

# 柑橘果实风味组学研究进展

张海朋, 彭昭欣, 石梅艳, 温欢, 张红艳, 徐娟

园艺植物生物学教育部重点实验室/华中农业大学园艺林学学院, 武汉 430070

**摘要** 风味是决定柑橘果实整体品质的重要因素, 直接影响消费者的购买意愿。风味组学则是解析风味品质物质基础的组学技术。柑橘风味包含甜味、酸味、香味、苦味、质地和异味等多种属性。本文对柑橘风味组学的产生、研究策略、方法以及研究进展进行了综述和展望。文章提出, 柑橘风味组学相关研究重点将更注重消费者偏好性, 发掘影响柑橘风味的最主要代谢物, 以期在生产中定向培育或利用栽培技术提升和改善柑橘果实品质, 助力产业的良性发展。

**关键词** 柑橘; 果实品质; 风味组学; 品质性状标志性代谢物; 代谢组指纹图谱; 定向育种

**中图分类号** S 666 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)01-0032-08

## 1 风味组学概念

近些年, 基因组学、转录组学、蛋白组学和代谢组学等组学技术飞速发展, 已逐渐发展成熟<sup>[1]</sup>。风味组学(flavoromics)来源于化学计量学和代谢组学领域, 本质上是基于非靶向方法快速收集不同样本的代谢数据, 进而挖掘和鉴定与果实风味品质相关的代谢物<sup>[2]</sup>。风味组学源于代谢组学而又异于代谢组学, 代谢组学主要是运用靶向和非靶向方法鉴定所有小分子代谢物<sup>[3]</sup>, 而风味组学主要用于鉴定与风味相关的代谢组分<sup>[4]</sup>, 因此, 风味组学是在代谢组学的基础上, 对所有风味相关代谢物质进行针对性和综合性分析<sup>[5]</sup>。

柑橘中的香味、苦味、酸味、甜味和质地等风味属性相关物质主要包括影响香味的挥发性物质<sup>[6]</sup>, 影响苦味的类黄酮和柠檬苦素类似物<sup>[7-8]</sup>, 影响甜味的可溶性糖, 影响酸味的有机酸<sup>[9]</sup>, 影响果实化渣品质的木质素、果胶、纤维素和半纤维素<sup>[10]</sup>, 以及影响鲜味的氨基酸和异味的醇、醛等物质。每项风味属性都可关联到众多代谢物质, 但并非所有代谢物质都对果实风味有贡献, 一般起决定作用的物质仅为其中几种。虽然风味通常被描述为味觉和嗅觉的组合, 但是外观、质地、口感和消费者前期体验记忆也

在味觉中发挥重要作用, 这表明多种不同的感官信号被加工以产生整体感觉, 将这些感官信息整合到大脑中, 最终导致味觉偏好或厌恶, 并对随后的感知和行为产生强烈影响<sup>[11]</sup>。前人对柑橘中风味物质的研究已有较多报道, 但大多仅针对其中一项品质相关物质。复杂的是, 不同风味属性代谢物质在含量及感官水平上有一定的相关性, 如可溶性糖产生的甜味对苦味有掩味作用<sup>[12]</sup>; 在柑橘汁胞发生木质化时, 其他风味也在不同程度上变淡<sup>[13]</sup>。因此, 现代风味组学的相关研究不仅要有色谱、质谱等分析仪器的检测结果, 还需要结合消费者感官评价的数据, 才可以综合解析风味品质之间不同层面上的关联性。

## 2 柑橘中风味组学研究进展

### 2.1 糖酸风味

果实甜味和酸味是消费者最关注的性状之一, 可溶性糖含量主要影响果实甜度, 而有机酸主要影响酸度。柑橘中可溶性糖主要包括蔗糖、果糖和葡萄糖等, 汁胞中可溶性糖随果实发育逐渐积累, 以蔗糖为主, 且积累速度高于葡萄糖和果糖, 不同柑橘品种中可溶性糖含量存在较大差异<sup>[14]</sup>。野生柑橘果实中糖含量与栽培种没有显著差异, 由此可见, 糖性

收稿日期: 2020-12-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD1000200); 国家自然科学基金项目(31672102)

张海朋, E-mail: haipengzhang@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 徐娟, E-mail: xujuan@mail.hzau.edu.cn

状在长期驯化过程中没有发生显著变化<sup>[15]</sup>。

柑橘果实中有机酸主要以柠檬酸为主,其含量在不同组织中有着显著差异,主要在果实中积累。不同柑橘种质可根据有机酸含量分为低酸、中酸和高酸三类。低酸品种有红暗柳甜橙;中酸品种有华盛顿甜橙和 Valencia 夏橙等;高酸品种有尤力克柠檬和马叙葡萄柚等<sup>[16]</sup>。前人研究表明低酸品种红暗柳甜橙汁胞中有机酸含量在不同发育期始终较低,而其野生型暗柳甜橙有机酸含量在果实发育早期显著上升,而后逐渐降低<sup>[17]</sup>。纽荷尔脐橙在采后贮藏过程中汁胞有机酸和可溶性糖呈现下降趋势,而 2,4-D 会延缓有机酸和可溶性糖降低速度<sup>[18]</sup>。研究发现野生柑橘中有机酸含量显著高于栽培种,可能在驯化过程中受负选择<sup>[15]</sup>。

