DOI:10.13193/j.issn.1673-7717.2025.11.020

白芷挥发油化学成分和药理作用研究进展

秦聪聪,李玉清
(山东中医药大学中医文献与文化研究院,山东 济南 250355)

摘要:白芷临床药用广泛,其挥发油为白芷药效发挥的关键活性成分,主要由烯烃、醇、酮、酯、酸、醛、烷烃、呋喃、吲哚等化合物组成,白芷含淀粉量较大,挥发油提取时极易糊化,长期暴露易氧化,且白芷挥发油成分含量可因地区差异、栽培方法、炮制方法、提取工艺、生长环境等因素波动。白芷挥发油药用价值较高,临床可用于抗炎、止痛、镇定、抗肿瘤、抗过敏、美白和抗氧化等。查阅国内外白芷挥发油相关文献,对白芷挥发性成分进行系统收集、归纳,分析影响白芷挥发油成分含量的因素及其稳定性,研究白芷挥发性成分的药效及作用机制,旨在为白芷及其挥发油进一步研究及开发利用提供参考。

关键词:白芷;挥发油;药理作用;影响因素
中图分类号:R285.5 **文献标志码**:A **文章编号**:1673-7717(2025)11-0090-08

Research Progress on Chemical Constituents and Pharmacological Effects of Volatile Oil from Baizhi(Radix Angelicae Dahuricae)

QIN Congcong, LI Yuqing
(Institute of Traditional Chinese Medicine Literature and Culture, Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250355, Shandong, China)

Abstract: Baizhi(Radix Angelicae Dahuricae) is widely used in clinical medicine. Its volatile oil is the key active ingredient. It is mainly composed of olefins, alcohols, ketones, esters, acids, aldehydes, alkanes, furans, indoles and other compounds. Baizhi(Radix Angelicae Dahuricae) contains a large amount of starch. It is easy to gelatinize when extracting the volatile oil, and it is easy to oxidize after long-term exposure. The contents of volatile oil in Baizhi(Radix Angelicae Dahuricae) can fluctuate due to regional differences, cultivation methods, processing methods, extraction processes, growth environment and other factors. The volatile oil of Baizhi(Radix Angelicae Dahuricae) has high medicinal value. It can be used for anti-inflammation, relieving pain, calming, anti-tumor, anti-allergy, whitening and anti-oxidation in clinic. The volatile oil components of Baizhi(Radix Angelicae Dahuricae) were systematically collected and summarized by consulting the relevant literature of volatile oil of Baizhi(Radix Angelicae Dahuricae) at home and abroad. The factors affecting the contents of volatile oil of Baizhi(Radix Angelicae Dahuricae) and their stability were analyzed, and the efficacy and mechanism of volatile oil of Baizhi(Radix Angelicae Dahuricae) were studied. The aim is to provide reference for further research and development and utilization of Baizhi(Radix Angelicae Dahuricae) and its volatile oil.

Keywords: Baizhi(Radix Angelicae Dahuricae); volatile oil; pharmacological effects; influencing factors

中药白芷 *Angelica dahurica* (Fisch. ex Hoffm.) Benth. & Hook. f. ex Franch. & Sav. 属于伞形目、伞形科的多年生草本植物,药用主要为其干燥根部。味属辛,性乃温,归属于脾、胃及肺经,能够表散风寒,祛风胜湿,宣通鼻窍,燥湿止带,排脓消肿,燥湿止痒,临床上常用于治疗风寒感冒,头风、牙痛、风湿痹病,鼻渊,女性带下,疮痈肿毒等疾病。白芷最早出现在《离骚》中:“菉蘋齐叶兮,白芷生”[1],是临床常用中药,种植范围广泛,我国西南、东北、华北地区均有生产,常生长于林下、林缘、溪旁、灌丛及山谷地,中国北方各省也常栽培用于药用[2]。经现代研究,已发现白芷富含挥发油、有机酸、多糖和氨基酸等多种化合物[3],白芷挥发油是从白芷根中提取的一种具有挥发性的芳香物质,富含多种功效,包括抗炎、止痛、镇定、抗肿瘤、抗过敏、美白和抗氧化等,具有极高的药用价值[4-6]。白芷挥发油发展前景广阔,对近10年来白芷挥发油化学成分、影响化学成分的诸多因素、药理作用及作用机制梳理总

基金项目:国家自然科学基金项目(81873220,81173183);山东中医药大学中医药古籍挖掘和保护条件提升项目(GZY-KJS-2022-021)
作者简介:秦聪聪(1997-),女,山东济宁人,博士在读,研究方向:中医文献古籍整理。
通讯作者:李玉清(1969-),女,山东临沂人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向:中医文献古籍整理。E-mail:dlm12138@163.com。

