

柑橘品种溯源及其精油智能感官评价技术研究进展

赵前^{1,3}, 叶芷玥^{1,3}, 陈健乐^{1,2}, 陈士国^{1,2,3}, 叶兴乾^{1,2}, 程焕^{1,2*}

(¹浙江大学生物系统工程与食品科学学院 智能食品加工技术与装备国家地方联合工程研究中心

馥莉食品研究院 全省食用农产品资源挖掘与高值利用重点实验室

浙江省健康食品制造与品质控制国际合作基地 杭州 310058

²浙江大学中原研究院 郑州 450000

³浙江三角智慧绿洲创新中心 浙江嘉兴 314102)

摘要 柑橘在全球范围广泛栽培,遗传背景复杂,其起源和植物学分类问题一直争议不断。柑橘果实在鲜食或加工过程中会产生大量果皮垃圾,而提取柑橘精油是一种有效利用柑橘加工废弃物的方法,有助于资源再利用,符合可持续发展理念。然而,市售柑橘精油品质参差不齐,风味各异,且掺假现象严重。柑橘品种繁多是导致其精油风味多样性的一个重要原因,也对柑橘精油的风味评价带来挑战。为深入解析柑橘精油感官风味,本文阐述柑橘的起源,不同柑橘精油风味特征信息及其主要应用领域;系统评价柑橘精油的感官分析技术,包括传统感官评价、人机结合分析设备、智能传感器技术和现代感官分析技术的应用及其优、缺点。此外,展望未来柑橘精油的风味评价方法,提出加强品质监管和溯源管理,完善风味评价体系等相关建议,旨在提升柑橘精油风味品质,推动柑橘产业的可持续发展。

关键词 柑橘; 品种; 溯源; 精油; 风味; 智能感官

文章编号 1009-7848(2025)02-0479-13 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2025.02.042

柑橘是世界上最重要的水果之一,广泛分布于热带、亚热带和温带地区^[1]。全球每年柑橘产量约 1.46 亿 t,主要用于鲜食、果汁加工和食品添加剂等^[2-3]。中国是柑橘的主要产地,2022 年我国柑橘产量达 6 000 万 t,宽皮橘类、橙类、柚类和杂交柑桔类是我国广泛种植的柑橘品种,其中包括宽皮柑橘、柠檬、葡萄柚、甜橙等一系列广泛栽培的商业品种^[4]。柑橘水果富含大量类黄酮和类胡萝卜素等对人体有益的功能活性物质,赋予了柑橘鲜艳的色彩以及预防心脑血管疾病,抗肿瘤,增强免疫力等多种健康功能。除生物活性组分外,柑橘风味是评价柑橘果实品质、影响消费者喜好的关键因素之一。柑橘风味化合物不仅决定了消费者对果实食用的喜好性,而且使不同柑橘具备不同的风味特征。柑橘果实风味主要源于萜类、醛类、酯类及醇类等挥发性化合物,其中柑橘精油作为柑橘的次生代谢产物,因具有浓郁、宜人、清新的香气与出色的生物活性而广受关注^[5]。柑橘果实在鲜

食或加工过程中会产生大量果皮垃圾,经微生物发酵和腐败进一步带来经济和环境问题^[6]。处理柑橘果皮是柑橘副产物加工所面临的主要挑战。柑橘精油是柑橘加工过程中重要的高附加值产品,利用柑橘果皮加工柑橘精油具有可观的经济利益和实用价值,是柑橘产业“变废为宝”的重要途径^[7]。

由于柑橘品种的多样性以及市场管控问题,市售柑橘精油目前存在源头不清、成分不明、品质不一等问题。此外,柑橘的起源和分类也一直是柑橘学术界讨论的焦点问题。截止目前还没有相关文章系统归纳、总结柑橘水果的起源和植物学分类问题,以及不同柑橘精油的感官风味评价。本综述聚焦以上两个问题,深入解析柑橘风味特点,展望未来柑橘加工业发展方向,推动柑橘产业的可持续发展。

1 柑橘起源与植物学分类

柑橘的起源一直存在争议。直到 2018 年 Wu 等^[8]通过对 60 个柑橘品种及其相关材料的基因学、系统发育和生物地理学分析,推断柑橘物种的起源中心位于喜马拉雅山脉的东南山麓,并经过 2 次传播扩张到东南亚地区和澳大利亚地区。最

收稿日期: 2024-02-16

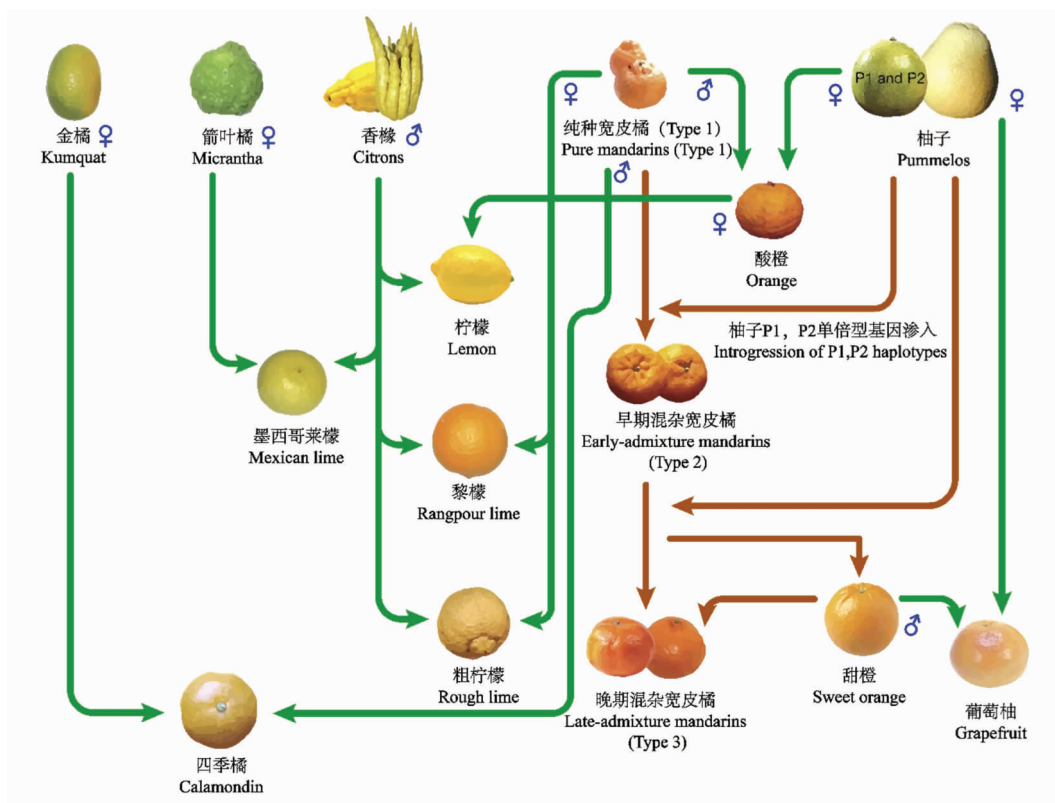
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32172334)

