

八角茴香化学成分、药理作用和提取分析加工技术研究进展

韦沁, 黄丹娜*, 陈路*, 王聪

广西壮族自治区药用植物园, 西南濒危药材资源开发国家工程研究中心, 大健康产品开发协同创新中心, 南宁 530023

摘要:八角茴香(*Illicium verum* Hook. f.)属于木兰科植物,是中国特有的药食同源植物,目前研究集中于其化学成分与药理作用的开发利用。然而,八角茴香化学成分的系统鉴定和药理作用的定量数据不足,加工及提取技术缺乏统一规范。综述系统梳理了八角茴香的主要成分,包括挥发油、黄酮类、酚酸类、倍半萜内酯类等,分析了其抗菌、镇痛、抗炎、抗氧化等药理作用,并总结了提取、分析及鲜料加工等方法的工艺要点,以期为完善八角茴香研究方法与工艺标准,提升资源利用效率和产业化应用提供有力支撑。

关键词:八角茴香;化学成分;药理作用;提取分析;加工技术

DOI:10.19586/j.2095-2341.2025.0025

中图分类号:Q946.8, R932 文献标志码:A

Research Advances on Chemical Constituents, Pharmacological Effects, Extraction Analytical and Processing Techniques of Star Anise

WEI Qin, HUANG Danna*, CHEN Lu*, WANG Cong

Collaborative Innovation Center for Big Health Product Development, National Engineering Research Center for the Development of Endangered Medicinal Materials Resources in Southwest China, Guangxi Zhuang Autonomous Region Medicinal Botanical Garden, Nanning 530023, China

Abstract: Star anise (*Illicium verum* Hook. f.) belongs to the Magnoliaceae family, a medicinal-food homologous plant endemic to China, has current research primarily focused on the development and utilization of its chemical components and pharmacological effects. However, challenges remain in the systematic identification of its chemical composition, insufficient quantitative data on pharmacological effects, and the absence of standardized protocols for processing and extraction technologies. The review systematically sorted out the main constituents, including volatile oils, phenolic acids, flavonoids, and sesquiterpene lactones, analysed the pharmacological activities such as antibacterial, analgesic, anti-inflammatory, and antioxidant effects and summarized the main points of extraction techniques, analysis and fresh material processing technology. It provides strong support for improving the research methods and technological standards of star anise, improving the efficiency of resource utilization and industrial application.

Keywords: star anise; chemical components; pharmacological effects; extraction techniques; processing technology

八角茴香(*Illicium verum* Hook. f.)是一种木兰科植物的干燥果实,其果实外形与齿轮相似,通常由8个蓇葖果组成。八角茴香是“桂十味”广西道地药材之一,属我国“药食同源”的中药品种,具有很高的药用价值和商用价值。我国使用八角的历史悠久,原产八角的历史可追溯到宋代^[1],

《桂海虞衡志》中记载八角“出左、右江州洞中”。我国八角资源占世界八角资源总量的85%以上,是世界上唯一能大规模生产和提供八角资源的国家。其中,广西八角的种植面积占全国总面积的80%以上,年产量约占全国的90%左右,位居全国第一^[2-3]。

收稿日期:2025-02-27; 接受日期:2025-04-01

基金项目:广西壮族自治区中医药管理局项目(GXZYA20230001);广西壮族自治区药用植物园科研基金项目(202304)。

联系方式:韦沁 E-mail: well_wqin@163.com

*通信作者 黄丹娜 E-mail: dhuang202@126.com; 陈路 E-mail: 150388451@qq.com

《中国药典》记载八角味辛性温,归肝、肾、脾、胃经,具有温阳散寒、理气止痛之功效,用于寒疝腹痛、肾虚腰痛、胃寒呕吐、脘腹冷痛^[2]。明代《本草品汇精要》曰:“八角主一切冷气及诸疝疔痛”。《医学入门·治寒门》中描述八角可“专主腰疼”。《欧洲药典》记载八角具有祛痰和解痉的作用。在印度,八角用以增加食欲和驱虫;在印度尼西亚,八角被认为在治疗失眠和产后外用方面具有药用价值;在墨西哥和美国,八角常用于缓解婴儿的绞痛和胃痛;在古巴则用于治疗胃肠道疾病,亦有文献提到八角的芳香油可应于治疗风湿疾病^[4]。本文总结了八角茴香的主要化学成分、药理作用、化学成分提取分析加工技术,以期为八角茴香的产业化应用提供参考。

1 八角茴香的主要化学成分

八角茴香含有丰富的化学成分,主要包括挥发油、有机酸类、黄酮类及倍半萜内酯类化合物等(表1),这些化学成分是八角茴香药用价值的基础,可为其生产工艺节约较大成本。

1.1 挥发油

挥发油是八角茴香香气的主要来源^[5],也是八角茴香中研究较广泛的一类活性成分,它们大多以苯丙素进行生物合成。八角茴香挥发油的主要活性成分是大茴香脑,也叫做八角茴香脑(anethole),约占80%~90%,化学名为对丙烯基茴香醚、升白宁、升血宁和茴香烯,有反式茴香脑和顺式茴香脑的区别^[6]。除此之外,活性成分还含有柠檬烯、柠檬醛、草蒿脑、茴香醛、芳香醇、桉油精,以及少量的桉树脑、 α -蒎烯、二戊烯、甲基黑胡椒酚、龙脑、大茴香基甲酮等^[7]。大茴香脑作为主要活性成分,其在抗菌、抗炎及抗氧化方面的作用已得到验证,并广泛应用于食品和医药行业。

1.2 酚酸类

八角茴香中酚酸类化合物主要包括对香豆酸、没食子酸、肉桂酸、绿原酸和阿魏酸等^[8]。这些酚酸类化合物在八角茴香的不同部位均有分布,其中果实中含量最高,在抗氧化、抗炎和抗肥胖等方面具有显著活性^[9]。此外,有研究在八角茴香水提取物中检测到香豆素、芹菜素和迷迭香酸等酚类物质^[10],它们与酚酸类共同构成八角茴香多种药理活性的物质基础。

1.3 有机酸类

有机酸类化合物包括莽草酸和其他脂肪酸,如棕榈酸、亚油酸、油酸等^[7]。其中,莽草酸是多种植物化学成分进行生物合成的重要中间体,其含量受八角茴香生长阶段的影响,主要集中在果实中,枝条、叶片上也有少量分布。莽草酸是植物和微生物的重要代谢产物,可参与芳香族氨基酸的合成,具有抗炎、镇痛的作用。此外,莽草酸作为抗病毒和抗癌药物的中间体,是治疗当前流行的甲型流感特效药“磷酸奥司他韦”的主要成分,也是八角茴香抗病毒作用中研究最广泛的分子之一^[11]。