## 2.2 苦味

柑橘苦味物质主要包括两类,一类为前苦味物质,主要为类黄酮新橘皮糖苷类化合物,以柚皮苷含量最高<sup>[8]</sup>;另一类为后苦味物质,属于三萜类的柠檬苦素类似物,以柠檬苦素含量最高,其次为诺米林素<sup>[5,19]</sup>。

前人对同一地区生长的甜橙、宽皮柑橘、柠檬、枸橼等果汁中类黄酮类物质进行 LC-MS 检测,发现其类黄酮类物质种类和含量差异都颇大<sup>[20-21]</sup>。柑橘中类黄酮物质丰富,主要以糖苷形式存在,主要分为新橘皮糖苷和芸香糖苷类。有前苦味的柑橘主要为柚、葡萄柚和酸橙等种质,含有大量的苦味新橘皮糖苷类物质。宽皮柑橘、甜橙和柠檬等无前苦味现象<sup>[22-23]</sup>,主要积累非苦味的芸香糖苷类类黄酮,尤以橙皮苷含量占优<sup>[8]</sup>。苦味柚皮苷和非苦味橙皮苷分别由 1,2-鼠李糖苷转移酶(1,2RhaT)和 1,6-鼠李糖苷转移酶(1,6RhaT)催化黄烷酮-7-O-葡萄糖糖苷而成。前人研究表明,柚苦味种质中,1,2RhaT 蛋白正常,可催化合成大量柚皮苷,而甜橙等非前苦味种质中该编码基因发生移码突变,不能合成苦味物质柚皮苷<sup>[8,24]</sup>。同一柑橘不同组织中前苦味物质含量也存在较大差异,如葡萄柚果肉中含有大量柚皮苷、橙皮苷和橙皮素等,但果皮中仅能检测到少量柚皮苷和橙皮苷<sup>[20]</sup>。果实发育期也会影响类黄酮物质积累,研究发现甜橙和化州柚等类黄酮含量随果实发育呈现下降趋势<sup>[8,25]</sup>。而且,在贮藏过程中 3 种柚果实和果皮中类黄酮含量均呈下降的趋势<sup>[26]</sup>。

柑橘种质中广泛存在柠檬苦素和诺米林素<sup>[19]</sup>。柠檬苦素和诺米林素在温州蜜柑果实黄皮层、白皮

层和囊衣中含量较高,汁胞中含量较低;Oroblanco 葡萄柚主要在囊衣中积累;柠檬苦素和诺米林素含量在上述 2 种柑橘中都随果实发育逐渐降低<sup>[7,19]</sup>。开花后 100~150 d 红肉处红柚与同时期的绿肉翡翠柚相比,处红柚黄皮层、白皮层、囊衣和汁胞中柠檬苦素和诺米林素均显著高于翡翠柚,至果实成熟期,处红柚汁胞中柠檬苦素和诺米林素含量分别为翡翠柚的 4.91 倍和 4.62 倍<sup>[27]</sup>。

## 2.3 香味

香味物质是指被人类嗅觉感知而感受到愉悦的挥发性物质,影响柑橘的香味品质。需要说明的是,不是所有的挥发性物质都有气味,跟其香气活性值有关<sup>[28]</sup>;不是所有的挥发性物质都有香味,跟其结构和性质有关,也与人对香味物质的嗅觉阈值有关<sup>[29]</sup>;不是所有认为有香味的物质,都被任何人、在任何介质中或任意浓度下感知到香味。因此,挥发性物质不能被称为香味物质。以柑橘果实为例,呈花香味的代谢物主要有  $\beta$ -月桂烯、顺式-/反式-芳樟醇氧化物、 $\beta$ -芳樟醇、橙花醇和反式-橙花叔醇等,呈果香味的物质主要有乙酸甲酯、乙酸丁酯、 $\beta$ -月桂烯、己醇和  $\alpha$ -石竹烯等<sup>[30]</sup>。