结,旨在为白芷挥发性成分的深入研究和临床应用提供参考。

1 白芷挥发油化学成分

关于白芷干燥根茎的挥发油成分研究众多,不同种类、不同地区及加工处理方式均可导致白芷挥发油成分含量区别。鲜白芷挥发油中主要含有十二碳醇、1-十五烯醇、罗勒烯及萜品烯[5],茶陵白芷挥发油中醇类及烷烃类占比较高[7]。纵使白芷种类繁多,但其挥发油中的化学成分大致相似。研究报告总结显示,目前已经鉴定出一百多种化学成分,主要有烯烃、醇、酮、酯、酸、醛、烷烃、醚、芳香族化合物等,此外,亦含括吡啶、呋喃、吲哚等化合物[8-9]。

1.1 烯烃类 白芷挥发油主要成分是烯烃类化合物,目前,共检测出 37 种烯烃类化合物。据报道,月桂烯、罗勒烯、萜品烯、橄香烯、1-石竹烯、α-香柑油烯、大根香叶烯、a-古芸烯的浓度较高,其浓度均超过 1%[5],其中萜品烯、1-石竹烯为治疗心肌缺血再灌注损伤、黑色素瘤、局灶性脑缺血再灌注损伤的主要活性物质[10]。白芷挥发油中烯烃化合物范围广泛,其相对含量差异较大,可能受到多种因素影响,包括不同检测方法、药材产地以及生长环境等因素[11]。白芷挥发油中烯烃类化合物以兴安白芷含量最高(42.787%),杭白芷(28.727%)和亳白芷(25.053%)次之,川白芷最低(2.103%)[12]。表 1 列出白芷挥发油中烯烃化合物。

1.2 醇类 目前,白芷挥发油中共鉴定得到 28 个醇类化合物,其数量微低于烯烃类,是白芷挥发油中重要活性成分。十二碳醇、1-十三醇、1-十五烯醇、Z-9-十五碳烯醇、油醇为白芷挥发油中含量较高的醇类成分[4]。不同产地白芷挥发油成分差别含量较大,杭白芷(14.648%)和祁白芷(11.169%)中醇类化合物含量最高[12],茶陵白芷中十五烷醇、十二烷醇与油醇的含量较高[7]。白芷醇类化合物中松油醇属于单萜醇,具有免疫调节和神经保护作用,与大麻素受体Ⅰ(Cannabinoid receptor Ⅰ,CB1)、大麻素受体Ⅱ(Cannabinoid receptor Ⅱ,CB2)及 D2-多巴胺受体分子对接可发挥抗抑郁功效;人参炔醇的药理效应较多,含抑菌抗炎、镇静镇痛、升压及抗癌等[18]。汤建等[19]研究表明白芷挥发油中十四烷醇与 2-甲基-2-己醇是白芷发挥抗炎、镇痛的关键成分。表 2 列出白芷挥发油中醇类化合物。

1.3 酯类 酯类化合物含独特香气特征,在香料和挥发油成分中占据关键地位。酯类化合物广泛分布于自然界,具有抗菌、抗氧化等活性。经鉴定,白芷挥发油包含 20 种脂类化合物,其中亚油酸异丙酯、邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二异辛酯及棕榈酸十八烷基酯含量较高[8]。研究表明亚油酸异丙酯可减弱巨噬细胞分泌白细胞介素-1(Interleukin-1,IL-1)、白细胞介素-6(Interleukin-6,IL-6)、肿瘤坏死因子 α(Tumor necrosis factor-α,TNF-α)和白细胞介素-8(Interleukin-8,IL-8)等相关炎性因子,兼具体外抗炎活性[20]。产地是影响亳州白芷脂类挥发油含量的重要因素之一,土壤的营养成分和微量元素的含量会直接影响植物的生长和代谢过程,进而影响脂类挥发油的合成和积累,亳州白芷中脂类挥发油含量较高[21]。表 3 列出白芷挥发油脂类化合物。

