

分子感官科学在花椒风味评价中的应用研究进展

钱 杨¹ 王雪梅² 王传明² 沈秋霞¹ 胡 涛²

(1. 四川工商职业技术学院, 四川 成都 611830; 2. 四川天味食品集团股份有限公司, 四川 成都 610200)

摘要: 花椒中含有大量的香气化合物和滋味化合物, 这些化合物构成了花椒独特的气味和滋味。分子感官科学作为一个多学科交叉技术, 致力于从分子层面深入探索和研究食品的感官质量, 包含感官评价与检测分析两方面。文章综述了分子感官科学技术在花椒风味评价中的应用研究进展, 阐明了分子感官科学技术在花椒风味与感官质量评价中的重要意义, 并对其未来发展方向进行了展望。

关键词: 分子感官科学; 花椒; 风味; 感官评价

Research progress on the application of molecular sensory science in the evaluation of *Zanthoxylum bungeanum* flavor

QIAN Yang¹ WANG Xuemei² WANG Chuanming² SHEN Qiuxia¹ HU Tao²

(1. Sichuan Technology and Business College, Chengdu, Sichuan 611830, China;

2. Sichuan Teway Food Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610200, China)

Abstract: There are amount of aroma compounds and taste compounds in *Zanthoxylum bungeanum*, which make it have a unique aroma and taste. Molecular sensory science, as an interdisciplinary technology, is committed to exploring and studying the sensory quality of food at the molecular level, including sensory evaluation and detection analysis. This article reviews the application research progress of molecular sensory science and technology in the evaluation of *Zanthoxylum bungeanum* flavor, elucidates the important significance of molecular sensory science and technology in the evaluation of *Zanthoxylum bungeanum* flavor and sensory quality, and looks forward to its future development direction.

Keywords: molecular sensory science; *Zanthoxylum bungeanum*; flavor; sensory evaluation

分子感官科学于 2007 年被提出^[1], 是集食品风味化学、分析化学与感官评价等为一体的多学科交叉技术, 包含感官评价技术与仪器检测分析技术, 其核心是在分子水平上定性、定量研究食品感官质量, 筛选出关键风味物质, 通过精确构建食品的风味重组物, 进一步验证食品中的关键风味化合物^[2]。目前, 分子感官科学技术被广泛应用于食品风味领域, 尤其是在调味品风味探究方面。

花椒 (*Zanthoxylum bungeanum*), 包括红花椒、青花椒、藤椒等, 是中国特色调味品, 主产于四川、云南、陕西、山西、山东与甘肃等地区。干花椒粒、花椒粉、花椒调油、花椒精、花椒油树脂、花椒精油、花椒精油微胶囊与花椒籽蛋白等是市面上常见的花椒制品。作为与墨西哥辣椒、印度咖喱、非洲黑胡椒、斯里兰卡小豆蔻齐名的特色

调味品, 香气与麻味是花椒的主要风味, 苦味是花椒的次级代谢产物所产生的负面风味^[3], 花椒的风味品质与三者息息相关。

目前, 通过分子感官科学技术探究花椒及其制品的风味研究较多, 但缺乏系统的技术手段和评价方法总结。文章拟综述分子感官科学技术在花椒及其制品中的最新应用与研究动态, 总结常用的花椒风味物质提取方法、花椒风味仪器检测技术以及感官评价手段, 为花椒产业的精深加工、感官质量数字化评价、产业化进程推进等提供依据。

1 分子感官科学在花椒风味评价中的应用

分子感官科学技术在花椒风味评价中应用较为广泛, 其研究流程大体可归纳为 3 个阶段 (见图 1)。首先通

基金项目: 四川省科技创新苗子工程项目 (编号: MZGC20230122)

通信作者: 王雪梅 (1994—), 女, 四川天味食品集团股份有限公司工程师, 硕士。E-mail: 691073001@qq.com

收稿日期: 2024-05-14 **改回日期:** 2024-11-07

过风味提取技术将花椒及其制品中的风味物质进行提取,通过仪器分析对所提取的风味物质进行气味活性物质和滋味活性物质检测,在此过程中,将提取、分离与分

析的每一步操作均与感官评价相结合,最终得到花椒风味轮廓组成,从而实现从分子层面定性、定量研究花椒感官质量,揭示花椒特征风味化学本质的目的。

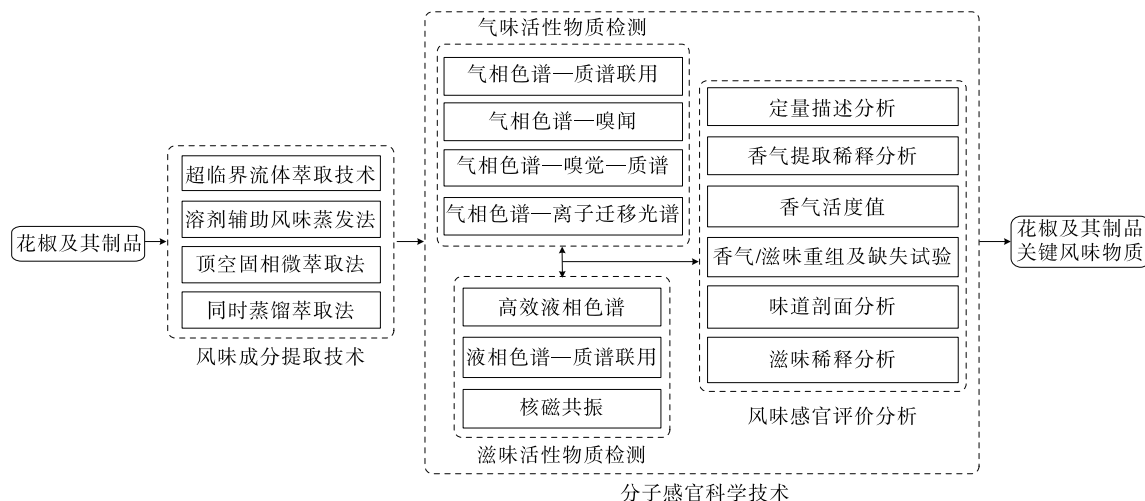


图1 分子感官科学技术在花椒风味评价中的应用流程

Figure 1 Application process of molecular sensory science and technology in flavor evaluation of *Zanthoxylum bungeanum*

