

花椒加工利用研究进展

卓士鸿¹, 刘婉婷², 韩洪波², 刘 珊²

(1. 莘麻众甫食品科技(四川)有限公司, 四川攀枝花 617000;

2. 攀枝花学院生物与化学工程学院(农学院), 四川攀枝花 617000)

[摘 要]花椒(*Zanthoxylum* spp.)是芸香科花椒属植物的干燥成熟果皮,为我国传统药食同源香辛料,被誉为“八大调味品”之一。本文从食品科学与食品加工应用的角度,系统综述了花椒的种类、产地分布与主要化学成分,重点梳理了挥发油(精油)、麻味物质(不饱和脂肪酸酰胺类,以羟基- α -山椒素为代表)、生物碱及多酚黄酮等功能成分的提取分离技术,包括水蒸气蒸馏、超临界 CO₂ 萃取、亚临界流体萃取及超声/微波辅助提取等工艺的优化进展。文章着重论述了花椒精油在调味与香精香料中的应用,花椒油树脂(oleoresin)及麻味提取物的开发,花椒在食品保鲜、抗氧化与抗菌防腐(天然防腐剂、活性包装膜、纳米乳液)中的应用,花椒油、花椒粉及复合调味料、火锅底料等调味品加工,以及花椒籽油(富含 α -亚麻酸)等副产物的高值化利用。最后剖析了当前花椒加工产业精深加工程度低、功能成分稳定性差、标准化不足、产品同质化等关键问题,并对绿色提取、稳态化递送、副产物循环利用及标准体系建设等发展趋势进行了展望,以期为花椒资源的高效利用与产业升级提供参考。

[关键词]花椒;精油;麻味物质;食品加工;天然防腐剂;综合利用

[作者简介]卓士鸿(1982—),男,四川盐源人,本科,研究方向:花椒加工利用。刘婉婷(2006—),女,四川成都人,本科在读,研究方向:食品加工。韩洪波(1981—),男,四川攀枝花人,讲师,硕士,研究方向:植物资源利用。刘珊(1980—),女,四川雅安人,教授,博士,研究方向:分子生物学。

[基金项目]本文系“花椒油同类竞品的风味组学研究”(项目编号:HX2025109);“非热加工技术对冷榨花椒油制备的影响研究”(项目编号:2026cxcyl61);生化学院生物园艺实践教学示范基地(项目编号:2024025300171);攀西特色资源生物技术应用校外实践教学示范基地(项目编号:20240506)。

[DOI] <https://doi.org/10.62662/kjxk0203007>

[中图分类号] TS202.1

[本刊网址] www.oacj.net

[投稿邮箱] kjxk999@163.com

引言

花椒为芸香科(*Rutaceae*)花椒属(*Zanthoxylum* L.)植物的干燥成熟果皮,原产于中国,栽培历史悠久,《诗经》中即有“椒聊之实,繁衍盈升”的记载。花椒以其特有的浓郁芳香与持久麻味,成为我国最重要的香辛调味料之一,被誉为“八大调味品”之一,同时也是传统中药材,具有温中散寒、除湿止痛、杀虫等功效。在现代食品工业中,花椒不仅用于增香赋味、去腥除膻,其提取物还在食品保鲜、抗

氧化、抗菌防腐等方面展现出良好的应用潜力。

我国是世界第一花椒生产大国。据国家林业和草原局 2023 年引用中国经济林协会花椒分会数据,2014—2022 年全国花椒主产区产量从 28.9 万吨增长到 57.4 万吨,而目前国内年市场消费量在 42 万吨左右;全国花椒种植 2300 多万亩,共有 16 个产区获得“中国花椒之乡”称号。然而,花椒产业长期以烘烤、晾晒等初加工为主,精深加工程度低。根据《我国花椒市场与产业调查分析报告》,70% 以

上的加工企业是中小企业,存在设备差、档次低、产品少的情况,精深加工能力弱。加之产量已趋于饱和,产业正从卖方市场转向买方市场,亟须通过加工技术升级和产品多样化实现高质量发展。