1.4 黄酮类

黄酮类化合物是八角茴香具有活性的主要化学成分之一,本课题组从已提取八角挥发油的八角药渣中,采用纤维素酶-超声辅助方法优化提取八角总黄酮,产出率达到14.76%^[12]。槲皮素、山柰素和异鼠李素等是八角茴香中常见的黄酮苷元类型,常与D-葡萄糖、D-木糖、L-鼠李糖等组成单糖或二糖类的黄酮苷化合物^[13-14]。

1.5 倍半萜内酯类

倍半萜内酯类化合物在八角茴香中也占有一定比例,以八角茴香为原料,经脱皮处理,可以得到30多种高度氧化的倍半萜内酯及其衍生物,如伪莽毒素、莽草毒素、1-羟基新莽草毒素、八角莽草毒素A和B、6-去氧伪莽草毒素、3,4-去羟基-15 α -甲基-2-氧-6-去氧新莽草毒素、6-去氧红花八角素、红花八角素、6-去羟基-1-羟基新莽草毒素、3,4-去羟基-2-氧-6-去氧新莽草毒素等^[8]。有研究发现,倍半萜内酯及其衍生物在抵抗肿瘤、杀菌消炎等方面颇有功效,且此类化合物与八角茴香的毒性作用有一定的关系^[15]。

1.6 多糖类

八角茴香中的多糖类化合物具有复杂的结构和多种生物活性。研究表明,八角茴香多糖主要通过丙醇基深共熔溶剂和微波辅助方法提取,优化条件下的提取率为5.14%^[16]。这些多糖具有高粘度、高油持能力和高酯化度等特性,主要由半乳糖醛酸构成,具有高度分支的多糖结构^[16],它们在治疗肥胖、高血压和糖尿病方面表现出显著的疗效^[16]。此外,八角多糖还具有抗氧化和抗肿瘤功能,能够抑制肿瘤的生长^[17]。

表1 八角茴香主要化学成分分类及功效

Table 1 The classification and explanation of the main chemical components of star anise

活性成分	主要化合物	功效
挥发油	大茴香脑、柠檬烯、柠檬醛、草蒿脑、茴香醛、桉油精、 α -蒎烯等	抗菌、抗炎、抗氧化
酚酸类	对香豆酸、没食子酸、肉桂酸、绿原酸、阿魏酸	抗氧化、抗肥胖、抗菌、抗炎
有机酸类	莽草酸、棕榈酸、亚油酸、油酸	抗病毒、抗癌(莽草酸为磷酸奥司他韦中间体)、调节代谢
黄酮类	槲皮素、山柰素、异鼠李素及其苷类(与D-葡萄糖、D-木糖、L-鼠李糖结合)	抗氧化、抗炎
倍半萜内酯类	伪莽毒素、莽草毒素、八角莽草毒素A/B、6-去氧伪莽草毒素及其30余种衍生物	抗肿瘤、杀菌消炎、与毒性作用相关
多糖类	八角茴香多糖(以半乳糖醛酸为主的高支化结构)	抗肥胖、降血压、控血糖、抗氧化、抗肿瘤

2 八角茴香药理作用

2.1 抗氧化作用

Luís 等^[18]采用1,1-二苯基-2-苦基肼(1,1-diphenyl-2-picryl-hydrazyl, DPPH)自由基清除实验评估了八角茴香精油的抗氧化活性,结果证实八角茴香精油具有很强的抗氧化活性(半抑制浓度为3.46%),并推测其抗氧化活性与包括反式茴香脑在内的高苯丙素含量(92.2%)有关。有研究表明,反式茴香脑及其衍生物茴香硫醚已被证明能通过增加细胞内谷胱甘肽含量和增强谷胱甘肽巯基转移酶的活性,提高机体抗氧化能力^[19]。Cai 等^[20]研究了八角茴香挥发油的DPPH和ABTS自由基清除活性,结果表明八角茴香挥发油有温和的DPPH清除活性,且随着共渗的增加,清除活性增加。尽管研究明确了反式茴香脑是关键抗氧化成分,但未明确是否涉及线粒体功能保护、DNA损伤修复等更深入的抗氧化机制。

2.2 抗炎镇痛作用

有研究显示,八角茴香的甲醇提取物能够显著抑制促炎细胞因子如肿瘤坏死因子 α (tumor necrosis factor- α , TNF- α)和白细胞介素-1 β (interleukin-1 β , IL-1 β)的产生,从而发挥抗炎作用^[21],这些成分通过调节神经系统的信号传导,减轻疼痛感^[22]。Tuseef 等^[23]通过构建啮齿动物的热板镇痛模型、酵母诱导发热模型和足跖水肿模型,发现八角甲醇、乙醇和水溶液提取物在不同剂量下均表现出明显的镇痛、解热和抗炎作用,且呈剂量依赖。研究还测定了IL-6、IgE等炎症因子,初步揭示了八角茴香抗炎的生物学机制。利用多种动物

模型研究了八角茴香有效成分在抗炎方面的作用,包括热板法(疼痛)、足跖水肿(炎症)、发热模型等,综合评价了八角茴香的镇痛、解热作用。然而,少有研究探讨是否影响NF- κ B、MAPK、TLR4等炎症信号通路,以及长期给药是否可能引起免疫抑制、不良反应等问题。

2.3 抑菌作用

一项有50名参与者的双盲随机交叉临床试验,评估了八角茴香漱口水对口腔健康的影响。结果显示,八角茴香漱口水在降低牙龈指数、乳头出血指数及口腔微生物数量方面显著优于安慰剂,说明八角茴香具有收敛、抗菌作用,有望用于口腔健康护理^[24]。Salem 等^[25]发现八角茴香水甲醇提取物对耐多药和高毒力的鲍曼不动杆菌AB5057和耐甲氧西林金黄色葡萄球菌(methicillin-resistant staphylococcus aureus, MRSA) USA300生物膜的形成具有显著的抑制和分离活性,体内局部应用降低了MRSA感染皮肤损伤中的细菌含量,因此提出了八角极性成分在抗持续性感染的毒力策略和作为局部抗菌药物治疗葡萄球菌皮肤感染的潜在用途^[25]。八角对病原菌的抑菌机理主要通过多种抑菌成分协同降解细胞壁,破坏细胞质膜或使膜蛋白变性,导致细胞内葡萄糖、蛋白质、DNA等物质流失,使其合成代谢紊乱,造成细菌或真菌死亡^[26]。目前,大部分研究的重点放在MRSA等耐药菌,具有较强的实际应用价值,但随着细菌感染类型的增多,八角茴香对于其他菌种的抑菌效果也正在探索中,可为八角茴香在抗菌方面的应用及其作为天然抗菌剂的进一步开发提供科学依据。