表1总结了常见花椒制品的主要风味物质,具有花香、青香、木香和甜香的芳樟醇为不同花椒制品所共有的主要风味物质^[4-5]。随着分子感官科学技术在花椒风味评价中的应用,进一步明确了羟基- α -山椒素和羟基- β -山椒素是花椒中麻味的主要来源^[6],而其少量苦味则主要是由于含有某些苦味氨基酸和多肽所致^[7]。

2 花椒风味物质的提取与分离技术

花椒中的风味物质组成复杂,因此,能够有效地分离挥发性化合物是准确鉴别香气的前提条件。目前常用于花椒风味物质的提取与分离技术主要有超临界流体萃取技术(SFE)、溶剂辅助风味蒸发法(SAFE)、顶空固相微萃取法(HS-SPME)和同时蒸馏萃取法(SDE)等。不同的提取与分离技术的优缺点详见表2,在实际生产和研究中,多采用多种方法相结合的形式进行提取与分离。

3 花椒风味物质的鉴定技术

分子感官科学结合了生物、化学、物理等多学科,通过精密仪器设备和科学的分析技术,揭示食品中气味与滋味产生的本质^[12]。仪器分析是挥发性成分和滋味物质定性和定量分析的主要方法。在花椒挥发性风味成分研究中,气相色谱—质谱联用(GC-MS)、气相色谱—嗅闻(GC-O)、气相色谱—嗅觉—质谱(GC-O-MS)、气相色谱—离子迁移光谱(GC-IMS)等技术应用较多,在花椒滋味物质研究中,高效液相色谱(HPLC)、液相色谱—质谱联用(LC-MS)、核磁共振(NMR)等技术应用较为广泛。常用于花椒风味物质检测的分子感官科学技术见表3。

3.1 花椒气味活性化合物仪器检测分析技术

3.1.1 GC-MS GC-MS通过匹配标准谱库对挥发性化合物进行定性分析,并在最佳温度下对提取的分析物进行定量分析,其中,芳香化合物的定性鉴定一般采用数据库检索法、标准品法和保留指数法,定量分析主要有面积归一化法、内标法和外标法^[19]。目前,GC-MS已成为花椒风味分析中应用最广泛的技术,其结合了气相色谱和质谱仪的优点,能够对复杂的多组物质进行定性和定量分析,具有分离效率高、鉴别能力强、灵敏度高和分析速度快等优点。

Liu等^[20]采用SAFE充分提取炸红花椒油中的香味化合物后,经GC-MS和描述性感官分析鉴定了炸红花椒油中的香气化合物。结果表明,7种不同工艺炸红花椒油中鉴定出46种香气化合物,其中,130℃油炸20 min的花椒油中芳樟醇含量较高,呈较强的花香和柑橘香;140℃油炸20 min与130℃油炸30 min的花椒油呈较强的脂肪香,可能与反式-2,4-癸二烯醛有关。Gao等^[21]通过GC-MS结合OAV分析对产自川渝地区的7种青花椒样品的香气感官特性和挥发性物质进行了研究。结果表明,四川和重庆地区的青花椒样品具有不同的感官特性和关键风味成分,其中芳樟醇、辛樟烯、月桂烯、 β -蒎烯、柠檬烯和 γ -马草蒎烯是区分川渝不同地区样品的关键香气成分。

通过GC-MS分析可基本确定青花椒中主要香气化合物为芳樟醇和柠檬烯,红花椒中主要香气成分为柠檬烯、乙酸芳樟酯和芳樟醇^[22],不同制备工艺的花椒产品和不同产地的花椒在其风味表现上有所差异。

表1 不同花椒制品中的主要风味物质
Table 1 Main flavor substances in different *Zanthoxylum bungeanum*

花椒制品	主要风味物质	风味描述
红花椒粉	芳樟醇	花香、青香、木香、甜香
	3-萜烯	松木
	乙酸香叶酯	玫瑰花香
	月桂烯	清淡的香脂气、青草、柑橘香气
炸红花椒油	芳樟醇	花香、青香、木香、甜香
	桉叶油醇	松油香、草药味、樟脑气息
	月桂烯	清淡的香脂气、青草、柑橘香气
	柠檬烯	柑橘香
红花椒精油	芳樟醇	花香、青香、木香、甜香
	D-柠檬烯	柑橘香、柠檬
	乙酸芳樟酯	木香、麻
	4-月桂烯	胡椒
青花椒粉	芳樟醇	花香、青香、木香、甜香
	柠檬烯	柑橘香
	桉烯	木香、辛辣
	月桂烯	清淡的香脂气、青草、柑橘香气
青花椒精油	芳樟醇	花香、青香、木香、甜香
	D-柠檬烯	柑橘香、柠檬
	桉烯	木香、辛辣
	萜品烯-4-醇	胡椒
竹叶花椒精油	芳樟醇	花香、青香、木香、甜香
	桉烯	木香、辛辣
	D-柠檬烯	柑橘香、柠檬
	α -松油烯	柑橘、柠檬
	α -松油醇	丁香、百合香
	月桂烯	清淡的香脂气、青草、柑橘香气
	γ -松油烯	柠檬

3.1.2 气相色谱嗅闻技术(GC-O) GC-O的检测器为人类鼻子,样品经气相色谱系统分离后被分为两部分:一部分流向嗅闻口,经感官评价小组成员的鼻子嗅闻描述气味;另一部分流向气相色谱检测器,经检测器检测,最后将二者结合起来。GC-O技术在对花椒中特征香味化合物、香味活性化合物、香味化合物有效性及香味化合物的强度和作用大小的鉴别和确定上有着重要作用。

通过GC-O分析可以进一步对检测到的风味物质进行香气描述。Li等^[23]采用SAFE结合SPME-GC-MS与GC-O等技术,从汉源红花椒中鉴定出月桂烯、柠檬烯、桉叶油醇、芳樟醇、苯乙醇、4-甲基苯乙酮和反-香茅醇7种关键香气活性化合物,其为汉源红花椒提供了脂香、花香、青香、甜香、薄荷香、苦杏仁等香气特征。曹博雅等^[24]采用SAFE-GC-MS结合GC-O法分析了20种辛香型香辛

料香气活性成分,结果表明,花椒中的香气活性成分以醇类、烯烃类、酮类和酚类为主,其中橙花醇、(-)-4-萜品醇、芳樟醇、桉叶油醇为花椒提供了花香、甜香、椒麻、木香、青香等香气特征;黄樟素在花椒中的相对含量最高,为花椒提供了麦壳、谷物类香气特征。