本文聚焦食品加工应用方向,系统综述花椒的化学成分基础、功能成分提取分离技术及其在食品工业中的应用进展,并对存在问题与发展趋势进行分析,以期为花椒的精深加工与综合利用提供科学依据。

一、花椒的种类、产地分布与化学成分

(一) 种类与产地分布

花椒属植物分布广泛,据《中国植物志》记载,该属约 250 种,广布于亚洲、非洲、大洋洲、北美洲的热带和亚热带地区,中国有 39 种 14 变种,自辽东半岛至海南岛、自台湾地区至西藏东南部均有分布,我国是世界上花椒种植面积最大的国家。按果皮色泽,我国栽培花椒主要分为红花椒与青花椒两大类。红花椒以花椒(*Zanthoxylum bungeanum* Maxim.)为代表,主要品种有大红袍、二红袍、凤椒、伏椒、梅花椒等;青花椒包括竹叶花椒(藤椒, *Zanthoxylum armatum* DC.)和青花椒(狭义, *Zanthoxylum schinifolium* Sieb. et Zucc.)等,主要品种有九叶青、金阳青花椒、藤椒等。

在产地分布上,红花椒主要分布于秦岭—淮河以北地区,以甘肃(陇南武都大红袍)、陕西(韩城大红袍)、四川(汉源贡椒)、山东等地为主;青花椒则主要集中于西南地区的四川、重庆(江津九叶青)、云南、贵州等省市。据《我国花椒市场与产业调查分析报告》汇总的国内 25 个产区数据,花椒栽种面积共 1728.4 万亩,其中青花椒栽种面积为 1037.9 万亩,占 60.0%;其余产区以红花椒为主,栽种面积为 593.6 万亩,占 34.3%。红花椒主要提供麻味,青花椒尤其是藤椒香味清新、麻味柔和,近年来“藤椒味型”通过藤椒鱼、藤椒鸡、藤椒方便面等产品在全国快速流行。

(二) 主要化学成分

花椒的化学成分复杂,主要包括挥发油、麻味物质、生物碱、多酚黄酮、脂肪酸及香豆素等,其中挥发油与麻味物质是决定花椒“香”与“麻”两大风味属性的核心成分。

挥发油(精油):花椒挥发油主要由单萜、倍半萜及其含氧衍生物(醇、酯、醛、酮)构成。研究表

明,红花椒与青花椒挥发油的主体成分相似但含量差异显著。多项 GC-MS 研究显示,花椒精油的主要成分包括柠檬烯、芳樟醇、桉烯、月桂烯、 β -蒎烯、3-蒎烯、4-萜烯醇、 α -松油醇及乙酸芳樟酯等。例如,对采自遵义绥阳的两种花椒进行研究后发现,青花椒挥发油主要成分为 γ -松油烯、芳樟醇、4-萜烯醇等,红花椒主要成分为桉烯、月桂烯、柠檬烯、芳樟醇、4-萜烯醇等;青花椒和红花椒出油率分别为 1.83% 和 2.52%。芳樟醇和柠檬烯通常是花椒精油中含量最高的成分之一。

麻味物质:花椒的麻味来源于链状多不饱和脂肪酸酰胺类化合物,统称麻味物质,以山椒素(sanshool)为代表,目前已从花椒中分离鉴定出 50 余种酰胺类化合物。主要成分包括 α -、 β -、 γ -、 δ -山椒素及其羟基衍生物,其中羟基- α -山椒素(hydroxy- α -sanshool, 分子式 $C_{16}H_{25}NO_2$, CAS 号 83883-10-7, 分子量 263.38)是含量最高、麻味最强的活性成分。这些山椒素及其衍生物在结构上均具有一个酰胺基团头部(N 端)和一个链状多不饱和烷基尾部(C 端),C 链末端有 3 个共轭双键。麻味物质通过激活瞬时受体电位 TRPV1 和 TRPA1 离子通道或抑制两孔钾离子通道激发感觉神经元,产生特征性的辛麻刺痛感;羟基- α -山椒素为 TRPA1 的共价激动剂和 TRPV1 的非共价激动剂。麻味物质在光、热、氧条件下极易发生异构化和降解,稳定性差,是制约其加工应用的关键难题。

