

卓凯丽, 董丽, 李道通, 等. 我国青花椒保鲜及加工技术研究现状 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(13): 413–420. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070143

ZHUO Kaili, DONG Li, LI Daotong, et al. Research Status of Preservation and Processing Technology of *Zanthoxylum schinifolium* in China[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(13): 413–420. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070143

· 专题综述 ·

我国青花椒保鲜及加工技术研究现状

卓凯丽, 董丽, 李道通, 陈芳*

(中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

摘要: 青花椒是我国传统的药食两用植物资源, 不仅能赋予食品特殊的香气和麻味, 也具有抑菌、消炎、镇痛等生物活性。目前, 青花椒市场以保鲜青花椒和干制青花椒等初级加工品为主, 加工深度低、产品种类少, 难以满足市场多元化需求。为深度开发利用青花椒资源, 本文综述了青花椒保鲜、干制及深加工技术的研究现状, 对比分析了不同技术的优缺点, 以期为提高青花椒现有产品品质、促进青花椒精深加工明确方向。

关键词: 青花椒, 保鲜技术, 干制技术, 提取技术

中图分类号: TS202.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)13-0413-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070143

本文网刊:



Research Status of Preservation and Processing Technology of *Zanthoxylum schinifolium* in China

ZHUO Kaili, DONG Li, LI Daotong, CHEN Fang*

(College of Food Science & Nutritional Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

Abstract: *Zanthoxylum schinifolium* (*Z. schinifolium*) is a traditional Chinese medicinal and edible plant resource that not only imparts special fragrance and numbness to food, but also has antibacterial, anti-inflammatory, and analgesic biological activities. Currently, the *Z. schinifolium* market mainly consists of fresh *Z. schinifolium* and dried *Z. schinifolium* and other primary processed products, with low processing depth and few product varieties, which are difficult to meet the diversified market needs. In order to deeply develop and utilize the Sichuan pepper resources, this article reviews the current research status of *Z. schinifolium* preservation, drying, and deep processing technologies, compares and analyzes the advantages and disadvantages of different technologies, in order to provide direction for improving the quality of existing *Z. schinifolium* products and promoting the development of *Z. schinifolium* deep processing.

Key words: *Zanthoxylum schinifolium* (*Z. schinifolium*); preservation technology; drying technology; extraction technology

花椒 (*Zanthoxylum bungeanum*) 为芸香科 (Rutaceae) 花椒 (*Zanthoxylum*) 属植物, 在我国栽培历史悠久, 广泛用做菜品香辛料。根据果皮颜色, 可将花椒分为两大类: 红花椒和青花椒^[1]。其中, 青花椒因特殊的清香麻郁风味, 近年来深受消费者喜爱。青花椒主产于我国西南地区, 主要集中在四川、重庆、贵州、云南^[2] 等地, 栽种面积约为 69.2 万 hm²^[3], 主要品种有藤椒、九叶青花椒、金阳青花椒等, 主要成分是挥发油、酰胺类物质、生物碱、类黄酮、香豆

素、甾醇、木质素和脂肪酸^[4]。目前, 青花椒产品市场以初级加工品为主, 如鲜青花椒、干制青花椒, 约占 90%, 精深加工品如青花椒精油约为 3%^[5]。因此, 亟待加大青花椒加工技术研究开发力度, 发挥我国青花椒资源优势, 提升我国青花椒产品的国际竞争力。本文综述了我国青花椒的保鲜技术、干制技术、青花椒精油和青花椒籽蛋白的提取技术, 分析比较了不同技术方法的优缺点及应用, 以期开发青花椒产品提供技术参考。

收稿日期: 2024-07-15

基金项目: 十四五国家重点研发项目 (2023YFF1104002)。

作者简介: 卓凯丽 (2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: zhuoklh@cau.edu.cn。

* 通信作者: 陈芳 (1972-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品安全控制与干预技术, E-mail: chenfangch@sina.com。

1 青花椒保鲜技术

鲜青花椒采摘初期水分含量高、酶活性强,放置在空气中极易氧化褐变^[6]、退绿、营养成分及活性物质迅速消耗,导致组织软烂甚至腐败^[7]。因此,鲜青花椒保鲜贮藏技术的研究对提高鲜青花椒感官品质、食用品质、延长供应时间等具有重要意义。目前,常用的保鲜技术有高温瞬时处理、低温保鲜、气调冷藏、涂膜及联合保鲜等(表 1)。

1.1 高温瞬时处理

高温瞬时处理是将新鲜青花椒在温度较高的热水、沸水或蒸汽中进行短时处理,以钝化氧化酶活力,有效防止青花椒在贮藏过程中发生褐变,同时也有利于杀灭青花椒表面部分虫卵和微生物,减少原料初始菌数。曾剑超等^[8]研究指出,弱碱性条件下进行热水烫漂处理可有效降低青花椒初期的褐变程度,一般情况下,可在室温下放置 8~9 d 不褐变。然而热水处理作用时间较长,容易破坏青花椒表面的油胞,促使麻味等挥发性物质逸出,高温蒸汽处理可以在较短时间内达到杀青效果,且能有效降低物质损失。姚佳^[9]发现,高温蒸汽瞬时处理对过氧化物酶(POD)有较强的灭活效果,且在处理过程中,当蒸汽压力、载料量和处理时间合适时,挥发油等物质含量稳定,未出现显著下降。但是,无论是热水烫漂还是蒸汽处理,都需要大量的水资源,任康^[10]创新性地用加热植物油作为高温瞬时处理介质,当油温达到 200 ℃ 左右时,可以实现快速灭酶,不但起到对青花椒的保鲜作用,还减少了麻味物质被水分带走的比例,大大提高了青花椒的利用率,节约水资源。综上,高温瞬时处理可以有效降低青花椒中的 POD 酶活性,减缓褐变,尤其是高温油瞬时处理,在护色的同时也能较好地保持青花椒有益物质。

1.2 低温贮藏保鲜

低温可以延缓青花椒采后的生命活动、抑制微生物生长,是一种最简单易行的保鲜技术。蔡思进等^[11]将青花椒进行分别置于 4、25 ℃ 下贮藏,研究青花椒品质,结果表明,4 ℃ 贮藏时,青花椒腐烂率、褐变度均较 25 ℃ 低,叶绿素、挥发油和麻味物质含量较 25 ℃ 高,即 4 ℃ 下有较好的保鲜效果。同样地,吕明珠^[12]研究也发现 4 ℃ 贮藏条件青花椒褐变程度低于室温贮藏,且含水量和总酚含量更高,果实中的多酚氧化酶、过氧化物歧化酶及超氧化物歧化酶活性均显著低于室温贮藏,利于降低酶褐变程度。综上,低温保鲜通过抑制酶活和生化反应速率,可以保持青花椒的正常生理状态及采后初期的新鲜度^[13],但随着贮存时间延长,氧化反应、酶褐变反应的破坏效果不断积累,最终使鲜青花椒腐烂坏变。因此,单一的温度措施难以全面保证鲜青花椒的感官及食用品质,与其他保鲜技术联合使用是行之有效的方法。