3.1.3 气相色谱-嗅觉-质谱技术(GC-O-MS) GC-O-MS技术是GC-O技术和GC-MS技术的结合,已在食品科学领域展现出其强大的分析能力,是研究食品风味的有力工具^[15]。GC-O-MS技术在花椒等香料的关键香气活性化合物鉴定中也发挥着重要作用,通过GC-O-MS技术分析可以更准确地鉴定出花椒中的关键香气成分。

Zheng等^[25]通过GC-O-MS分析了不同气候条件下花椒果皮的挥发性成分,结果表明,柠檬烯和芳樟醇为西南和西北地区产的花椒果皮中的关键香气成分,赋予了花椒较浓的香气; β -月桂烯和(E)-辛烯是华北、华东和华中地区产的花椒果皮中的关键香气成分,赋予了花椒较重的辣味。董天宇等^[26]采用GC-O-MS结合AEDA对青红花椒风味成分进行了分析,结果表明,芳樟醇、月桂烯、桉叶油醇、柠檬烯、桉烯为两种花椒共有的关键香气成分, β -水芹烯为青花椒特有的关键香气成分,为青花椒提供了薄荷清香和辛香。

与GC-O相比,GC-O-MS具有对关键气味分析更快、更准确,避免气味误检等特点,在花椒风味研究中应用较为广泛。

3.1.4 气相色谱-离子迁移光谱技术(GC-IMS) GC-IMS技术结合了气相色谱的高分离能力和离子迁移谱法(IMS)的快速响应优点,在药物检测、疾病监测、环境保护,特别是食品风味分析等方面被广泛应用^[27]。该技术不需要通过SPME对样品中的挥发性化合物进行浓缩,而是直接从样品中提取并分析一定体积的气体,与GC-MS法相比,GC-IMS技术虽无法量化所有的峰,但具有速度快、灵敏度高、进样体积可变、无需预处理等特点,适用于低含量成分检测,可以作为一种简单快速的调味品风味分析检测工具。

Feng等^[28]采用HS-SPME-GC-MS和HS-GC-IMS技术对8种不同的中国地理标志红绿花椒的挥发性有机物进行了测定。结果表明,GC-IMS和GC-MS两种方法均适用于不同生长环境花椒的分类,两种方法测得的红花椒比绿花椒释放出更多的萜烯、酯类和更少的醇类,但GC-IMS在检测速度上明显优于GC-MS。倪瑞洁等^[29]采用GC-IMS对不同炸制时间制备的4种花椒调味油挥发性风味化合物进行了分析,其中柠檬烯、 α -水芹烯、乙缩醛、 α -松油烯、3-甲基丁酸乙酯等物质是炸制15 min花椒调味油的特征香气物质,芳樟醇、 β -蒎烯、 α -蒎烯、柠檬烯、 α -水芹烯、己醛、庚醛、(E)-2-己醛等20种化合物为4种花椒调味油间的标志性差异物。

表 2 常用于花椒风味物质提取与分离的方法比较

Table 2 Comparison of extraction and separation methods commonly used for the flavor substances of *Zanthoxylum bungeanum*

方法	工艺特点	优点	缺点	参考文献
SFE	以超临界状态下的流体为溶剂,利用其高渗透和高溶解能力来提取分离混合物	对温度、压力等条件要求不高,无溶剂残留,香型好	成本较高	[8]
SAFE	利用溶剂在低温和高真空条件下快速蒸发来辅助目标物质的蒸发,进而从复杂的样品中迅速且有效地分离出挥发性化合物	挥发物回收率高,对极性较高的风味物质有较高的回收率、对脂肪含量高的食品基质有较高的气味回收率	操作复杂,萃取过程中可能形成非样品本身的挥发性风味成分	[9]
HS-SPME	顶空固相微萃取即萃取纤维位于样品瓶上空,不直接接触样品基质,涂层通过吸附挥发至顶空部分的分析物完成萃取过程,该方法针对的是含挥发或半挥发性质分析物的复杂基质检测	集萃取、净化、浓缩、进样功能于一体,操作简单、耗时短、无需溶剂、用量少、选择性强	对试验条件要求非常苛刻,纤维涂层状态、温度、样品与顶空体积等均会对结果造成影响	[10]
SDE	水蒸气蒸馏与溶剂萃取相结合,通过少量溶剂提取大量样品	操作简单、重复性好、回收率高	需在高温下操作,易造成风味损失	[11]

表 3 常用于花椒风味物质检测的分子感官科学技术

Table 3 Molecular sensory science techniques commonly used for the detection of flavor substances in *Zanthoxylum bungeanum*

仪器分析方法	特点描述	参考文献
GC-MS	挥发性化合物的定性和定量分析,具有分离效率高、鉴别能力强、灵敏度高等特点	[13]
GC-O	将毛细管气相色谱的分辨能力与人鼻子的选择性和灵敏度联系起来,具有分离效率高、灵敏度高、样品用量少、分析速度快等特点	[14]
GC-O-MS	结合了 GC-MS 和 GC-O 技术的优点,具有对关键气味分析更快、更准确、避免气味误检等特点	[15]
GC-IMS	结合了 GC 的高分离能力和 IMS 的高灵敏度,为复杂样品中挥发性有机物的定性和定量分析提供了准确且可靠的方法,具有速度快、灵敏度高、进样体积可变、无需预处理等特点	[16]
HPLC	高灵敏度和高分辨率的检测器使痕量溶质也能被准确检测,加之色谱柱的选择性和分离作用,不同组分之间的干扰较小,得到的分析结果更加精准可靠	[17]
LC-MS	结合了液相色谱的高分离效能和质谱的高灵敏度、高分辨率特点,样品无需过气化处理,可以直接测定化合物的部分结构信息,检测准确性较高	[17]
NMR	用于对复杂化合物进行结构解析,但灵敏度相对较低,且易出现光谱重叠	[18]

3.2 花椒滋味活性化合物仪器检测分析技术

3.2.1 高效液相色谱法(HPLC) HPLC是有机物质化学成分分离和鉴定中最有用的工具之一。其原理是将分析物放入液体流动相中,通过固定相填充的色谱柱,在柱内各成分被分离后,进入检测器进行检测,从而实现对待样品的分析^[30]。目前,HPLC常被用于花椒中麻味物质的分析和检测以及指纹图谱的构建中。

