11.6±0.1 ^{jk}	13.0±0.1 ⁱ		
组氨酸 His	37.9±0.4 ^{de}	39.5±0.2 ^d	43.8±0.6 ^c	29.0±0.5 ^k	35.0±0.4 ^{fg}	31.1±0.8 ^{ijk}	50.1±1.4 ^b	29.6±0.4 ^{jk}	29.4±0.3 ^{jk}	31.0±0.3 ^{ijk}		
天冬氨酸 Asp	503.7±5.2 ^d	665.0±3.3 ^c	296.4±3.9 ^g	61.3±1.2 ^m	389.4±4.2 ^f	187.6±4.8 ^h	894.7±24.9 ^b	91.8±1.2 ^l	114.6±1.2 ^k	148.2±1.5 ^j		
丙氨酸 Ala	2790.1±29.0 ^c	2859.2±14.4 ^c	2442.3±31.9 ^d	502.8±9.5 ^m	2070.0±22.3 ^{fg}	867.9±22.3 ⁱ	3768.4±105.0 ^a	789.0±9.9 ^{ij}	626.2±6.5 ^{kl}	775.9±7.8 ^{ij}		
甘氨酸 Gly	59.2±0.6 ^c	46.4±0.2 ^f	53.1±0.7 ^e	24.1±0.5 ^{hi}	52.6±0.6 ^e	26.0±0.7 ^h	66.1±1.8 ^b	20.2±0.3 ^k	23.0±0.2 ^{ij}	24.7±0.2 ^{hi}		
谷氨酸 Glu	133.3±1.4 ^d	97.6±0.5 ^f	94.6±1.2 ^f	53.3±1.0 ^j	78.9±0.9 ^h	106.1±2.7 ^e	179.3±5.0 ^a	45.8±0.6 ^k	59.4±0.6 ^{ij}	86.2±0.9 ^g		
谷氨酰胺 Gln	85.3±0.9 ^e	63.0±0.3 ^g	105.0±1.4 ^a	19.2±0.4 ^{no}	56.8±0.6 ^h	21.2±0.5 ⁿ	71.0±2.0 ^c	17.9±0.2 ^o	19.7±0.2 ^{no}	42.2±0.4 ^j		
酪氨酸 Tyr	36.1±0.4 ^b	22.8±0.1 ^{gh}	48.7±0.6 ^a	23.9±0.5 ^{gh}	33.6±0.4 ^c	24.2±0.6 ^{fg}	37.4±1.0 ^b	26.0±0.3 ^e	13.5±0.1 ^l	21.0±0.2 ⁱ		
脯氨酸 Pro	681.3±7.1 ^e	560.3±2.8 ^d	923.2±12.0 ^b	302.9±5.7 ^{ij}	427.0±4.6 ^f	133.4±3.4 ^a	316.6±8.8 ⁱ	414.6±5.2 ^f	82.0±0.9 ^o	192.9±1.9 ^m		
丝氨酸 Ser	614.4±6.4 ^b	626.3±3.2 ^b	423.0±5.5 ^d	97.9±1.9 ^k	336.3±3.6 ^g	177.9±4.6 ^h	625.0±17.4 ^b	160.3±2.0 ^{hi}	134.0±1.4 ^j	176.8±1.8 ^h		
天冬酰胺 Asn	1508.0±15.7 ^e	1762.2±8.9 ^d	868.0±11.3 ^g	86.5±1.6 ^l	1560.7±16.8 ^e	478.8±12.3 ^{ij}	3519.7±98.1 ^a	139.0±1.7 ^l	236.6±2.5 ^k	444.0±4.4 ^j		
总游离氨基酸 TFAAs	6700.4	6989.1	5514.0	1309.7	5291.9	2223.0	9832.0	1851.3	1457.9	2077.4		
必需氨基酸 EAAs	251.0	246.7	215.9	108.8	251.7	169.0	303.6	117.0	119.5	134.4		
半必需氨基酸 CEAAAs	37.9	39.5	43.8	29.0	35.0	31.1	50.2	29.6	29.4	31.0		
非必需氨基酸 NEAAAs	6411.5	6702.9	5254.3	1171.9	5005.2	2022.9	9478.2	1704.7	1309.0	1912.0		
药用氨基酸 MAAs	802.1	902.7	563.1	207.1	651.0	408.7	1260.7	228.1	254.1	329.5		
EAAs/TFAAs/%	3.7	3.5	3.9	8.3	4.8	7.6	3.1	6.3	8.2	6.5		
MAAs/TFAAs/%	12.0	12.9	10.2	15.8	12.3	18.4	12.8	12.3	17.4	15.9		

续表 1 20 份黄皮种质果肉的游离氨基酸组成
Tab. 1 Free amino acids composition of 20 wampee germplasms pulp (continued)