1.3 气调冷藏

气调贮藏是通过调节密闭贮藏环境中 O₂、CO₂、

N₂ 浓度^[14],调节青花椒采后生命活动并结合低温保藏的一种保鲜技术。气调贮藏法中 O₂、CO₂ 的比例对贮藏效果有重要影响,O₂ 浓度过高则青花椒代谢旺盛、酶活高,CO₂ 浓度过高则进行无氧呼吸,产生乙醛、乙醇及乳酸等物质^[9],易使青花椒组织软烂、产生异味,因此控制有氧呼吸和无氧呼吸的强度是气调保鲜的关键。蒋云华^[15]研究韩城大红袍花椒小环境气调时发现,在 4 ℃、气调比例为 5% O₂、8% CO₂、87% N₂ 条件下贮藏的花椒,感官评分最高、褐变度及失重率最低,货架期可延长至 34 d。李一卓^[16]对气调保鲜中气体比例和青花椒的呼吸作用进行研究,发现高氧气调初期能有效抑制微生物生长,但随着青花椒的呼吸作用,使得密闭环境中气体成分比例改变会加快微生物增长速率,而适当降低 O₂ 浓度、增加 CO₂ 浓度,能够长时间抑制青花椒呼吸作用且不产生无氧呼吸,可加强对微生物的抵抗能力,因此对气调过程中气体比例变化的监测对于保持青花椒的新鲜状态十分重要。综上,气调保鲜技术对于调节采后青花椒的呼吸作用、减少鲜青花椒在贮藏过程中微生物的污染、减缓褐变及椒果品质劣变速率具有重要作用。

1.4 涂膜及联合保鲜技术

涂膜保鲜^[17]以生物大分子如多糖、蛋白、脂质等为原料配制成涂膜液,喷涂于物料表面,干燥后在样品表面形成薄膜层,这层薄膜可以封闭果蔬表面气孔,形成微小的密闭环境,减缓青花椒采后的后熟作用及外界微生物的侵染,保持果实新鲜度^[18]。多糖可以增加薄膜涂层的机械性能,防止组织脱水、氧化,保持涂层的持久性,结合杀菌前处理、气调冷藏,可以进一步控制微生物生长,抑制果蔬腐烂,达到保鲜、护色作用。姚佳^[9]利用壳聚糖涂膜结合低温贮藏技术,对青花椒进行保鲜,结果发现涂膜浓度对青花椒果实呼吸作用有重要影响,浓度过厚易导致薄膜不均,促进果实无氧呼吸,导致组织腐烂,涂膜过薄营养物质损耗快,薄膜易破裂,最终确定壳聚糖的涂膜浓度为 1.0%、温度为 4 ℃ 时,能够均匀涂膜且起到微气调环境的作用,青花椒呼吸作用适中,多酚氧化酶活性显著下降,减轻青花椒褐变和膜脂过氧化程度,综合贮藏期间青花椒呼吸强度、叶绿素含量、挥发油含量、酶活等多个评价指标,发现该方法可将鲜青花椒保质期延长至 60 d 左右。此外,李一卓^[16]使用杀菌-涂膜-气调联用技术研究对青花椒的保鲜效果,结果发现用臭氧杀菌处理 30 min,结合 1% 壳聚糖涂膜预处理,并以 5% O₂、15% CO₂、80% N₂ 的气体比例气调包装鲜青花椒,果实色泽变化延缓、腐烂率和失重率显著降低且可达到约两个月的保存期。综上,涂膜保鲜利用涂膜材料的成膜性能,形成屏障,结合杀菌处理、低温贮藏,可有效减少微生物侵染及水分子的逸出,保持青花椒的新鲜度。因此,涂膜保鲜及与其他技术联用是一种较有潜力的青花椒保鲜措施。

表 1 青花椒保鲜技术
Table 1 *Z. schinifolium* preservation techniques

保鲜方法	保鲜原理	优点	缺点	参考文献
高温瞬时处理	杀死部分病原菌、灭酶	耗时短、效果好	过热可能导致油胞破裂, 麻味物质散失	[8-10]
低温保鲜	抑制酶活、降低化学反应速率	工艺简单、青花椒腐烂率及褐变度低	酶反应、褐变等仍能缓慢进行	[11-12]
气调保鲜	控制气体环境, 控制呼吸速率	青花椒色泽好, 营养成分损失少	气调技术成本高	[15-16]
涂膜保鲜	控制果蔬表面微环境, 防止微生物侵染	青花椒新鲜度好, 不易氧化、褐变	涂膜工艺繁琐, 涂膜液浓度不好控制	[17-18]
联合保鲜	同时控制温度、气体环境、椒果呼吸速率、抑制褐变酶活	多种技术联用保鲜作用全面	技术措施多, 硬件设备要求高, 使用成本高	[9,16]

2 青花椒加工技术

2.1 青花椒干制

成熟的鲜青花椒为青绿色、香气浓郁、含水量高, 约为 66%~70%^[13]。目前虽有较多的保鲜技术应用于青花椒中, 但就其保存期限难以实现青花椒的全年供应, 且鲜花椒在长途运输过程中易因呼吸产热、酶活增强、微生物污染、机械挤压等, 导致鲜果油胞破裂、果皮褐变、风味劣化。干制技术可降低鲜青花椒的水分含量, 抑制酶促褐变、微生物生长等不良化学反应, 同时能降低运输成本, 增加经济效益。因此, 干制技术是青花椒加工的重要技术之一。目前, 青花椒的人工干制方法有热风干燥、微波干燥、真空干燥、热泵干燥等。