表 1 白芷挥发油中烯烃类化合物

中文名	英文名	结构式	参考文献
(+)-喇叭烯	(+)-hornene	$C_{15}H_{24}$	[6]
(Z)-3,7-二甲基-1,3,6-十八烷三烯	(Z)-3,7-dimethyl-1,3,6-octadecanetriene	$C_{10}H_{16}$	[6]
1,13-十四碳二烯	1,13-tetradecadiene	$C_{14}H_{26}$	[6]
1-十六烯	1-hexadecene	$C_{16}H_{32}$	[6]
1-石竹烯	1-caryophyllene	$C_{15}H_{24}$	[6]
2,6-二甲基-2,4,6-辛三烯	2,6-Dimethyl-2,4,6-octatriene	$C_{10}H_{16}$	[6]
4-蒈烯	4-carene	$C_{10}H_{16}$	[6]
a-古芸烯	a-guruene	$C_{15}H_{24}$	[6]
a-香柑油烯	a-olefins	$C_{15}H_{24}$	[6]
α-菲兰烯	α-phenylene	$C_{10}H_{16}$	[6]
α-金合欢烯	α-alloyrene	$C_{15}H_{24}$	[6]
α-蒎烯	a-pinene	$C_{10}H_{16}$	[6]
α-新丁香三环烯	α-neoclovene	$C_{15}H_{24}$	[6]
α-衣兰油烯	α-isalanolene	$C_{15}H_{24}$	[6]
β-金合欢烯	β-farnesene	$C_{15}H_{24}$	[6]
β-马阿里烯	β-maaliene	$C_{15}H_{24}$	[6]
β-石竹烯	β-caryophyllene	$C_{15}H_{24}$	[7]
β-甜没药烯	β-bisabolene	$C_{15}H_{24}$	[7]
δ-杜松烯	δ-cadinene	$C_{15}H_{24}$	[7]
别罗勒烯	alloocimene	$C_{10}H_{16}$	[7]
大根香叶烯	germacrene macrorhiza	$C_{15}H_{24}$	[7]
杜松三烯	truzontriene	$C_{15}H_{22}$	[7]
杜松烯	cadinene	$C_{15}H_{24}$	[7]
反-水合倍半香桧烯	trans-hydrated sesquisabinene	$C_{15}H_{26}O$	[7]
橄香烯	olivine	$C_{15}H_{24}$	[8]
花侧柏烯	cuparene	$C_{15}H_{22}$	[8]
罗汉柏烯	thujopsene	$C_{15}H_{24}$	[8]
罗勒烯	ocimene	$C_{10}H_{16}$	[8]
葎草烯	humulene	$C_{15}H_{24}$	[12]
柠檬烯	limonene	$C_{10}H_{16}$	[12]
十八烯	octadecylene	$C_{18}H_{36}$	[13]
石竹烯氧化物	caryophyllene oxide	$C_{15}H_{24}O$	[13]
水芹烯	phellandrene	$C_{10}H_{16}$	[13]
甜没药烯	bisabolene	$C_{15}H_{24}$	[14]
萜品烯	terpinene	$C_{10}H_{16}$	[14]
月桂烯	myrcene	$C_{10}H_{16}$	[15]
长叶蒎烯	longifolene	$C_{15}H_{24}$	[16]

1.4 醛酮类 白芷挥发油中的醛酮类化合物主要是肉豆蔻醛、月桂醛、E-14-十六烷烯醛、十四碳醛,白芷挥发油已鉴定醛酮类化合物 17 种,占总白芷挥发油含量约 1%。醛酮类化合物是一类具有醛基和酮基的有机化合物,因其具有独特香气和味道,常用于香料制作、化妆品制作、药物合成等领域[22]。研究表明,肉豆蔻醛能将小鼠脑内的 5 羟色胺(5-hydroxytryptamine,5-HT)含量升高,具备抗抑郁功效[23]。月桂醛对大肠杆菌、放线菌霉菌、酵母菌、枯草芽孢杆菌和金黄色葡萄球菌均有抑菌作用,是研发解热抗炎镇痛药物的核心关键成分[24]。表 4 为白芷挥发油中醛酮类化合物。