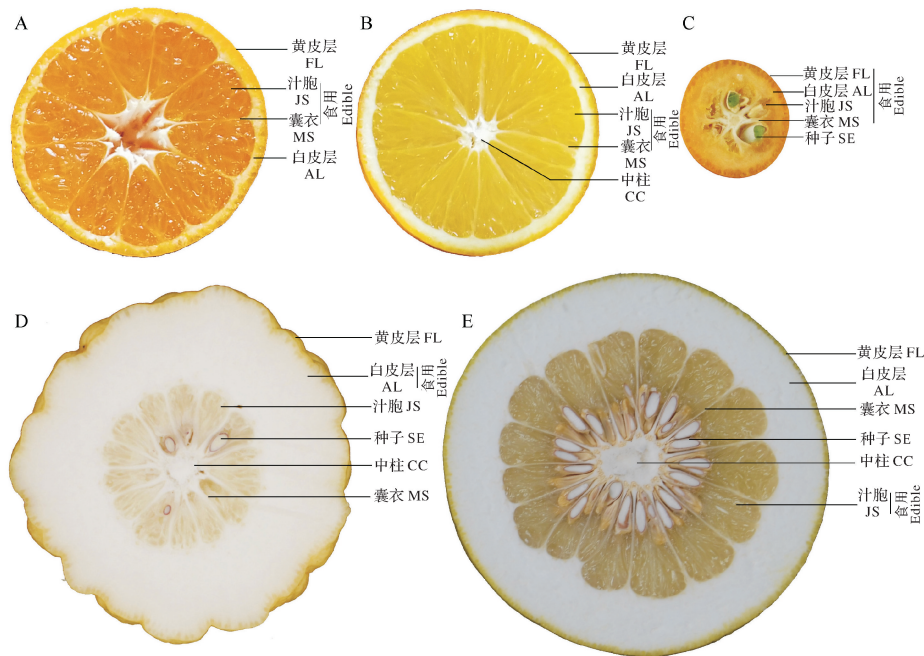
柑橘果实中富含挥发性萜类物质,还产生芳香族化合物、醛、酮和酯类物质等其他挥发性成分,其中萜类物质均在含量和种类上占优<sup>[28]</sup>。大多数柑橘种质果实中最主要的挥发性物质均为 *d*-柠檬烯<sup>[6,31]</sup>。特征香气物质则因种质而异,如  $\beta$ -月桂烯、顺式-/反式-芳樟醇氧化物对莽山野柑的花香和膏香味有贡献<sup>[28]</sup>;瓦伦烯、芳樟醇和丁酸甲酯则分别为甜橙<sup>[32]</sup>、宫本温州蜜柑<sup>[33]</sup>和血橙的特征香气物质<sup>[34]</sup>。Zhang 等<sup>[35]</sup>研究表明莽山野柑特征香气可通过花粉直感效应传递到授粉果实上,显著提高华农红柚汁胞中顺式-、反式-芳樟醇氧化物含量。基于 66 个柑橘种质果皮挥发性物质的主成分分析(PCA),可以将宽皮柑橘、甜橙、柚和柠檬明显区分开。不同柑橘种类间,如宽皮柑橘、甜橙、柠檬和柚等香味品质各不相同,利用偏最小二乘法分析发现有 33 种潜在影响香味品质差异的挥发性物质<sup>[36]</sup>,但这些物质对不同柑橘种类特殊香味品质的贡献度还需要进一步研究。此外,果实发育期、外源激素和是否感病等都会显著影响柑橘果实萜烯类物质组成和含量变化,从而导致香味品质的变化<sup>[37-39]</sup>。目前,柑橘中挥发性物质的研究主要集中在代谢物质检测和鉴定方面,特征香味物质鉴定还有待进一步深入开展。

## 2.4 质地品质

在咀嚼柑橘可食用部位的同时,消费者会感受到化渣性、韧性、脆性及细胞破碎时散发出的糖酸味及气味。因此,果实的质地品质与消费者口感和咀嚼性密切相关,本文也将其归入风味品质,主要由木质素、果胶、纤维素和半纤维素等物质含量来决定。如图 1 所示,由于不同柑橘种质食用部位有所不同,主要质地风味品质可分为 4 种类型:第一类为食用囊衣和汁胞的宽皮柑橘(含杂柑)和甜橙,需要关注汁胞和囊衣的化渣性;第二类为仅食用汁胞的柚和葡萄柚,主要关注汁胞的脆性及囊衣的韧性,以评估是否容易揭去囊衣且无大片残余;第三类为食用白

皮层部位的佛手和枸橼等,除糖酸含量外,要关注白皮层含水量、化渣性、脆性和细胞紧密度等;最后一类为食用整果的金柑,黄皮层、白皮层、囊衣和汁胞的化渣性及脆性都对质地风味有贡献。

因种质不同,柑橘果实的质地品质存在较大差异。如爱媛 28 号果肉化渣性强,砂糖橘化渣较好,而贮藏一定时期后的红肉脐橙发生枯水而影响化渣性等。熟期对质地品质有一定影响,成熟期质地品质一般较好,采后贮藏措施不当时果实汁胞枯水,木质素含量升高,进而影响果实的化渣性<sup>[40]</sup>。研究发现外源激素 IAA 和 ABA 可影响华农红柚汁胞木质素合成,为外源激素调控柑橘汁胞木质化提供有效思路<sup>[10]</sup>。



A: 宽皮柑橘; B: 甜橙; C: 金柑; D: 枸橼; E: 柚; FL: 黄皮层; AL: 白皮层; MS: 囊衣; JS: 汁胞; SE: 种子; CC: 中柱。A: Loose-skin mandarin; B: Sweet orange; C: *Fortunella japonica*; D: Citron; E: Pummelo. FL: Flavedo; AL: Albedo; MS: Membrane segment; JS: Juice sacs; SE: Seed; CC: Central column.