生物碱、多酚与黄酮:花椒中还含有异喹啉类、喹啉类生物碱及香豆素、木脂素等。多酚和黄酮类成分具有显著的抗氧化活性。研究测得花椒果皮总黄酮经超声辅助提取率可达 3.56%,纯化后对 DPPH 自由基的清除能力强于合成抗氧化剂 BHT。从花椒正丁醇部位还分离得到南烛木树脂酚、异落叶松脂素等木脂素类抗氧化成分。这些成分为花椒作为天然抗氧化剂的应用提供了物质基础。

二、花椒功能成分的提取与分离技术

(一) 挥发油(精油)的提取

花椒精油的提取方法主要有水蒸气蒸馏法、有机溶剂浸提法、超临界 CO_2 萃取法、亚临界流体萃取法及超声/微波辅助提取等。

水蒸气蒸馏法是最传统、应用最广的方法,设备简单、成本较低,能较好地保持花椒的浓郁香气,但加热温度较高,易造成低沸点和热敏性成分损

失,提取率较低,且难以提取麻味物质。有机溶剂浸提法可较完整提取呈味物质,香气均匀饱满,但存在溶剂残留、影响食品安全的问题。

超临界 CO₂ 萃取是一种绿色提取技术,具有提取率高、操作温度低、可防止热敏性物质破坏、无溶剂残留等优势。莫彬彬等人利用超临界 CO₂ 分步萃取花椒风味物质,在低压(12 MPa)条件下萃取物主要为呈香成分,高压(25 MPa)条件下呈麻味的多烯酰胺类物质含量较高,实现了香气与麻味成分的分步分离。刘雄等人对比发现超临界 CO₂ 萃取花椒油树脂的得率(12.63%)远高于多种有机溶剂法,且麻味强烈。该法缺点是设备昂贵、能耗较高、产能较小,限制了大规模工业推广。

亚临界流体萃取采用常温萃取、低温脱溶工艺,能有效防止热敏性物质分解,投资小、成本低、规模大、无“三废”污染,近年来受到推崇。研究表明,向亚临界丁烷中添加4%~6%的无水乙醇,可使花椒精油得率提高到11.96%~12.68%,麻味素提取率达91.96%~96.56%,实现了挥发油和麻味素的一步低温高效提取。

超声/微波辅助提取利用超声空化效应或微波加热效应加速细胞壁破裂和有效成分溶出,能缩短提取时间、提高效率,但通常作为辅助手段与其他方法联用。采用超声辅助水蒸气蒸馏法,在原料粒度50目、料液比1:15、超声温度50℃、超声时间60 min条件下,花椒精油得率可达2.61%,且对DPPH自由基和超氧阴离子自由基有良好清除效果(最高清除率分别为72.5%和80.6%)。曹雁平等人对超声辅助提取与超临界 CO₂ 萃取花椒油树脂的挥发性成分,发现两者香气类型相近但成分有差别,超临界 CO₂ 萃取物以芳樟醇(47.18%)为主。

值得关注的是,绿色溶剂技术正成为新热点。Zhu 等人(2025)的研究表明,采用低共熔溶剂(NADES,如氯化胆碱-乳酸)处理可使花椒精油得率由未处理的4.67%提高到6.42%,并使 α -松油醇相对含量提升到158%,从而显著增强其抗菌效能。

(二)麻味物质的提取与纯化

麻味物质的制备一般分为提取和分离纯化两步。常用提取溶剂有甲醇、乙醇、氯仿、石油醚、乙醚及植物油等,其中甲醇、乙醇最常用于粗提;超临界 CO₂ 萃取因溶解度高、可避免成分化学变化而成