1.5 烷烃类 烷烃,一类碳原子通过碳碳单键连接形成的化合物,根据其结构可划分为环状与链状两大类,广泛应用于化

表 2 白芷挥发油所含醇类化合物

中文名	英文名	结构式	参考文献
(E)9-十八碳烯醇	(E)9-Octadecenol	$C_{18}H_{36}O$	[6]
(Z)-2-十三(碳)烯醇	(Z)-2-tridecen-1-ol	$C_{13}H_{26}O$	[6]
1-α-松油醇	1-α-terpineol	$C_{10}H_{18}O$	[7]
1-癸醇	1-decanol	$C_{10}H_{22}O$	[7]
1-十三醇	1-tridecanol	$C_{13}H_{28}O$	[7]
1-十五烯醇	1-pentadecenol	$C_{15}H_{32}O$	[8]
1-十一醇	1-undecanol	$C_{11}H_{24}O$	[6]
2-[(Z)-十八碳-9-烯氧基]乙醇	2-[(Z)-octadec-9-enoxy]ethanol	$C_{18}H_{34}O$	[12]
2-甲基-2-己醇	2-methyl-2-hexanol	$C_7H_{16}O$	[6]
4-萜烯醇	4-terpineol	$C_{10}H_{18}O$	[13]
5,8,1-十七碳三烯醇	5,8,1-heptadecatrienol	$C_{20}H_{34}O_2$	[12]
9,12,15 十八碳三烯醇	9,12,15 octadecatrienol	$C_{18}H_{32}O$	[8]
Z-9-十五碳烯醇	Z-9-pentadecenol	$C_{15}H_{30}O$	[8]
α-杜松醇	α-cadinol	$C_{15}H_{26}O$	[8]
α-松油醇	α-trepineol	$C_{10}H_{18}O$	[6]
β-杜松醇	β-cadinol	$C_{15}H_{26}O$	[7]
β-芫荽油醇	β-coriander oleyl alcohol	$C_{10}H_8O$	[6]
人参炔醇	panaxynol	$C_{17}H_{24}O$	[7]
十八(烷)醇	stearyl alcohol	$C_{18}H_{38}O$	[6]
十二碳醇	1-dodecanol	$C_{12}H_{26}O$	[12]
十二烷醇	dodecyl alcohol	$C_{12}H_{26}O$	[12]
十六(烷)醇	cetyl alcohol	$C_{16}H_{34}O$	[13]
十三烷醇	tridecyl alcohol	$C_{13}H_{28}O$	[6]
十四醇	tetradecyl alcohol	$C_{14}H_{30}O$	[12]
十四烷醇	myristyl alcohol	$C_{14}H_{30}O$	[6]
十五烷醇	pentadecyl alcohol	$C_{15}H_{32}O$	[12]
十一(烷)醇	undecanol (alkyl) alcohol	$C_{13}H_{28}O$	[12]
油醇	oleyl alcohol	$C_{18}H_{36}O_2$	[6]

表 3 白芷挥发油脂类化合物

中文名	英文名	结构式	参考文献
3-甲基-十六烷基丁酸酯	3-methyl-hexadecyl butyrate	$C_{21}H_{42}O_2$	[7]
8,11 亚油酸甲酯	methyl 8,11-octadecadienoate	$C_{19}H_{36}O_2$	[12]
Z-11 十四碳烯酸	Z-11 tetradecenoic acid	$C_{14}H_{26}O_2$	[6]
丙二醇油酸酯	propylene glycol oleate	$C_{21}H_{40}O_4$	[14]
二十一烷基甲酸酯	undecyl formate	$C_{22}H_{44}O_4$	[15]
环十五内酯	exaltolide	$C_{15}H_{28}O_2$	[6]
邻苯二甲酸二丁酯	dibutylphthalate	$C_{15}H_{22}O_4$	[6]
邻苯二甲酸二辛酯	dioctyl phthalate	$C_{24}H_{38}O_4$	[16]
邻苯二甲酸二异丁酯	diisobutyl phthalate	$C_{16}H_{22}O_4$	[6]
邻苯二甲酸二异辛酯	diisocapryl phthalate	$C_{15}H_{22}O_4$	[17]
亚油酸甘油三酯	triacylglycerol octadecadienoate	$C_{21}H_{38}O_4$	[17]
十二烷酸甲基乙酯	methyl ethyl dodecanoate	$C_{10}H_{18}O$	[17]
十二烷酸十二烷基酯	dodecyl dodecanoate	$C_{24}H_{48}O_2$	[12]
十二烷酸十四烷基酯	tetradecyl dodecanoate	$C_{25}H_{52}O_2$	[6]
十六碳酸乙酯	ethyl hexadecanate	$C_{18}H_{36}O_2$	[12]
亚油酸异丙酯	isopropyl linoleate	$C_{19}H_{36}O_2$	[6]
月桂醇醋酸酯	lauryl alcohol acetate	$C_{14}H_{28}O_2$	[6]
棕榈酸十八烷基酯	octadecyl palmitate	$C_{34}H_{66}O_2$	[6]
棕榈酸十四烷基酯	tetradecyl palmitate ester	$C_{30}H_{50}O_2$	[13]
棕榈酸乙烯基酯	vinyl palmitate ester	$C_{18}H_{34}O_2$	[12]