图 1 不同柑橘种质果实横切面示可食用部分

Fig.1 Morphological characteristics of the edible parts of different citrus fruits

## 2.5 异味

异味物质的有否与含量高低是消费者购买商品的一个主要影响因素。柑橘果实发育过程中醇和醛类物质数量少且含量变化不大<sup>[37]</sup>。柑橘中异味物质主要产生于贮藏过程中,目前研究主要集中于小分子醇和醛类物质。当果实供氧不足,致使无氧呼吸产生的代谢产物乙醇和乙醛等物质积累而产生异味<sup>[41]</sup>。研究表明氨基酸和脂肪酸代谢产物,如三甲基丁醇、2-甲基丁酸乙酯等物质含量在贮藏过程中显著增加,导致异味产生。柑橘贮藏期低温措施

会影响柑橘乙醇和乙醛物质的积累,促进 Valencia 夏橙和 Olinda 夏橙果实异味产生<sup>[42-43]</sup>。果实打蜡是提高果实光洁度的重要技术措施,但同时引起果实无氧呼吸、导致乙醇增加,而选用透气性较好的蜡液配方材料会减少异味物质积累<sup>[44]</sup>。

## 3 风味组学研究策略与方法

### 3.1 仪器分析策略

风味相关物质主要为分子质量较低的初生和次生代谢物。所使用的检测仪器主要为:气相色谱-质



谱联用仪(GC-MS),用于检测挥发性物质和初生代谢物质<sup>[6,15]</sup>;气相色谱-嗅闻联用仪(GC-O)主要用于香气活性物质鉴定<sup>[35]</sup>;高效液相色谱(HPLC),主要用于类黄酮、类胡萝卜素、纤维素、果胶的测定<sup>[7,10,27]</sup>,也可以分析可溶性糖和有机酸等;液相色谱-质谱联用仪(LC-MS)主要用于靶向和非靶向代谢物检测<sup>[20]</sup>。

在利用色谱分析时,风味相关代谢物质的定性分析方法主要依据紫外可见吸收光谱特性和标准品的保留时间,但 2 种以上代谢物质共分离情况时有发生,且不同色谱柱型号会导致保留时间改变,所以色谱定性时要结合标准品鉴定。风味相关代谢物质的定量方法有结合内标的相对定量和利用标准品的标准曲线绝对定量(外标法)<sup>[6]</sup>。相对定量是基于内标含量定量,性质越相似,定量相对越准确;利用标准品的标准曲线绝对定量更加准确<sup>[45]</sup>。

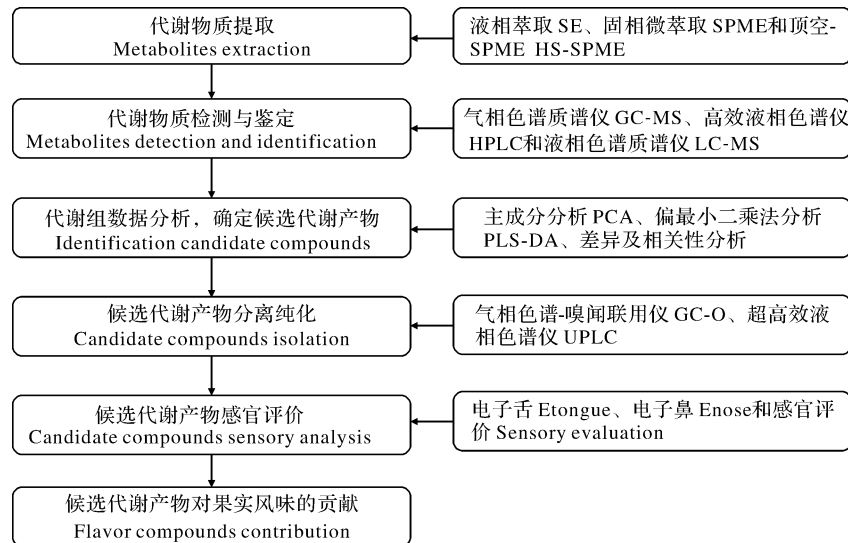
在利用质谱分析时,GC-MS 因具有标准统一的质谱条件,可基于标准品鉴定,也可基于 NIST (2015)和 Wiley Registry 等质谱数据库鉴定。LC-MS 没有标准化的质谱条件,主要靠标准品及化合

物的精确分子质量定性,也可根据二级质谱信息并解析断键方式来对物质初步定性。需要注意的是,在对代谢物质进行定性分析时,绝大多数是在没有标准品的情况下进行,可通过查找数据库和前人文献,结合相似物种的代谢物定性结果来提高定性的准确性。

### 3.2 风味评价及风味物质的贡献度

不同的风味代谢物质都有感官阈值,即能让人体感知到的最低浓度值。该感官阈值会随着介质的变化而变化<sup>[2]</sup>。所以,某一代谢物质对风味品质的贡献度主要由其感官阈值、含量及所共存的介质等共同决定<sup>[46]</sup>。

如图 2 所总结,前人文献<sup>[28,30,35]</sup>中对风味相关物质的鉴定流程,首先对代谢物进行提取、检测和鉴定,进而分析含量差异代谢物;或经主成分分析(PCA)和偏最小二乘法(PLS-DA)分析鉴定重要候选代谢物;然后对候选代谢物进行分离纯化,基于电子鼻、电子舌或利用感官评价人员对候选代谢物进行评价;最后评估候选代谢物对果实风味品质的贡献<sup>[28,30,35]</sup>。



SE:液相萃取;SPME:固相微萃取;HS-SPME:顶空-固相微萃取;GC-MS:气相色谱质谱联用仪;HPLC:液相色谱仪;LC-MS:液相色谱质谱分析仪;PCA:主成分分析;PLS-DA:偏最小二乘法分析;GC-O:气相色谱-嗅闻联用仪;UPLC:超高效液相色谱仪。SE:Solvent extraction;SPME:Solid-phase micro extraction;HS-SPME:Headspace solid-phase micro extraction;GC-MS:Gas chromatography-mass spectrometry;HPLC:High performance liquid chromatography;LC-MS:Liquid chromatography-mass spectrometry;PCA:Principal component analysis;PLS-DA:Partial least squares-discriminant analysis;GC-O:Gas chromatography-olfactometry;UPLC:Ultrahigh-performance liquid chromatography.