第一作者: 赵前,男,博士生

通信作者: 程焕 E-mail: huancheng@zju.edu.cn

新的研究通发现古印度板块可能是是柑橘亚科的起源中心，而中国中南部地区可能为柑橘属植物的主要起源中心，包括宜昌橙 (*Citrus ichangensis*)、枳 (*Citrus trifoliata*)、金柑 (*Citrus hindsii*) 等^[9]。由于柑橘属内部的生殖隔离较弱，新的杂交品种不断发展，通过人工选择和栽培，人们希望获得具有理想品质(如无籽、多汁和新鲜的味道)的柑橘品种，根据 Velasco 等^[10]报告，柑橘经过几千年的栽培和杂交已经产生了大约 25 个品种和至少 250 个商业品种，这给柑橘类水果的植物学分类带来了挑战。Swingle^[11]为柑橘类植物命名了 95 个植物学名称，并在 1943 年出版的主要著作《The Botany of Citrus and Its Wild Relatives》中将所有柑橘类水果分为 16 种及其亚种和各种栽培品种，包括宽皮柑橘、香橼、柚、酸橙、柠檬、甜橙、葡萄柚、金柑、枳、来檬等。除此之外，关于柑橘属的“祖先”问题也没有准确定论，Mabberley^[12]在《A classification for edible Citrus》一书中指出宽皮柑

橘 (*Citrus reticulata*)、柚 (*Citrus maxima*) 和香橼 (*Citrus medica*) 是 3 个最基本的种，而其它柑橘种类都是后代。Wu 等^[13]对 4 种不同柑橘(宽皮柑橘、柚、甜橙和酸橙)的基因组进行了测序和比较证明了柚和宽皮柑橘是二大祖先，而酸橙是柚和宽皮橘的 F1 代杂交。通过基因组学、系统发育学和生物地质学表征柑橘在物种层面的多样性和进化，Wu 等^[8]进一步构建了柑橘主要基因型家谱(如图 1 所示)，主要包括 5 个祖先物种(金橘、小花橙、香橼、宽皮柑橘和柚)。酸橙由宽皮橘与柚子杂交产生，柠檬由香橼和酸橙杂交产生，早期宽皮橘(Ⅱ型)和柚多次杂交或回交产生甜橙，而甜橙与柚进一步杂交产生葡萄柚。黎檬是由宽皮橘(Ⅰ型)和香橼杂交而来，来檬是由小花橙和香橼杂交而来，而金橘与宽皮橘(Ⅰ型)杂交产生四季橘。柑橘家族“混乱”的杂交，加上人类的嫁接芽接技术，使得柑橘家族的家谱变得更加复杂。



注：本图根据 Wu 等^[8]的研究结果改编。绿线表示两个亲本基因型间的简单杂交，而红线表示更复杂的过程。

图 1 柑橘主要基因家谱图

Fig.1 Genealogy of major citrus genotypes

在中国,柑橘果树主要分为金柑属(*Fortunella*)、枳属(*Poncirus*)和柑橘属(*Citrus*)。柑橘属又可分为柑橘亚属和大翼橙亚属,其中柑橘亚属是我国广泛栽培的的经济型柑橘,包括枸橼类(佛手、香橼、来蒙、柠檬等)、橙类(酸橙和甜橙)、宽皮柑橘类(橘和柑)和柚类(葡萄柚和柚)^[14]。这些品种在中国的柑橘产业中具有重要地位:枸橼类柑橘具有独特的形态和香味,被广泛用于食用和药用^[15];橙类柑橘则因其酸甜可口的果肉而受到喜爱^[16];宽皮柑橘类则因其果皮较厚、易剥离而备受青睐;柚类柑橘则因其大型果肉和独特的风味而深受欢迎^[17]。此外,大翼橙亚属也是中国柑橘属的一部分,它包括了宜昌橙类和大翼橙类。这些品种在中国的柑橘产业中也具有一定的重要性。宜昌橙类因其鲜艳的颜色和甜美的口感而受到青睐,大翼橙类则因其特殊的果实形态和独特的风味而备受关注^[18]。

2 常见柑橘精油汇编

根据国际标准化组织(ISO)的定义,植物精油是通过蒸馏或压榨等物理过程从植物芳香原料中提取出来的天然挥发性液体^[19-20]。虽然柑橘的种类繁多,但柑橘精油化学成分可主要分为单萜烯、倍半萜烯、氧合单萜烯和氧合倍半萜烯 4 大类。其中,*D*-柠檬烯、柠檬醛、芳樟醇、 α -蒎烯和 β -月桂烯等萜类化合物是大多数柑橘精油共有且重要的特征香气贡献组分,*D*-柠檬烯在柑橘精油中含量极高,橙皮精油中柠檬烯的含量更可达 90%至 95%^[21-23]。柑橘精油凝结了柑橘水果的独特香气和风味,同时具备抗氧化、抗炎、肝脏保护和镇痛等多种促健康功能^[24-26]。此外,柑橘还被证明有助于降低患精神疾病的概率,如作为抗焦虑剂缓解焦虑,抗胆碱酯酶缓解阿尔茨海默病等^[27]。然而,目前市售柑橘精油存在着来源不明、品质参差以及适用领域不清晰等问题。表 1 汇编了常见柑橘精油的植物学信息、商用精油名称、植物原材料、主要提取方式与主要应用领域。

不同植物的芳香部位提取出的柑橘精油在品质和功效上存在差异。柑橘类水果的果皮被认为是柑橘精油的主要来源,每吨水果平均能获得 0.5~3.0 kg 的柑橘精油。此外,皮厚的柑橘类水果

相较于薄皮水果通常含有更高的精油含量^[7]。花、树枝、细叶、种子和碎果也作为原材料用于柑橘精油的提取,其所得的精油在产率、品质、成分具有明显的差异^[29]。Nguyen 等^[30]研究发现四季桔(*Citrus microcarpa* Bunge)的花精油主要成分为柠檬烯,而叶油的主要成分为榄香醇,且 2 种柑橘精油的抗氧化活性和对常见真菌抑制能力存在显著差异。制备柑橘精油最常用的方法是冷冻压榨和水蒸气蒸馏法。冷压法通过机械压力将精油从油囊中释放,并通过冷冻离心回收柑橘精油。水蒸气蒸馏是一种更经济的提取方法,广泛用于多种植物精油的提取。在水蒸气蒸馏过程中,柑橘原料被加热煮沸,然后通过蒸馏收集柑橘精油。相比之下,通过冷冻压榨法提取的柑橘精油化学成分变化不大,因而保留了柑橘更原本的香气,而水蒸气蒸馏法提取柑橘精油的产率更高^[31-32]。然而,这 2 种传统提取技术依旧共同存在着产率低、挥发性成分损失和目标化合物降解等缺点^[33]。另一种传统提取方式是利用二氯甲烷、乙酸乙酯、石油醚等有机溶剂,由于其对目标化学成分的较高溶解度,可从植物组织中提取出品质相对较好的柑橘精油。然而,这种方法可能会存在溶剂残留、难以分离以及安全性等一系列问题,同时是否将利用溶剂萃取的挥发性有机化合物定义为精油还有待商榷^[23-34]。为了提高植物精油的产率,涌现了多种新型植物精油提取技术,如微波蒸汽蒸馏法^[35]、超临界流体萃取法^[36]、微波萃取法^[37]等。Razzaghi 等^[35]从提取率、能耗、定性和经济等方面评价了水蒸气提取、微波提取和微波与水蒸气结合提取共 6 种不同橘皮精油的提取工艺,结果表明微波结合水蒸气蒸馏提取效果最好。虽然这些技术提高了植物原料的利用率,加快了提取速率,同时提升了植物精油品质,但考虑到技术的能耗与成本,目前尚未在工业生产中得到普及应用。