指标 Index	J3	M1	N-3	T1	X1	X2	X3	X4	Y-1	Z1
苯丙氨酸 Phe	21.1±0.2 ⁱ	25.5±0.6 ^{gh}	21.1±0.2 ⁱ	27.3±0.2 ^{ef}	16.4±0.2 ^k	35.6±0.6 ^b	25.5±0.4 ^{gh}	24.7±0.4 ^b	36.5±0.4 ^b	25.1±0.4 ^b
甲硫氨酸 Met	3.4±0.0 ^h	5.7±0.1 ^b	3.1±0.0 ⁱ	3.0±0.0 ⁱ	3.1±0.0 ⁱ	4.0±0.1 ^f	4.5±0.1 ^d	4.5±0.1 ^{de}	4.7±0.0 ^c	9.3±0.1 ^a
赖氨酸 Lys	17.3±0.2 ^{ef}	19.5±0.4 ^b	12.9±0.1 ^k	14.4±0.1 ⁱ	13.9±0.2 ^{ijk}	19.2±0.3 ^{bc}	16.7±0.3 ^{fg}	16.0±0.3 ^{gh}	18.3±0.2 ^d	19.6±0.3 ^b
亮氨酸 Leu	18.0±0.2 ^h	23.5±0.5 ^b	13.9±0.1 ^j	15.9±0.1 ⁱ	17.6±0.2 ^h	22.9±0.4 ^b	21.8±0.3 ^c	20.6±0.4 ^{de}	20.6±0.2 ^{de}	25.5±0.4 ^a
色氨酸 Trp	27.4±0.3 ^h	52.0±1.2 ^b	23.4±0.2 ^j	26.2±0.2 ^h	14.9±0.2 ^{lm}	44.1±0.7 ^e	33.3±0.5 ^g	46.1±0.8 ^d	51.9±0.5 ^b	22.2±0.3 ^{ij}
苏氨酸 Thr	69.0±0.8 ^b	85.8±1.9 ^a	33.7±0.3 ^h	22.3±0.2 ^j	28.2±0.3 ⁱ	52.6±0.9 ^e	47.8±0.7 ^f	53.0±0.9 ^e	51.5±0.5 ^e	56.2±0.8 ^d
缬氨酸 Val	42.0±0.5 ^h	54.4±1.2 ^c	22.1±0.2 ⁱ	29.5±0.3 ^k	28.8±0.3 ^k	59.7±1.0 ^c	46.1±0.7 ^{fg}	46.4±0.8 ^f	43.9±0.5 ^{gh}	45.9±0.7 ^{fg}
异亮氨酸 Ile	15.4±0.2 ^g	25.1±0.6 ^a	11.0±0.1 ^k	12.0±0.1 ^j	13.1±0.1 ⁱ	21.1±0.3 ^c	17.5±0.3 ^{ef}	18.1±0.3 ^{de}	15.3±0.2 ^g	18.6±0.3 ^d
组氨酸 His	32.4±0.4 ^{hi}	68.9±1.5 ^a	30.0±0.2 ^{jk}	31.4±0.3 ^{ij}	30.1±0.3 ^{jk}	51.0±0.8 ^b	37.2±0.6 ^c	44.8±0.8 ^c	36.1±0.4 ^{ef}	33.9±0.5 ^{gh}
天冬氨酸 Asp	173.4±2.0 ^{hi}	280.3±6.2 ^g	69.4±0.5 ^m	160.4±1.4 ^{ij}	160.7±1.8 ^{ij}	903.9±14.9 ^b	301.1±4.5 ^g	428.5±7.5 ^e	1045.0±10.9 ^a	294.4±4.4 ^g
丙氨酸 Ala	1699.6±19.3 ^h	3514.8±78.1 ^b	546.7±4.2 ^{lm}	691.4±5.9 ^{jk}	610.0±6.7 ^{klm}	2446.0±40.4 ^d	2134.1±32.2 ^f	2283.1±40.1 ^e	2544.6±26.5 ^d	2004.0±30.3 ^g
甘氨酸 Gly	36.4±0.4 ^g	86.0±1.9 ^a	21.7±0.2 ^{jk}	17.8±0.2 ⁱ	20.4±0.2 ^k	36.9±0.6 ^g	48.5±0.7 ^f	56.1±1.0 ^d	38.1±0.4 ^g	52.8±0.8 ^e
谷氨酸 Glu	82.4±0.9 ^{gh}	108.4±2.4 ^e	99.4±0.8 ^f	61.0±0.5 ⁱ	84.3±0.9 ^g	141.2±2.3 ^c	85.9±1.3 ^g	109.8±1.9 ^e	174.1±1.8 ^b	50.1±0.8 ^{ki}
谷氨酰胺 Gln	32.9±0.4 ^k	48.0±1.1 ⁱ	14.5±0.1 ^p	26.2±0.2 ^m	65.6±0.7 ^f	88.0±1.5 ^b	28.1±0.4 ^{lm}	29.5±0.5 ⁱ	88.7±0.9 ^b	74.4±1.1 ^d
酪氨酸 Tyr	24.9±0.3 ^{ef}	25.9±0.6 ^e	19.4±0.2 ^j	32.7±0.3 ^c	16.9±0.2 ^k	33.2±0.5 ^c	22.5±0.3 ^h	29.3±0.5 ^d	33.9±0.4 ^c	48.3±0.7 ^a
脯氨酸 Pro	376.6±4.3 ^g	1095.1±24.3 ^a	490.3±3.8 ^e	287.7±2.5 ^{jk}	273.3±3.0 ^k	349.3±5.8 ^h	374.6±5.7 ^g	225.7±4.0 ⁱ	548.0±5.7 ^d	676.6±10.2 ^c
丝氨酸 Ser	327.9±3.7 ^g	787.5±17.5 ^a	132.4±1.0 ^j	154.6±1.3 ⁱ	129.8±1.4 ^j	407.6±6.7 ^{de}	391.1±5.9 ^e	447.6±7.9 ^e	326.3±3.4 ^g	370.0±5.6 ^f
天冬酰胺 Asn	552.9±6.3 ^{hi}	2822.4±62.8 ^c	84.2±0.7 ⁱ	173.7±1.5 ^{kl}	265.3±2.9 ^k	3462.2±57.2 ^a	998.1±15.1 ^f	1506.7±26.5 ^e	2986.9±31.1 ^b	595.8±9.0 ^b
总游离氨基酸 TFAAs	3553.0	9128.8	1649.2	1787.6	1792.2	8178.5	4634.5	5390.5	8064.4	4423.0
必需氨基酸 EAAs	213.6	291.5	141.3	150.6	136.0	259.1	213.2	229.4	242.6	222.5
半必需氨基酸 CEAAAs	32.4	68.9	30.0	31.4	30.1	51.1	37.2	44.8	36.1	33.9
非必需氨基酸 NEAAs	3307.0	8768.4	1478.0	1605.7	1626.2	7868.2	4384.1	5116.4	7785.6	4166.5
药用氨基酸 MAAs	376.9	574.8	261.0	332.5	333.3	1196.9	526.5	689.5	1371.2	525.2
EAAs/TFAAs/%	6.0	3.2	8.6	8.4	7.6	3.2	4.6	4.3	3.0	5.0
MAAs/TFAAs/%	10.6	6.3	15.8	18.6	18.6	14.6	11.4	12.8	17.0	11.9