2.1.1 热风干燥 热风干燥操作简便, 运用广泛。青花椒置于含热空气的干燥室内, 并使花椒周围的冷湿空气与热干空气循环, 促进湿热交换, 以达到干燥的目的^[19]。温度是热风干燥的重要条件, 杨森等^[20]研究不同热风温度对青花椒的色泽、黄酮、多酚、酰胺、挥发油含量的影响, 发现温度高于 45 ℃ 时不利于有效成分的保留。此外, 热风干燥时所采用的风速也对于干制品质量有重要影响, Chen 等^[21]研究了热风风速对青花椒果皮颜色、叶绿素酶活及叶绿素含量的影响, 结果发现干燥速率低时, 酶易促进叶绿素分解, 导致青花椒果皮褐变, 而升高干燥速率可降低酶活, 维持青花椒鲜绿色泽。由于高温瞬时处理有较好的护色效果, 杨兵等^[22]在热风干制前进行汽蒸灭酶处理, 由于过氧化物酶、多酚氧化酶等在初期被灭活, 得到的干制青花椒色泽仍为青绿色, 但汽蒸时间过长会导致挥发油含量、麻味物质含量相对降低, 因此, 汽蒸灭酶处理与热风干燥联用时, 应尽可能提高蒸汽温度, 缩短汽蒸时间, 以在短小时内达到灭酶护绿效果。综上, 热风干燥设备简单、操作简便, 是青花椒干制最常用的方法, 但适宜的热风温度、热风速度、单位面积内铺料量仍需要进行大量实验验证, 热风温度高、风速大, 青花椒干燥速度快, 但表面易过热造成青花椒果皮结成硬壳, 发生龟裂, 甚至导致青花椒油胞破裂, 风味散失、发生褐变; 热风温度低、风速慢则干燥时间长, 能耗增加, 热积累增多, 不利于青花椒色泽和风味的保持。

2.1.2 微波干燥 微波干燥利用青花椒中的水分吸

收微波能量, 引起分子振动和摩擦并产生热量, 使物料温度升高、水分蒸发, 从而实现鲜青花椒的干制。微波干燥大大减少了常规加热中热传导的时间, 因此, 与热风干燥相比, 微波干燥具有加热均匀、干燥速率快、排气少、环境友好的优点。然而, 由于微波加热过程中物料上升过快, 会导致很多营养物质和热敏成分损失, 且随着物料内部水分减少, 水分分布不均, 使得物料发生局部焦化、变色等不良反应^[23]。如祝瑞雪等^[24]发现, 在干燥温度和铺料密度一定的条件下, 微波功率越高, 干燥所用时间越少, 但当微波功率超过 1000 W 时, 花椒出现油胞开裂, 而 700~900 W 较为适宜。彭林等^[25]分析了微波干燥功率、加热时间、铺放量对麻味物质的影响, 结果发现在一定时间范围内, 青花椒的麻味物质含量随微波功率升高出现先升后降的趋势。因为干燥初期微波功率升高, 大大缩短干燥时间, 青花椒的麻味物质及挥发油未被破坏, 而随着时间延长, 微波功率上升到一定程度后, 干燥室内热量积累增多, 导致麻味物质和挥发油大量损失。同时, 该研究人员也探究了微波功率、间歇微波时间和花椒铺放量对挥发油含量的影响^[26], 发现当间歇微波时间、铺放量一定时, 挥发油含量也呈现随微波功率升高而先升后降的规律, 表明微波条件对挥发油含量的影响也较大。因此, 在使用微波干燥时, 干燥功率、干燥温度、时间、物料铺放密度等是重要控制参数。

2.1.3 真空干燥 真空干燥是将物料放在密闭的干燥室内, 利用真空系统不断把气体抽出形成负压环境, 同时对物料进行适当加热, 直到物料达到一定含水量的一种干燥方法^[27]。黎斌等^[28]研究了不同真空度、干燥温度、青花椒形态对最终干燥品质的影响, 结果发现真空度和干燥温度与干燥时间均成正相关, 青花椒色泽受温度影响大, 破壳率与干燥温度和真空度呈正相关。同时, 孟国栋等^[29]也研究了真空度、温度及装载量对花椒干燥品质的影响, 结果发现温度越低、真空度越高, 花椒色差越小, 但低温下花椒开口率较小, 而罗传伟^[30]在研究真空干燥中指出, 进一步提高真空度可减小花椒颜色变化、增大开口率。在负压条件下, 水沸点降低, 物料吸收较少热量水分即可蒸发逸出, 因此真空干燥方式有利于青花椒色泽饱和度和风味的保持, 营养物质损失减少, 但真空干燥

的动力消耗和设备投资高^[31],经济效益下降。

近年来,真空脉动干燥技术也逐渐被应用,真空脉动干燥是使物料处于真空与常压脉动循环的环境中^[32],压力的周期性变化不仅会不断破坏物料表面的蒸汽压平衡,而且使物料内部的微观孔道被不断挤压与扩张^[33],显著提高水分迁移速率,从而提高干燥效率。代建武等^[34]研究真空及常压保持时间对花椒品质的影响,结果发现在真空保持时间与常压保持时间相同时,青花椒品质(干燥速率、挥发油、酰胺含量、色泽、开口率)综合评分值最高。与连续真空干燥相比,在真空脉动过程中,物料大部分时间处于低氧真空环境,也可减少青花椒的褐变及风味成分流失,且能耗降低^[35],干燥效率提高。

2.1.4 热泵干燥 热泵干燥与热风干燥都属于对流干燥,以热空气为干燥介质,不同的是,热泵干燥根据逆卡诺原理,从周围环境中吸收热量并加热除湿,再传递给被加热物料青花椒。热泵干燥可实现低温空气封闭循环,物料干燥质量好,且加热空气的热量主要来自回收干燥室排出的温湿空气中的显热和潜热,高效节能,设备面积大,适合大规模企业生产加工。王子轩等^[36]使用热泵对青花椒干燥,发现恒温条件下,风速越大、铺放厚度越薄,温度越高则光合色素含量变化越快,色差变化越大。同样地,谭均^[37]以热泵干燥温度、铺放厚度、气体流速为因子研究其对青花椒色泽、水分扩散速率的影响,结果发现烘干温度和铺放厚度是影响花椒色泽的主要因素,烘干温度和气体流速是影响青花椒干制过程中水分扩散速率的主要因素。然而,杨兵等^[38]研究表明,不仅热泵干燥的温度、铺放量对干制青花椒麻味物质和挥发油含量等品质影响很大,相对湿度也是重要因素,且当相对湿度为40%时青花椒品质较优。因此,使用热泵干燥时,除设置温度、热风速度、铺料量外,干燥室内的相对湿度也要重点控制。