2.4 抗病毒作用

Li等^[27]从八角中分离出的对香豆酸龙脑酯具有很强的抗病毒活性,其对甲型H1N1流感病毒的半抑制浓度优于达菲和利巴韦林。本课题组通过网络药理学方法探讨了八角挥发油防治新型冠状病毒肺炎的潜在作用机制,发现其可能通过抗病毒、抗炎、调节免疫、保护心血管等途径来实现防治作用^[28]。Torres等^[29]分别通过新型冠状病毒假病毒进入细胞和在表达人血管紧张素转换酶2的HeLa细胞中进行XTT试验来确定其抗病毒和细胞毒性活性,发现八角挥发油具有可抑制新型冠状病毒的潜力。

2.5 抗肿瘤作用

有研究显示,八角可显著抑制肿瘤诱导的人脐静脉内皮细胞迁移和小管形成,并通过减少肿瘤中促血管生成因子抑制体内肿瘤诱导的血管生成,在转移性恶性肿瘤的治疗中具有潜在作用^[30]。在慢性髓系白血病细胞中,八角单用或与伊马替尼联合应用均可显著降低Bcr-Abl融合基因表达,且具有抗白血病活性^[31]。通过壳聚糖负载八角茴香提取物形成纳米粒,结果显示该纳米粒NCI-H460肺癌细胞株以剂量依赖的方式显著降低细胞活力^[32]。另有研究表明,八角对人乳腺癌MCF-7细胞的增殖有抑制作用^[33]。目前,八角茴香的抗肿瘤作用研究已经在细胞水平取得了一定进展,展现出广谱抗肿瘤活性,并利用纳米剂型对其抗肿瘤疗效进行了更丰富的研究,但其分子作用机制研究和剂型的新设计仍然较少。

2.6 调节糖脂代谢

在一项研究中,使用高脂高糖饮食喂养诱导肥胖大鼠,给予八角干预后,大鼠体质量增加明显减缓、氧化应激指标减少、相关脂肪含量降低,表明八角具有抗氧化应激和抗肥胖作用^[8]。在另外一项研究中,八角已被证明可降低链脲佐菌素诱导的糖尿病大鼠的血糖、尿素、血脂、肝功能指数以及肾脏糖基化终末产物(advanced glycation end products, AGEs)水平,具有可作为抗糖尿病和非酶糖基化反应的辅助手段并减轻相关并发症的药物潜力^[34]。Alias和Shafie^[16]利用丙醇基低共熔溶剂和微波辅助方法提取八角茴香多糖,所得的酸性果胶状物质具有凝胶状特性、高度非晶态、高半乳糖醛酸浓度和高支化大小的多糖结构,具有抑制胰腺脂肪酶(86.67%)、血管紧张素转换酶

(73.47%)和 α -葡萄糖苷酶(82.33%)活性,提示其在糖尿病控糖方面存在潜力。

2.7 其他作用

有报告研究了包括2004—2021年间3个婴儿在接触八角茴香后的临床病例,结果显示八角茴香可用于治疗婴儿肠绞痛,但存在神经毒性。其神经毒性表现从轻微烦躁、呕吐到严重抽搐不等,主要是由于中国八角受含神经毒素的日本八角污染影响。然而,多数病例经保守治疗后无长期神经学后果^[35]。

八角茴香在药理学上具有多种作用,然而关于其临床研究的数量相对有限,更多的研究集中在化学成分和潜在的药理作用上。未来,八角茴香中的莽草酸和其他活性成分有望用于开发治疗流感方面的新型抗病毒药物。此外,抗菌和抗真菌特性使其成为潜在的天然食品防腐剂和药物成分,显著的抗氧化特性可用于抗氧化补充剂和护肤品等天然产品的开发上。

3 常用的八角茴香化学成分提取分析加工技术

3.1 八角茴香各药理化学物质常用的提取方法

不同提取方法在提取效率、溶剂残留、环保性和适用范围上各有特点,实际应用时需根据目标成分的极性、稳定性以及产品用途综合选择最优方案(表2)。

3.1.1 水蒸气蒸馏法 水蒸气蒸馏法提取的八角茴香油鲜少有残留和污染,于彩云等^[36]采用水蒸气蒸馏法,以水为溶剂,选取八角粉碎粒度、浸泡时间、料液比和蒸馏时间进行4因素3水平的正交试验,比较了各因素各水平下八角茴香油的提取率,结果显示4个因素均不同程度地影响八角茴香油的提取率、反式茴香脑含量和提取量。该方法常用于挥发油提取,但由于采用高温蒸馏,可能导致部分热敏性成分的降解,虽然环保且安全,但缺乏经济性,提取八角茴香油需要在4个因素均处于适宜条件下,才能有较大的生产功效,产生更大的经济效益。

3.1.2 分子蒸馏法 分子蒸馏法是利用不同物质的分子运动自由程差异,在高真空条件下,使物质在远低于其沸点的温度下达到分离的绿色技术,

具有物料受热时间短、无需沸腾、操作简单且连续、能耗低、绿色环保等优点^[37]。尹团章等^[38]采用分子蒸馏法对八角茴香油进行萃取,得到了八角茴香油轻组分。分子蒸馏法适用于制备高纯度精油,可有效减少杂质干扰,但设备成本较高,主要适用于大型企业中高附加值产品的工业生产。

3.1.3 有机溶剂萃取法 逯家辉等^[39]优选丙酮为溶剂,以提取时间、料液比和提取温度为因素,采用响应面法优化提取工艺,以精油得率为响应值,得到八角茴香油提取的最佳工艺条件。总体而言,有机溶剂提取法虽然操作简单、成本低,但存在溶剂用量大、提取效率低等问题,进而影响八角茴香得油率。

3.1.4 索氏提取法 索氏提取法是一种经典的溶剂提取方法,通常使用乙醇作为溶剂。有研究显示,索氏提取法的得率最高,尤其是使用99.7%乙醇时,提取率可达25.51%^[40-41]。此外,索氏提取法能够有效保留精油的生物活性^[41]。