注：同行不同小写字母表示不同种质间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters on the same row indicate significant difference between different germplasm ($P<0.05$).

表 2 呈味氨基酸含量统计
Tab. 2 Statistics of taste active amino acid content

指标 Index	含量 Content/(mg·kg ⁻¹)			变异系数 CV/%
	变幅 Amplitude	均值 Mean	标准差 SD	
甜味氨基酸	914.31~5622.89	2716.69	1466.13	53.97
苦味氨基酸	133.05~316.55	218.10	56.87	26.07
鲜味氨基酸	201.06~4593.70	1657.63	1461.87	88.19

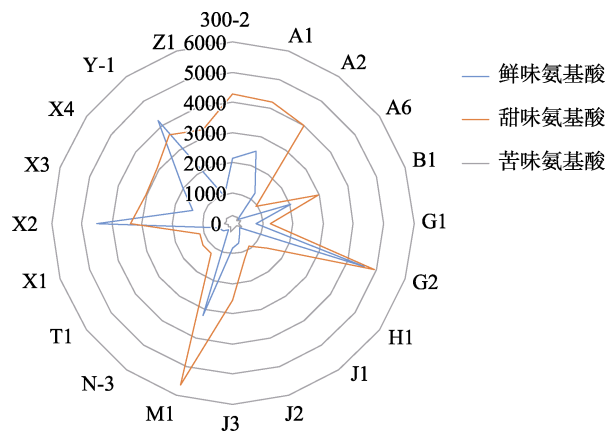


图 1 不同黄皮种质果肉的呈味氨基酸雷达图
Fig. 1 Radar chart of taste-active amino acids in different wampee germplasm pulp

味氨基酸对果实风味无贡献；甜味氨基酸 Ala 的 TAV 值除在种质 A6 和 N-3 中小于 1 外，在其余 18 份种质中均大于 1；鲜味氨基酸 Asn 的 TAV 值除在 300-2、A1、B1、G2、M1、X2、X4、Y-1 等 8 份种质中大于 1 外，在其他样品中均小于 1；而鲜味氨基酸 Asp 的 TAV 值仅在 Y-1 种质中大于 1。说明大多数黄皮种质果实味道酸甘，适宜鲜食，还可加工制成蜜饯、果脯、果酱和极具特色的果汁等食品，具有生津止渴之功效，300-2、X2、Y-1 等部分黄皮种质的果实具有鲜、清甜感，还可用于开发制成调味品，具有提效增味、促进食欲的功效。另外，苦黄皮种质味苦难咽，但药用价值高，具有敛气镇咳、养胃去燥等功效。

2.4 黄皮种质果肉中游离氨基酸相关性分析

20 份黄皮种质的 18 种游离氨基酸间存在一定相关性（图 2）。18 种游离氨基酸间均呈正相关，大多数呈显著或极显著关系，且相关系数≥0.300，相关性较高，其中 Gly、Ser、Ala、Leu、Lys、Thr 等氨基酸间的相关性系数较高，呈极显著水平，2 种甜味氨基酸 Ser 和 Ala 间相关性最高，相关性系数为 0.952，鲜味氨基酸 Glu 和甜味氨基酸 Met 之间的相关系数最低，仅为 0.076，相关性不高。