柑橘精油的最大应用产业之一是食品工业,通常作为调味剂赋予饮料、糖果、果酒和其它食品香味,以及作为保鲜剂提高新鲜果蔬的贮藏能力^[38-39]。此外,由于柑橘精油的香味和生物活性,它们在香料工业、制药工业、美妆和芳香疗法领域的需求也较大^[7,40-41]。需要注意的是部分柑橘精油(如苦橙精油、宽皮柑橘精油和佛手柑精油)可能含有

表 1 常见柑橘精油汇编^[28]Table 1 Compilation of common citrus essential oils^[28]

柑橘品种	商用精油名称	植物提取部位	主要提取方式	主要应用领域
青柠 (<i>Citrus aurantiifolia</i>)	青柠精油	中等成熟水果外果皮, 碎果	冷冻压榨	食品工业、美妆、芳香疗法、香料工业
酸橙 (<i>Citrus aurantium</i>)	橙花精油	花	水蒸气蒸馏	食品工业、香料工业、芳香疗法
	纯粹酸橙精油	花	水蒸气蒸馏	芳香疗法、香料工业
苦橙 (<i>Citrus aurantium</i> var. <i>bigaradia</i>)	苦橙精油	成熟水果外果皮	溶剂提取	芳香疗法、食品工业
	橙花叶精油	树枝和细叶	冷冻压榨	芳香疗法、食品工业
	苦橙精油	中等成熟水果外果皮	水蒸气提取	芳香疗法、制药工业
酸橙 (香水品种) (<i>Citrus aurantium</i> 'Bouquetier')	无蕊苦橙精油	外果皮	冷冻压榨	食品工业
	苦橙叶精油	树枝和细叶	冷冻压榨	芳香疗法
	无蕊苦橙叶精油	树枝和细叶	水蒸气蒸馏	食品工业
佛手柑 (<i>Citrus aurantium</i> ssp. <i>Bergamia</i>)	橙花精油	花	水蒸气蒸馏	芳香疗法、香料工业
	纯粹橙花精油	花	水蒸气蒸馏	芳香疗法、香料工业
佛手柑 (<i>Citrus aurantium</i> ssp. <i>Bergamia</i>)	佛手柑精油	中等成熟水果外果皮, 碎果	溶剂提取	美妆、化学工业、芳香疗法、香料工业
	佛手柑精油 (无佛手柑内酯)	中等成熟水果外果皮	冷冻压榨	食品工业
箭叶橙 (<i>Citrus hystrix</i>)	香柠檬精油	树枝和细叶, 生果皮	冷冻压榨	香料工业
	箭叶橙精油	成熟的果皮、果肉和叶子	水蒸气蒸馏	食品工业、美妆
柠檬 (<i>Citrus limon</i>)	青柠叶精油	树枝和细叶	水蒸气蒸馏	美妆
	柠檬精油	新鲜成熟水果外果皮, 叶, 细枝和小的生水果	水蒸气蒸馏	食品工业、美妆、化学工业、芳香疗法、制药工业、香料工业
香柠檬 (<i>Citrus medica</i>)	香柠檬油	无香柠檬烯和萜类	冷冻压榨	食品工业
	柠檬叶精油	叶、细枝和小的生水果	冷冻压榨	化学工业、美妆、制药工业、香料工业
葡萄柚 (<i>Citrus paradisi</i>)	香柠檬油	花, 果皮	水蒸气蒸馏	食品工业、香料工业
	香柠檬精油	树枝和细叶	冷冻压榨、水蒸气蒸馏	食品工业、美妆、香料工业
宽皮柑橘 (<i>Citrus reticulata</i>)	西柚精油	新鲜成熟水果外果皮	水蒸气蒸馏	食品工业、香料工业
	柑橘精油	新鲜成熟水果外果皮	冷冻压榨、水蒸气蒸馏	食品工业、芳香疗法
甜橙 (<i>Citrus sinensis</i>)	无蕊柑橘精油	外果皮	冷冻压榨	芳香疗法、香料工业
	柑橘叶精油	树枝和细叶	冷冻压榨	食品工业
	甜橙精油	成熟水果外果皮, 碎果和花	水蒸气蒸馏	美妆、香料工业
			冷冻压榨、水蒸气蒸馏	美妆、化学工业、香料工业

对人体有害的萜烯或佛手柑内酯,尤其在食品工业中,严格把控柑橘精油的品质具有重要意义^[23]。Belsito等^[42]描述了一种真空蒸馏法,通过该方法可以完全去除佛手柑精油中含有的佛手柑内酯和其它香豆素,提高了柑橘精油的商用价值。然而,如何优化植物精油的提取工艺以及降低设备能耗,仍然是食品行业领域亟待解决的问题。

3 柑橘精油的感官分析技术

3.1 传统感官评价法

柑橘精油通常具有清新、宜人且令人愉悦的感官特性。传统的感官评价法主要包括定量描述分析、检查所有使用法(CATA)、评估适合选项法(RATA)、评级量表和日内瓦情绪与气味量表(GEOS)等一系列口头或文字的自我报告法^[43]。柑橘精油的主要香气描述涵盖了松木香、甜香、柑橘香、花香和果香^[44]。刘菲斐等^[45]采用评级量表法评价不同甜橙精油的香气属性(果香、花香、甜香、青香、脂香和木香)及整体喜爱度,结果表明冷压法制备的甜橙精油具有最强烈的果香、甜香和花香,且整体喜爱度最高。相比之下,微波辅助水蒸气蒸馏法收集的甜橙精油更偏向于青香、脂香和木香风味,整体喜爱程度较低。这与先前的研究相一致,冷压法更能维持精油自然的风味,而通过蒸馏获得的精油在高温加热过程中可能导致成分变质或产生异味,从而降低了其感官属性^[31,46]。Deterre等^[47]根据小组感官结果将10种不同市售的苦橙精油归类为2组,而区分结果与基于主要香气成分的区分结果相似。Guneser等^[48]使用13组定义术语来评估冷压法和己烷萃取法提取的柠檬籽精油感官风味,结果发现柠檬籽精油的口感主要包括苦、涩、辣和呛人。考虑到其不佳的口感和独特的香味,柠檬籽精油更适合用于香料工业、制药工业和美妆领域。传统的自我报告方法由于数据处理简单、高效而得到了广泛应用,而个体差异,如文化背景、年龄、性别、经验、记忆、认知偏差和社会期望等因素可能会对报告结果产生潜在影响^[43,49]。例如,啤酒和咖啡这类带有苦味或涩味的饮料通常具有年龄和性别区分效应,通常中年人群和男性更容易接受这种复杂口味的饮料。此外,许多新产品在研发阶段可能会获得较满意