3.1.5 超临界CO₂萃取法 超临界CO₂萃取法具有工艺过程简单、操作温度低、分离效率和速率高、无溶剂残留及萃取物常温下无凝固等优点。有多项研究报道了利用超临界CO₂萃取法提取八角茴香油^[42-44]。该方法相比传统溶剂萃取更环保,适用于制备高纯度成分,但设备成本较高,适用于大规模工业化生产。

3.1.6 超声波提取法 超声波提取法在中药学领域的应用较多,利用超声波产生的强烈空化、振动、粉碎等特殊作用,对中药材的细胞进行破坏,使溶剂更容易渗透到细胞中,从而加速有效成分的溶解和提取。Lee等^[45]在63℃下,利用81%乙醇超声波法提取15 min,茴香醛和茴香脑两种化合物的最大提取率分别为0.402%和7.996%。李萍等^[46]通过超声波法对八角茴香挥发油进行提取,以乙酸乙酯为溶剂,八角茴香油的提取率为23.89%,并且发现温度对八角茴香挥发油质量损失有较大影响。

3.1.7 亚临界流体正丁醇萃取 亚临界流体萃取是一种新兴的提取技术,能够在较低温度下进行,有效保护热敏性成分。研究表明,亚临界流体萃取法提取的八角茴香精油产率约为7.77%,且具有更强的香气特性^[41]。

3.1.8 酶辅助提取法 酶辅助提取法利用酶的催化作用提高提取效率,这种方法通常用于提高

多糖等大分子物质的提取效率^[16]。有报道显示,单一用酶辅助提取法获得的反式茴香脑产率为40.90%,而结合微波辅助提取法、超声波辅助提取法,反式茴香脑产率可达56%^[47]。

综上,在8种常用的提取方法中,水蒸气蒸馏法环保且安全,但生产成本昂贵、因素影响较多。分子蒸馏法操作简单且连续、能耗低、绿色环保,不过只是有效的提取粗提取物,只能适合于大型企业的生产。有机溶剂提取法和索氏提取法虽然操作简单、成本低,适用于实验室提取,但是存在溶剂用量大、提取效率低等问题,影响八角茴香得油率且会对环境造成污染。超临界CO₂萃取法具有工艺过程简单、操作温度低、分离效率及速率高、无溶剂残留及萃取物常温下无凝固等优点,但提取技术设备原料较其他工艺昂贵。超声波提取法和亚临界流体萃取法在保护热敏成分方面表现优异,前者适合快速提取,后者能保留独特香气,但两者均需进一步优化工艺以实现工业化。酶辅助提取法通过酶解细胞壁显著提升多糖和黄酮得率,但酶活性的稳定性及成本问题仍需解决,这也是未来八角茴香在生物技术方面有望拓展的方向。

3.2 八角茴香药理化学物质常用的分析方法

八角茴香的化学物质分析和结构鉴定方法主要包括色谱技术和光谱技术。这些方法用于识别和量化八角茴香中的化学成分。

3.2.1 色谱分析方法 高效液相色谱(high-performance liquid chromatography, HPLC)法八角茴香化学成分较丰富,而含量最大且最具特色的成分是反式茴香脑和莽草酸。中国药典2020年版仅对八角茴香中反式茴香脑含量进行GC法测定,而缺乏水溶性成分评价指标,彭善贵等^[50]建立了HPLC同时测定莽草酸、反式茴香脑含量的方法,以便更科学合理地控制八角茴香的质量。欧敏等^[48]采用HPLC法对八角茴香中4种有机酸进行分析,建立了八角茴香中莽草酸、原儿茶酸、对羟基苯甲酸、对甲氧基苯甲酸含量测定方法,可用于八角茴香的质量控制。

王琴等^[49]利用气质联用(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)法分析了水蒸汽蒸馏法、有机溶剂萃取法和超临界CO₂萃取法提取的八角茴香油气相图谱和化学成分,发现3种方法萃取的八角茴香油的化学成分相似,但有机溶剂

表2 八角茴香的提取方法对比表

Table 2 Comparative analysis of extraction methods of star anise

提取方法	优点	缺点	适用范围
水蒸气蒸馏	纯净环保、安全	成本较高、热敏成分易降解	精油提取
分子蒸馏	低温提取、成分不易破坏、操作简单、能耗低、绿色环保	设备昂贵	高端精油分离
有机溶剂萃取	操作简单、成本低	溶剂用量大、提取效率低	实验室小规模提取
索氏提取	操作简单、成本低、提取率高	耗时长、溶剂消耗大;需高温加热、热敏成分易损失	实验室高纯度提取
超临界CO ₂	无溶剂残留	工艺复杂	药物与食品级提取
超声波提取	操作简单、提取工艺成本低	提取率较低	实验室小规模提取
亚临界流体正丁醇萃取	低温保护热敏成分、香气特性保留好	工艺较新、设备要求高	高价值精油提取
酶辅助提取法	高效破坏细胞壁、绿色温和、溶剂用量少	酶成本高、工艺优化复杂,需结合其他技术	需高提取效率场景

和超临界CO₂萃取的八角茴香萃取物化学成分更多。郑燕菲等^[50]利用GC-MS分别对八角茴香壳与八角茴香籽中的挥发油进行化学成分分析,结果显示八角茴香壳与籽挥发油成分中相同化合物共32种,各自占挥发油的94.03%和94.68%。在八角茴香壳与籽挥发油中,两者成分差异不大,含量最高的均为茴香脑,其次是草蒿脑。

超高效液相色谱-串联质谱法(ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, UHPLC-MS/MS)可用于同时测定八角茴香中3种治疗性黄酮类化合物和神经毒性物质茴香毒素。该方法通过使用重同位素化合物作为内标,能够快速分离和定量多种标志化合物^[51]。

气相色谱-同位素比质谱法(gas chromatography-isotope ratio mass spectrometry, GC-IRMS)可用于验证八角茴香精油的真实性,特别是检测茴香脑的掺假情况^[52]。

《中国药典》(2020版)中,利用薄层色谱法对八角茴香进行鉴定分析,最终显示相同颜色及橙色至橙红色斑点可鉴定为八角茴香。

3.2.2 光谱分析方法 傅里叶变换红外光谱(fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)是结构鉴定常用的分析方法,用于分析八角茴香精油中的化学键和官能团,如苯环、羰基和芳香醚键^[41]。

核磁共振波谱(nuclear magnetic resonance, NMR)也是结构鉴定常用的分析方法,可用于识别八角茴香精油中的主要化合物,提供分子结构信息^[53]。