表 3 不同黄皮种质果肉呈味氨基酸的味觉活度值
Tab. 3 Taste activity values of flavor amino acids in different wampee germplasms pulp

类别 Sort	游离氨基酸 FAA	味道阈值 Taste threshold/(mg·kg ⁻¹)	TAV		变异系数 CV/%
			变幅 Amplitude	均值 Mean	
甜味氨基酸	苏氨酸 Thr	2600	0.007~0.033	0.017	43.363
	丝氨酸 Ser	1500	0.065~0.525	0.228	58.933
	丙氨酸 Ala	600	0.838~6.281	2.997	58.444
	甲硫氨酸 Met	300	0.010~0.031	0.014	34.076
	脯氨酸 Pro	3000	0.027~0.365	0.146	58.438
	甘氨酸 Gly	1100	0.016~0.078	0.037	46.085
	谷氨酰胺 Gln	2500	0.007~0.042	0.020	57.316
苦味氨基酸	异亮氨酸 Ile	900	0.012~0.028	0.018	25.353
	亮氨酸 Leu	1900	0.006~0.014	0.010	24.194
	缬氨酸 Val	1500	0.013~0.048	0.029	36.260
	组氨酸 His	200	0.145~0.344	0.188	26.626
	赖氨酸 Lys	500	0.026~0.044	0.033	15.923
	酪氨酸 Tyr	2600	0.005~0.019	0.011	32.621
	苯丙氨酸 Phe	1500	0.010~0.024	0.017	29.888
	色氨酸 Trp	900	0.015~0.063	0.035	45.281
鲜味氨基酸	天冬氨酸 Asp	1000	0.061~1.045	0.358	83.025
	谷氨酸 Glu	300	0.153~0.598	0.322	38.860
	天冬酰胺 Asn	1000	0.084~3.520	1.203	96.242

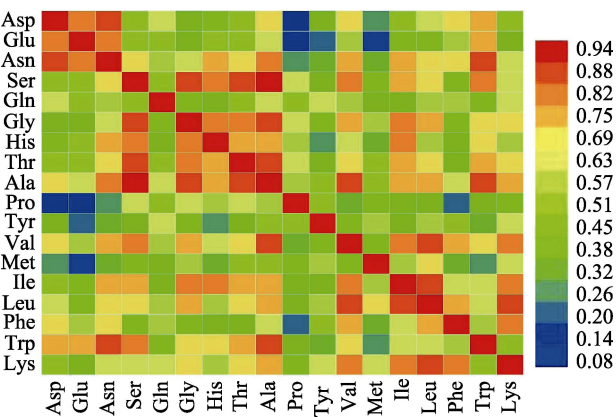


图 2 各游离氨基酸的相关性热图
Fig. 2 Correlation heat map of free amino acids

2.5 不同黄皮种质果肉中游离氨基酸主成分分析

对 20 份黄皮种质果肉内的 18 种游离氨基酸进行主成分分析 (principal component analysis, PCA), 以累计贡献率达到 85% 及以上的标准进行主成分的提取, 提取到 4 个主成分, 其累计贡献率为 89.776% (表 4), 说明这 4 个主成分提取有效, 可以代表不同黄皮种质果肉游离氨基酸的品质。在 4 个主成分中, 主成分 1 的贡献率最高, 达到 65.304%, 说明主成分 1 对氨基酸品质的影响最大, 在主成分 1 中, 18 种游离氨基酸的特征值均为正值, 对评价结果起正向作用, 其中, Lys、Leu、Trp、Thr、Val、Ile、His、Ala、Gly、Ser、Asn 等 11 种游离氨基酸的载荷值均大于 0.800, 包含了大部分游离氨基酸, 体现了总游离氨基酸的品质。主成分 2 的方差贡献率为 10.637%, 主要由 Met、Asp、Glu、Pro 共同影响, 其中苦味氨基酸 Asp、Glu 的特征值为负值, 甜味氨基酸 Met 和 Pro 的特征值为正值, 主要体现不同黄皮种质果肉中鲜味氨基酸和甜味氨基酸的品质。主成分 3 的方差贡献率为 8.461%, 主要由苦味氨基酸 Phe、Tyr、His 等共同影响, 主要反映苦味氨基酸的品质。主成分 4 的贡献率最低, 为 5.364%, 对游离氨基酸品质的影响最小, 主要受非必需氨基酸 Gln 和 Pro 的影响, 反映非必需氨基酸的信息。

2.6 不同黄皮种质果肉中游离氨基酸的综合评价

根据主成分分析发现, 提取出的 4 个主成分累计贡献率达 89.766%, 可以有效替代 18 种氨基酸对 20 份黄皮种质进行综合评价。而 4 个主成分分别从不同方面体现了各黄皮种质果肉的游离氨

表 4 主成分特征值、贡献率及载荷矩阵
Tab. 4 Eigenvalues, contribution rate and loading matrix of principal component