闫紫玮等^[6]采用 HPLC 测定了不同成熟时期藤椒中的麻味物质。结果表明,在 6 月中下旬—7 月底所采收的藤椒中羟基- α -山椒素含量最高可达 48.25 mg/g。Feng 等^[31]利用 HPLC 分析了花椒中的麻味物质组成及含量。结果表明,花椒中的麻味物质成分主要是羟基- α -山椒素,其含量可达 71.06%~92.90%。娄丽等^[32]通过 HPLC 构建了贵州青花椒指纹图谱,在不同产地的 10 批次花椒中均检出羟基- α -山椒素、羟基- β -山椒素、羟基- γ -山椒素等麻

味物质成分,但其含量有所差异,说明产地、品种和采收时间对花椒麻味物质组成和含量均有影响,与闫紫玮等^[6]的研究结果一致。

3.2.2 液相色谱—质谱联用法(LC-MS) LC-MS具有良好的重现性和广泛的应用性,具有灵敏度高、不需要衍生化处理等特点,常用于分析鉴定难挥发、强极性、热稳定性差的化合物^[33]。目前,高效液相色谱—质谱联用(HPLC-MS)、液相色谱—串联质谱(LC-MS/MS)、高效液相色谱—串联质谱(HPLC-MS/MS)等技术已成为高效鉴定花椒中麻味物质组分的重要技术手段。

高夏洁等^[34]采用 HPLC-MS 对 17 个不同产地炸红花椒油进行分析,发现花椒麻感物质组成和含量与花椒的产地及品种有较大关系,其中花椒油素和 β -山椒素在山东莱芜未知品种花椒油中含量最高;羟基- γ -山椒素是四川南椒的特征物质,此外,四川盐源南椒中还含有较高含

量的羟基- α -山椒素;陕西富平大红袍中含有较高含量的羟基- β -山椒素和羟基- ϵ -山椒素;其余各地花椒品种中的麻味物质含量和组成则较为均匀。方正等^[35]采用HPLC-MS、线性标度法和斯科维尔指数法,从甘肃武都、四川汉源、陕西韩城红花椒油树脂中鉴定出羟基-山椒素(α -、 β -、 γ -和 ϵ -)、羟基- γ -异山椒素、花椒素、异花椒素、 γ -山椒素和四氢花椒素9种共有麻味物质,且4种羟基-山椒素占总麻味物质含量的95%以上。贮藏期间,麻味物质相互转化,羟基- α -山椒素和羟基- γ -山椒素含量减少,羟基- β -山椒素含量增加,羟基- ϵ -山椒素含量无显著变化。Zhao等^[36]利用GC-MS、超高效液相色谱—线性离子阱/静电场轨道阱组合式高分辨质谱联用和高效液相色谱—二极管阵列检测等方法分析了6种红花椒和9种青花椒在脂肪酸、挥发性成分上的差异。结果表明,亚油酸等5种脂肪酸、芳樟醇等28种挥发性成分,凯拉花青等46种挥发性成分为红花椒和青花椒间的差异代谢产物。

3.2.3 核磁共振技术(NMR) NMR常用于复杂化合物的结构解析,目前可以测定上万种化合物的分子结构,已被广泛应用于多个领域^[37],包括对花椒中麻味物质的解析和化合物的鉴定。

卫林^[38]利用TLC、HPLC-MS、NMR对花椒中的麻味化合物进行了结构鉴定。结果表明,所获得的麻味物质为羟基- β -山椒素,含量为99.31%。Chai等^[39]利用红外、NMR和MS技术对花椒果皮中分离出的一种新的香豆素进行了鉴定,将其鉴定为7-oxo-7H-furo-[3,2-g]chromen-9-yl二甲基氨基甲酸酯。李春丽等^[40]利用多种色谱柱和HPLC、NMR等技术从花椒正丁醇部位分离鉴定出1种新化合物和13种已知化合物,其中丁香树脂酚-4'- O - β -D-吡喃葡萄糖苷为首次从花椒中分离得到,4- O -(3',4'-亚甲二氧基肉桂酰基)-肉桂酸甲酯、苔黑酚、1-甲氧基-7R,8S-二羟基苯丙醇、咖啡酸甲酯、没食子甲酯、腺苷、紫花前胡苷、blumenol C glucoside、(6R,9S)-3-氧- α -紫罗兰醇- β -D-吡喃葡萄糖苷和异落叶松脂素为首次从花椒属植物中分离得到。

4 用于花椒风味感官评价的分子感官科学技术

感官评价分析是分子感官科学技术的重要组成,常用于花椒风味感官评价的方法有定量描述分析(QDA)、香气提取稀释分析(AEDA)、香气活度值(OAV)、香气/滋味重组及缺失试验、味道剖面分析(TPA)及滋味稀释分析(TDA)等。

4.1 定量描述分析(QDA)在花椒风味评价中的应用

QDA是风味描述中常用的一种方法,该方法要求8~12位评价人员组成评价小组,面对多个相关类项的样品,首先通过一致性讨论开发产生统一的描述性词汇库,再使用非线性或线性标度对样品的各种感官特征进行评

价,如色泽、香气、口感等,最后利用统计学方法分析所得数据,确定样品的香气属性,在实际使用中多与GC-MS、GC-O、GC-O-MS等仪器分析技术相结合。

王娟等^[41]通过QDA确定了青香、椒麻、木香、油脂、酸味、甜香、哈喇味和清香为花椒精油及其水提取物的香气属性。结果表明,青香和椒麻香为青花椒精油的主要香气属性,哈喇味、酸味和木香为青花椒水提物的主要香气属性;红花椒精油的主要香气属性为青香、椒麻香和木香,红花椒水提物的主要香气属性为木香、油脂香和甜香;结合GC-MS、GC-O等技术进一步鉴定出汉源、金阳青花椒和汉源、武都红花椒的精油及水提物的香气活性成分主要由呈果香、甜香的酯类,呈植物香、柑橘香、柠檬香的萜烯类与呈典型胡椒味、椒麻味的萜烯类氧化物组成。倪瑞洁^[42]采用QDA确定了草药味、柑橘香、松香、香料味、脂香和青香为花椒调味油的6个呈香属性,进一步分析发现,韩城大红袍红花椒调味油和汉源红花椒调味油中的草药味、脂香和松香较强,由不同产地的青花椒制得的调味油在草药味、香料味、松香和脂香方面整体表现较弱;与平昌青花椒和陕西青花椒所制得的调味油相比,江津青花椒调味油具有最强的青香和柑橘香。