3.2.3 其他分析方法 电子鼻分析法(electronic nose, E-Nose)是一种基于样品挥发性气味对样品进行检测的方法,而八角茴香油有其独特的挥发性气味,因此非常适合应用于八角茴香油的检测。建立八角茴香精油指纹图谱,从不同方面反映研究对象的主要特征,之后利用单因素方差分析、主成分分析和线性判别分析对检测结果进行聚类分析,选择较佳的参数,最后对选定的参数进行方法学考察,检测仪器在此条件下的可靠性。测定结果可应用于后续对八角茴香油的定性定量分析^[52]。

将二维色谱技术结合MaxEnt模型和化学分析,评估气候变迁对八角茴香潜在分布及质量的影响,发现土壤pH等环境因素是影响其分布的关键,预测未来其适宜栖息地将北移。同时,确定了区分不同产地八角茴香质量的潜在化学标志物,为八角茴香的资源保护、种植选址及质量控制提供了科学依据^[54]。

3.3 八角茴香加工技术

3.3.1 传统加工技术与现状 八角茴香的传统加工主要包括采收后的干燥处理,产品主要表现为干果。目前,我国八角干果加工仍以农户分散、小作坊加工模式为主,主要采用直接晒干、杀青晒干、柴火烘干、简易土炕烘干等传统技术^[3]。

杀青晒干方法具有生产成本低、干果色泽好等优点,是当前产区群众普遍使用的干燥加工方法。然而,这种方法也存在明显缺点,如过分依赖天气、人工和大型晒场等条件,如果干燥不及时,容易造成八角发霉,影响外观及食用安全性,同时

劳动强度大、耗时长、工效低^[3]。

对于采集的新鲜湿八角,需要经过杀青、晾晒或烘干等处理流程才能进入销售市场。市场上普遍会采用硫磺熏蒸方式对八角鲜果进行处理,以达到抑制霉菌和增色等目的。然而,这种做法会导致八角茴香中二氧化硫残留,长期经口摄入过量二氧化硫会对人体健康造成不良影响,包括刺激呼吸道和消化道黏膜、引起恶心和呕吐等胃肠道症状,甚至可能增加哮喘发作和脑组织损伤风险^[55]。因此,传统硫磺熏蒸法虽然效率高,但对人体伤害大,优化熏蒸技术或采用替代方法成为重要研究方向。

3.3.2 现代加工技术 近年来,随着科技进步,一些加工企业开始尝试采用大型、自动化机械设备进行规模化八角烘干加工,虽然生产效率提高,但也面临如何保持和提高八角干果产品颜色、外观和内在品质等技术问题。

微波干燥法是一种利用微波能量加热物料的干燥技术。在微波干燥过程中,微波辐射穿透物料,使物料中的极性分子如水分子在高频电磁场的作用下产生快速振荡,导致分子间摩擦生热,从而使物料内部温度升高,水分得以蒸发并从物料中移除。由于微波能够直接作用于物料内部,因此微波干燥通常比传统的热风干燥更高效,能够更快地达到干燥效果,同时还能保持物料的营养成分和风味^[56]。有研究采用连续微波干燥联合热风干燥对八角茴香进行干燥加工,探讨了不同微波加热功率及热风温度对八角粉的八角茴香油含量、色差比较、化合物成分含量、感官评价、微观结构的影响^[57]。结果发现,与自然晒干和杀青晒干等传统方法相比,该方法可提高干燥的效率,有效去除水分,缩短干燥的时间,并减少热敏性成分的降解,同时保留八角原有的香气和品质,在现代化生产中具有广阔的应用潜力^[57]。

陈路等^[58]采用臭氧预处理加工法,采收、净选之后立即进入 $2 \sim 5 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ 的臭氧进行处理,完毕之后进入干燥、分级、包装等工序,实现了无需硫磺熏蒸但能延长八角茴香保存时间的目的,且二氧化硫残留量符合GB 2760—2014《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》规定,其他各项考核指标相当于或略优于传统加工方法产品。臭氧预处理法可以在不使用有害化学物质的前提下,延长八角茴香鲜果的保存时间,明显提高了由于阴

雨天气不能及时加工处理的八角茴香产品质量,有效减少微生物污染,并降低食品加工过程中的化学污染,具有方法操作简便、安全实用、可推广的特点。

3.3.3 灭菌技术 八角茴香灭菌技术主要采用辐照技术。辐照技术是一种有效的灭菌方法,通过使用 $2 \sim 10 \text{ kGy}$ 剂量的辐照处理八角茴香,可以延长其保质期并进行微生物去污。研究显示,辐照不仅能有效灭菌,还能促进八角茴香中多酚类物质的积累,尤其是黄酮类化合物的含量显著增加^[59]。

3.3.4 包装技术及其影响 有研究比较了4种包装方法(透明密封袋、透明塑料袋、黑色避光密封袋、编织袋)对干制八角贮藏1年的影响,结果显示密封包装(透明/黑色密封袋)防潮效果显著优于非密封包装(编织袋/透明塑料袋),其中透明密封袋色泽最佳,而黑色避光密封袋可有效减少莽草酸、挥发油及反式茴香脑损失。GC-MS结合主成分分析表明,黑色密封袋样品挥发性物质得分最高,透明密封袋次之。综上,黑色避光密封袋为室温贮藏干制八角的最优方法^[60]。

4 展望

八角茴香因其丰富的化学成分及抗氧化、抗炎、抗菌等多种生物活性,为开发新型药物和药食同源大健康产品提供了重要基础。质量分析技术的进步确保了其标准化生产,而加工技术的提升优化了利用率、风味和稳定性,契合了市场对高品质药食产品的需求。尽管八角茴香的研究已有显著进展,但活性成分的高效应用、药理机制的深入解析及绿色加工技术仍待突破。

未来需进一步深化分子机制研究,借助组学技术与分子模拟手段,系统解析反式茴香脑、倍半萜内酯等核心成分在抗氧化和炎症调控中的作用机制,并通过长期安全性评价为应用提供依据。此外,八角多糖等成分的新型药物递送系统的设计有望改善其生物利用度,特别是在抗糖尿病和免疫调节等药食同源应用中展现潜力,为大健康产业提供支持。在技术革新层面,需突破单一提取方法的局限性,探索分子蒸馏与超临界 CO_2 提取技术的联合应用可否实现活性成分的高效分离与富集;微波-臭氧协同干燥等技术的优化能否在提升加工效率的同时维持营养与品质;能否开发