图 2 风味相关物质鉴定流程与方法

Fig.2 Flavor-related compounds detect and identification

### 3.3 风味评价与代谢组学关联鉴定风味物质

风味评价与代谢组数据关联分析的方法研究较

少,目前主要为相关性分析、偏相关分析、PLS-DA及 PCA 等。前人在对陈皮和广陈皮挥发性物质进

行检测后,利用 PLS-DA 分析发现 15 种标志代谢物可区分陈皮与广陈皮<sup>[47]</sup>。但是,基于数据分析仅能得到潜在作用的候选物质,后续研究仍需要结合风味重构和感官评价等试验进一步确认。Liu 等<sup>[28]</sup>首先利用莽山野柑与 4 种其他类型柑橘果实为材料检测其挥发性物质谱,分析在含量上有显著差异的代谢物,确定候选代谢物;然后利用 GC-O 对候选代谢

物的香气特性进一步筛选,结合香气稀释试验(AE-DA)分析候选代谢物的阈值;最后对候选代谢物进行香气重构,确定莽山野柑的特征香气物质为顺式-、反式-芳樟醇氧化物和  $\beta$ -月桂烯,而芳樟醇和 *d*-柠檬烯提供其背景香气。

如图 3 所示,结合前人的相关文献<sup>[30,36]</sup>,我们总结出柑橘中特定风味相关物质的鉴定流程。

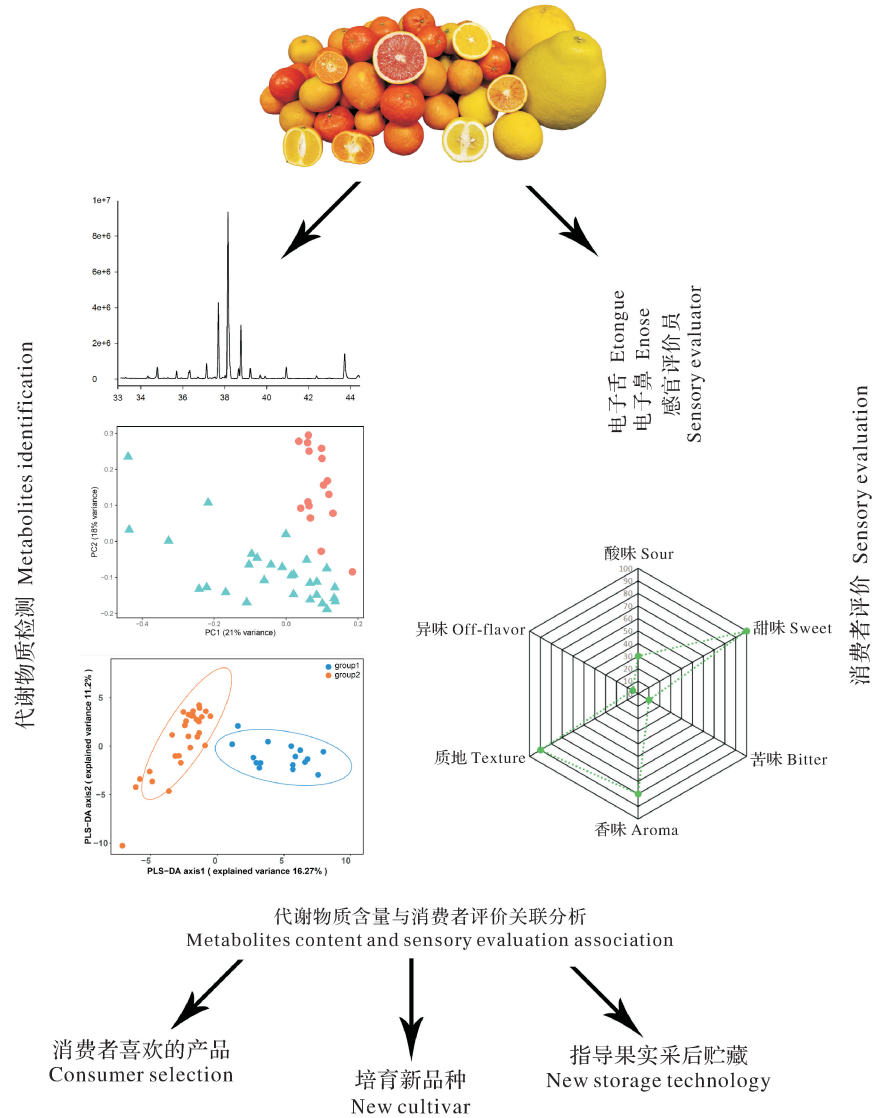


图 3 多平台综合分析确定柑橘中特定风味相关物质的技术流程

Fig.3 Multi-platform analysis to determine the specific flavor-related compounds in citrus