的感官评价反馈,而在进入市场后,由于消费者结构和消费环境的变化,新产品很可能会很快失去吸引力甚至消失^[49-50]。因此在对柑橘精油的风味进行自我报告和享乐评价的测定时,需要重视被试人群的选择,并根据所确定的产品,选取足够的受试者或针对特殊风味选取目标针对性的人群具有重要意义。

3.2 人机结合分析设备

随着感知学科在消费者领域的研究不断深入,研究人员试图更深入地了解植物精油中复杂成分的作用,特别是对不同活性成分对风味的贡献度进行研究。为了实现这一目标,一系列人机结合分析设备应运而生,其中气相色谱/嗅觉技术(Gas chromatography/olfactometry, GC/O)的出现使客观精确测量柑橘精油的感官属性成为可能^[51]。通过与感官分析技术如香气提取液稀释分析(Aroma extract dilution analysis, AEDA)、香气活性值(Odor activity value, OAV)、香气缺失和重组试验结合,不仅可以识别与感官相关的化合物,而且可以从许多挥发性化合物中筛选出关键香气化合物^[52]。Minh等^[53]等结合GC/O技术和AEDA法分析了经冷压法提取的酸橙精油(*Citrus sphaerocarpa* Hort. ex Tanaka)中主要挥发性香气成分,发现香茅醛在酸橙精油的特有气味中起重要作用。李丽等^[54]比较了6种不同香气型柑橘的果皮香气组分并通过计算OAV值分析了关键香气物质成分,结果表明芳樟醇是所测柑橘精共有的风味贡献最大的活性物质,而不同品种的柑橘精油的关键香气成分具有明显差异。Miyazato^[55]结合GC/MS和基于AEDA分析法的GC/O技术识别出立花橘[*Citrus tachibana* (Makino) Tanaka]精油中33种关键香气化合物,其中, α -蒎烯、 β -蒎烯和柠檬烯呈现松萜类香气,芳樟醇是立花橘精油果香味的主要风味贡献物,而微量的香叶醇和烃类化合物有助于整体香气。胡梓妍等^[56]通过顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱法提取并鉴定3种不同金橘的挥发性化合物,结合OAV分析表明月桂烯、柠檬烯、芳樟醇、癸醛和紫苏醛等可能是构成金橘香气的重要香气物质,对于不同品种的金橘精油,其特有香气活性化合物均有所区别。Xiao等^[57]通过GC/O和OAV分析确定宽皮柑橘(*Citrus*

reticulata Blanco)香气成分的基础上,利用重组试验成功模拟了宽皮柑橘果汁的整体香气,并通过缺失试验证实壬醛、己醛、芳樟醇和柠檬烯是整体香气的关键成分。这些结果为柑橘精油的品质开发和利用具有重要指导意义。首先,植物精油中活性成分的含量与香气贡献度不一定成正比,柠檬烯是柑橘精油的主要活性成分,而从香味贡献度来看,柠檬烯对柑橘精油风味的贡献度不如柠檬醛、月桂烯、芳樟醇等萜类化合物^[45,58]。其次,不同种类的柑橘精油的主要风味贡献物存在差异,有研究指出丁酸乙酯、辛醛和癸醛是甜橙类香气的关键成分,而芳樟醇、辛醛、 α -蒎烯和柠檬醛被认为是宽皮柑橘类香气主要成分,通过香气成分的分析可以实现柑橘种类的鉴定^[59]。最后,同种类而不同产地的柑橘的感官和主要风味贡献物也存在差异,不同产地金橘的香气活性化合物的含量、组成和特征香气均有一定差异,可通过香气成分解析实现柑橘产地的溯源^[56]。

尽管 GC/O 是食品感官分析中人机结合仪器的黄金标准,但其局限性于依赖人类嗅觉作为检测器,导致其无法鉴定有害或安全成分不明确的气味物质,同时无法识别气味阈值低于人类感知下限的物质^[60]。GC/O 分析同样无法完全排除认知偏差对测量结果的影响,且评价过程依旧耗时、迟钝且非可视化。除此之外,柑橘精油的香气是由不同香气活性化合物共同作用下产生的复杂感官属性^[41]。通过鉴定并叠加单个活性成分的气味感知并不能完全表征植物精油的感官属性,这可能是重构试验无法完全复刻柑橘精油原始香气的主要原因。

3.3 智能传感器技术

智能传感器可以模拟人类感官对不同刺激做出客观评价^[49]。由于具备灵敏度高、重复性好、不受主观影响和可视化结果等特点,智能传感技术被广泛用于食品质量和风味评估。电子鼻是模拟人类嗅觉系统开发出的一种专门研究风味化合物的电子传感设备,通过一系列传感器来监测并利用模式识别系统将化合物与食物和饮料的气味联系起来,从而实现对气味的感知和识别^[49,61-62]。Asikin 等^[63]利用基于质谱的电子鼻技术有效区分了在不同成熟度下的柑橘果皮精油中香气成分差异,得出 14 种主要香气成分的浓度在果实成熟过

程中有所波动,其中柠檬烯、 γ -萜品烯和甲基百里香酚可作为潜在的化学标记来监测酸橙精油质量和风味的变化。此外,通过结合化学计量法,智能传感技术在对柑橘精油的风味进行定性识别和定量评估的同时能实现基于风味特征的精准分类。在甜橙精油的研究中,刘斐菲等^[45]利用超快速气象电子鼻技术结合主成分分析(Principal component analysis, PCA)和判别因子分析(Discriminant factor analysis, DFA)有效区分了不同方法提取的甜橙精油挥发性成分差,这为改进甜橙精油提取工艺和控制品质提供了有力的数据支持。Russo 等^[64]使用氧化物半导体传感器结合 DFA 统计分析有效区分了不同质量的佛手柑(*Citrus bergamia* Risso et Poiteau)精油,验证了智能传感器技术在检测植物精油真伪中的有效性。电子鼻技术在食品质量检测方面具有快速、成本低、操作简便、不破坏样本等优势,可以用于鉴定不同质量柑橘精油的挥发性活性成分,这一技术的广泛应用为食品行业提供了更为高效和可靠的品质控制手段。