4.2 香气提取稀释分析(AEDA)在花椒风味评价中的应用

AEDA是通过逐渐稀释香气提取物,对每个稀释浓度的样品进行GC-O分析和香气描述,直到感官评价人员闻不到香气为止,稀释倍数用香气稀释因子(FD)表示,根据香气提取物的FD大小,确定样品的关键香气活性物质。实际应用中需要与GC-O、GC-O-MS等仪器分析技术结合使用,且嗅闻人员必须经过专业培训。

王思思^[43]采用AEDA、GC-O-MS、动态稀释嗅辨仪和快速描述性感官分析,从11个不同产地红花椒中鉴定出17种香气活性成分($FD \geq 1$),其中, $FD \geq 128$ 的关键香气活性化合物有桉烯、D-柠檬烯、芳樟醇、反-1-水合桉烯、新别罗勒烯、香茅醛、4-萜烯醇、 α -松油醇和乙酸芳樟酯。Zhao等^[44]通过GC-O-MS、GC $\times$ GC-O-MS和AEDA等方法对汉源花椒的挥发性香气成分和主要香气活性成分进行了研究。结果表明,月桂烯、(+)-柠檬烯、(E)- β -辛烯、 β -丁烯、德国红烯D、桉树脑、芳樟醇和乙酸芳樟醇为汉源花椒的主要香气活性化合物。陈海涛等^[45]采用SDE、SAFE、AEDA与GC-O-MS等技术,从炸金阳红花椒油中鉴定出44种香气活性成分,其中, $FD \geq 81$ 的关键香气活性化合物有芳樟醇(青香和辛香)、大根香叶烯D(花香)、柠檬烯(清甜和花香)、乙酸芳樟酯(月季花香)和乙酸-4-松油烯醇酯(脂肪香)等。

4.3 香气活度值(OAV)在花椒风味评价中的应用

OAV的使用首先需要通过GC-MS、GC-O等仪器分析技术准确量化化合物后,根据化合物在相应基质中的香气阈值计算OAV,可以判断化合物对食物特征气味的

贡献, $OAV \geq 1$ 表示此种物质对样品的整体香气有一定贡献, OAV 值越大, 其对样品香气的贡献越大。

高夏洁等^[46]采用 SPME-GC-MS 与 OAV 技术, 从 17 种不同红花椒油中鉴定出 25 种香气活性成分 ($OAV > 1$), 部分花椒油样品中, $100 < OAV < 1\ 000$ 的有 (—)- β -蒎烯、罗勒烯、水芹烯、p-伞花烃、(E,E)-2,4-庚二烯醛、R-(—)-香芹酮及乙酸芳樟酯, $OAV \geq 1\ 000$ 的有月桂烯、柠檬烯、桉叶油醇及芳樟醇。高露等^[47]利用 HS-SPME-GC-MS 结合 OAV 和偏最小二乘判别分析对 12 种红花椒油的关键香气物质特征进行分析。结果表明, 芳樟醇和月桂烯对红花椒油香气贡献最大, 部分样品中的 OAV 值高至接近 30 000; 2-庚烯醛、罗勒烯和柠檬烯在大部分样品中的 $OAV > 1\ 000$, 对红花椒油香气也有重大贡献。综上, 芳樟醇和月桂烯为不同红花椒油所共有的主要香气活性成分。

4.4 香气/滋味重组及缺失试验在花椒风味评价中的应用

香气/滋味重组与缺失试验是建立在 $OAV \geq 1$ 的基础上的。重组试验中, 是将一系列已知的香气/滋味物质按照其在原始食品中的浓度重新组合, 以模拟原始食品的香气/滋味, 而在缺失试验中, 会故意省略一种或多种已知的香气/滋味物质, 然后评估这种省略对整体香气/滋味的影响。如果省略了某种物质后, 重组样品的香气/滋味与原始样品显著不同, 该物质就被认为是关键的香气/滋味成分。此法在确定花椒风味成分的关键物质中应用较多, 尤其在确定不同花椒间的差异性风味成分中尤为重要。

Ni 等^[48]采用 SPME-GC-O-MS、香气强度值 (AI)、 OAV 、QDA、香气重组与缺失试验等技术, 从 5 种花椒油中鉴定出 30 种关键香气活性化合物, 其中 AI 值与 OAV 值均较高的有月桂烯、(E)-2-庚烯醛、柠檬烯、 α -松油醇和 p-伞花烃; 可作为区分炸青、红花椒油标记物的有芳樟醇、乙酸芳樟醇和桉叶油醇; 韩城与汉源炸红花椒油呈强烈的草本、辛辣、脂肪和松香味, 陕西、江津和平昌炸青花椒油呈较强的青味和柑橘香。Sun 等^[49]利用 AEDA 结合 GC-O-MS 技术研究了韩城花椒油和汉源花椒油中的香气特征, 通过香气重组模型成功模拟了两种花椒油的香气特征。缺失试验表明, β -茶香烯、对伞花烯、乙酸辛酯、辛醛、香茅醇和沙滨烯在韩城花椒油和汉源花椒油的香气差异中起关键作用。

综上, 通过香气/滋味重组及缺失试验, 不仅能得到芳樟醇、月桂烯这种含量高、风味贡献大的主要香气成分, 也能挖掘到对伞花烯、沙滨烯这种含量低但风味贡献大的关键差异性风味成分。

4.5 味道剖面分析 (TPA) 在花椒风味评价中的应用

TPA 的使用首先需要评价小组确定用来描述产品间感官差异的标准化词汇, 再对照词汇表检查样品, 在强度

标度上给每一出现的特性进行打分, 同时要注意所感知到的各因素的顺序, 最后对气味和风味的整体印象进行打分。此法对评价员要求较高, 需为优选评价员或专家。

课净璇等^[50]采用溶剂萃取、TPA、TDA、硅胶色谱、薄层色谱与超高压液相色谱—飞行时间质谱仪等技术, 从不同产地具有明显苦味 (苦味强度 $BIs > 0.5$) 的花椒中鉴定出 2 种主要苦味成分: 7-甲氧基香豆素和 8-异戊烯基山奈酚, 并证明两者均能刺激苦味受体 hTAS2R14 以产生苦味。张璐璐等^[51-52]采用时间强度法、感官剖面描述性分析、动态主导型感官属性法对 8 个不同产地红花椒和 2 个不同浓度花椒油树脂进行分析, 得到木感、针刺感、振动感、涩感、苦味、垂涎感和灼热感 7 个麻味描述词, 且木感、针刺感和苦味变化趋势较为一致, 麻味在口腔内扩散呈中心向外辐射型。