表 4 白芷挥发油醛酮类化合物

中文名	英文名	结构式	参考文献
(Z)-9-十八烯醛	(Z)-9-octadecenal	$C_{18}H_{34}O$	[6]
(Z)—氧代环十七碳—8-烯-2-酮	(Z)-oxocycloheptadeca-8-en-2-one	$C_{16}H_{28}O_2$	[6]
1-(2,6 二甲基-1-萘基)乙酮	1-(2,6-dimethyl-1-naphthyl) ethanone	$C_{12}H_{10}O_3$	[6]
2-羟基环十五烷酮	2-hydroxycyclopentadecanone	$C_{15}H_{28}O_2$	[6]
E-14-十六烷烯醛	E-14-hexadecenal	$C_{14}H_{30}O$	[6]
Z-11 十五碳烯醛	Z-11 pentadecenal	$C_{15}H_{28}O$	[6]
反式-2-癸烯醛	trans-2-decenal	$C_{10}H_{18}O$	[6]
癸醛	decylaldehyde	$C_{10}H_{20}O$	[12]
肉豆蔻醛	myristaldehyde	$C_{14}H_{28}O$	[15]
十二碳醛	12-carboxaldehyde	$C_{12}H_{24}O$	[15]
十三碳醛	tridecanoic aldehyde	$C_{13}H_{26}O$	[15]
十四碳醛	tetradecanal	$C_{14}H_{28}O$	[16]
十一醛	undecanal	$C_{11}H_{22}O$	[17]
辛醛	caprylic aldehyde	$C_8H_{16}O$	[17]
3-戊烯-2-酮	3-penten-2-one	C_5H_8O	[15]
氧杂环十七烷-2-酮	oxacycloheptadecane-2-one	$C_{16}H_{30}O_2$	[15]
月桂醛	lauric aldehyde	$C_{12}H_{24}O$	[15]

表 5 白芷挥发油烷烃类化合物

中文名	英文名	结构式	参考文献
1,2,2-三甲基环十一烷	1,2,2-trimethylcycloundecane	$C_{14}H_{28}$	[6]
1,6-二烯环十烷	1,6-diencyclodecane	$C_{10}H_{16}$	[6]
2,6,10-三甲基十四烷	2,6,10-trimethyltetradecane	$C_{17}H_{35}O$	[6]
二十七碳烷	heptadecane	$C_{27}H_{56}$	[6]
环十二碳烷	cyclododecane	$C_{12}H_{24}$	[15]
环十六烷	cyclohexadecane	$C_{16}H_{32}$	[17]
环十四烷	cyclotetradecane	$C_{14}H_{30}$	[18]
壬基环丙烷	nonylcyclopropane	$C_{12}H_{24}$	[18]
十六烷	hexadecane	$C_{16}H_{34}$	[19]
十七烷基环氧乙烷	heptadecyl ethylene oxide	$C_{19}H_{38}O$	[19]
十四烷基环氧乙烷	tetradecyl ethylene oxide	$C_{16}H_{32}O_2$	[19]
正十三烷	n-tridecane	$C_{13}H_{28}$	[19]

学工业与能源领域[25]。白芷挥发油中共鉴别出烷烃类化合物 12 种,环十四烷、十四烷基环氧乙烷及壬基环丙烷含量较高[17]。白芷挥发油烷烃类化合物的药理作用尚待深入探究,白芷挥发油中烷烃类成分详见表 5。

1.6 其他 此外,白芷挥发油还含有醛酸类、醚类、吡啶、胺类、奠类、呋喃、吲哚、酚类化合物等成分。如(2E)2-十六碳烯酸、(Z)-11-十六碳烯-1-乙酸盐、2,2′-亚甲基双-(4-甲基-6-叔丁基苯酚)、2-甲基六氢化吲哚、2-甲氧基-4-甲基-1-(1-甲基乙基)苯、3,4-二乙基联二苯、3-甲酰基-6-甲基-7-氮杂吲哚、4-异丙基甲苯、Z-11 十四碳烯酸、榄香素、软木花椒素、十六碳酸、石竹素、石竹烯氧化物、樟脑萜、棕榈酸等[13,26],目前,对白芷挥发油成分含量和药效研究相对有限,一方面,由于白芷挥发油的复杂性,对其成分进行准确定量分析仍存在一定挑战;另一方面,对于白芷挥发油药理活性研究还需要深入探讨,包括其作用机制、生物利