为有效方法。分离纯化方法包括硅胶柱色谱、大孔树脂、制备/半制备型 HPLC、高速逆流色谱(HSCCC)等。研究表明,采用石油醚索氏提取结合甲醇浸提与逆流干柱层析,可使不饱和酰胺在麻味物质纯品中的相对含量达95.50%;采用超临界 CO₂ 萃取结合半制备型 HPLC,可得到纯度达98.2%的羟基- α -山椒素。此外,借助化学合成方法亦可制备特定结构的麻味物质,如羟基- α -山椒素可由相应的十二碳四烯酸和1-氨基-2-甲基-2-丙醇在缩合试剂作用下合成。

(三)多酚、黄酮等成分的提取

花椒多酚、黄酮的提取多采用乙醇浸提结合超声/微波辅助及大孔树脂纯化。如采用60%乙醇提取花椒总黄酮并用AB-8型大孔吸附树脂纯化,纯化样品的抗氧化能力显著提高。提取工艺的优化多采用单因素结合正交试验或响应面法,以提取率 and 功能活性为指标进行综合评价。

三、花椒在食品加工中的应用

(一)调味与香精香料应用

花椒最主要的应用是作为香辛调味料。在传统烹饪和食品工业中,花椒及其精油用于增香赋味、去腥除膻,广泛应用于川菜、火锅、卤制品、休闲食品等。花椒精油因香气浓郁、麻味纯正、使用方便,已作为食品添加剂(食用香精香料)使用。花椒中的芳樟醇、柠檬烯、桉叶油醇、月桂烯等是花椒油的关键香气物质,气味活度值(OAV)分析表明这些成分对整体香气贡献最大。值得注意的是,花椒精油挥发性强、气味刺鼻、脂溶性强,难以在水相中均匀分散,限制了其在部分食品体系中的直接应用,需借助乳化、微胶囊化等技术加以改善。

(二)花椒油、调味品及复合调味料加工

花椒油是将花椒与食用油混合,经加热、浸泡或油炸等工艺提取花椒呈香呈味物质制成的调味油,相对于花椒颗粒和原粉等粗加工产品,花椒油具有标准化程度高、溶解性好、有效成分利用率高等优点,是近年来花椒调味品中增速最快的产品,主要有红花椒油、青花椒油、藤椒油等味型。花椒油的制备工艺(油炸法、浸提法等)及花椒粉颗粒度对其挥发性香气成分有显著影响。目前已发布T/GAQHJ 2-2021《花椒油》团体标准、四川省食品安全地方标准DBS51/008-2019《花椒油》等,规范了花椒油的术语、技术要求与检验规则。

在复合调味料领域,花椒是火锅底料、川菜复合调味料的核心原料,被誉为“川菜之魂”。麻辣火锅底料以花椒和辣椒的应用为最鲜明特色。火锅底料、川味复合调味料等复合调味品市场快速增长,带动了花椒深加工产品的需求。然而,花椒调味品产业仍存在优势品种不足、加工链条延伸不够、产品同质化等问题。

(三) 花椒油树脂(oleoresin)与麻味提取物的开发

花椒油树脂是采用溶剂或超临界 CO₂ 萃取得到的、同时富含香气成分和麻味成分的稠膏状提取物,能同时体现花椒的“香”与“麻”,且成分浓缩、便于标准化添加,是花椒精深加工的重要方向。油树脂可用于复合调味料、方便食品调味包、肉制品等的赋味。针对麻味物质稳定性差的问题,微胶囊包埋技术被用于提高其稳定性——以多孔糊精、变性淀粉等为壁材包埋花椒提取物,可在氧气、pH、水分、温度等不良条件下保护花椒的麻度和香气,并在煮制过程中延缓香气与麻味物质的释放,适用于复合调味料。

(四) 食品保鲜、抗菌与活性包装应用

花椒精油及提取物具有广谱抗菌和抗氧化活性,是开发天然防腐剂、保鲜剂和活性包装的优良原料。花椒精油对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、枯草芽孢杆菌、蜡样芽孢杆菌等多种食品腐败菌和致病菌均有抑制作用,其抗菌机理主要是破坏细胞膜结构、增加膜通透性、引起胞内电解质外泄。Zhu 等人(2025)测得经氯化胆碱-柠檬酸 NADES 萃取的花椒精油对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌的最小抑菌浓度(MIC)分别为 1.41 mg/mL 和 2.81 mg/mL,显著优于山梨酸钾、苯甲酸钠等化学防腐剂,总体而言,金黄色葡萄球菌等革兰氏阳性菌较大肠杆菌等革兰氏阴性菌更为敏感。