2.1.5 联合干燥技术 色泽、风味、椒果质地等是干青花椒的重要品质,由于青花椒成分复杂,单一的干燥技术难以保证干青花椒产品质量,将不同干燥技术联合使用^[39],可扬长避短。万学宁^[40]研究表明,在热风-微波串联干燥中,先进行热风干燥,再进行微波辅助,有助于干燥快速完成,保持青花椒的优良品质,且干燥能耗明显降低。Liu等^[41]先对青花椒进行射频热处理,再联合热风干燥,结果发现射频处理不仅能起到杀菌效果、减少干燥过程中挥发性成分的损失,对青花椒中多酚和类黄酮含量的保留也有较好效果。因此,联合干燥技术能较全面地保持青花椒质量,但不同的干制技术在干制速度、能耗、干花椒最终品质方面各有差异,因此联合干制技术的干制条件需要进一步优化,以实现低能耗、高品质的青花椒干制方法。

2.2 青花椒精油的提取

青花椒精油又称为挥发油,是从青花椒皮中提

取的一类具有芳香气味、易挥发的油类物质^[42]。青花椒精油的主要成分为烯烃、醇类、酯类、醛类物质^[43],具有抗菌消炎^[44-45]、抗氧化、杀虫^[46]等生物活性,在食品、医药、农药及日化领域具有广泛运用的潜力。青花椒精油的提取技术主要有水蒸气蒸馏法、超临界CO₂萃取法等。

水蒸气蒸馏法利用道尔顿分压原理,使挥发性成分随高温水蒸气流出,并通过冷凝回流收集。谢士娟^[47]选用5种青花椒,以料液比1:10进行加热蒸馏,结果金阳、仁寿、洪雅、江津、昭通青花椒精油的得率分别为11.7%、8.2%、9.3%、10.0%、7.8%,不同产地青花椒精油含量有差异,但主要成分类似,含有芳樟醇、桉烯、柠檬烯、月桂烯等。同时,王友峰等^[48]将黔地青花椒以料液比1:6浸泡36 min、蒸馏146 min,收集精油;通过SPME-GC-MS分析发现,烯烃类、醇类、酮类占精油总量的99.51%,其中相对较高的成分有 β -芳樟醇(91.10%)、D-柠檬烯(3.12%)、 β -月桂烯(1.13%)、4-萜品醇(1.04%);水蒸气蒸馏法设备简单、操作简便,无溶剂残留,提取得到的精油安全性高,适合用于萃取具有挥发性、在高温蒸汽中稳定性好、不溶解的植物组分,而青花椒精油稳定性差,随提取时间的延长,活性物质在高温蒸汽中易降解损失,因此,水蒸气蒸馏法提取青花椒精油的工艺需要进一步优化,可增加预处理技术或与其他提取技术相结合,以缩短提取时间。

超临界CO₂萃取法是利用在一定压力和温度下,超临界CO₂对某些天然物质具有特殊溶解作用,且萃取速度快、效率高,能在较低温度和CO₂环境下进行萃取,可以最大程度保留植物体内的活性成分,是萃取植物天然成分的有效办法^[49]。刘琳琪等^[50]以超临界CO₂萃取法得到花椒精油的萃取率为12.7%,是相同条件下水蒸气蒸馏法得率的2.27倍;GC-MS检测分析发现其主要成分为花椒素(32.99%)、芳樟醇(4.68%)、桉叶油醇(3.92%)、 α -松油醇(4.55%)、4-萜烯醇(2.95%)、乙酸松油酯(5.19%)、薄荷酮(5.40%)、茴香脑(2.91%)等。李潮俊^[51]利用超临界CO₂萃取法萃取青花椒精油的平均萃取率为14.25%;GC-MS检测分析发现其主要成分为芳樟醇(51.9%)、 β -水芹烯(10.41%)、D-柠檬烯(6.62%)、 β -月桂烯(1.67%)。对比水蒸气蒸馏法得到的青花椒精油抗氧化能力较好,其中 γ -萜品烯和 α -松油烯是主要的抗氧化物质。与水蒸气蒸馏法相比,超临界CO₂萃取法对组分选择性强,萃取效果好,能提高萃取效率、缩短提取时间,减少热敏成分损失^[52],但由于设备昂贵,一般用于生产青花椒精油高附加值产品。

2.3 青花椒籽蛋白的提取

青花椒除了含有挥发油及多种生物活性物质外,其籽中含有较多的蛋白质,含量约15%,且氨基酸组成齐全,必需氨基酸含量相对较高^[53],是一种新

表 2 青花椒加工技术
Table 2 *Z. schinifolium* processing techniques

加工类型	具体技术	技术原理	优点	缺点	参考文献
干制	热风干燥	干燥热空气与湿冷空气进行热交换	设备简单、操作简便	干燥时间长, 温度不易控制, 香气物质易挥发	[20–22]
	微波干燥	干燥温度 58 ℃、微波能量升高物料温度, 促进青花椒内水分蒸发	干燥速率高, 对香气影响小	物料后期水分不均, 干燥品质不稳定	[24–26]
	真空干燥	真空条件下水沸点降低, 促进水分逸出	不易损失热敏性物质	设备投资高、电能等能源消耗大	[28–30]
	热泵干燥	热干空气与青花椒周围冷空气的对流干燥	可在低温下实现干燥, 青花椒整体品质高; 可规模生产	设备占地面积大, 一般只用于企业	[36–38]
	联合干燥	多种技术联用	干制青花椒在色泽、风味、质地方面品质均较好	不同技术的工艺条件需要具体优化以适合联用; 生产成本高	[43–44]
精油提取	水蒸气蒸馏	挥发油随水蒸气逸出, 并通过冷凝回流收集	设备简单、操作简便, 无溶剂残留, 提取得到的精油安全性高	提取时间长, 易造成青花椒精油的降解	[47–48]
	超临界 CO ₂ 萃取	在一定压力和温度下, 超临界 CO ₂ 对某些天然物质具有特殊溶解作用	对组分选择性强, 萃取效果好, 能提高萃取效率、缩短提取时间, 减少热敏性成分损失	设备昂贵, 工业化应用成本高	[50–51]
	盐析法	蛋白质在等电点析出	操作简便, 安全性高, 不影响蛋白质活性	主要为粗蛋白, 纯度较低	[54]
籽蛋白提取	碱溶酸沉法	大部分蛋白质在碱性条件下溶解, 酸性条件下析出, 先从原料基中溶出蛋白质再沉淀分离	蛋白得率高, 蛋白籽油充分利用	酸碱性影响蛋白质生物活性, 降低蛋白质的效价	[55]
	Osborne 分级法	根据蛋白质不同的溶解性, 进行逐步提取	蛋白质纯度高, 且能对蛋白质分级	操作工艺繁琐、较为耗时	[57]