用度、毒性和安全性等。

2 白芷挥发油化学成分影响因素

2.1 不同产地白芷挥发油成分比较 西汉末年,白芷产地就有记载,《范子计然》言白芷“出齐郡”[27],即今之山东。据历代本草记载,白芷原产于山东、河南、河北及山西晋城一带,三国时期变迁为江苏、浙江、福建、广东、广西、江西、安徽、湖北等地[28]。《图经本草》云:“吴地尤多”[29];《本草衍义》载:“出吴地者良”,由此可知,自宋朝起,江浙一带的白芷成主流商品趋势[30]。我国白芷存在南北两地药用的情况,南方江浙一带及北方山西晋城一带为白芷的道地产区,但由于历史变迁,北方白芷主产地已由山西一带变为现今河北、河南,形成现在的祁白芷、禹白芷[31]。明清时代各地将白芷从浙江引进种植业,民国时期,杭、川、禹三大产区逐渐形成[32],杭白芷因城市扩张和经济发展等原因被广泛引种到南方其他省市,如四川遂宁、安岳、南充、达县等地,成为川白芷的主要产地[33]。白芷因基原、地理环境、气候、栽培方式、加工方式、采收时间不同,其挥发油含量、化学成分构成及各成分比重均有明显差异。张世洋等[15]首次利用水蒸气蒸馏法和气质联用技术,对川白芷、亳州白芷、禹白芷、杭白芷、山东白芷和祁白芷 6 种不同产地的白芷挥发性成分作了比较分析,结果表明杭白芷、亳州白芷中烯类化合物占比较大,分别为 21.15%、23.04%,推测因浙江、安徽等地气温适宜,光照较多,雨量丰沛,空气湿润,播种与采收时期均为最佳时期,有利于白芷挥发油成分的积累。祁白芷、山东白芷中醇类化合物占比较多,分别为 68.37%、63.22%,推测是因为河北、山东两地为温带大陆性气候,四季温差较大所致。不同地区白芷挥发油含量各有其特点,杭白芷的十二醇与十四醇含量均低于其他 5 种产地的白芷[34]。祁白芷、山东白芷和禹白芷的酮类化合物、醛类化合物及烷烃类化合物含量均低于其余 3 种产地的白芷[35]。经聚类[33],川白芷和亳州白芷聚成一类,山东白芷、禹白芷和祁白芷聚为一类,杭白芷单独为一类,可见较之基原因素,各地白芷挥发油成分含量可能与加工、种质资源质量、栽培、气候、产地等因素更具相关性[15]。张强等[36]使用气相色谱-质谱联用技术对杭白芷挥发油化学成分进行了分析,研究结果显示,杭白芷中含有较高含量的壬基环丙烷、α-蒎烯和 1-十四碳醇,分别占 44.8%、14.1% 及 5.1%。姚川等[2]使用 HP5970BMSD 气质联用仪对兴安白芷挥发性成分分析鉴定,发现兴安白芷中含量较高的化合物是甲基环癸烷和 1-十四碳烯,分别占比 12.4% 和 10.9%。川白芷挥发油特点是其主要成分为有机酸类、碳烯类和醇类化合物,其含量约占整个挥发油的 60%~85%[37]。以上这种差异可作为不同品种白芷挥发油成分鉴定的依据之一。