酶工程与绿色工艺(如固定化酶联用超临界萃取)实现高效、低耗生产;是否能以青蒿素通过工程化酵母实现工业化生产为案例,通过合成生物学和代谢工程,改造酵母用于生产莽草酸,解决“磷酸奥司他韦”原料供应瓶颈。此外,质量控制体系的完善亦为当务之急,现有标准以反式茴香脑和莽草酸为核心指标,未来需建立多组分联用检测方法(如HPLC/GC-MS),实现从原料到终端产品的全链条标准化管理。

随着对八角茴香化学成分、药理作用、质量分析及加工技术研究的持续深化,未来研究应聚焦于“成分-机制-技术-产品”的集成策略,推动八角茴香从传统香料向精准医疗和功能食品领域的跨越,八角茴香有望成为天然药物研发的典范,为中医药现代化和全球大健康产业发展提供新动能。

参 考 文 献

- [1] 李琳,戴铭. 中药八角茴香的文献考证[J]. 中药材, 2023, 46(3): 773-779.
LI L, DAI M. Textual research on *Illicium verum* L.[J]. J. Chin. Med. Mater., 2023, 46(3): 773-779.
- [2] 黄开顺,黎贵卿,安家成,等. 八角特色资源加工利用产业发展现状[J]. 生物质化学工程, 2020, 54(6): 6-12.
HUANG K S, LI G Q, AN J C, et al.. Developing situation of processing and utilization industry of characteristic resources of star anise (*Illicium verum*)[J]. Biomass Chem. Eng., 2020, 54(6): 6-12.
- [3] 马锦林,曾祥艳,李开祥,等. 广西八角产业现状及发展战略[J]. 广西林业科学, 2011, 40(4): 336-339.
- [4] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典—一部: 2020年版[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.
- [5] WEE Y C, KENG H. An illustrated dictionary of Chinese medicinal herbs[M]. Singapore: Singapore University Press, 1992.
- [6] 郭向阳. 八角茴香油化学成分、香气性能及活性研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
- [7] 段敏,王崇川,朱德强,等. 八角茴香活性成分的研究进展[J]. 齐鲁工业大学学报, 2023, 37(3): 31-36.
DUAN M, WANG C C, ZHU D Q, et al.. Research advances on the active ingredients of *Illicium verum*[J]. J. Qilu Univ. Technol., 2023, 37(3): 31-36.
- [8] IFTIKHAR N, HUSSAIN A I, KAMAL G M, et al.. Antioxidant, anti-obesity, and hypolipidemic effects of polyphenol rich star anise (*Illicium verum*) tea in high-fat-sugar diet-induced obesity rat model[J/OL]. Antioxidants, 2022, 11(11): 2240 [2025-06-30]. <https://doi.org/10.3390/antiox11112240>.
- [9] SINGH S, VERMA R. Comprehensive review on pharmacological potential of *Illicium verum*, Chinese herb[J/OL]. Pharmacol. Res. Mod. Chin. Med., 2024, 10: 100411[2025-06-30]. <https://doi.org/10.1016/j.prmcm.2024.100411>.
- [10] SABRY B A, FAROUK A, BADR A N. Bioactivity evaluation for volatiles and water extract of commercialized star anise[J/OL]. Heliyon, 2021, 7(8): e07721[2025-06-30]. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07721>.
- [11] PATRA J K, DAS G, BOSE S, et al.. Star anise (*Illicium verum*): chemical compounds, antiviral properties, and clinical relevance[J]. Phytother. Res., 2020, 34(6): 1248-1267.
- [12] HUANG D, ZHOU X, SI J, et al.. Studies on cellulase-ultrasonic assisted extraction technology for flavonoids from *Illicium verum* residues[J/OL]. Chem. Cent. J., 2016, 10(1): 56[2025-06-30]. <https://doi.org/10.1186/s13065-016-0202-z>.
- [13] 商艳丽,史荣军. 八角茴香果实中酚苷类成分的研究[J]. 中成药, 2016, 38(1): 107-110.
SHANG Y L, SHI R J. Phenolic glycosides from the fruits of *Illicium verum*[J]. Chin. Tradit. Pat. Med., 2016, 38(1): 107-110.
- [14] 袁经权,周小雷,王硕,等. 八角茴香化学成分的研究[J]. 中成药, 2010, 32(12): 2123-2126.
YUAN J Q, ZHOU X L, WANG S, et al.. Chemical constituents from *Illicium verum*[J]. Chin. Tradit. Pat. Med., 2010, 32(12): 2123-2126.
- [15] 焦方文,刘玉红,王集会. 八角属药用植物化学成分研究进展[J]. 山东中医药大学学报, 2016, 40(2): 192-194.
JIAO F W, LIU Y H, WANG J H. Research progress on chemical constituents of *Illicium* medicinal plants[J]. J. Shandong Univ. Tradit. Chin. Med., 2016, 40(2): 192-194.
- [16] ALIAS A H D, SHAFIE M H. Star anise (*Illicium verum* Hook. f.) polysaccharides: potential therapeutic management for obesity, hypertension, and diabetes[J/OL]. Food Chem., 2024, 460: 140533 [2025-06-30]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140533>.
- [17] SHU X, LIU X, FU C, et al.. Extraction, characterization and antitumor effect of the polysaccharides from star anise (*Illicium verum* Hook. f.)[J]. J. Med. Plants Res., 2010, 4(24): 2666-2673.
- [18] LUÍS Á, SOUSA S, WACKERLIG J, et al.. Star anise (*Illicium verum* Hook. f.) essential oil: antioxidant properties and antibacterial activity against *Acinetobacter baumannii*[J]. Flavour Fragr. J., 2019, 34(4): 260-270.
- [19] DING X, YANG C, YANG Z, et al.. Effects of star anise (*Illicium verum* Hook.f) oil on the nuclear factor E2-related factor 2 signaling pathway of chickens during subclinical *Escherichia coli* challenge[J]. Poult. Sci., 2020, 99(6): 3092-3101.
- [20] CAI M, GUO X, LIANG H, et al.. Microwave-assisted extraction and antioxidant activity of star anise oil from *Illicium verum* Hook.f[J]. Int. J. Food Sci. Tech., 2013, 48(11): 2324-2330.
- [21] MAJALI I. Antioxidant and anti-inflammatory activity of star anise (*Illicium verum*) in murine model[J]. Biomed. Pharmacol. J., 2022, 15(2): 1097-1108.
- [22] INTAN E K, NGETE A F, JANNAH R, et al.. Pharmacological activities of *Bunga lawang* (*Illicium verum*)[J]. Indones. J. Interdiscip. Res. Sci. Technol., 2023, 1(7): 651-660.
- [23] TUSEEF H, RAZA M L, ASSAD T. Comparative evaluation of analgesic, antipyretic & anti-inflammatory effects of various extracts of dried fruit of *Illicium verum* Hook.f (star anise) in rodents[J/OL]. Walailak J. Sci. Technol., 2021, 18(9): 1[2025-06-30]. <https://doi.org/10.48048/wjst.2021.9456>.
- [24] ASSIRY A A, KAROBARI M I, BHAVIKATTI S K, et al.. Crossover analysis of the astringent, antimicrobial, and anti-