天然防腐剂与纳米乳液:针对花椒精油脂溶性、难分散、气味刺鼻的缺陷,研究者采用纳米乳化技术改善其在食品体系中的应用性能。纳米乳液能增大接触面积、提高物理化学稳定性和生物利用度、实现控释,在肉制品等保鲜中可延长货架期并增强生物活性。研究表明花椒精油纳米乳液对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑制作用显著增强,且兼具抗氧化与降血脂活性,可作为食品保鲜的天然抗氧化剂或防腐剂。

活性包装膜:将花椒精油与多糖、蛋白质等生物高分子结合制备活性包装膜是近年研究热点。例如,将花椒精油皮克林乳液加入聚乙烯醇(PVA)膜用于冷鲜猪肉保鲜,可增强膜的疏水性、热稳定性、阻紫外性能和抗菌活性;以玉米淀粉为基质、藻类纳米纤维素稳定的花椒精油皮克林乳液制备的活性膜可用于樱桃番茄保鲜,兼具抗氧化和抗菌性能。Liu 等人(2023)将竹叶花椒(*Z. armatum*)精油负载于木薯淀粉/壳聚糖/魔芋胶复合膜(SCKZ),可使牛肉酱货架期较对照延长约 4~6 d(达到 12~14 d);Chen 等人(2024)以含 1% 花椒精油的壳聚糖/氧化魔芋葡甘聚糖复合膜处理猪肉,膜的拉伸强度提高 18.92%、水溶性和水蒸气透过率降低,并延长了猪肉的货架期;含花椒精油的抗真菌静电纺丝纳米纤维膜可用于草莓和甜樱桃保鲜;Shen 等人(2024)以马铃薯蛋白-壳聚糖纳米颗粒稳定花椒精油皮克林乳液制备涂膜,可有效抑制柑橘意大利青霉和指状青霉,延长柑橘贮藏期。这些研究表明花椒精油活性包装在畜禽肉、水产品 and 果蔬保鲜中具有广泛应用前景。

抗氧化应用:花椒提取物(精油、多酚、黄酮)可抑制肉制品中的脂质氧化和蛋白质氧化,延缓品质劣变。作为天然抗氧化剂,花椒及其提取物在肉制品加工中可部分替代化学合成抗氧化剂,兼具赋味与抗氧化双重功能,可改善中式香肠的色泽并抑制脂质氧化。

(五) 在肉制品、水产品等具体食品中的应用案例

在肉制品中,花椒、肉桂精油协同孜然精油对多种羊肉腐败菌、致病菌具有明显抑制作用,并可减缓抗氧化酶活性下降。花椒精油活性包装膜应用于冷鲜猪肉、牛肉等,可有效延长货架期、抑制微生物增殖和脂肪氧化。在水产品中,花椒渣(加工副产物)萃取物对副溶血弧菌、嗜水气单胞菌和希瓦氏菌均有抑制作用,可用于冷藏虾等水产品保鲜。这些案例表明花椒在高蛋白、高水分、易腐败的动物性食品保鲜中具有独特优势。

四、花椒加工副产物的综合利用

花椒加工过程中产生大量副产物,包括花椒籽、花椒叶、花椒渣等,长期以来多作为废料或肥料处理,造成资源浪费。近年来,副产物的高值化利用成为延伸花椒产业链的重要方向。

花椒籽油:花椒籽含油量丰富,据相关研究报

道,花椒籽含有27%~31%的油脂,尤其是 α -亚麻酸的含量较高(不同文献测得占油脂总量的17%~33.3%),是一种具有食用和保健价值的营养油。花椒籽油可通过压榨、溶剂浸出、亚临界流体萃取等方法提取,已发布GB/T 22479—2008《花椒籽油》国家标准。花椒籽油可作为食用调和油或功能性食品原料,从中分离纯化高纯度 α -亚麻酸具有重要的工业价值。陕西、重庆等地企业已建成花椒籽精深加工生产线,开发出花椒籽油、花椒肽等高附加值产品,可应用于食品、涂料、饲料及大健康产业。