尽管电子鼻在感官学科领域取得了显著的进展,其性能仍存在一些限制,主要包括传感器冗余会导致信噪比下降、传感器漂移可能导致输出数值偏离、电子鼻的性能对环境条件敏感以及可能无法准确区分多种化合物的混合物^[62]。为了提高电子鼻的稳定性和适用范围,一种有效的方法是采用数据融合策略及结合其它检测方法。已有研究联合多种智能传感器技术如电子鼻、电子舌和电子眼,结合化学计量法对不同品质的豆瓣酱和茶叶进行风味鉴定与预测,并取得了良好的效果,明显优于单一传感技术^[65-66]。另一方面,电子鼻虽然能模拟人类捕捉到的感觉,但它们不能完全复制大脑基于这些感觉产生的感知。感官属性是人类对食品材料属性的一种主观感体验,尽管与相应的物质属性之间存在内在的联系,但在本质上是不同的^[67]。仅通过测定食品的材料属性可能会忽视个体的心理学和生理学行为对食品感官的重要影响。因此,建立一种食品感官测量方法,通过对食物材料性质的客观测量来准确映射消费者的主观体验,是当前食品感官学科研究面临的主要挑战^[68]。

3.4 现代感知分析技术

现代感知分析技术将传统感官分析的内涵扩大,不仅仅依赖于人进行感官评价,而是结合心理学或生理学分析仪器直接测量消费者在食品消费过程中内隐性和无意识反应,使得感官分析更具客观性和精确性。其中,脑成像技术提供了大量的关于下意识神经反应与食品偏好、选择和决定之间的信息^[69]。脑电图(Electroencephalography, EEG)技术是一种用于记录大脑电活动的无创生理监测方法。它通过多个电极将大脑神经元突触后电位放大后并记录下来,用来了解大脑的功能状态^[70]。在一项对9名健康女性展开的视觉显示任务中发现,吸入柑橘(*Citrus depressa* Hayata)精油能通过降低大脑枕部 β 波功率来有效缓解视觉疲劳,且效果好于吸入柑橘精油主要活性成分柠檬烯和 γ -蒎品烯,表明柑橘精油具有缓解情绪,使人镇静作用^[71]。Ueda等^[72]的研究得到了相似的结果,吸入柠檬(*Citrus limonum* L.)精油后能引起脑部前额皮质的 δ 波和 θ 波激活,从而提高工作记忆能力,效果好于檀香和香草精油。然而,在一项采用功能性磁共振成像技术(Functional magnetic resonance imaging, fMRI)研究柠檬精油吸入对健康受试者警觉性水平及其神经相关物质影响的试验中发现,在吸入柠檬精油后,被试者大脑皮层中涉及嗅觉和情绪处理的区域(如嗅球、下丘脑和丘脑)的功能连接增加,并结合自我报告表明柠檬精油具有令人兴奋的特性,可以用于提高健康成人的警觉性^[73]。大脑对不同浓度的柑橘精油的反应也并不相同,Chandharakool等^[74]的研究发现未稀释的柑橘精油(*Citrus tangerina*)具有刺激作用,表现为 β 波功率的增加;而在稀释到阈值浓度后,柑橘精油可有效降低 α 波和 β 波功率,增加 θ 波功率,强调其镇静作用。通过测定自主神经系统(Autonomic nerves system, ANS)反应,如皮肤电导、体温、心率和呼吸活动,也能评估参与者对柑橘精油刺激的情绪反应,研究发现柚子精油和甜橙精油分别能减轻负面情绪应激和促进高唤醒,柚子的芳香气息能显著降低健康女性在生理期的心率,缓解压力和改善副交感神经系统的功能^[75-76],而甜橙精油能舒缓呼吸频率和脉搏频率,使受试者感觉更愉快和更有活力。这些发现为芳香疗法中使

用柑橘精油缓解人类的抑郁和压力提供了进一步的科学证据,同时也为食品、医药、美妆和香料领域提供了有价值的参考,不仅要考虑柑橘精油品种差异带来的组成品质和风味感官变化,同时不能忽略精油浓度对受试者情绪的影响。

目前,现代感官分析技术在食品领域的应用,尤其是在风味感知方面依旧停留在较为基础的水平,其中最主要的原因可能是由于不同学科的交叉需要来自多个领域专业知识的支撑,导致在数据的处理和结果的分析阶段需要投入更多的精力学习相关知识或咨询相关领域的专家。其次,感官试验的构建需要充分的准备。内隐式测量是连续和动态的,这意味着研究人员需要考虑各种因素,包括个体差异和潜在的噪声或伪影来源^[43]。最后,仪器成本的昂贵和使用环境的苛刻导致很多实验室无法开展相关试验。感官分析仪器,尤其是脑成像技术成本较高,且复杂精密的设备导致试验的开展受限于专门感官实验室环境,因此很难获得受试者在实际环境中的情感反应。科学技术的日新月异使体积庞大、价格昂贵的感官分析设备逐渐变得小型化、经济化和灵活化,同时虚拟现实和沉浸式技术的出现使营造逼真的消费环境成为可能^[77-79]。随着机器学习领域与感知科学的不断融合,通过解析风味与化学分子结构之间的关系,人工智能技术将在关联仪器客观数据和人体主观评价方面发挥关键作用,从而方便、准确且高效地为消费者提供与食品相关的真实感官感知^[80]。

4 总结与展望

柑橘类水果最初是由橘子、柚子和香橼的杂交演化而来,通过自然交叉和人为选择形成了多个品种。随着基因组学、系统发育学和生物地理学的不断发展,人们终能揭开柑橘家族神秘而又古老的面纱。柑橘精油是柑橘加工过程中重要的高附加值产品,市售的柑橘精油因品种差异和化学组成不同而风味各异。传统的感官评价和人机结合分析设备虽然能直观地表述柑橘精油的感官风味,但存在个体差异和认知偏见,因很多反应是生理的和无意识的,未能捕捉到消费者对柑橘精油的全面反应。智能传感器技术在检测柑橘精油品质与真伪方面具有独特优势,而仅通过电子鼻技

术分析并不能完全映射到消费者感官属性。随着内隐性测量在消费者感官评估中的权重增加,脑成像技术和ANS测定技术将为调查消费者对柑橘精油的真实情绪和主观感受提供新的手段。需要重视的是现代感知技术的出现并不是为了取代传统感官评价方式,而是作为传统评估工具(问卷调查和享乐评分)的补充,以更好地了解风味感知和决策决定后的神经和心理驱动因素。

面向未来,为更好解析柑橘精油的风味感官,拓展柑橘精油的应用领域,促进柑橘产业的可持续发展,食品相关领域可着重于以下两个方面。一是,柑橘精油的提取与质量控制;1)优化植物精油提取工艺、提高产油效率、降低设备能耗以及减少有害成分富集;2)加强品质监管和溯源管理以严控市售柑橘精油的品质;3)优化天然精油真伪鉴别技术。二是柑橘精油的香气属性与感官感知;1)建立一系列客观准确的评价标准来构建精油的香气成分与人体感知之间的映射联系;2)结合传统感官评价和现代感知技术解读柑橘精油风味感知背后的生理学和心理学反应。通过筛选出高品质的柑橘精油拓宽应用市场,并结合感知科学准确评估不同柑橘精油的接受度及偏好,为柑橘精油品质提升提供数据支持。