指标 Index	主成分 Principal component			
	1	2	3	4
贡献率/%	65.304	10.637	8.461	5.364
累计贡献率/%	65.304	75.941	84.402	89.766
特征值	11.755	1.915	1.523	0.966
苯丙氨酸 Phe	0.758	-0.235	0.447	-0.165
甲硫氨酸 Met	0.599	0.554	0.244	-0.119
赖氨酸 Lys	0.865	0.202	0.307	-0.214
亮氨酸 Leu	0.899	0.126	0.222	-0.280
色氨酸 Trp	0.858	-0.322	-0.242	0.120
苏氨酸 Thr	0.870	0.157	-0.304	0.059
缬氨酸 Val	0.917	-0.093	0.113	-0.218
异亮氨酸 Ile	0.873	0.133	-0.076	-0.378
组氨酸 His	0.806	0.053	-0.455	-0.018
天冬氨酸 Asp	0.761	-0.540	0.216	0.121
丙氨酸 Ala	0.969	-0.021	-0.156	0.058
甘氨酸 Gly	0.884	0.288	-0.273	-0.062
谷氨酸 Glu	0.679	-0.633	-0.038	0.166
谷氨酰胺 Gln	0.698	-0.027	0.392	0.470
酪氨酸 Tyr	0.602	0.335	0.530	0.303
脯氨酸 Pro	0.583	0.530	-0.188	0.475
丝氨酸 Ser	0.895	0.099	-0.349	0.056
天冬酰胺 Asn	0.878	-0.397	-0.073	-0.023

基酸品质, 单一主成分不能对其品质进行综合评价, 因此, 通过 4 个主成分的特征向量权重值 and 对应方差贡献率对各主成分的得分进行加权求和^[14], 构建得到综合评价方程为: $Y=0.653\ 04\times Y_1+0.106\ 37\times Y_2+0.084\ 61\times Y_3+0.053\ 64\times Y_4$, 最终计算得到不同黄皮种质的主成分得分和综合排序 (表 5)。20 份黄皮种质的综合排名由低到高依次为 J1<A6<H1<N-3<J2<X1<T1<G1<J3<X3<X4<A1<A2<B1<300-2<Z1<Y-1<X2<G2<M1, 综合得分在 -3.18~3.51 之间, 其中有 9 份黄皮种质的氨基酸品质综合得分为负数, 其余均为正数, 说明多数种质的游离氨基酸高于平均水平。

2.7 不同黄皮种质果肉中游离氨基酸的聚类分析

采用 ward 最小方差法和平方欧氏距离法对 20 份黄皮种质果肉的 18 种游离氨基酸进行系统聚类分析 (图 3)。在欧式距离为 5 时, 可将 20 份黄皮种质分为 3 大类。第 I 类由 A6、H1、J1、N-3、J2、X1、G1、T1 等 8 份黄皮种质组成, 其

表 5 不同黄皮种质的主成分得分及综合排序
Tab. 5 Principal component scores and comprehensive ranking of different wampee germplasm

种质 Germplasm	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y	排序 Sorting
300-2	2.66	-0.23	-0.16	1.59	1.78	6
A1	2.04	-0.52	-0.74	0.27	1.23	9
A2	1.97	1.71	0.83	2.14	1.65	8
A6	-4.64	0.28	-0.23	0.27	-3.01	19
B1	2.42	0.59	2.19	-2.04	1.72	7
G1	-2.10	-0.61	0.54	-1.34	-1.46	13
G2	5.68	-1.82	-0.19	-0.47	3.47	2
H1	-4.29	0.47	-0.35	0.56	-2.75	18
J1	-4.66	-0.44	-0.75	-0.48	-3.18	20
J2	-3.36	-0.40	0.00	-0.04	-2.24	16
J3	-0.84	0.43	-0.65	-0.35	-0.58	12
M1	5.51	1.99	-3.41	-0.20	3.51	1
N-3	-3.75	-0.27	-0.71	0.53	-2.51	17
T1	-3.11	-0.11	0.80	0.08	-1.97	14
X1	-3.36	-0.35	0.14	0.28	-2.20	15
X2	3.62	-2.01	0.82	-0.19	2.21	3
X3	0.22	0.28	-0.60	-1.10	0.06	11
X4	1.16	-0.44	-1.02	-0.79	0.58	10
Y-1	2.92	-2.33	1.33	1.40	1.85	4
Z1	1.92	3.78	2.17	-0.13	1.83	5

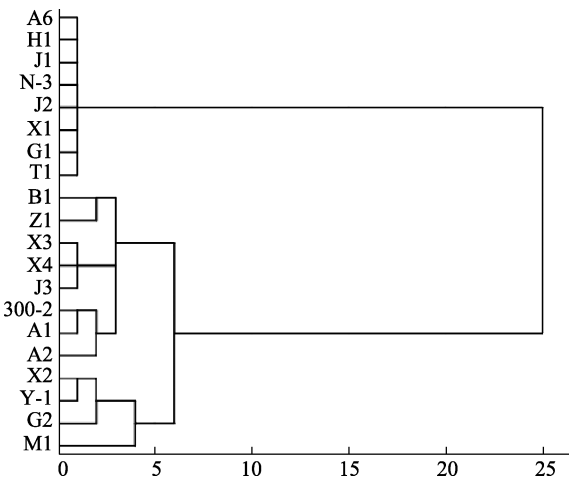


图 3 不同黄皮种质资源系统聚类分析
Fig. 3 System cluster analysis of different wampee germplasm resources