- inflammatory effects of *Illicium verum*/star anise in the oral cavity[J/OL]. Biomed Res. Int., 2021, 2021: 5510174[2025-06-30]. <https://doi.org/10.1155/2021/5510174>.
- [25] SALEM M A, EL-SHIEKH R A, HASHEM R A, *et al.* *In vivo* antibacterial activity of star anise (*Illicium verum* Hook. f.) extract using murine MRSA skin infection model in relation to its metabolite profile[J]. Infect. Drug Resist., 2021, 14: 33-48.
- [26] 包正宇, 李耀文, 李言, 等. 八角茴香的生物学活性及其应用[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(11): 323-329.
BAO Z Y, LI Y W, LI Y, *et al.* Biological activity and application of *Illicium verum*[J]. Food Ferment. Ind., 2023, 49(11): 323-329.
- [27] LI W, WU Z, XIA Y, *et al.* Antiviral and antioxidant components from the fruits of *Illicium verum* Hook. f. (Chinese star anise)[J]. J. Agric. Food Chem., 2022, 70(12): 3697-3707.
- [28] 黄丹娜, 陈路. 八角茴香挥发油防治新型冠状病毒肺炎的潜在作用机制[J]. 广西医学, 2021, 43(6): 738-743.
HUANG D N, CHEN L. Potential mechanism of essential oils of star anise in prevention and treatment of coronavirus disease 2019[J]. Guangxi Med. J., 2021, 43(6): 738-743.
- [29] TORRES NETO L, MONTEIRO M L G, FERNÁNDEZ-ROMERO J, *et al.* Essential oils block cellular entry of SARS-CoV-2 delta variant[J/OL]. Sci. Rep., 2022, 12(1): 20639 [2025-06-30]. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25342-8>.
- [30] KIM A, IM M, MA J Y. Anisi stellati fructus extract attenuates the *in vitro* and *in vivo* metastatic and angiogenic potential of malignant cancer cells by downregulating proteolytic activity and pro-angiogenic factors[J]. Int. J. Oncol., 2014, 45(5): 1937-1948.
- [31] KIM Y S, SUH S Y, AHN Y T, *et al.* Systemic pharmacological approach to identification and experimental verification of the effect of anisi stellati fructus extract on chronic myeloid leukemia cells[J/OL]. Evid. Based Complement. Alternat. Med., 2019, 2019: 6959764[2025-06-30]. <https://doi.org/10.1155/2019/6959764>.
- [32] ABDELAZIZ M A, ALALAWY A I, SOBHI M, *et al.* Elaboration of chitosan nanoparticles loaded with star anise extract as a therapeutic system for lung cancer: physicochemical and biological evaluation[J/OL]. Int. J. Biol. Macromol., 2024, 279(Pt 1): 135099 [2025-06-30]. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135099>.
- [33] PAHORE A K, KHAN S, KARIM N. Anticancer effect of *Illicium verum* (star anise fruit) against human breast cancer MCF-7 cell line[J]. Pak. J. Med. Sci., 2023, 39(1): 70-74.
- [34] KHAN H N, RASHEED S, CHOUDHARY M I, *et al.* Antiglycation properties of *Illicium verum* Hook. f. fruit *in-vitro* and in a diabetic rat model[J/OL]. BMC Complement. Med. Ther., 2022, 22(1): 79[2025-06-30]. <https://doi.org/10.1186/s12906-022-03550-z>.
- [35] ALSWAIDANI G, ALRASHIDI R, ALZABNI L, *et al.* Neurotoxic effects of star anise in the management of infantile colic: a systematic review of case reports[J]. Int. J. Med. Dev. Countr., 2024: 3219-3223.
- [36] 于彩云, 穆阿丽, 杨在宾, 等. 水蒸气蒸馏法提取八角茴香油工艺参数的研究[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(12): 63-68.
YU C Y, MU A L, YANG Z B, *et al.* The process parameters of extracting star anise oil by steam distillation[J]. J. Chin. Cereals Oils Assoc., 2018, 33(12): 63-68.
- [37] 刘华, 葛发欢. 分子蒸馏新技术在天然产物分离和其它领域中的应用[J]. 中药材, 1999, 22(3): 152-156.
LIU H, GE F H. Application of new molecular distillation technology in natural product separation and other fields[J]. J. Chin. Med. Mater., 1999, 22(3): 152-156.
- [38] 尹团章, 邵佩, 高胜寒, 等. 分子蒸馏法制备八角茴香油轻组分及其成分分析的研究[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(2): 154-160.
YIN T Z, SHAO P, GAO S H, *et al.* Research on preparation of light components of star anise oil by molecular distillation extraction and its composition analysis[J]. J. Chin. Cereals Oils Assoc., 2025, 40(2): 154-160.
- [39] 逯家辉, 李国庆, 张华飞, 等. 八角茴香油提取工艺优化[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 254-257.
LU J H, LI G Q, ZHANG H F, *et al.* Optimization of extraction process for star anise oil[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2008, 24(6): 254-257.
- [40] CHENG H D, SUN T M. Study on the different method of extraction of star anise oil[C/OL]. E3S Web of Conferences, 2020, 213(6): 03035[2025-06-30]. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021303035>.
- [41] ZHANG G, MA Z, PIAO Y, *et al.* Revealing the potential of star anise essential oil: comparative analysis and optimization of innovative extraction methods for enhanced yield, aroma characteristics, chemical composition, and biological activities[J]. Food Sci. Nutr., 2024, 12(11): 9540-9554.
- [42] 李祯, 侯党社, 张娟, 等. 八角茴香精油的超临界萃取工艺研究[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(6): 127-130.
LI Z, HOU D S, ZHANG J, *et al.* Study on the supercritical extraction process of star anise essential oil[J]. Hubei Agric. Sci., 2022, 61(6): 127-130.
- [43] 陈秀清, 丁邦东, 毛云飞. 超临界萃取八角茴香油的研究[J]. 中国调味品, 2011, 36(10): 79-80.
CHEN X Q, DING B D, MAO Y F. The studies on the supercritical CO₂ extraction of star anise oil[J]. China Condiment, 2011, 36(10): 79-80.
- [44] LI G, SUN Z, XIA L, *et al.* Supercritical CO₂ oil extraction from Chinese star anise seed and simultaneous compositional analysis using HPLC by fluorescence detection and online atmospheric CI-MS identification[J]. J. Sci. Food Agric., 2010, 90(11): 1905-1913.
- [45] LEE A Y, KIM H S, CHOI G, *et al.* Optimization of ultrasonic-assisted extraction of active compounds from the fruit of star anise by using response surface methodology[J]. Food Anal. Meth., 2014, 7(8): 1661-1670.
- [46] 李萍, 舒展, 申晓霞, 等. 3种方法提取的八角茴香油的比较研究[J]. 食品科技, 2016, 41(12): 213-219.
LI P, SHU Z, SHEN X X, *et al.* Comparison of star anise oil extracted by three methods[J]. Food Sci. Technol., 2016, 41(12): 213-219.
- [47] IFITTAH E D, WARSITO W, NURHADIANTY V, *et al.* Extraction of *trans*-anethole from star anise (*Illicium verum*) using combination of microwave, ultrasonic, and enzyme assisted