4.6 滋味稀释分析 (TDA) 在花椒风味评价中的应用

TDA 是基于人类的味觉感知, 将人的舌头作为检测器, 通过逐步稀释样品中的滋味物质, 直到人们无法再检测到该物质为止, 该点即为该滋味物质的滋味阈值, 再根据计算得出 TAV 值, $TAV > 1$, 说明该物质对整体滋味有显著贡献。此法对评价员要求较高, 需经过专业培训。

梅小飞^[7]采用 TPA、TDA、(半) 制备型液相色谱、UPLC-MS/MS、UPLC-Q-TOF-MS/MS 等技术, 以同产地苦味微弱的汉源红花椒为对照, 从苦味强度较高的汉源枸橼 (野生红花椒) 中分离、鉴定出 15 种关键苦味化合物, 包括苯丙氨酸、缬氨酸、异亮氨酸、Zanthoamide A、木兰花碱、小檗碱、槲皮素、槲皮苷、异槲皮苷、槲皮素-3-O- α -L-阿拉伯糖苷、异鼠李素、芥子酸、水杨酸、熊果苷和腺苷。Yang 等^[53]采用 UPLC-MS 结合 TDA 对花椒中大量潜在的非挥发性苦味物质进行了筛选和鉴定, 共鉴定出 15 种苦味关键化合物, 包括 5 种黄酮、3 种氨基酸、3 种生物碱、2 种酚酸、1 种多酚和 1 种核苷酸, 其中槲皮素 3-O-葡萄糖苷、槲皮素、熊果苷和异鼠李素对花椒的苦味有显著贡献。

以上感官评价方法均是常用于花椒风味评价的方法, 但任何评价方法的单独使用都有一定局限性, 如 QDA 和 TPA 需要评价小组对待评价样品进行训练, 试验成本较高; AEDA 需要足够多的感官评价员参与评价, 耗时耗力; 仅以 $OAV > 1$ 就判定某物质对样品风味具有重大贡献缺乏准确性和说服力; 香气/滋味重组及缺失试验对试验设计要求较高, 且试验周期长; TDA 只适用于滋味活性成分的定性分析, 不能进行定量分析。因此, 在关于花椒风味评价的实际研究中多是几种感官评价方法结合使用, 以提高评价人员利用率和试验准确性, 如将 QDA 和 AEDA 结合既能提高评价人员利用率又能得到花椒关键风味物质的具体香味描述; 将 OAV 和香气/滋味重组及缺失试验结合能进一步提高试验结果的准确性和可靠度。

除了不同感官评价方法的联合使用, 实际研究中通

常还需将感官评价和仪器分析技术相结合,从而进一步发挥分子感官科学技术在花椒风味评价中的优势。通过分子感官科学技术的应用,已探究得知不同品种、生长环境、采收季节、加工方式、花椒产品间的关键风味成分和感官特性均存在差异,但主体风味仍以芳樟醇和月桂烯等物质提供的花香、青香、木香、甜香和脂香等香味,羟基- α -山椒素和羟基- β -山椒素等物质提供的麻味为主。

5 总结与展望

目前,分子感官科学技术多被用于花椒风味物质的鉴定与感官特性描述等方面,在花椒风味质量控制、消费者偏好和适应性产品开发方面研究较少。由于该技术本身存在局限性,例如:花椒中的不同化合物之间的相互作用会造成花椒麻味与苦味的改变,仪器定性定量分析的结果可能与感官结果不一致,因此,还需优化仪器分析方法以得到真实评价。未来,分子感官科学技术可从以下方面进行突破:针对不同产地、品种、工艺下的花椒及其制品,研究其风味物质的变化规律、形成机制和构效关系,以实现香气强化、提麻降苦等方面的风味靶向调控;针对代表性花椒及其制品建立感官描述词典及参照系,以辅助研究者与消费者理解其感官属性,从而在研发、生产和营销等环节实现有效沟通;针对不同香型的花椒开发适应性产品,建立风味数据库,并形成风味与感官质量的预测模型和评价体系。

参考文献

- [1] STEINHAUS P, SCHIEBERLE P. Characterization of the key aroma compounds in soy sauce using approaches of molecular sensory science[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(15): 6 262-6 269.
- [2] GREGER V, SCHIEBERLE P. Characterization of the key aroma compounds in apricots (*Prunus armeniaca*) by application of the molecular sensory science concept[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(13): 5 221-5 228.
- [3] KE J X, QU Y, LI S S, et al. Application of HPLC fingerprint based on acid amide components in Chinese prickly ash (*Zanthoxylum*) [J]. Industrial Crops and Products, 2018, 119: 267-276.
- [4] 冯西娅. 八种地理标志青红干花椒的风味特性及其物质基础研究[D]. 重庆: 西南大学, 2024: 31-48.
FENG X Y. Study on flavor characteristics and material basis of eight kinds of dried green and red huajiao with geographical indication[D]. Chongqing: Southwest University, 2024: 31-48.
- [5] 李东, 张琼, 何新益, 等. 花椒风味油茶籽油制备及挥发性物质分析[J]. 食品与机械, 2023, 39(5): 166-172.
LI D, ZHANG Q, HE X Y, et al. Preparation and volatile compounds analysis of Camellia seed oil with *Zanthoxylum* flavor[J]. Food & Machinery, 2023, 39(5): 166-172.
- [6] 闫紫玮, 谢天芳, 王佳琳, 等. 藤椒果实成熟期麻味物质及其挥发性香气组分的变化规律[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(7): 304-312.
YAN Z W, XIE T F, WANG J L, et al. Variation of numb and volatile components in *Zanthoxylum armatum* DC. at different maturity stages[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(7): 304-312.
- [7] 梅小飞. 红花椒果皮苦味形成的关键苦味物质研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020: 35-53.
MEI X F. Identification of key bitter compounds in the formation of bitter taste of red huajiao (*Zanthoxylum simulans* Hance) peel[D]. Chongqing: Southwest University, 2020: 35-53.
- [8] 屈岩峰, 郭晓婵, 唐嘉瞳, 等. 花椒中天然成分提取工艺及在食品中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(5): 234-240.
QU Y F, GUO X C, TANG J T, et al. Research progress on the extraction process of natural components from *Zanthoxylum bungeanum* and its application in food[J]. Food & Machinery, 2024, 40(5): 234-240.
- [9] LIU X L, DU X P, YANG Y F, et al. Study on the aroma formation of baked sea bass (*Lateolabrax japonicus*) via solvent-assisted flavor evaporation coupled with gas chromatography-mass spectrometry (SAFE-GC-MS) analysis [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 171: 114152.
- [10] 陆欢, 徐宁, 刘建辉, 等. 基于HS-SPME-GC-MS法分析春生田头菇子实体不同部位挥发性成分[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(8): 95-104.
LU H, XU N, LIU J H, et al. Analyses of volatile components in different parts of agrocybe praecox by HS-SPME-GC-MS [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2021, 40(8): 95-104.
- [11] 葛德鹏, 李森, 黄凯, 等. 不同溶剂同时蒸馏萃取艾叶挥发油的抑菌活性[J]. 食品与生物技术学报, 2020, 39(3): 41-48.
GE D P, LI S, HUANG K, et al. Antimicrobial activities of artemisia argyi essential oils extracted by simultaneous distillation using different solvent systems[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(3): 41-48.
- [12] 关海宁, 赵士发, 刘登勇, 等. 基于分子感官科学的肉制品风味研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(6): 352-361.
GUAN H N, ZHAO S F, LIU D Y, et al. Research progress of meat product flavor based on molecular sensory science[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(6): 352-361.
- [13] VERMA D K, SRIVASTAV P P. A paradigm of volatile aroma compounds in rice and their product with extraction and identification methods: a comprehensive review[J]. Food Research International, 2020, 130: 108924.
- [14] ZELLNER B D, DUGO P, DUGO G, et al. Gas chromatography-olfactometry in food flavour analysis[J]. Journal of Chromatography A, 2008, 1 186(1/2): 123-143.
- [15] SONG H L, LIU J B. GC-O-MS technique and its applications in food flavor analysis[J]. Food Research International, 2018, 114: 187-198.