2.2 不同炮制方法白芷挥发油成分比较 白芷的炮制工艺主要分为煨、浸泡、清炒、焙、净制、加辅料制和与他药同制 7 个方面。近年来,学者主要集中研究白芷炮制工艺参数,其主要针对生白芷进行。药材在干燥加工过程中,会发生多种不同的化学反应,包括转化、分解和合成等。加工工艺、加工设备和操作条件差异会导致药材粒度的不同,影响其药效成分释放和药材活性成分的稳定性。CAO G 等[38]采用吹扫捕集技术和二维气相色谱-飞行时间质谱联用技术研究了硫黄熏蒸对白芷的影响,结果表明硫黄熏蒸可以减少白芷挥发性化合物,并产生新的硫化产物。实验研究发现,白芷中 32 种挥发性化合物在硫黄熏蒸后消失,12 种硫化化合物只存在于硫黄熏蒸过的白芷中,主要因为硫黄熏蒸过程中二氧化硫与白芷中不稳定成分如挥发油类等发生了氧化还原反应,因此硫黄熏蒸后白芷部分挥发性化合物消失[39]。周冰[40]研究了不同加工方法对白芷挥发油成分影响,结果显示晒干法的白芷挥发油总量较多,且挥发性成分数量也比阴干法多。推测阴干干燥时间约为晒干干燥时间的两倍,致使白芷挥发性成分大量损失所致。经实验,恒温干燥:热风恒温干燥:RF50 ℃ > IRF60 ℃ > RF70 ℃,其中 RF70 ℃总量 RF459C > 约为 RF50 ℃的一半;中波红外恒温干燥:ZBHW45 ℃ > ZBHW50 ℃ > ZBHW60 ℃ > ZBHW70 ℃,可见白芷挥发油在低温干燥中保留其总量成分较多,升高干燥温度时,白芷挥发性成分含量下降,推测多因干燥升温后白芷挥发性成分蒸发所致[41]。实验结果显示白芷挥发油在热风变温干燥条件下含量较高,而在恒温干燥条件下含量与温度成反比[42]。外观评价显示,白芷挥发油最佳热风温度为 50 ℃,其次是晒干、阴干、中波红外 50 ℃。将外观、干燥时间和功效成分含量进行综合考量,控温控湿热风干燥机为禹白芷的最佳炮制方式,该机器的适宜温度为 50 ℃,排湿湿度为 35%[40]。赵恒等研究了杭白芷受到硫熏、石灰埋藏、烘干、晒干等四种传统加工处理方法对其化学成分产生的影响,研究结果显示,加工方法对杭白芷质量具有显著影响。白芷经暴晒后指标性成分占比最高,硫黄熏蒸白芷的含量则最低。因此,研究者认为,杭白芷最佳加工方法应选择石灰埋藏或晒干[43]。戴跃进等[44]研究、分析了川白芷的采收和加工过程,结果表明经硫黄熏制后的川白芷,其指标性成分和挥发油成分含量均低于加工前成分的 50%。白芷挥发油含量受干燥温度的影响较大,在恒温干燥条件下,挥发油含量越低温度越高,相比于热风恒温干燥,热风变温干燥整体上更为优越。此外,经对比,白芷中波红外 45 ℃和 50 ℃干燥效果优于热风白芷干燥效果[40,45]。

2.3 不同部位白芷挥发油成分比较 采用气相色谱质谱联用法分析白芷块茎、根茎组成部位挥发油获得率,结果分别为 6.1% 以及 7.5%。白芷的块茎和根茎中含有不同比例的挥发油化合物,块茎中共有 51 种化合物,占总量的 75.00%,而根茎中则有 59 种化合物,占总量的 86.76%[44]。其中以十二(烷)醇、邻苯二甲酸二异辛酯、十六碳酸含量最大,其中块茎主成分主要为(E)9-十八碳烯醇 0.50%,2,2′-亚甲基双-(4-甲基-6-叔丁基苯酚)0.64%,月桂醇醋酸酯 0.85%,Z-11 十四碳烯酸 1.16%,十六碳酸 1.60%,邻苯二甲酸二异辛酯 4.85%,十二(烷)醇 56.01%。根茎中 2,2′-亚甲基双-(4-甲基-6-叔丁基苯酚)1.03%,人参炔醇 1.14%,亚油酸异丙酯 1.59%,月桂醇醋酸酯 1.65%,Z-11 十四碳烯酸 1.68%,十六碳酸 4.15%,邻苯二甲酸二异辛酯 7.29%,十二(烷)醇 43.20% 为其主要成分[13]。杭白芷根的分泌道为裂生型,分泌道腔道是挥发油积累的关键场所[46]。在分泌道发育成熟阶段,通过组织化学定位和电镜观察发现杭白芷分泌道腔道和分泌细胞均为白芷挥发油的主要积累场所,这为揭示白芷挥发油合成途径和调控机制提供科学依据[34]。通过对白芷

根、茎、叶横切面观察可知，分泌结构是药用成分挥发油等细胞内含物合成和积累的主要部位，多分布在根的皮层和韧皮部、茎的维管束附近以及叶脉维管束上下的薄壁组织中。白芷挥发油主要分布在皮层和韧皮部，而根部的挥发油含量高于茎和叶，叶部的挥发油含量最低[47]。中医传统理论认为白芷的部位用药是长圆锥形根部，然茎、叶中亦含有白芷挥发油性成分，尚需对白芷药用价值进一步合理利用。