花椒叶:花椒叶富含蛋白质、氨基酸、多酚和黄酮,醇提物中总多酚和类黄酮含量较高,具有良好的抗氧化活性,可开发花椒芽茶、凉拌菜、油炸食品等。

花椒渣:花椒精油或花椒油提取后的残渣(花椒渣)仍含有生物碱、酰胺等活性成分。研究表明花椒渣超临界CO₂萃取物具有广谱抑菌作用,对副溶血弧菌等的最小抑菌浓度(MIC)为3.125 mg/mL,且其抗氧化活性强于花椒萃取物、花椒麻素和花椒精油,在12.5 mg/mL时对ABTS⁺自由基清除率达100%,可实现花椒的高值化利用。此外,以花椒副产物功能化的大豆分离蛋白基活性膜也被用于樱桃番茄保鲜,体现了副产物在活性包装中的应用价值。

五、存在的问题与发展趋势

(一)存在的主要问题

1. 精深加工程度低、产品同质化。当前花椒加工仍以干花椒、花椒粉等初加工产品为主,精深加工产品种类少、技术含量低。据相关产业报告,在青花椒产品中,干花椒、保鲜花椒、花椒调味品和花椒精深加工品占比分别为78%、12%、7%、3%,精深加工产品占比极低;产品同质化严重,缺乏高附加值新品类。

2. 功能成分稳定性差。花椒精油挥发性强、易氧化,麻味物质(山椒素类)在光、热、氧条件下极易异构化和降解,导致风味流失和活性下降,给储存和加工带来挑战。

3. 标准化程度不足。花椒品质评价(尤其是麻味)尚缺乏统一的、适用于工业生产的标准方法;不同产区、品种、提取工艺导致产品成分差异大、批次稳定性差,制约了产品质量控制和市场流通。

4. 成分分散性与感官限制。花椒精油脂溶性

强、难以在水相中均匀分散,且气味刺鼻,限制了其在多种食品体系中的应用范围。

(二)发展趋势与展望

1. 绿色高效提取技术。发展超临界CO₂萃取、亚临界流体萃取、低共熔溶剂(NADES)辅助提取等绿色技术,提高功能成分得率和品质。如前所述,适当的NADES处理可提高花椒精油得率并增强其抗菌效能,代表了绿色提取的发展方向。

2. 功能成分的稳态化与递送。通过微胶囊化、纳米乳液、皮克林乳液、环糊精包合等技术提高花椒精油和麻味物质的稳定性,实现控释,扩大其在水基食品体系中的应用。利用多酚等提升山椒素稳定性也成为研究方向。

3. 天然防腐保鲜与活性包装。顺应“清洁标签”和减少化学防腐剂的消费趋势,深入开发花椒基天然防腐剂、保鲜剂和可降解活性包装膜,应用于肉制品、水产品 and 果蔬保鲜。

4. 副产物循环利用与产业链延伸。加强花椒籽、花椒叶、花椒渣等副产物的综合利用,开发花椒籽油、 α -亚麻酸、花椒肽、天然抗氧化剂等高值化产品,推动产业向精深加工和高附加值方向转型。

5. 标准体系建设。建立花椒麻味、香气等品质评价的标准方法和产品标准,推进种质资源研究和优良品种选育,加强产学研协作,提升花椒产业的标准化、品牌化和工业化水平。

六、结论

花椒作为我国特色药食同源香辛料,其挥发油、麻味物质、多酚黄酮等功能成分赋予其独特的风味和多样的生物活性。在食品加工领域,花椒已从单一的调味用途拓展到精油香精、油树脂、复合调味料、天然防腐保鲜剂、活性包装及副产物高值化利用等多个方向,展现出广阔的应用前景。然而,花椒产业仍面临精深加工程度低、功能成分稳定性差、标准化不足等问题。未来应以绿色提取、稳态化递送、副产物循环利用和标准体系建设为重点,推动花椒资源的高效利用与产业升级,提高产品附加值,为乡村振兴和食品工业发展提供支撑。

参考文献:

- [1] 吕春梅, 史文娟, 雷军, 等. 花椒品质评价研究进展[J]. 分析测试技术与仪器, 2024, 30(5): 295-309.
- [2] Jie Y., Li S., Ho C. T. Chemical Composition, Sensory Properties and Application of Sichuan Pepper

(*Zanthoxylum* genus)[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2019, 8(2): 115-125.