- [16] 陈俊宇, 凌建刚, 杜丽慧, 等. 基于 GC-IMS 技术分析不同干燥方式花菇的挥发性风味成分差异[J]. 食品与机械, 2024, 40(6): 43-52.
CHEN J Y, LING J G, DU L H, et al. Differences in volatile components between different drying methods of lentinus edoeds analyzed by GC-IMS[J]. Food & Machinery, 2024, 40(6): 43-52.
- [17] 陈巧莉. 基于高效液相色谱的花椒麻味物质质量检测技术研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021: 13-20.
CHEN Q L. Study on quantitative detection technology of numb-taste substances in *Zanthoxylum bungeanum* based on high performance liquid chromatography[D]. Chongqing: Southwest University, 2021: 13-20.
- [18] TANG D Q, ZOU L, YIN X X, et al. HILIC-MS for metabolomics: an attractive and complementary approach to RPLC-MS[J]. Mass Spectrometry Reviews, 2016, 35(5): 574-600.
- [19] GOU M, BI J, CHEN Q, et al. Advances and perspectives in fruits and vegetables flavor based on molecular sensory science [J]. Food Reviews International, 2021, 39(6): 3 066-3 079.
- [20] LIU R J, QI N, SUN J, et al. Effects of frying conditions on volatile composition and odor characteristics of fried pepper (*Zanthoxylum bungeanum* Maxim.) oil[J]. Foods, 2022, 11(11): 1 661.
- [21] GAO L, SHI B L, ZHAO L, et al. Aroma characteristics of green huajiao in Sichuan and Chongqing area using sensory analysis combined with GC-MS[J]. Foods, 2024, 13(6): 836.
- [22] DUAN P, FENG X Y, LI A J, et al. Identification and characterization of aroma profiles of huajiao oil from different geographical origins using instruments and sensory analysis[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 129: 106074.
- [23] LI Z H, JEON J, KWON S Y, et al. Characterization and evaluation of changes in the aroma-active components in szechuan pepper (*Zanthoxylum bungeanum* Maxim) under different cooking temperatures using gas chromatography-olfactometry[J]. Chemosensory Perception, 2019, 12(1): 32-39.
- [24] 曹博雅, 蒲丹丹, 郑瑞仪, 等. SAFE-GC-MS 结合 GC-O 法分析 20 种辛香型香辛料香气活性成分[J/OL]. 食品科学. (2023-12-06) [2024-06-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20231206.1030.007.html>.
CAO B Y, PU D D, ZHENG R Y, et al. Characterization of the aroma-active compounds among 20 pungent spices by SAFE-SPME-GC-MS/O[J/OL]. Food Science. (2023-12-06) [2024-06-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20231206.1030.007.html>.
- [25] ZHENG T, SU K X, GAO M S, et al. Chemotaxonomic variation in volatile component contents and their correlation between climate factors in Chinese prickly ash peels (*Zanthoxylum bungeanum* Maxim.) [J]. Food Chemistry: X, 2021, 12: 100176.
- [26] 董天宇, 齐楠, 刘芮嘉, 等. 青花椒与红花椒关键风味物质的对比分析[J]. 精细化工, 2023, 40(4): 869-877.
DONG T Y, QI N, LIU R J, et al. Comparative analysis of key flavor substances of green and red pepper[J]. Fine Chemicals, 2023, 40(4): 869-877.
- [27] WANG S, CHEN H, SUN B. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. Food Chemistry, 2020, 315: 126158.
- [28] FENG X Y, WANG H W, WANG Z R, et al. Discrimination and characterization of the volatile organic compounds in eight kinds of huajiao with geographical indication of China using electronic nose, HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131671.
- [29] 倪瑞洁, 詹萍, 田洪磊. 基于 GC-IMS 结合多元统计方法分析炸制时间对花椒调味油挥发性物质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 279-286.
NI R J, ZHAN P, TIAN H L. Effects of frying time on volatile flavor compounds in fried pepper (*Zanthoxylum bungeanum*) oil as analyzed by gas chromatography-ion mobility spectrometry and multivariate statistical analysis[J]. Food Science, 2022, 43(6): 279-286.
- [30] GALANT A L, KAUFMAN R C, WILSON J D. Glucose: detection and analysis[J]. Food Chemistry, 2015, 188: 149-160.
- [31] FENG X Y, HUANG P M, DUAN P, et al. Dynamic *Zanthoxylum* pungency characteristics and their correlation with sanshool composition and chemical structure[J]. Food Chemistry, 2023, 407: 135138.
- [32] 姜丽, 胡伯凯, 王忠伟, 等. 基于高效液相色谱法构建贵州青花椒指纹图谱及聚类分析[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(8): 253-260.
LOU L, HU B K, WANG Z W, et al. Establishment of HPLC fingerprints and cluster analysis of *Zanthoxylum armatum* from Guizhou[J]. China Food Additives, 2023, 34(8): 253-260.
- [33] ASZYK J, BYLINSKI H, NAMIESNIK J, et al. Main strategies, analytical trends and challenges in LC-MS and ambient mass spectrometry-based metabolomics[J]. Trac-Trends in Analytical Chemistry, 2018, 108: 278-295.
- [34] 高夏洁, 钟葵, 赵镭, 等. 不同产区花椒油的椒麻感官特性及物质组成[J]. 食品科学, 2022, 43(8): 281-287.
GAO X J, ZHONG K, ZHAO L, et al. Sensory numb taste characteristics and numb taste-active components of pepper oil produced in different areas of China[J]. Food Science, 2022, 43(8): 281-287.
- [35] 方正, 高海燕, 赵镭, 等. 花椒树脂加速贮藏期间麻味物质组成及麻感变化[J]. 中国调味品, 2019, 44(8): 1-6, 12.
FANG Z, GAO H Y, ZHAO L, et al. Changes of substances and pungency characteristics of pepper oleoresin during the accelerated storage period[J]. China Condiment, 2019, 44(8): 1-6, 12.
- [36] ZHAO C, HAN M, TU T, et al. Comparative analysis of fatty acids, volatile and non-volatile components in red huajiao