- methods and evaluation of their antibacterial activity[J/OL]. *Indones. J. Chem.*, 2024, 24(2): 325[2025-06-30]. <https://doi.org/10.22146/ijc.79341>.
- [48] 欧敏, 潘宇, 陈路, 等. HPLC法测定广西不同产地八角茴香中4种有机酸的含量[J]. *广西中医药大学学报*, 2024, 27(1): 53-57.
- OU M, PAN Y, CHEN L, *et al.*. Determination of four organic acids in star anise from different producing areas in Guangxi by HPLC[J]. *J. Guangxi Univ. Chin. Med.*, 2024, 27(1): 53-57.
- [49] 王琴, 蒋林, 温其标, 等. 气质联用对不同提取法的八角茴香油化学成分的分析[J]. *食品工业科技*, 2006, 27(10): 189-190.
- [50] 彭善贵, 许莉, 曾桢, 等. HPLC法测定八角茴香中莽草酸和反式茴香脑含量[J]. *中国药师*, 2018, 21(9): 1665-1666.
- PENG S G, XU L, ZENG Z, *et al.*. Determination of shikimic acid and trans-anethole in *Illicium verum* by HPLC[J]. *China Pharmacist*, 2018, 21(9): 1665-1666.
- [51] PATIL A S, LI X, XU Y. Simultaneous determination of three curative flavonoids and neurotoxic anisatin in star anise fruits by ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J/OL]. *Food Chem.*, 2023, 429: 136769[2025-06-30]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136769>.
- [52] MURPHY B J, WILSON T M, ZIEBARTH E A, *et al.*. Authentication of fennel, star anise, and anise essential oils by gas chromatography (GC/MS) and stable isotope ratio (GC/IRMS) analyses[J/OL]. *Plants*, 2024, 13(2): 214[2025-06-30]. <https://doi.org/10.3390/plants13020214>.
- [53] SANDER A, BIVAL ŠTEFAN M, RADETIĆ A, *et al.*. Advanced spectroscopic characterization, antioxidant and antibacterial activity evaluation, and trace metal analyses of essential oils from star anise, nutmeg, clove, oregano, leavesbay, and lemon peel[J/OL]. *Appl. Sci.*, 2024, 14(23): 11094[2025-06-30]. <https://doi.org/10.3390/app142311094>.
- [54] GU P, LI Q, LI L, *et al.*. Habitat suitability assessment for *Illicium verum* Hook. f. (star anise) under climate change conditions, using the MaxEnt model and comprehensive 2D chromatography[J/OL]. *Agronomy*, 2024, 14(12): 2858[2025-06-30]. <https://doi.org/10.3390/agronomy14122858>.
- [55] 陈虎, 陈赛赛, 吴琼, 等. 八角茴香中二氧化硫残留量分析及安全性评价[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(13): 215-223.
- CHEN H, CHEN S S, WU Q, *et al.*. Analysis and safety evaluation of sulfur dioxide residue in *Illicium verum*[J]. *J. Food Saf. Qual.*, 2024, 15(13): 215-223.
- [56] CHEN A, ACHKAR G E L, LIU B, *et al.*. Experimental study on moisture kinetics and microstructure evolution in apples during high power microwave drying process[J/OL]. *J. Food Eng.*, 2021, 292: 110362[2025-06-30]. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110362>.
- [57] 曹笑皇, 黄艳艳, 韩聪颖, 等. 分段式微波热风干燥对八角品质及微生物安全的影响[J]. *黄河科技学院学报*, 2024, 26(5): 31-39.
- CAO X H, HUANG Y Y, HAN C Y, *et al.*. Effect of microwave linked hot air drying on quality and microbiological safety of star anise[J]. *J. Huanghe S&T Coll.*, 2024, 26(5): 31-39.
- [58] 陈路, 吴献娟, 潘富林, 等. 八角茴香产地加工方法的对比研究[J]. *现代中药研究与实践*, 2019, 33(1): 1-5.
- CHEN L, WU X J, PAN F L, *et al.*. Comparative study of processing methods of *Illicium verum* Hook. f. in production place[J]. *Res. Pract. Chin. Med.*, 2019, 33(1): 1-5.
- [59] JIA W, YANG Y, LIU S, *et al.*. Molecular mechanisms of the irradiation-induced accumulation of polyphenols in star anise (*Illicium verum* Hook. f.)[J/OL]. *J. Food Compos. Anal.*, 2022, 105: 104233[2025-06-30]. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104233>.
- [60] 施月, 王智荣, 陈涓慧, 等. 包装方式对室温储存下干制八角(*Illicium verum* Hook. f.)颜色、挥发油、莽草酸和挥发性物质的影响[J]. *食品营养化学*, 2023, 1(3): 94.
- SHI Y, WANG Z R, CHEN X H, *et al.*. Assessment of dried star anise (*Illicium verum* Hook. f.) for color, volatile oil, shikimic acid, and flavor during room temperature storage can be affected by packaging methods[J]. *J. Food Nutri. Chem.*, 2023, 1(3): 94.