#### 4 风味组学的应用展望

柑橘代谢组学方面已取得较大进展,但风味组学研究开展较少。代谢组学检测到的物质数量巨大,很难通过数据分析明确代谢物对柑橘风味的作

用。风味组学的相关研究需要与消费者的喜好进行对接,明确消费者偏好的风味品质所关联的代谢物质,为不同人群提供符合其口味偏好且营养健康的产品,才是柑橘乃至整个园艺产业期望达到的目的。而这些对人体有益的风味相关代谢物质及其合成与

调控机制的研究成果,可以直接应用于合成生物学领域或栽培技术的更新及定向育种中,指导园艺产业的升级和健康发展。

我国柑橘产量居世界第一,成熟季节会有大量果实滞销而造成果农经济损失。与世界上其他柑橘主产国不同,榨汁、果汁和罐头等专用品种的育种和栽培研究投入欠缺,反而是解决水果滞销的有效出路之一。但是,如何改善果汁等制品的品质,同样需要进行风味组学与感官评价分析。众所周知,甜味(糖)增加了柑橘果实的适口性,但出于健康考虑,消费者可能越来越希望减少糖含量而不影响果实甜味。可以结合风味组学和感官评价对味觉系统不断了解及探索植物天然甜味代谢物,通过直接瞄准口中的味觉传感器,在不增加糖含量的情况下提高甜度的新策略,旨在改善消费者味觉体验。除此之外,对香味、苦味等的分析也有助于提升柑橘果品品质。最终目的是增加柑橘果实中对人体有益物质的含量,而不影响柑橘果实的口感。

柑橘果实中有数以万计的代谢组分,利用风味组学方法可分析得到哪些代谢物对风味品质有贡献且其贡献度如何,并将主要贡献者定义为该品质性状的标志性代谢物。整合所有风味品质标志性代谢物后,可将其进一步开发为代谢组指纹图谱,用于预测新种质或新产品的消费者接受度,提升柑橘育种效率,还可应用于新品种保护或鉴别等。

**致谢:**感谢朱晨桥博士和冯迪博士研究生提供的金柑和枸橼照片。

## 参考文献 References

[1] FABIAN T, FEJERDY P, CSERMELY P. Salivary genomics, transcriptomics and proteomics; the emerging concept of the oral ecosystem and their use in the early diagnosis of cancer and other diseases[J]. *Current genomics*, 2008, 9(1): 11-21.

[2] TAMURA H, FUKUDA Y, PADRAYUTTAWAT A. Characterization of citrus aroma quality by odor threshold values [J]. *Biotechnology for improved foods and flavors*, 1996, 27: 282-294.

[3] GRACKA A, JELEN H, MAJCHER M, et al. Flavoromics approach in monitoring changes in volatile compounds of virgin rapeseed oil caused by seed roasting[J]. *Journal of chromatography A*, 2016, 1428: 292-304.

[4] WORLEY B, POWERS R. Multivariate analysis in metabolomics[J]. *Current metabolomics*, 2013, 1(1): 92-107.

[5] ANDUJAR O I, PEPPARD T L, REINECCIUS G A. Flavor-

omics for determining markers of cooked and fermented flavor in strawberry juices [M]//GUTHRIE B, BEAUCHAMP J, BUETTNER A, et al. *The chemical sensory informatics of food: measurement, analysis, integration*. [S.l.]: American Chemical Society, 2015: 93-312.

[6] ZHANG H, XIE Y, LIU C, et al. Comprehensive comparative analysis of volatile compounds in citrus fruits of different species[J]. *Food chemistry*, 2017, 230: 316-326.

[7] CHEN J, LI S, XU J, et al. Concentration and distribution of main bitter compounds in fruit tissues of 'Oroblanco' (*Citrus grandis* L. × *Citrus paradisi* Macf.) [J]. *Scientia horticulturae*, 2015, 193: 84-89.

[8] CHEN J, YUAN Z, ZHANG H, et al. *Cit1*, *2RhaT* and two novel *CitdGlcTs* participate in flavor-related flavonoid metabolism during citrus fruit development[J]. *Journal of experimental botany*, 2019, 70: 2759-2771.

[9] WANG X, XU Y, ZHANG S, et al. Genomic analyses of primitive, wild and cultivated citrus provide insights into asexual reproduction[J]. *Nature genetics*, 2017, 49: 765-772.

[10] SHI M, LIU X, ZHANG H, et al. The IAA- and ABA-responsive transcription factor CgMYB58 upregulates lignin biosynthesis and triggers juice sac granulation in pummelo[J]. *Horticulture research*, 2020, 7: 1-14.

[11] STENHEN A, HARRY J. Plant volatile compounds: sensory cues for health and nutritional value? [J]. *Science*, 2006, 311: 815-819.

[12] KARL C M, WENDELIN M, LUTSCH D, et al. Structure-dependent effects of sweet and sweet taste affecting compounds on their sensorial properties[J/OL]. *Food chemistry*, X, 2020, 7: 100100 [2020-12-16]. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2020.100100>.

[13] KUNA A, SOWMYA M, SAHOO M R, et al. Value addition and sensory evaluation of products made from underutilized Kachai Lemon (*Citrus jambhiri*) Lush. fruits[J]. *Journal of pharmacognosy and phytochemistry*, 2018, 7: 3032-3036.