[3]徐丹萍,蒲彪,叶萌,等. 花椒中麻味物质的呈味机理及制备方法研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(13): 304-309.

[4]阚建全,陈科伟,任廷远,等. 花椒麻味物质的生理作用研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2018, 36(1): 11-17.

[5]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.

[6]莫彬彬,连宾,万固存,等. 超临界 CO₂ 分步萃取花椒香气和麻味物质的初步研究[J]. 食品科学, 2009, 30(8): 201-203.

[7]曹雁平,张东. 超声辅助提取和超临界 CO₂ 萃取花椒树脂的挥发性成分对比分析[J]. 食品科学, 2010, 31(16): 165-167.

[8]武佳,刘小琳,滕飞,等. 超临界 CO₂ 萃取工艺优化及不同提取方法对花椒油树脂品质的影响分析[J]. 食品工业科技, 2026, 47(11): 1-12.

[9]马铃,郭川川,张峰轶,等. 花椒精油亚临界流体萃取工艺优化及 GC-MS 分析[J]. 中国酿造, 2022, 41(10): 201-206.

[10]张莹丽,柳亚文,杨红应,等. 超声辅助提取花椒精油及抗氧化活性分析[J]. 中国调味品, 2024, 49(2): 186-191.

[11]祝晓云,张开艳,余家奇,等. GC-MS 法分析两种花椒挥发油的成分[J]. 亚太传统医药, 2022, 18(9): 68-73.

[12]杨静,赵镭,史波林,等. 青花椒香气快速气相电子鼻响应特征及 GC-MS 物质基础分析[J]. 食品科学, 2015, 36(22): 69-74.

[13]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.

[14]高亚妮,田呈瑞,康宇新,等. 超声波提取花椒皮总黄酮工艺及其抗氧化性研究[J]. 食品科学, 2012, 33(18): 77-82.

[15]张宇思,龚祝南,石雪萍. 花椒黄酮抗氧化作用研究[J]. 食品科学, 2011, 32(15): 70-73.

[16]孙晨倩,王征奇,姚梅,等. 花椒叶的化学组成、叶提取物体外抗氧化活性及其对黑腹果蝇抗氧化酶活性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2015, 24(4): 38-44.

[17]赵慧娟,许腾腾,赵楠,等. 花椒渣超临界 CO₂ 萃取物成分及其活性分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(24): 256-262.

[18]李嘉欣,赵前程,宋关梁,等. 植物精油在抗菌活性包装中的应用及其迁移特性研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(24): 408-415.

[19]王梦如,乔海颜,柯梦雨,等. 植物源精油的抑菌机制及其在食品保鲜包装中的应用进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(7): 439-444.

[20]乔省,张帅兵,王艳艳,等. 植物精油提取技术、生物

活性及其在食品贮藏保鲜中的应用进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2024, 45(5): 121-130.

[21]Liu J., Wang Y., Hou X., et al. Starch-based Film Functionalized with *Zanthoxylum armatum* Essential Oil Improved the Shelf Life of Beef Sauce[J]. *LWT*, 2023, 183.

[22]Chen Z., Tian W., Qin X., et al. Chitosan/Oxidized Konjac Glucomannan Films Incorporated with *Zanthoxylum bungeanum* Essential Oil: A Novel Approach for Extending the Shelf Life of Meat[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 262(1).

[23]Shen G., Qiu X., Hou X., et al. Development of *Zanthoxylum bungeanum* Essential Oil Pickering Emulsions Using Potato Protein-chitosan Nanoparticles and Its Application in Mandarin Preservation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 277(1).