参 考 文 献

- [1] SINGH B, SINGH J P, KAUR A, et al. Phenolic composition, antioxidant potential and health benefits of citrus peel[J]. Food Research International, 2020, 132: 109114.
- [2] CHEN J, LIU F, WU R A, et al. An up-to-date review: Differential biosynthesis mechanisms and enrichment methods for health-promoting anthocyanins of citrus fruits during processing and storage[J/OL]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, (2022-12-02)[2023-11-13]. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10408398.2022.2137778>.
- [3] OH C J, WOO J K, YI K U, et al. Development of molecular markers for genotyping of Ruby, a locus controlling anthocyanin pigment production in *Citrus* with its functional analysis[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 289: 110457.
- [4] 国家统计局. 2023年中国统计年鉴[EB/OL]. (2023-10-16)[2023-11-13]. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2023/indexch.htm>.
- [5] BORA H, KAMLE M, MAHATO D K, et al. Citrus essential oils (CEOs) and their applications in food: An overview[J]. Plants, 2020, 9(3): 357.
- [6] CASQUETE R, CASTRO S M, MARTÍN A, et al. Evaluation of the effect of high pressure on total phenolic content, antioxidant and antimicrobial activity of citrus peels[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 31: 37-44.
- [7] SINGH B, SINGH J P, KAUR A, et al. Insights into the chemical composition and bioactivities of citrus peel essential oils[J]. Food Research International, 2021, 143: 110231.
- [8] WU G A, TEROL J, IBANEZ V, et al. Genomics of the origin and evolution of *Citrus*[J]. Nature, 2018, 554(7692): 311-316.
- [9] HUANG Y, HE J X, XU Y T, et al. Pangenome analysis provides insight into the evolution of the orange subfamily and a key gene for citric acid accumulation in citrus fruits[J]. Nature Genetics, 2023, 55(11): 1964-1975.
- [10] VELASCO R, LICCIARDELLO C. A genealogy of the citrus family[J]. Nature Biotechnology, 2014, 32(7): 640-642.
- [11] SWINGLE W T. The botany of *Citrus* and its wild relatives of the orange subfamily (Family Rutaceae, Subfamily Aurantioideae)[M]. Berkeley & Los Angeles: University of California Press, 1943: 129-474.
- [12] MABBERLEY D J. A classification for edible *Citrus* (*Rutaceae*)[J]. Telopea, 1997, 7(2): 167-172.
- [13] WU G A, PROCHNIK S, JENKINS J, et al. Sequencing of diverse mandarin, pummelo and orange genomes reveals complex history of admixture during citrus domestication[J]. Nature Biotechnology, 2014, 32(7): 656-662.
- [14] 佚名. 中国柑橘分类整理网[EB/OL]. (2022-11-06)[2023-11-13]. <https://wenku.baidu.com/view/6d5a3412f5335a8102d220ec.html>.
- [15] ANON. Classification and summary of Chinese Citrus [EB/OL]. (2022-11-06)[2023-11-13]. <https://wenku.baidu.com/view/6d5a3412f5335a8102d220ec.html>.
- [15] CHHIKARA N, KOUR R, JAGLAN S, et al. Cit-

- rus medica: Nutritional, phytochemical composition and health benefits – A review[J]. *Food & Function*, 2018, 9(4): 1978–1992.
- [16] CHEN J, ZHANG Y R, LIU F F, et al. The potential of different ripeness of blood oranges (*Citrus sinensis* L. Osbeck) for sale in advance after low-temperature storage: Anthocyanin enhancements, volatile compounds, and taste attributes[J]. *Food Chemistry*, 2023, 417: 135934.
- [17] CHEONG M W, LOKE X Q, LIU S Q, et al. Characterization of volatile compounds and aroma profiles of Malaysian pomelo (*Citrus grandis* (L.) Osbeck) blossom and peel[J]. *Journal of Essential Oil Research*, 2011, 23(2): 34–44.
- [18] BACCATI C, GIBERNAU M, PAOLI M, et al. Chemical variability of peel and leaf essential oils in the *Citrus* Subgenus *Papeda* (Swingle) and few relatives[J]. *Plants*, 2021, 10(6): 1117.
- [19] DAJIC STEVANOVIC Z, SIENIAWSKA E, GLOWNIAK K, et al. Natural macromolecules as carriers for essential oils: From extraction to biomedical application[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2020, 8: 563.
- [20] JUGREET B S, SUROOWAN S, RENGASAMY R R K, et al. Chemistry, bioactivities, mode of action and industrial applications of essential oils[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 101: 89–105.
- [21] ZHANG H P, XIE Y X, LIU C H, et al. Comprehensive comparative analysis of volatile compounds in citrus fruits of different species[J]. *Food Chemistry*, 2017, 230: 316–326.
- [22] HAOKIP S W, SHEIKH K H A, DAS S, et al. Unraveling physicochemical profiles and bioactivities of citrus peel essential oils: A comprehensive review[J]. *European Food Research and Technology*, 2023, 249(11): 2821–2834.
- [23] GONZÁLEZ-MAS M C, RAMBLA J L, LÓPEZ-GRESA M P, et al. Volatile compounds in citrus essential oils: A comprehensive review[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 12.
- [24] NAVARRA M, MANNUCCI C, DELBÒ M, et al. *Citrus bergamia* essential oil: From basic research to clinical application[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2015, 6: 36.
- [25] MAURYA A K, MOHANTY S, PAL A, et al. The essential oil from *Citrus limetta* Risso peels alleviates skin inflammation: *In-vitro* and *in-vivo* study[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2018, 212: 86–94.
- [26] BOUZENNA H, DHIBI S, SAMOUT N, et al. The protective effect of *Citrus limon* essential oil on hepatotoxicity and nephrotoxicity induced by aspirin in rats[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2016, 83: 1327–1334.
- [27] AYAZ M, SADIQ A, JUNAID M, et al. Neuroprotective and anti-aging potentials of essential oils from aromatic and medicinal plants[J]. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2017, 9: 168.
- [28] KOSKINEN J. Citrus pages[EB/OL]. (2009–11–20) [2023–11–13]. <http://citruspages.free.fr/oils.php>.
- [29] SARROU E, CHATZOPOULOU P, DIMASSI-THERIOU K, et al. Volatile constituents and antioxidant activity of peel, flowers and leaf oils of *Citrus aurantium* L. growing in Greece[J]. *Molecules*, 2013, 18(9): 10639–10647.
- [30] NGUYEN T N T, HUYNH T N N, TRAN V T, et al. Physicochemical characterization and bioactivity evaluation of essential oils from *Citrus microcarpa* Bunge leaf and flower[J]. *Journal of Essential Oil Research*, 2018, 30(4): 285–292.
- [31] EL ASBAHANI A, MILADI K, BADRI W, et al. Essential oils: From extraction to encapsulation[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2015, 483(1/2): 220–243.
- [32] FERHAT M A, MEKLATI B Y, CHEMAT F. Comparison of different isolation methods of essential oil from Citrus fruits: Cold pressing, hydrodistillation and microwave ‘dry’ distillation[J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2007, 22(6): 494–504.
- [33] CHEN Q, HU Z, YAO F Y D, et al. Study of two-stage microwave extraction of essential oil and pectin from pomelo peels[J]. *LWT–Food Science and Technology*, 2016, 66: 538–545.
- [34] 张艳东, 张艳俊, 李腾飞. 植物精油的提取及其生理活性研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(9): 203.
- ZHANG Y D, ZHANG Y J, LI T F. Plant essential oil extraction and physiological activities[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(9): 203.
- [35] RAZZAGHI S E, ARABHOSSEINI A, TURK M, et al. Operational efficiencies of six microwave based