品质相近，综合得分均为负值，排名靠后，总游离氨基酸和各呈味氨基酸含量低，氨基酸综合品质不佳；第Ⅱ大类群由 8 份黄皮种质组成，即 B1、Z1、X3、X4、J3、300-2、A1、A2，其总游离氨基酸、药用氨基酸和各类呈味氨基酸均较高；第Ⅲ类群包括 X2、Y-1、G2、M1 等 4 份黄皮种质，

其总游离氨基酸、药用氨基酸、鲜味氨基酸和甜味氨基酸高，营养价值高，氨基酸综合品质好。

3 讨论

氨基酸作为组成蛋白质的基本单位，是影响果实品质的重要成分之一^[9]。本研究检测到 20 份黄皮种质果肉中含有 18 种常见的游离氨基酸，其中包括 8 种 EAAs, 1 种 CEAAAs 以及 9 种 NEAAs, 表明黄皮果肉的游离氨基酸种类较多，20 份黄皮种质中的 TFAA 浓度在 1309.7~9832.0 mg/kg 之间，均值为 4592.4 mg/kg，总体高于猕猴桃、杨梅、苹果等的鲜果^[16-18]，与张永明等^[11]的研究结果基本一致。同时，各种质间游离氨基酸的差异性也反映出黄皮遗传积累特征及种质间的复杂多样性，可为育种提供丰富的母本材料。黄皮果肉中主要的药用氨基酸为 Asp 与 Glu, 与戴宏芬等^[18]在黄皮果肉药用氨基酸的相关研究结果一致, Asp 有镇咳祛痰的功效, Glu 有健脑的功效^[17]，因此，黄皮的药用价值也可能与药用氨基酸含量相关。但据张永明等^[11]对黄皮鲜品和药材中的氨基酸进行对比分析发现，在药材的加工过程中，氨基酸的含量可能会发生改变，同时氨基酸含量在各种质间存在较大差异，所以需要尽可能地选择 Y-1 等药用氨基酸含量高的种质进行药用加工。

游离氨基酸作为水果营养品质的重要评价标准之一，游离氨基酸会对水果风味产生影响^[9]。本研究检测出的游离氨基酸均为呈味氨基酸，其中，SAA 和 DAA 占比最大，二者总含量占 TFAA 的 89.30%~96.82%，根据 TAV>1 来判断不同氨基酸对黄皮种质风味的影响发现，仅甜味氨基酸 Ala 和鲜味氨基酸 Asn、Asp 对黄皮种质的风味具有贡献，其中 Ala 对 18 份种质的风味有影响，Asn 对 8 份黄皮种质风味有贡献，而 Asp 仅对 Y-1 的风味有贡献，表明 Ala 是影响多数黄皮种质口感的主要物质，且 Ala、Asn 和 Asp 对 Y-1 的风味均有贡献，说明其味感比较丰富，这与实际口感评价结果一致。同时，Asn 的变异系数最大，达到 96.242%，在各种质间差异明显，表明其具备较大的发展空间。

目前，多元统计法已广泛应用于众多科研的综合评价及特征性指标筛选中^[19]，但该方法主要运用于黄皮糖组分、香气成分、有机酸成分等评价方面^[20-23]，因此，本研究运用相关性分析、主成分分析和聚类分析，对 20 份黄皮种质果肉中检

测到的18种游离氨基酸组分含量进行综合评价,结果表明18种游离氨基酸间均互为正相关,且多数氨基酸间存在显著或极显著关系,这说明氨基酸间相互起到促进作用;经主成分分析提取到4个有效主成分,累计方差贡献率达到89.776%,并构建了综合评价方程,即 $Y=0.653\ 04\times Y_1+0.106\ 37\times Y_2+0.084\ 61\times Y_3+0.053\ 64\times Y_4$,可用来预测黄皮果肉游离氨基酸品质的高低,其中,综合得分最高的前4份种质依次为M1、G2、X2、Y-1;同时,通过聚类分析,将20份黄皮种质分为3大类,分析得到X2、Y-1、G2、M1等4份氨基酸品质较好的黄皮种质,与主成分分析结果一致,进一步说明二者的结果均能较好地反映不同黄皮种质间游离氨基酸的差异。

综合上述分析,黄皮果肉中游离氨基酸种类及含量丰富,具有一定的营养价值和药用价值,其中以种质G2的总游离氨基酸和鲜味氨基酸含量最高,种质Y-1的药用氨基酸含量高,种质M1的甜味氨基酸含量最高,可为今后黄皮的优良品种选育提供参考依据。