型、优质的植物蛋白资源。花椒籽蛋白的提取方法有盐析法、碱溶酸沉法和 Osborne 分级提取法。李超^[54]以九叶青花椒为原料, 采用盐析法提取花椒籽中蛋白质, 提取率最高达 88.77%, 且氨基酸种类丰富, 必需氨基酸占 31.61%。寇明钰^[55]利用碱溶酸沉淀法提取蛋白质, 提取率为 54.76%, 并评定氨基酸组成, 得分为 58, 高于大豆(46)、花生(43), 是一种较优质的蛋白质。Osborne 分级提取法是根据蛋白组分不同的溶解特性进行分类提取, 用水、稀盐酸、稀碱溶液分级提取清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白^[56]。瞿瑗等^[57]采用 Osborne 法分级提取青花椒籽蛋白中的 4 种蛋白质(谷蛋白、清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白), 相对含量分别为 40.02%、23.06%、21.64%、6.41%, 且具有较好的起泡性和乳化特性。碱溶酸沉法是蛋白质提取的传统方法, 适用于提取大量水溶性蛋白和部分非水溶性蛋白, 盐析法主要用于提取盐溶性蛋白质, 因此, 根据目的蛋白质性质的不同, 提取方法不同。Osborne 分级法根据蛋白质不同的溶解性, 进行逐步提取, 得到的蛋白质纯度较高, 分离效果好, 所以较适用于蛋白质的完全提取、分离。

青花椒干制、精油提取及籽蛋白提取加工技术的原理及优缺点比较如表 2 所示。

3 青花椒的应用

青花椒兼具食用和药用价值, 目前我国青花椒产品开发已取得初步发展。以青花椒原料出售的产品有鲜青花椒和干青花椒, 以青花椒提取物为主要成分的产品有青花椒调味油^[58]、青花椒精油^[59]等。此外, 青花椒由于富含酰胺、多酚、香豆素、生物碱等生物活性成分^[60], 在日化用品及医疗保健领域也具有极大的开发价值。《本草纲目》中记载: “花椒, 其味辛而麻, 其气温而热。入肺散寒, 入脾除湿、入右肾

补火”, 因此, 在驱寒保暖方面有青花椒养护用品, 如青花椒泡脚药包、保暖脐贴等。药理学研究也表明, 青花椒中的酰胺物质具有优异的镇痛、消炎作用, 对缓解牙痛、治疗 I 型糖尿病、动脉粥样硬化具有一定作用^[61–63]。Li 等^[64]发现酰胺物质中的羟基- α -山椒素对神经系统有保护作用, 作用机制可能为减少细胞内自由基的产生和积累、抑制氧化应激反应, 水解能够促进神经退行性疾病发生的前体蛋白。Tsai 等^[65]从青花椒根皮提取物中分离出香豆素, 证明其具有抑制血小板凝集作用。Hou 等^[66]发现花椒籽蛋白水解物中含有多种新型抗菌肽, 对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌有显著的杀菌作用。作为药食同源植物, 目前针对青花椒的功能性的研究还只是一个开端, 在药理学中的作用机制也仍待继续探究。我国青花椒资源丰富, 探究青花椒在各个领域的应用、充分发挥青花椒活性成分的价值, 对于提高青花椒附加值、开发深加工产品具有深远意义。

4 结论与展望

青花椒作为我国传统经济作物和重要调味品, 素有“调味之王”的美誉, 随着现代生活品质的提高, 青花椒产品质量及产品类型也应进一步提升和丰富, 因此, 研究青花椒的加工技术具有重要意义。本文综述了市场上青花椒的主要产品, 即鲜椒和干椒的保鲜方法及干制方法, 以期获得色泽鲜绿、麻味浓郁、质地良好的青花椒提供理论参考。同时, 由于青花椒精油、青花椒籽蛋白具有较高的药用价值, 本文总结了二者的主要提取方法, 为进一步促进青花椒在日化用品、医疗保健品领域的开发提供一定的技术参考。

此外, 本文认为未来在青花椒保鲜技术、干制技术及活性成分提取利用方面仍有较大的发展空间:

a.在青花椒保鲜方面,除传统的低温、气调等保鲜技术外,可与智能保鲜系统结合,运用物联网技术和智能传感器监控青花椒的贮藏环境(如温度、湿度),实时调整贮藏条件以保持青花椒的新鲜度、光泽度和特有的浓郁香气;b.在青花椒干制技术方面,目前干燥设备的智能化、自动化水平低,干青花椒品质参差,缺少对干燥过程的检测,因此,建立青花椒的干燥动力学模型是一个较好的技术优化方向。结合干燥时间、干燥温度、干燥速率、青花椒的含水量、色泽等品质情况实现干制过程信息化,运用机器学习算法,建立青花椒干燥过程的神经网络模型、随机森林模型等预测不同干燥条件下,青花椒的色泽度、精油含量、麻味程度等品质情况,基于此建立青花椒干燥标准化设备,以实现对于干燥条件及干燥品质的精准把控;c.在青花椒活性成分的提取利用方面,目前多处于实验室研究阶段,各种成分在提取、分离、加工过程中的变化需要进一步进行相关研究,可使用精密分析仪器如二维气相色谱质谱联用仪、液相色谱-四极杆-飞行时间质谱联用仪等准确鉴定各组分,并使用制备型液相色谱分离纯化物质,并进行细胞及动物实验评价各纯化组分的生物功能、研究作用机制及生理毒性等,促进青花椒在临床上的应用实验。此外,青花椒在生产过程中产生的副产物,如青花椒叶、青花椒茎等也富含多种药用成分,也应将其进行综合利用,有助于减缓青花椒植物资源浪费、拓宽青花椒产品产业链,促进青花椒产业可持续、多元化发展。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 梅小飞, 伏晴晴, 徐富慧, 等. 花椒干制技术的研究进展[J]. 美食研究, 2024, 41(2): 70-76. [MEI X F, FU Q Q, XU F H, et al. Research progress of drying technologies of *Zanthoxylum bungeanum* [J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2024, 41(2): 70-76.]
- [2] 吴振, 李红, 杨勇, 等. 基于无机元素的花椒产地溯源和品种聚类分析[J]. 食品科学, 2019, 40(16): 213-219. [WU Z, LI H, YANG Y, et al. Geographical origin traceability and varietal classification of *Zanthoxylum* based on mineral profile [J]. Food Science, 2019, 40(16): 213-219.]
- [3] 刘春秋, 吕雪梅, 邓涛. 对我国花椒产区营销工作的几点思考——以中国花椒之乡江津花椒为例[J]. 山西农经, 2023(18): 173-175. [LIU C Q, LÜ X M, DENG T. Several thoughts on marketing work in Sichuan pepper production areas in China: Taking Jiangjin Sichuan pepper, the hometown of Sichuan pepper in China, as an example [J]. Shanxi Agricultural Economics, 2023(18): 173-175.]
- [4] 李晓莉, 黄登艳, 刁英. 中国花椒产业发展现状[J]. 湖北林业科技, 2020, 49(1): 44-48. [LI X L, HUANG D Y, DIAO Y. Development status of *Zanthoxylum bungeanum* maxim industry in China [J]. Hubei Forestry Science and Technology, 2020, 49(1): 44-48.]
- [5] 任媛媛, 翟晓巧, 张晨. 我国花椒产业发展现状及存在问题和发展前景[J]. 河南林业科技, 2020, 40(4): 31-34. [REN Y Y, ZHAI X Q, ZHANG C. Development status, problems and prospects of *Zanthoxylum Bungeanum* industry in China [J]. Henan Forestry Science and Technology, 2020, 40(4): 31-34.]
- [6] 吴湘涵, 李安洁, 梅佳睿, 等. 抑菌功能性可降解保鲜包装对香蕉的保鲜研究[J]. 包装工程, 2024, 45(11): 105-111. [WU X H, LI A J, MEI J R, et al. Preservation of bananas by antibacterial functional degradable fresh-keeping packaging [J]. Packaging Engineering, 2024, 45(11): 105-111.]
- [7] 梁仕茹, 蒙馨怡, 黄心怡, 等. 基于玉米醇溶蛋白(zein)-海藻酸钠构建木犀草素输送体系及果蔬保鲜研究[J]. 食品安全导刊, 2024(13): 129-134. [LIANG S R, MENG X Y, HUANG X Y, et al. Study on the construction of luteolin transport system based on zein and sodium alginate and preservation on fruit and vegetable [J]. China Food Safety Magazine, 2024(13): 129-134.]
- [8] 曾剑超, 马力. 青花椒保鲜技术的研究[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2007, 26(2): 51-53, 56. [ZENG J C, MA L. Research on the preservation technology of green Sichuan pepper [J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2007, 26(2): 51-53, 56.]
- [9] 姚佳. 青花椒贮藏技术研究及褐变机理初探[D]. 成都: 四川农业大学, 2011. [YAO J. Study on the storage technology and exploring on the enzymatic browning mechanism of *Zanthoxylum schinifolium* Sieb. et Zucc [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2011.]
- [10] 任康. 保鲜青花椒生产工艺: 中国, CN200710048450.8 [P]. 2010-04-07. [REN K. The production process of preserved green Sichuan pepper: China, CN200710048450.8 [P]. 2010-04-07.]
- [11] 蔡思进, 李雅芝, 刘慧娟, 等. 低温贮藏对鲜青花椒品质的影响[J]. 中国果菜, 2023, 43(5): 29-34, 63. [CAI S J, LI Y Z, LIU H J, et al. The effect of low temperature storage on the quality of fresh green pepper [J]. China Fruit & Vegetable, 2023, 43(5): 29-34, 63.]
- [12] 吕明珠. 竹叶花椒果实采后生理生化特征及保鲜技术的研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2022. [LÜ M Z. Studies on post-harvest physiological and biochemical characteristics and preservation-treatment of *Zanthoxylum armatum* DC. Frui [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2022.]
- [13] 杨瑞丽. 不同处理和贮藏条件对花椒及其制品麻味物质稳定性影响的研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018. [YANG R L. The study on the stability of numb-taste of *Zanthoxylum* and its product in different treatments and storage conditions [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2018.]
- [14] LI S, DONG H, YANG X, et al. A novel insight into green food preservation: Design of equilibrium modified atmosphere packaging (EMAP) based on gas barrier (GB)-gas conductor (GC) blending materials [J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133560.
- [15] 蒋云华. 大红袍花椒小环境气调保鲜技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2013. [JIANG Y H. Study on the Preservation quality of Dahongpao Pepper treated in modified atmosphere packaging conical flasks [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013.]
- [16] 李一卓. 鲜青花椒保鲜及其农残降解技术的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011. [LI Y Z. Studies on the preservation technology of fresh *Zanthoxylum schinifolium* Sieb et Zucc. and degradation technology of pesticides on *Z. schinifolium* Sieb et Zucc. [D]. Chongqing: Southwest University, 2011.]
- [17] JURIĆ M, MASLOV BANDIĆ L, CARULLO D, et al. Tech-