- (*Zanthoxylum bungeanum* Maxim.) and green huajiao (*Zanthoxylum armatum* DC.) using GC-MS, UPLC-LTQ-Orbitrap-MS/MS and HPLC-DAD[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 204: 117371.
- [37] 张燕红, 尹军峰, 刘政权, 等. 分子感官科学技术在茶叶风味上的应用研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(22): 5 922-5 929.
- ZHANG Y H, YIN J F, LIU Z Q, et al. Research progress of application of molecular sensory science technology in tea flavor[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2018, 9(22): 5 922-5 929.
- [38] 卫林. 花椒果皮的化学成分研究[D]. 太原: 中北大学, 2023: 39-50.
- WEI L. Study on chemical constituents of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim. peel[D]. Taiyuan: North University of China, 2023: 39-50.
- [39] CHAI T, ZHANG W H, JIAO H, et al. A new coumarin from pericarps of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim[J]. *Journal of Chemical Research*, 2021, 45(11/12): 1 047-1 051.
- [40] 李春丽, 孟宪华, 尚贤毅, 等. 花椒化学成分及其抗氧化活性[J]. *中草药*, 2021, 52(10): 2 869-2 875.
- LI C L, MENG X H, SHANG X Y, et al. Constituents of *Zanthoxylum bungeanum* pericarps and their anti-oxidative activity[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2021, 52(10): 2 869-2 875.
- [41] 王娟, 杜静怡, 贾雪颖, 等. 花椒精油及其水提物的香气活性成分分析[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(20): 229-241.
- WANG J, DU J Y, JIA X Y, et al. Characterization of the aroma-active compounds in essential oil and water extract of *Zanthoxylum bungeanum* pericarp[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(20): 229-241.
- [42] 倪瑞洁. 花椒调味油特征香气物质解析及其呈香属性效应机制研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2022: 11-31.
- NI R J. Analysis of characteristic aroma substances of *Zanthoxylum* flavoring oil and study on effect mechanism of aroma properties[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2022: 11-31.
- [43] 王思思. 我国不同产地红花椒挥发性物质及香气特征分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2019: 22-39.
- WANG S S. Study on volatile compound and aroma characteristics of chinese red pepper[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019: 22-39.
- [44] ZHAO M, LI T, YANG F, et al. Characterization of key aroma-active compounds in Hanyuan *Zanthoxylum bungeanum* by GC-O-MS and switchable GC×GC-O-MS[J]. *Food Chemistry*, 2022, 385: 132659.
- [45] 陈海涛, 孙丰义, 王丹, 等. 梯度稀释法结合气相色谱-嗅闻-质谱联用仪鉴定炸花椒油中关键性香气活性化合物[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(3): 191-198.
- CHEN H T, SUN F Y, WANG D, et al. Identification of key aroma-active compounds of fried zanthoxylum essential oil by aroma extract dilution analysis and gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2017, 43(3): 191-198.
- [46] 高夏洁, 高海燕, 赵镭, 等. SPME-GC-MS结合OAV分析不同产区花椒炸花椒油的关键香气物质[J]. *食品科学*, 2022, 43(4): 208-214.
- GAO X J, GAO H Y, ZHAO L, et al. Analysis of key aroma components in fried *Zanthoxylum bungeanum* oil from different production areas by solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry combined with odor activity value[J]. *Food Science*, 2022, 43(4): 208-214.
- [47] 高露, 赵镭, 史波林, 等. 气相色谱-质谱联用结合气味活度值分析红花椒油的关键香气物质特征[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(22): 295-301.
- GAO L, ZHAO L, SHI B L, et al. GC-MS combined with odor activity value to analyze key aroma substance characteristics of red Chinese pepper oil[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(22): 295-301.
- [48] NI R J, YAN H Y, TIAN H L, et al. Characterization of key odorants in fried red and green huajiao (*Zanthoxylum bungeanum* maxim. and *Zanthoxylum schinifolium* sieb. et Zucc.) oils[J]. *Food Chemistry*, 2022, 377: 131984.
- [49] SUN J, SUN B, REN F, et al. Characterization of key odorants in Hanyuan and Hancheng fried pepper (*Zanthoxylum bungeanum*) oil[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(23): 6 403-6 411.
- [50] 课净璇, 李永秀, 李杰, 等. 乳清分离蛋白掩蔽花椒苦味机制研究[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(19): 10-16.
- KE J X, LI Y X, LI J, et al. Study on the mechanism of whey protein isolate masking bitterness of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(19): 10-16.
- [51] 张璐璐. 椒麻感的心理物理学实验研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2019: 49-60.
- ZHANG L L. Psychophysical experimental study of the pungency sensation evoked by Chinese pepper[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2019: 49-60.
- [52] ZHANG L L, XU S S, SHI B L, et al. Evaluation of the pungency intensity and time-related aspects of Chinese *Zanthoxylum bungeanum* based on human sensation[J]. *Journal of Sensory Studies*, 2018, 33(6): 12465.
- [53] YANG Q Q, MEI X F, WANG Z R, et al. Comprehensive identification of non-volatile bitter-tasting compounds in *Zanthoxylum bungeanum* Maxim. by untargeted metabolomics combined with sensory-guided fractionation technique[J]. *Food Chemistry*, 2021, 347: 129085.