[24]Zhu Y., Zhang C., Liu J., et al. Proper NADES Treatment Improved *Zanthoxylum bungeanum* Essential Oil Yield and Boosted α -terpineol Antibacterial Efficacy[J]. *NPJ Science of Food*, 2025, 9(1).

[25]Zhang H., Zhang C., Wang X., et al. Antifungal Electrospinning Nanofiber Film Incorporated with *Zanthoxylum bungeanum* Essential Oil for Strawberry and Sweet Cherry Preservation[J]. *LWT*, 2022, 169.

[26]Yu M., Hou Y., Zheng L., et al. Soy Protein Isolate-based Active Films Functionalized with *Zanthoxylum bungeanum* By-products: Effects on Barrier, Mechanical, Antioxidant and Cherry Tomato Preservation Performance[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253(7).

[27]李焰梅,郝丹,蒋献. 山椒素药理学研究进展[J]. 中国药理学通报, 2019, 35(2): 172-175.

[28]王瑜,苏家奎,杨仕春,等. 我国花椒市场与产业调查分析报告[J]. 农产品市场, 2021(14): 47-49.

[29]刘晓霞,蔡宁晨,苏平. 花椒籽油 α -亚麻酸提取技术的研究进展[J]. 食品工业科技, 2014, 35(8): 383-386.

[30]全国粮油标准化技术委员会(SAC/TC 270). 花椒籽油: GB/T 22479-2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.

[31]王珊珊,吴昊,李梁. 花椒挥发油的提取及其抑菌杀虫活性测定[J]. 生物技术通报, 2017, 33(11): 101-105.

[32]陈丽兰,杨心怡,乔明锋,等. 基于 GC-IMS、GC-MS 和 OAV 法分析花椒粉颗粒度对花椒油挥发性香气成分的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(8): 301-310.

[33]张志淳,何筱毅,何成军,等. 基于 GC-MS 技术分析盐源与汉源花椒籽挥发油化学成分[J]. 中国农业科学, 2025, 58(23): 5057-5070.

[34]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.

Research Progress on the Processing and Utilization of Sichuan Pepper (*Zanthoxylum*)

ZHUO Shi-hong¹, LIU Wan-ting², HAN Hong-bo², LIU Shan²

(1. Shenma Zhongfu Food Technology (Sichuan) Co., Ltd., Panzihua Sichuan 617000;

2. School of Biological and Chemical Engineering (School of Agriculture), Panzihua University, Panzihua Sichuan 617000, China)

Abstract: Sichuan pepper (*Zanthoxylum* spp.), the dried ripe pericarp of plants of the genus *Zanthoxylum* (family *Rutaceae*), is a traditional Chinese medicine–food homologous spice and is regarded as one of the “eight major condiments”. From the perspective of food science and food–processing applications, this paper systematically reviews the species, geographical distribution, and major chemical constituents of Sichuan pepper, with emphasis on the extraction and separation technologies of its functional components—essential oil, pungent compounds (unsaturated fatty acid amides, represented by hydroxy- α -sanshool), alkaloids, and polyphenols and flavonoids—including advances in steam distillation, supercritical CO₂ extraction, subcritical fluid extraction, and ultrasound/microwave–assisted extraction. The paper focuses on the application of the essential oil in flavoring and fragrance, the development of oleoresin and pungent extracts, the use of Sichuan pepper in food preservation, antioxidation, and antibacterial preservation (natural preservatives, active packaging films, and nanoemulsions), the processing of condiments such as pepper oil, pepper powder, compound seasonings, and hot–pot bases, and the high–value utilization of by–products such as Sichuan pepper seed oil (rich in α -linolenic acid). Finally, key problems of the current industry—low degree of intensive processing, poor stability of functional components, insufficient standardization, and product homogenization—are analyzed, and development trends including green extraction, stabilized delivery, by–product recycling, and standard–system construction are discussed, so as to provide a reference for the efficient utilization of Sichuan pepper resources and industrial upgrading.

Key words: Sichuan pepper; essential oil; pungent compounds (sanshools); food processing; natural preservative; comprehensive utilization