- extraction methods for orange peel oil[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 241: 26–32.
- [36] PARK Y S, KIM I, DHUNGANA S K, et al. Quality characteristics and antioxidant potential of lemon (*Citrus limon* Burm. f.) seed oil extracted by different methods[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2021, 8: 644406.
- [37] CIRIMINNA R, FIDALGO A, DELISI R, et al. High-quality essential oils extracted by an eco-friendly process from different citrus fruits and fruit regions[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, 5(6): 5578–5587.
- [38] WEDAMULLA N E, FAN M, CHOI Y J, et al. Citrus peel as a renewable bioresource: Transforming waste to food additives[J]. *Journal of Functional Foods*, 2022, 95: 105163.
- [39] MAHATO N, SHARMA K, KOTESWARARAO R, et al. Citrus essential oils: Extraction, authentication and application in food preservation[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(4): 611–625.
- [40] AGARWAL P, SEBGHATOLLAHI Z, KAMAL M, et al. Citrus essential oils in aromatherapy: Therapeutic effects and mechanisms[J]. *Antioxidants*, 2022, 11(12): 2374.
- [41] SAHINGIL D. GC/MS-olfactometric characterization of the volatile compounds, determination antimicrobial and antioxidant activity of essential oil from flowers of calendula (*Calendula officinalis* L.)[J]. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 2019, 22(6): 1571–1580.
- [42] BELSITO E L, CARBONE C, DI GIOIA M L, et al. Comparison of the volatile constituents in cold-pressed bergamot oil and a volatile oil isolated by vacuum distillation[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(19): 7847–7851.
- [43] LAGAST S, GELLYNCK X, SCHOUTETEN J J, et al. Consumers' emotions elicited by food: A systematic review of explicit and implicit methods[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 69: 172–189.
- [44] ZHANG J, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Basic sensory properties of essential oils from aromatic plants and their applications: A critical review[J/OL]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, (2023–02–19)[2023–11–13]. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10408398.2023.2177611>.
- [45] 刘菲斐, 陈晋, 陈健乐, 等. 基于化学计量学鉴定不同甜橙精油挥发性成分[J/OL]. *食品科学*, (2023–10–23)[2023–11–13]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=ZkvsKdWJ3STP6iODKXpWpdjZ5oH_cnAbv9MbiAqmkLw41F2NNGNmJgOCvko9z03lQBGRtltdUTfIKcCDQKrh_VCTXB_zKlGVwtNEorFecZiTPw00Gk1IPIFiZCqRf3p26VkXKQ1iQPWbqhKU-QlC0Cjm-CS5pJCOB&uniplatform=NZKPT&language=CHS&version=LYDG<https://link.cnki.net/urlid/1.12206.ts.20231020.1622.040>.
- LIU F F, CHEN J, CHEN J L, et al. Identification of volatiles in different sweet orange essential oils by chemometrics[J/OL]. *Food Science*, (2023–10–23)[2023–11–13]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=ZkvsKdWJ3STP6iODKXpWpdjZ5oH_cnAbv9MbiAqmkLw41F2NNGNmJgOCvko9z03lQBGRtltdUTfIKcCDQKrh_VCTXB_zKlGVwtNEorFecZiTPw00Gk1IPIFiZCqRf3p26VkXKQ1iQPWbqhKU-QlC0Cjm-CS5pJCOB&uniplatform=NZKPT&language=CHS&version=LYDG.
- [46] YAMAUCHI Y, SAITO M. Fractionation of lemon-peel oil by semi-preparative supercritical fluid chromatography[J]. *Journal of Chromatography A*, 1990, 505(1): 237–246.
- [47] DETERRE S C, REGA B, DELARUE J, et al. Classification of commercial bitter orange essential oils (*Citrus aurantium* L.), based on a combination of chemical and sensory analyses of specific odor markers[J]. *Journal of Essential Oil Research*, 2014, 26(4): 254–262.
- [48] GUNESER B A, YILMAZ E. Bioactives, aromatics and sensory properties of cold-pressed and hexane-extracted lemon (*Citrus limon* L.) seed oils[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2017, 94: 723–731.
- [49] TORRICO D D, MEHTA A, BORSSATO A. New methods to assess sensory responses: A brief review of innovative techniques in sensory evaluation[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2023, 49: 100978.
- [50] WAKIHIRA T, MORIMOTO M, HIGUCHI S, et al. Can facial expressions predict beer choices after tasting? A proof of concept study on implicit mea-

- surements for a better understanding of choice behavior among beer consumers[J]. *Food Quality and Preference*, 2022, 100: 104580.
- [51] ROSS C F. Sensory science at the human-machine interface[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2009, 20(2): 63-72.
- [52] GOU M, BI J F, CHEN Q Q, et al. Advances and perspectives in fruits and vegetables flavor based on molecular sensory science[J]. *Food Reviews International*, 2023, 39(6): 3066-3079.
- [53] MINH TU N T, ONISHI Y, CHOI H S, et al. Characteristic odor components of *Citrus sphaerocarpa* Tanaka (Kabosu) cold-pressed peel oil[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(10): 2908-2913.
- [54] 李丽, 蒋景龙, 胡佳乐, 等. 不同品种柑橘果皮精油关键香气物质筛选[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(24): 259-269.
- LI L, JIANG J L, HU J L, et al. Screening of key aroma components in essential oils from citrus peels of different cultivars[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(24): 259-269.
- [55] MIYAZATO H. Volatile composition and the key aroma compounds of the *Citrus tachibana* (Makino) Tanaka peel essential oil[J]. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 2018, 21(4): 924-937.
- [56] 胡梓妍, 刘伟, 何双, 等. 基于HS-SPME-GC-MS法分析3种金橘的香气挥发性成分[J]. *食品科学*, 2021, 42(16): 176-184.
- HU Z Y, LIU W, HE S, et al. Analysis of volatile components in three varieties of kumquat by headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Food Science*, 2021, 42(16): 176-184.
- [57] XIAO Z B, WU Q Y, NIU Y W, et al. Characterization of the key aroma compounds in five varieties of mandarins by gas chromatography-olfactometry, odor activity values, aroma recombination, and omission analysis[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(38): 8392-8401.
- [58] CHIDA M, YAMASHITA K, IZUMIYA Y, et al. Aroma impact compounds in three citrus oils: Cross-matching test and correspondence analysis approach[J]. *Journal of Food Science*, 2006, 71(1): S54-S58.
- [59] FENG S, SUH J H, GMITTER F G, et al. Differentiation between flavors of sweet orange (*Citrus sinensis*) and mandarin (*Citrus reticulata*)[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(1): 203-211.
- [60] LOUW S. Recent trends in the chromatographic analysis of volatile flavor and fragrance compounds: Annual review 2020[J]. *Analytical Science Advances*, 2021, 2(3/4): 157-170.
- [61] PARK S Y, KIM Y, KIM T, et al. Chemosensitive materials for electronic nose: Progress, perspectives, and challenges[J]. *InfoMat*, 2019, 1(3): 289-316.
- [62] SHI H, ZHANG M, ADHIKARI B. Advances of electronic nose and its application in fresh foods: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(16): 2700-2710.
- [63] ASIKIN Y, MAEDA G, TAMAKI H, et al. Cultivation line and fruit ripening discriminations of Shikuwasha (*Citrus depressa* Hayata) peel oils using aroma compositional, electronic nose, and antioxidant analyses[J]. *Food Research International*, 2015, 67: 102-110.
- [64] RUSSO M, SERRA D, SURACI F, et al. Effectiveness of electronic nose systems to detect bergamot (*Citrus bergamia* Risso et Poiteau) essential oil quality and genuineness[J]. *Journal of Essential Oil Research*, 2012, 24(2): 137-151.
- [65] XU M, WANG J, ZHU L Y. The qualitative and quantitative assessment of tea quality based on E-nose, E-tongue and E-eye combined with chemometrics[J]. *Food Chemistry*, 2019, 289: 482-489.
- [66] YU S S, HUANG X Y, WANG L, et al. Qualitative and quantitative assessment of flavor quality of Chinese soybean paste using multiple sensor technologies combined with chemometrics and a data fusion strategy[J]. *Food Chemistry*, 2023, 405: 134859.
- [67] CHEN J S. It is important to differentiate sensory property from the material property [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 96: 268-270.
- [68] 陈建设, 刘源, 师锦刚. 食品感官科学研究: 挑战与可能[J]. *食品科学*, 2022, 43(19): 1-7.
- CHEN J S, LIU Y, SHI J G. Food sensory research: Challenges and possibilities [J]. *Food Science*, 2022, 43(19): 1-7.
- [69] HAN P F. Advances in research on brain processing of food odors using different neuroimaging techniques [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2021, 42:

- 134–139.
- [70] SONGSAMOE S, SAENGWONG -NGAM R, KOOMHIN P, et al. Understanding consumer physiological and emotional responses to food products using electroencephalography (EEG)[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 93: 167–173.
- [71] ASIKIN Y, SHIMIZU K, IWASAKI H, et al. Stress amelioration and anti-inflammatory potential of Shiikuwasha (*Citrus depressa* Hayata) essential oil, limonene, and γ -terpinene[J]. *Journal of Food and Drug Analysis*, 2022, 30(3): 454.
- [72] UEDA K, HORITA T, SUZUKI T. Effects of inhaling essential oils of *Citrus limonum* L., *Santalum album*, and *Cinnamomum camphora* on human brain activity[J]. *Brain and Behavior*, 2023, 13(2): e2889.
- [73] MARTIAL C, POIRRIER A L, POTTIER L, et al. From nose to brain: The effect of lemon inhalation observed by whole brain voxel to voxel functional connectivity[J]. *Cortex*, 2023, 165: 119–128.
- [74] CHANDHARAKOOL S, KOOMHIN P, SINLAPASORN J, et al. Effects of tangerine essential oil on brain waves, moods, and sleep onset latency [J]. *Molecules*, 2020, 25(20): 4865.
- [75] HONGRATANAWORAKIT T, BUCHBAUER G. Autonomic and emotional responses after transdermal absorption of sweet orange oil in humans: Placebo controlled trial[J]. *International Journal of Essential Oil Therapeutics*, 2007, 1(1): 29–34.
- [76] MATSUMOTO T, KIMURA T, HAYASHI T. Aromatic effects of a Japanese citrus fruit-yuzu (*Citrus junos* Sieb. ex Tanaka) –on psychoemotional states and autonomic nervous system activity during the menstrual cycle: A single-blind randomized controlled crossover study[J]. *BioPsychoSocial Medicine*, 2016, 10(1): 1–11.
- [77] CASSON A J. Wearable EEG and beyond [J]. *Biomedical Engineering Letters*, 2019, 9(1): 53–71.
- [78] BOTO E, HOLMES N, LEGGETT J, et al. Moving magnetoencephalography towards real-world applications with a wearable system[J]. *Nature*, 2018, 555(7698): 657–661.
- [79] ZANDSTRA E H, KANEKO D, DIJKSTERHUIS G B, et al. Implementing immersive technologies in consumer testing: Liking and Just-About-Right ratings in a laboratory, immersive simulated café and real café [J]. *Food Quality and Preference*, 2020, 84: 103934.
- [80] LEE B K, MAYHEW E J, SANCHEZ-LENGELING B, et al. A principal odor map unifies diverse tasks in olfactory perception [J]. *Science*, 2023, 381(6661): 999–1006.

Research Progress in Variety Traceability of Citrus and Intelligent Sensory Evaluation of Its Essential Oils

ZHAO Qian^{1,3}, YE Zhiyue^{1,3}, CHEN Jianle^{1,2}, CHEN Shiguo^{1,2,3}, YE Xingqian^{1,2}, CHENG Huan^{1,2*}

(¹College of Biosystems Engineering and Food Science, National-Local Joint Engineering Laboratory of Intelligent Food Technology and Equipment, Fuli Institute of Food Science, Zhejiang Key Laboratory of Agro-food Resources and High-value Utilization, Zhejiang International Scientific and Technological Cooperation Base of Health Food Manufacturing and Quality Control, Zhejiang University, Hangzhou 310058

²Zhejiang University Zhongyuan Institute, Zhengzhou 450000

³Innovation Center of Yangtze River Delta, Zhejiang University, Jiaxing 314102, Zhejiang)

Abstract Citrus, widely cultivated globally, has a complex genetic background, leading to ongoing debates about its origins and botanical classification. The consumption or processing of citrus fruits generates a substantial amount of citrus peel waste. Extracting citrus essential oil provides an effective means of utilizing citrus processing waste, promoting resource reutilization, and aligning with the principles of sustainable development. However, commercially available citrus essential oils vary greatly in quality and flavor, with prevalent issues of adulteration. The diversity of citrus varieties is a crucial factor contributing to the wide range of flavors in citrus essential oils, posing a challenge for flavor assessment. To deeply analyze the sensory characteristics of citrus essential oil, this paper first delved into the issue of citrus origins.

Then provided detailed information to flavor characteristic of citrus essential oil and their primary application areas. Additionally, a systematic evaluation of the applications of sensory analysis techniques for citrus essential oil was conducted, including traditional sensory evaluation, human-machine integrated analytical devices, intelligent sensor technology, and modern sensory analysis techniques, along with their advantages and limitations, to provide a scientific basis for the quality evaluation of citrus essential oil. Finally, this paper presented future prospects for the flavor evaluation of citrus essential oils, proposing suggestions such as strengthening quality supervision, enhancing traceability management, and further refining flavor evaluation systems, aiming to enhance the sensory attributes of citrus essential oils and drive sustainable development of citrus industry.

Keywords citrus; variety; traceability; essential oil; flavor; intelligent sensory