- nological advancements in edible coatings: Emerging trends and applications in sustainable food preservation[J]. *Food Bioscience*, 2024, 58: 103835.
- [18] DAI L, WANG X, MAO X, et al. Recent advances in starch-based coatings for the postharvest preservation of fruits and vegetables[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 328: 121736.
- [19] 吴渝东, 谢英杰, 王明明, 等. 花椒干燥技术发展思考及其研究[J]. *食品工业*, 2022, 43(7): 228–231. [WU Y D, XIE Y J, WANG M M, et al. Thinking and research on development of pepper drying technology[J]. *The Food Industry*, 2022, 43(7): 228–231.]
- [20] 杨森, 冯靖雯, 刘友平, 等. 热风干燥温度对竹叶花椒干燥特性及品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(12): 203–209. [YANG S, FENG J W, LIU Y P, et al. The effect of hot air drying temperature on the drying characteristics and quality of *Zanthoxylum armatum* DC[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(12): 203–209.]
- [21] CHEN K, ZHANG F, KAN J. Characterization of chlorophyll breakdown in green prickleyashes (*Zanthoxylum schinifolium* Zucc.) during slow drying[J]. *European Food Research and Technology*, 2012, 234(6): 1023–1031.
- [22] 杨兵, 梅晓飞, 彭林, 等. 热风干制对青花椒品质的影响及工艺优化[J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(11): 251–258. [YANG B, MEI X F, PENG L, et al. Effects of hot air drying on the quality of *Zanthoxylum schinifolium* and its optimization[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2018, 44(11): 251–258.]
- [23] CHUA L Y W C. Influence of drying methods on the antibacterial, antioxidant and essential oil volatile composition of Herbs: A review[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2019, 12(3): 27–31.
- [24] 祝瑞雪, 高鸿, 赵志峰, 等. 响应面法优化青花椒微波干燥工艺[J]. *中国调味品*, 2012, 37(1): 51–55. [ZHU R X, GAO H, ZHAO Z F, et al. Optimization of the microwave drying technology of *Zanthoxylum schinifolium* Sieb. et Zucc by response surface methodology[J]. *Chinese Seasoning*, 2012, 37(1): 51–55.]
- [25] 彭林, 王建胜, 梅晓飞, 等. 微波干燥条件对青花椒麻味物质含量的影响及工艺优化[J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(8): 218–223. [PENG L, WANG J S, MEI X F, et al. Effect of microwave drying conditions on the content of alkylamides of *Zanthoxylum schinifolium* and the optimization of its drying process[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2018, 44(8): 218–223.]
- [26] 彭林, 田冰, 王玲, 等. 微波干燥对青花椒挥发油含量的影响及工艺优化[J]. *食品与机械*, 2017, 33(12): 169–173. [PENG L, TIAN B, WANG L, et al. Effect of microwave drying conditions on volatile oil content in *Zanthoxylum schinifolium* and its process optimization[J]. *Food and Machinery*, 2017, 33(12): 169–173.]
- [27] 李菁. 农产品干燥技术装备发展现状[J]. *农机使用与维修*, 2021(7): 137–138. [LI J. Development status of drying technology and equipment for agricultural products[J]. *Agricultural Machinery Using & Maintenance*, 2021(7): 137–138.]
- [28] 黎斌, 彭桂兰, 罗传伟, 等. 基于 Weibull 分布函数的花椒真空干燥动力学特性[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(11): 58–64. [LI B, PENG G L, LUO C W, et al. Vacuum drying kinetics characteristics of Chinese prickly ash based on Weibull distribution[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2017, 43(11): 58–64.]
- [29] 孟国栋, 彭桂兰, 罗传伟, 等. 花椒真空干燥特性分析及动力学模型研究[J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(4): 89–96. [MENG G D, PENG G L, LUO C W, et al. Vacuum drying characteristics and kinetics modeling study of *Zanthoxylum bungeanum*[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2018, 44(4): 89–96.]
- [30] 罗传伟. 花椒真空干燥动力学模型及干燥工艺研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017. [LUO C W. The study on vacuum drying model and method of the *Zanthoxylum unguanum*[D]. Chongqing: Southwest University, 2017.]
- [31] CAO X, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Effects of ultrasonic pretreatments on quality, energy consumption and sterilization of barley grass in freeze drying[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 40: 333–340.
- [32] DENG Y, ZHAO Y. Effect of pulsed vacuum and ultrasound osmopretreatments on glass transition temperature, texture, microstructure and calcium penetration of dried apples (Fuji)[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2008, 41(9): 1575–1585.
- [33] XIE Y, GAO Z, LIU Y, et al. Pulsed vacuum drying of *Rhizoma dioscoreae* slices[J]. *LWT*, 2017, 80: 237–249.
- [34] 代建武, 付琪其, 黄欢, 等. 青花椒真空脉动干燥特性及干燥品质工艺优化[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(8): 279–287. [DAI J W, FU Q Q, HUANG H, et al. Drying characteristics and quality optimization of green prickly ashes during vacuum pulsed drying[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(8): 279–287.]
- [35] XU X, ZHANG L, FENG Y, et al. Vacuum pulsation drying of okra (*Abelmoschus esculentus* L. Moench): Better retention of the quality characteristics by flat sweep frequency and pulsed ultrasound pretreatment[J]. *Food Chemistry*, 2020, 326: 127026.
- [36] 王子轩, 蒲应俊, 杨明金, 等. 青花椒热泵干燥特性及工艺参数优化[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(4): 261–270. [WANG Z X, PU Y J, YANG M J, et al. Drying characteristics and process optimization by heat pump drying of green Sichuan pepper[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(4): 261–270.]
- [37] 谭均. 基于 CFD 的青花椒热泵烘干传热传质及烘房优化[D]. 重庆: 西南大学, 2023. [TANG J. CFD Based heat and mass transfer of green Sichuan pepper during heat pump drying and optimization of drying room[D]. Chongqing: Southwest University, 2017.]
- [38] 杨兵, 梅小飞, 阚建全. 热泵干制对青花椒色差和品质的影响及工艺优化[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(12): 140–145, 151. [YANG B, MEI X F, KAN J Q. Effects of heat pump drying on chromatism and quality of *Zanthoxylum* L. and process optimization[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2019, 45(12): 140–145, 151.]
- [39] 薛韩玲, 拓雯, 万学宁, 等. 花椒热风-微波组合干燥失水特性研究[J]. *农机化研究*, 2024, 46(10): 129–137. [XUE H L, TUO W, WAN X N, et al. Dehydration characteristics and mathematical modeling of *Zanthoxylum bungeanum* in hot air/microwave combined drying[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2024, 46(10): 129–137.]
- [40] 万学宁. 热风-微波联合干燥花椒传热传质机理研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2022. [WANG X N. Study on heat and mass transfer mechanism of hot air and microwave combined drying for *Zanthoxylum bungeanum*[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2022.]
- [41] LIU Y, ZHANG Y, WEI X, et al. Effect of radio frequency-assisted hot-air drying on drying kinetics and quality of Sichuan pepper (*Zanthoxylum bungeanum* maxim.)[J]. *LWT*, 2021, 147: 111572.
- [42] 舒娟, 张雪研, 宋爽, 等. 花椒精油的提取及应用研究进展[J]. *中国调味品*, 2023, 48(9): 203–207. [SHU J, ZHANG X Y, SONG S, et al. Research progress on extraction and application of *Zanthoxylum bungeanum* essential oil[J]. *China Condiment*, 2023,