[14] KOMATSU A, TAKANOKURA Y, MORIGUCHI T, et al. Differential expression of three sucrose-phosphate synthase isoforms during sucrose accumulation in citrus fruits (*Citrus unshiu* Marc.) [J]. *Plant science*, 1999, 140: 169-178.

[15] WANG L, HE F, HUANG Y, et al. Genome of wild mandarin and domestication history of mandarin [J]. *Molecular plant*, 2018, 11: 1024-1037.

[16] HUSSAIN S B, SHI C, GUO L, et al. Recent advances in the regulation of citric acid metabolism in citrus fruit [J]. *Critical reviews in plant sciences*, 2017, 36: 241-256.

[17] SHI C, HUSSAIN S B, YANG H, et al. CsPH8, a P-type proton pump gene, plays a key role in the diversity of citric acid accumulation in *Citrus* fruits [J/OL]. *Plant science*, 2019, 289: 110288 [2020-12-16]. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110288>.

[18] 廖小娜. 2,4-D对脐橙果实贮藏期间糖酸及总酚总黄酮含量的

- 影响[D].南昌:江西农业大学,2019. LIAO X N. Effects of 2,4-D on the contents of sugars, acids, total polyphenol and flavonoids in navel orange during storage[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University (in Chinese with English abstract).
- [19] LI S, ZHUANG W, FAN D, et al. Content changes of bitter compounds in 'Guoqing No.1' Satsuma mandarin (*Citrus unshiu* Marc.) during fruit development of consecutive 3 seasons [J]. Food chemistry, 2014, 145: 963-969.
- [20] WANG S, TU H, WAN J, et al. Spatio-temporal distribution and natural variation of metabolites in citrus fruits [J]. Food chemistry, 2016, 199: 8-17.
- [21] CARISTI C, BELLOCCO E, GARGIULLI C, et al. Flavone-di-C-glycosides in citrus juices from Southern Italy [J]. Food chemistry, 2006, 95: 431-437.
- [22] CHEN J, ZHANG H, PANG Y, et al. Comparative study of flavonoid production in lycopene-accumulated and blonde-flesh sweet oranges (*Citrus sinensis*) during fruit development [J]. Food chemistry, 2015, 184: 238-246.
- [23] DURAND-HULAK M, DUGRAND A, DUVAL T, et al. Mapping the genetic and tissular diversity of 64 phenolic compounds in *Citrus* species using a UPLC-MS approach [J]. Annals of botany, 2015, 115: 861-877.
- [24] FRYDMAN A, LIBERMAN R, HUHMANN D V, et al. The molecular and enzymatic basis of bitter/non-bitter flavor of citrus fruit: evolution of branch-forming rhamnosyltransferases under domestication [J]. The plant journal, 2013, 73: 166-178.
- [15] 田静, 庞一波, 陈嘉景, 等. 化州柚种质资源的 SSR 分析及其果实不同发育期柚皮苷含量变化 [J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(5): 64-70. TIAN J, PANG Y B, CHEN J J. SSR analyses of germplasm resources and changes of naringin content at different developmental stages of *Citrus grandis* 'Tomentosa' fruit [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(5): 64-70 (in Chinese with English abstract).
- [26] 熊兰兰. 平和蜜柚果实贮藏期间黄酮类化合物含量及品质变化的研究[D].福州:福建农林大学,2012. XIONG L L. Study on the change of flavonoids content and fruit quality in storage of Pinghemiyou pumelo[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University (in Chinese with English abstract).
- [27] LIU C H, YAN F H, GAO H J, et al. Features of citrus terpenoid production as revealed by carotenoid, limonoid and aroma profiles of two pummelos (*Citrus maxima*) with different flesh color [J]. Journal of the science of food & agriculture, 2015, 95: 111-119.
- [28] LIU C H, CHENG Y J, ZHANG H Y, et al. Volatile constituents of wild citrus mangshanyegan (*Citrus nobilis* Lauriro) peel oil [J]. Journal of agricultural & food chemistry, 2012, 60: 2617-2618.
- [29] GROSCH W. Evaluation of the key odorants of foods by dilution experiments, aroma models and omission [J]. Chemical senses, 2001, 26: 533-545.
- [30] 刘翠华. 莽山野柑果实特征香气及其花粉直感效应的解析[D]. 武汉:华中农业大学,2014. LIU C H. Analysis of characteristic aroma and its pollen xenia effect of Mangshanyegan (*Citrus nobilis* Lauriro) [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [31] GONZÁLEZ-MAS M C, RAMBLA J L, LÓPEZ-GRESA M P, et al. Volatile compounds in citrus essential oils: a comprehensive review [J/OL]. Frontiers in plant science, 2019, 10: 12 [2020-12-16]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00012>.
- [32] SHARON-ASA L, SHALIT M, FRYDMAN A, et al. Citrus fruit flavor and aroma biosynthesis: isolation, functional characterization, and developmental regulation of *Cstps1*, a key gene in the production of the sesquiterpene aroma compound valencene [J]. The plant journal, 2003, 36: 664-674.
- [33] CHOI H S. Volatile constituents of satsuma mandarins growing in Korea [J]. Flavour and fragrance journal, 2004, 19: 406-412.
- [34] ARENA E, GUARRERA N, CAMPISI S, et al. Comparison of odour active compounds detected by gas-chromatography-olfactometry between hand-squeezed juices from different orange varieties [J]. Food chemistry, 2006, 98: 59-63.
- [35] ZHANG H, LIU C, YAO J, et al. *Citrus mangshanensis* pollen confers a xenia effect on linalool oxide accumulation in pummelo fruit by enhancing the expression of a cytochrome P450 78A7 gene *CitLO1* [J]. Journal of agricultural & food chemistry, 2019, 67: 9468-9476.
- [36] ZHANG H, WEN H, CHEN J, et al. Volatile compounds in fruit peels as novel biomarkers for the identification of four citrus species [J/OL]. Molecules, 2019, 24: 4550 [2020-12-16]. <https://doi.org/10.3390/molecules24244550>.
- [37] 施要强, 张海朋, 田静, 等. ABA 处理对不同柑橘种质汁胞中挥发性物质的影响 [J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(1): 10-17. SHI Y Q, ZHANG H P, TIAN J, et al. Effects of ABA treatment on volatile profile changes in different citrus fruit juice sacs [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(1): 10-17 (in Chinese with English abstract).
- [38] 施要强, 张海朋, 刘翠华, 等. 不同发育时期莽山野柑果皮中挥发性物质代谢谱的变化 [J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(1): 34-43. SHI Y Q, ZHANG H P, LIU C, H, et al. Changes of volatile profile in Mangshanyegan fruit peels at different development stages [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(1): 34-43 (in Chinese with English abstract).
- [39] 石莹, 刘园, 陈嘉景, 等. 黄龙病菌侵染对茶枝柑果实类黄酮和挥发性物质的影响 [J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(1): 24-33. SHI Y, LIU Y, CHEN J J, et al. Effects of Huanglongbing infection on profiles of flavonoids and volatiles in fruits of *Citrus reticulata* cv. *chachiensis* [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(1): 24-33 (in Chinese with English abstract).
- [40] JIA N, LIU J, SUN Y, et al. Citrus sinensis MYB transcription factors CsMYB330 and CsMYB308 regulate fruit juice sac lignification through fine-tuning expression of the *Cs4CL1* gene [J]. Plant science, 2018, 277: 334-343.