参考文献

- [1] 林针懿, 邬静, 刘乐, 郭聪, 陆玲, 凌鹏. 实生黄皮种质资源收集与表型性状遗传多样性分析[J]. 分子植物育种, 2022, 20(16): 5415-5428.
LIN Z Y, WU J, LIU L, GUO C, LU L, LING P. Collection of wampee (*Clausena lansium*) seeding germplasm resources and genetic diversity analysis of phenotypic traits[J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20(16): 5415-5428. (in Chinese)
- [2] 陆育生, 彭程, 常晓晓, 陈喆, 林志雄, 潘建平, 邱继水. 黄皮种质资源抗氧化特性的鉴定与评价[J]. 经济林研究, 2020, 38(2): 17-25.
LU Y S, PENG C, CHANG X X, CHEN Z, LIN Z X, PAN J P, QIU J S. Appraisal and evaluation on antioxidant properties in *Clausena lansium* fruits from different germplasm resources[J]. Non-wood Forest Research, 2020, 38(2): 17-25. (in Chinese)
- [3] ROBERTO M, LAURA M, AUGUSTA R M. Recent trends in the analysis of amino acids in fruits and derived food-stuffs[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2013, 405(25): 7941-7956.
- [4] 王远山, 徐建妙, 陈小龙, 郑裕国. 药用氨基酸的应用及其生物催化与生物转化法生产[J]. 中国现代应用药学, 2005, 22(增刊3): 825-828.
WANG Y S, XU J M, CHEN X L, ZHENG Y G. Application, biocatalytic synthesis and biotransformation of pharmaceutical amino acids[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2005, 22(Suppl. 3): 825-828. (in Chinese)
- [5] 陈华峰, 唐玉情, 潘亚婕, 郭晓瑞. 果实风味的代谢基础及其调控机制研究进展[J]. 植物研究, 2021, 41(3): 474-480.
CHEN H F, TANG Y Q, PAN Y J, GUO X R. Progress on the metabolic basis and regulation mechanism of fruit flavor[J]. Bulletin of Botanical Research, 2021, 41(3): 474-480. (in Chinese)
- [6] 李学贤, 张雪, 童灵, 张思文, 叶德练, 吴良泉. 游离氨基酸改善作物风味品质综述[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(4): 73-81.
LI X X, ZHANG X, TONG L, ZHANG S W, YE D L, WU L Q. Summary of free amino acids to improve crop flavor quality[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(4): 73-81. (in Chinese)
- [7] 蒋滢, 徐颖, 朱庚伯. 人类味觉与氨基酸味道[J]. 生物资源, 2002(4): 70.
JIANG Y, XU Y, ZHU G B. Human taste and amino acid taste[J]. Biotic Resources, 2002(4): 70. (in Chinese)
- [8] 林媚, 张伟清, 王天玉, 柯甫志, 冯先桔, 姚周麟, 徐程楠. 15个杂交柑橘品种的果实游离氨基酸组成及其对风味品质的影响[J]. 果树学报, 2022, 39(3): 352-365.
LIN M, ZHANG W Q, WANG T Y, KE F Z, FENG X J, YAO Z L, XU C N. Study on the composition of free amino acid and the effects on fruit flavor quality in 15 hybrid citrus varieties[J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(3): 352-365. (in Chinese)
- [9] 朱奕凡, 王妍, 汪国云, 周超超, 焦云, 甘可欣, 孙德利, 朱长青, 贾惠娟, 高中山. 不同杨梅品种果实游离氨基酸组成分析[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2021, 47(6): 736-742.
ZHU Y F, WANG Y, WANG G Y, ZHOU C C, JIAO Y, GAN K X, SUN D L, ZHU C Q, JIA H J, GAO Z S. Analysis of free amino acid composition in fruits of different bayberry (*Morella rubra*) varieties[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2021, 47(6): 736-742. (in Chinese)
- [10] 杨婉如, 彭健, 张晓敏, 余元善, 卜智斌, 徐玉娟, 陈树鹏. 不同热风干燥温度下的黄皮干燥特性及品质研究[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(22): 214-220.
YANG W R, PENG J, ZHANG X M, YU Y S, BU Z B, XU Y J, CHEN S P. Drying kinetics and quality characteristics of wampee (*Clausena lansium* L.): based on different hot air-drying temperatures[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(22): 214-220. (in Chinese)