- 48(9):203–207.]
- [43] 周敏, 刘福权, 吕远平, 等. 花椒的超临界 CO₂ 萃取和水蒸气蒸馏工艺对比研究[J]. 中国调味品, 2022, 47(8): 101–105. [ZHOU M, LIU F Q, LÜ Y P, et al. Comparative study on supercritical CO₂ extraction and steam distillation of *Zanthoxylum bungeanum*[J]. China Condiment, 2022, 47(8): 101–105.]
- [44] 程志敏, 陈彦荣, 王建辉, 等. 青花椒精油对致龋菌的体外抑菌活性[J]. 食品科学, 2022, 43(21): 70–77. [CHENG Z M, CHEN Y R, WANG J H, et al. Antibacterial activity of essential oils from *Zanthoxylum schinifolium* Siebold & Zucc. against cariogenic bacteria[J]. Food Science, 2022, 43(21): 70–77.]
- [45] 赵驰, 董玲, 张凤菊, 等. 青花椒精油抑制蜡样芽孢杆菌的活性与机理[J]. 食品科学, 2022, 43(17): 64–73. [ZHAO C, DONG L, ZHANG F J, et al. Antibacterial activity and mechanism of Green Huajiao essential oil against *Bacillus cereus*[J]. Food Science, 2022, 43(17): 64–73.]
- [46] WANG Z J, ZHOU Y, SHI X L, et al. Comparison of chemical constituents in diverse zanthoxylum herbs, and evaluation of their relative antibacterial and nematocidal activity[J]. Food Bioscience, 2021, 42: 101206.
- [47] 谢士娟. 青花椒挥发油的成分分析及品种亲缘关系的鉴定[D]. 成都: 西华大学, 2014. [XIE S J. Analysis of component essential oil and genetic relationship of cultivar on *Zanthoxylum schinifolium* Zucc.[D]. Chengdu: Xihua University, 2014.]
- [48] 王友峰, 罗忠圣, 黎浪, 等. 黔产青花椒精油成分分析及抑菌、抗氧化活性研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(4): 285–292. [WANG Y F, LUO Z S, LI L, et al. Components analysis of essential oil from the *Zanthoxylum schinifolium* in Guizhou and its antioxidant and antibacterial activities[J]. China Food Additives, 2023, 34(4): 285–292.]
- [49] 李品艾, 睢超霞. 花椒超临界 CO₂ 萃取物成分 GC-MS 分析[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(23): 10857, 10899. [LI P A, SUI C X. GC-MS analysis of extracts from *Zanthoxylum bungeanum* Maxim by supercritical carbon dioxide extraction[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(23): 10857, 10899.]
- [50] 刘琳琪, 赵晨曦, 李佩娟, 等. 花椒挥发油超临界 CO₂ 萃取的工艺优化及 GC-MS 分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(5): 73–80. [LIU L Q, ZHAO C X, LI P J, et al. Optimization of supercritical CO₂ extraction process of essential oil from *Zanthoxylum bungeanum* Maxim. and its chemical composition analyzed by GC-MS[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(5): 73–80.]
- [51] 李潮俊. 超临界 CO₂ 萃取竹叶花椒精油及其抗氧化性研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023. [LI C J. Study on supercritical CO₂ extraction and antioxidation of essential oil of *Zanthoxylum armatum* DC.[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023.]
- [52] 胡晴文, 彭郁, 李莱, 等. 花椒油和花椒籽油提取技术研究进展[J]. 中国油脂, 2024, 49(1): 16–21. [HU Q W, PENG Y, LI M, et al. Research progress on extraction process of *Zanthoxylum bungeanum* oil and *Zanthoxylum bungeanum* seed oil[J]. China Oils and Fats, 2024, 49(1): 16–21.]
- [53] 古雪艳, 徐国伟, 张康, 等. 花椒籽资源利用研究进展[J]. 中兽医医药杂志, 2024, 43(1): 43–47. [GU X Y, XU G W, ZHANG K, et al. Review on resource utilization of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim. seeds[J]. Journal of Traditional Chinese Veterinary, 2024, 43(1): 43–47.]
- [54] 李超. 花椒籽仁分离蛋白的制备及性质研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2017. [LI C. Study on preparation and properties of protein isolate from *Zanthoxylum armatum* seed kernel[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2017.]
- [55] 寇明钰. 花椒籽蛋白质分离提取及功能性质的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2006. [KOU M Y. Study on the extration of protein from Chinese prickly ash seed and its functional properties[D]. Chongqing: Southwest University, 2006.]
- [56] 吕俊霞. 花椒籽蛋白提取及体外模拟消化产物的鉴定与分析[D]. 成都: 四川农业大学, 2020. [LÜ J X. Extraction of *Zanthoxylum* seed protein and identification and analysis of simulated digestion products *in vitro*[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2020.]
- [57] 瞿瑗, 余国贤, 黎杉珊, 等. Osborne 法分级提取青花椒籽蛋白及其理化性质研究[J]. 核农学报, 2018, 32(12): 2373–2379. [QU A, YU G X, LI S S, et al. Physicochemical properties of proteins isolated from *Zanthoxylum armatum* DC. seed using osborne extract method[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(12): 2373–2379.]
- [58] 金敬红, 凌艺炜, 姚正颖, 等. 不同干燥方式对青花椒精油品质的影响[J]. 中国野生植物资源, 2022, 41(12): 46–50. [JING J H, LING Y W, YAO Z Y, et al. Effects of different drying dethods on the quality of essential oil from *Zanthoxylum schinifolium*[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2022, 41(12): 46–50.]
- [59] 陈江魁, 董占军, 殷春燕, 等. 超声辅助混合浸提制备花椒调味油及风味成分分析[J/OL]. 中国油脂, 1–10. [2025-04-02]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230457>. [CHEN J K, DONG Z J, YIN C Y, et al. Preparation of *Zanthoxylum* flavor oil by ultrasound-assisted mixed extraction and analysis of flavour components[J]. China Oils and Fats: 1–10. [2025-04-02]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230457>.]
- [60] WANG L, HAO H, MENG X, et al. A novel isoquinoline alkaloid HJ-69 isolated from *Zanthoxylum bungeanum* attenuates inflammatory pain by inhibiting voltage-gated sodium and potassium channels[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2024, 330: 118218.
- [61] WANG L, FAN W, ZHANG M, et al. Antiobesity, regulation of lipid metabolism, and attenuation of liver oxidative stress effects of hydroxy- α -sanshool isolated from *Zanthoxylum bungeanum* on high-fat diet-induced hyperlipidemic rats[J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2019, 2019: 5852494.
- [62] ZHU L, WANG L, CHEN X, et al. Comparative studies on flavor substances of leaves and pericarps of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim. at different harvest periods[J]. Tropical Journal of Pharmaceutical Research, 2019, 18(2): 279–286.
- [63] 牛博, 鹿广昌, 鲁丁强. 花椒麻素的生物功能研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(9): 248–253. [NIU B, PANG G C, LU D Q. Progress in the biological functions of sanshool[J]. Food Science, 2021, 42(9): 248–253.]
- [64] LI R, ZHANG Q, LIU J, et al. Hydroxy- α -sanshool possesses protective potentials on H₂O₂-stimulated PC12 cells by suppression of oxidative stress-induced apoptosis through regulation of PI3K/Akt signal pathway[J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2020, 2020: 3481758.
- [65] TSAI I, LIN W, TENG C, et al. Coumarins and antiplatelet constituents from the root bark of *Zanthoxylum schinifolium*[J]. Planta Medica, 2000, 66(7): 618–623.
- [66] HOU X, LI S, LUO Q, et al. Discovery and identification of antimicrobial peptides in Sichuan pepper seeds by peptidomics and bioinformatics[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2019, 103(5): 2217–2228.