- [41] PLOTTO A, MARGARÍA C A, GOODNER K L, et al. Odour and flavour thresholds for key aroma components in an orange juice matrix: esters and miscellaneous compounds[J]. *Flavour and fragrance journal*, 2008, 23: 398-406.
- [42] PESIS E, AVISSAR I. The post-harvest quality of orange fruits as affected by pre-storage treatments with acetaldehyde vapour or anaerobic conditions[J]. *Journal of horticultural science*, 1989, 64: 107-113.
- [43] SCHIRRA M, COHEN E. Long-term storage of 'Olinda' oranges under chilling and intermittent warming temperatures[J]. *Postharvest biology and technology*, 1999, 16: 63-69.
- [44] 方项. 柑橘商品化处理过程中蜡液浓度对果实品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013. FANG X. Effect of wax concentration on the fruit quality in the process of citrus fruit commercial handling[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [45] ZHANG H, CHEN M, WEN H, et al. Transcriptomic and metabolomic analyses provide insight into the volatile compounds of citrus leaves and flowers[J/OL]. *BMC plant biology*, 2020, 20: 7 [2020-12-16]. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-2222-z>.
- [46] 张海朋, 刘翠华, 刘园, 等. 柑橘中挥发性萜类物质代谢研究进展[J]. *园艺学报*, 2020, 47(8): 1610-1624. Research advances of volatile terpenoids metabolism in citrus[J]. *Journal of horticulture*, 2020, 47(8): 1610-1624 (in Chinese with English abstract).
- [47] DUAN L, GUO L, DOU L, et al. Discrimination of *Citrus reticulata* Blanco and *Citrus reticulata* 'Chachi' by gas chromatograph-mass spectrometry based metabolomics approach[J]. *Food chemistry*, 2016, 212: 123-127.

## Advances on citrus flavoromics

ZHANG Haipeng, PENG Zhaoxin, SHI Meiyuan, WEN Huan, ZHANG Hongyan, XU Juan

*Key Laboratory of Horticultural Plant Biology, Ministry of Education/College of Horticulture and Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*

**Abstract** Flavor is an important factor that determines the overall quality of citrus fruit and directly affects consumers' purchase intentions. Flavoromics is an omics technology to analyze the metabolites basis of flavor quality. The citrus flavor contains many attributes such as sweetness, sourness, aroma, bitterness, texture and off-flavor. This article reviews and prospects the origination, strategies, methods and progress of studying citrus flavoromics. It is proposed that the focus of citrus flavoromics should pay more attention to consumer preference and discover the most important metabolites affecting citrus flavor, with a view to targeted cultivation or using cultivation techniques to enhance and improve the quality of citrus fruits in production, and promote the healthy development of the industry.

**Keywords** citrus; fruit quality; flavoromics; marker metabolites for quality traits; metabonomics fingerprint; directional breeding

(责任编辑: 张志钰)