- [11] 张永明, 黄亚非, 黄际薇, 李瑞珍, 刘杰. 黄皮果氨基酸成分分析[J]. 中药材, 2006(9): 921-924.
ZHANG Y M, HUANG Y F, HUANG J W, LI R Z, LIU J. Study on amino acids from the fruit of *Clausena lansium*[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2006(9): 921-924. (in Chinese)
- [12] 李升锋, 陈卫东, 徐玉娟, 肖更生, 吴继军, 陈智毅. 无核黄皮的营养成分[J]. 食品科技, 2005(6): 96-98.
LI S F, CHEN W D, XU Y J, XIAO G S, WU J J, CHEN Z Y. Nutrition composition of seedless wampee[J]. Food Science and Technology, 2005(6): 96-98. (in Chinese)
- [13] 高铭媛, 王森, 侯哲, 赵春杰. 柱前衍生 UPLC 法测定甜瓜籽中 13 种游离氨基酸的含量[J]. 沈阳药科大学学报, 2015, 32(8): 612-617.
GAO M H, WANG M, HOU Z, ZHAO C J. Pre-column derivatization UPLC method for determination of 13 amino acids in muskmelon seed[J]. Journal of Shenyang Pharmaceutical University, 2015, 32(8): 612-617. (in Chinese)
- [14] 彭琼瑶, 刘玉倩, 敖芳, 杨琦宏, 杨家干, 牛素贞, 宋勤飞. 基于主成分分析和聚类分析的湄潭翠芽游离氨基酸特性评价[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(6): 283-291.
PENG Q Y, LIU Y Q, AO F, YANG Q H, YANG J G, NIU S Z, SONG Q F. Evaluation of free amino acid characteristics of *Meitan cuiya* based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(6): 283-291. (in Chinese)
- [15] 王馨雨, 王蓉蓉, 王婷, 杨绿竹, 刘洁, 黎欢, 张群, 单杨, 丁胜华. 不同品种百合内外鳞片游离氨基酸组成的主成分分析及聚类分析[J]. 食品科学, 2020, 41(12): 211-220.
WANG X Y, WANG R R, WANG T, YANG L Z, LIU J, LI H, ZHANG Q, SHAN Y, DING S H. Principal component analysis and cluster analysis for evaluating the free amino acid composition of inner and outer lily bulb scales from different cultivars[J]. Food Science, 2020, 41(12): 211-220. (in Chinese)
- [16] 孙立军, 郭玉蓉, 李景景, 付成程, 李卓. 长富 2 号苹果果肉中游离氨基酸地域特性分析[J]. 食品科学, 2012, 33(5): 53-57.
SUN L J, GUO Y R, LI J J, FU C C, LI Z. Analysis of regional characteristics of free amino acids in pulp of "Nagafu 2" apples from different habitats[J]. Food Science, 2012, 33(5): 53-57. (in Chinese)
- [17] 揣冰洁. 猕猴桃果中氨基酸含量分析与利用[J]. 农业与技术, 1999(5): 67-68, 78.
CHUAI B J. Analysis and utilization of amino acids in kiwi fruit[J]. Agriculture and Technology, 1999(5): 67-68, 78. (in Chinese)
- [18] 戴宏芬, 赖志勇, 黄炳雄, 李建光, 肖维强, 王晓容. 反相 HPLC 法测定杨梅和黄皮果肉中的氨基酸[J]. 仲恺农业技术学院学报, 2008(3): 7-11.
DAI H F, LAI Z Y, HUANG B X, LI J G, XIAO W Q, WANG X R. Determination of amino acids in flesh of wax-berry and wampee by RP-HPLC[J]. Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2008(3): 7-11. (in Chinese)
- [19] 张婷, 刘慧琴, 郭勤卫, 李朝森, 章心惠, 项小敏, 赵东风, 万红建. 十六份辣椒材料游离氨基酸组成的主成分分析与聚类分析[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(4): 640-650.
ZHANG T, LIU H Q, GUO Q W, LI C S, ZHANG X H, XIANG X M, ZHAO D F, WAN H J. Principal component analysis and cluster analysis for evaluating free amino acid composition of 16 pepper materials[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2021, 33(4): 640-650. (in Chinese)
- [20] 彭程, 常晓晓, 陈喆, 邱继水, 林志雄, 陆育生. 不同类型黄皮果实香气成分和特征香气物质分析[J]. 经济林研究, 2019, 37(4): 50-60.
PENG C, CHANG X X, CHEN Z, QIU J X, LIN Z X, LU Y S. Analysis on aromatic components and specific aromatic components in different clones of *C. lansium* fruits[J]. Non-wood Forest Research, 2019, 37(4): 50-60. (in Chinese)
- [21] 彭程, 陈喆, 常晓晓, 林志雄, 邱继水, 陆育生. 黄皮种质资源果汁中有机酸成分的分析[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2019, 51(4): 57-66.
PENG C, CHEN Z, CHANG X X, LIN Z X, QIU J X, LU Y S. A componential analysis of organic acid in wampee fruit juice from germplasm resources[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2019, 51(4): 57-66. (in Chinese)
- [22] 陈慧琼, 彭程, 常晓晓, 陈喆, 陆育生, 邱继水. 黄皮种质资源果实糖组分及其含量特征分析[J]. 广东农业科学, 2022, 49(4): 8-18.
CHEN H Q, PENG C, CHANG X X, CHEN Z, LU Y S, QIU J S. Analysis of soluble sugar components and contents in fruits from different wampee germplasm resources[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2022, 49(4): 8-18. (in Chinese)
- [23] 喻华平, 赵志常, 高爱平, 罗睿雄. 基于主成分分析和聚类分析的 23 份黄皮种质资源的品质评价[J]. 热带作物学报, 2022, 43(7): 1357-1364.
YU H P, ZHAO Z C, GAO A P, LUO R X. Quality evaluation of 23 species of *Clausena lansium* (Lour.) Skeels germplasm resources based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(7): 1357-1364. (in Chinese)