2.4 不同工艺提取白芷挥发油成分比较 超临界 CO_2 萃取法和水蒸气蒸馏法为目前提取白芷挥发油关键应用方法。白芷经乙醚、乙醇冷浸后加正己烷、无水乙醇、经正已烷、经乙醇冷浸后加乙醚不同溶剂超声处理后挥发油含量分别占总挥发油的 89.73%、79.39%、86.93%、78.43% 及 82.96%，可见，白芷挥发油采用乙醚超声辅助处理所得的产油量最高，这清楚表明乙醚在超声辅助处理中的重要性[48]。舒任庚等[49]研究不同方法提取白芷挥发性成分显示，微波辅助水蒸气蒸馏较之单纯水蒸气蒸馏法提取得到的挥发性成分更多（59 种 vs. 37 种），微波辅助水蒸气蒸馏提取时间为 5 h，而水蒸气蒸馏法则可缩至 4 h。白芷挥发油淀粉含量较高，在提取过程中容易发生糊化现象，故提取时需采取一系列措施防止糊化发生。此外，白芷挥发油长时间暴露在空气中易氧化变质，导致挥发油活性成分品质下降。因此，在提取完成后，需要采取措施来保护挥发油的品质，如密封保存、避光存放等。高温环境下进行白芷水蒸气蒸馏提取时，需要控制温度、时间，以免不稳定成分分解。崔秋兵等[50]研究认为白芷挥发油提取最佳工艺是超临界 CO_2 萃取法；通过气质联用法（Gas chromatography - mass spectrometry，GC - MS）分析，发现其中有 86 种挥发性成分，香豆素类占比最高，46.15%，醇类含 23.08%，脂肪酸类含 15.38%，其他成分约含 15.39%。杨祖金等[51]对比分析了超临界 CO_2 萃取法和其他萃取法的差异，结果证实超临界 CO_2 萃取法具有高收率、低温操作和有效防止易氧化的挥发性组分等优点。然而，该方法也存在一些局限性，例如高压操作有极高的设备和操作技术要求，且极性大、结合能力强的白芷挥发性成分不易被提取。

2.5 白芷挥发油稳定性 白芷挥发油的稳定性受诸多因素的影响。一是提取时易乳化，乳化液中的主要成分对乙烯基愈创木酚具有含氧基团、易与氢键结合，亲水性强，该成分与乳化液浊度呈正相关，是造成挥发油乳化的主要成分[52]。二是白芷富含淀粉，容易糊化，提取过程操作不便，长时间暴露在室温下易氧化变质，同时某些不稳定成分易分解，从而影响挥发油性质。光照和氧气等外部条件均会加速其异构化进程，稳定性较差[53]。黄培池[54]研究表明白芷挥发油最佳提取工艺为：粉碎粒度为 65 目，液料比为 20∶1（mL/g），浸泡时间为 2.3 h，提取时间为 5.4 h，在此条件下挥发油得率为 2.273%。对羟自由基的 IC_{50} 为 0.882 mg/mL，对 1，1 - 二苯基 - 2 - 三硝基苯肼（1，1 - diphenyl - 2 - picryl - hydrazyl radical，DPPH）自由基的 IC_{50} 为 0.722 mg/mL，具有较好的抗氧化作用。白芷挥发油作药用时，常以包合物形式入药，以维持其稳定性[55]。

3 药理作用研究进展

3.1 抗炎 白芷味辛性温，其挥发油主要通过减少血清中一氧化氮合酶（Nitric oxide synthase，NOS）等活力而发挥抗炎、抑菌作用。孙守坤等[56]进行了白芷总挥发油对佐剂性关节炎大鼠肿胀影响的研究，结果显示，与对照组相比，白芷挥发油组能够降低血清中 NOS 活力，减少一氧化氮（Nitric oxide，NO）、TNF - α 和前列腺素（Prostaglandin E2，PGE2）含量，从而改善佐剂性关节炎大鼠的右后足肿胀程度。川芎、白芷是治疗疮疡肿毒的常用药对，毛应岚等[57]研究发现川芎、白芷精油可降低豚鼠炎性组织中 PGE2，前列腺素 D2（Prostaglandin D2，PGD2）含量，减弱白细胞介素 - 1β（Interleukin - 1β，IL - 1β）、TNF - α 水平，减缓末梢微血管的扩张，二者可协同配伍抑制白细胞三烯类和白细胞介素类炎症介质。马拉色菌是一种酵母样真菌，常驻于温血动物和人类皮肤表面，引发多种疾病，如特应性皮炎、寻常痤疮、多花斑癣、脂溢性皮炎、银屑病和马拉色菌性毛囊炎。有学者证实对于糠秕马拉色菌，白芷挥发油抑菌活性强于安息香油、香薷油和丁香油，而对于合轴马拉色菌，白芷挥发油抑菌效果较弱[58]。

3.2 镇痛、镇静 白芷在传统中医药中被广泛应用于治疗各种疼痛，在治疗头面部疼痛等方面，白芷的使用频率较高。倪红霞等研究了白芷挥发油对大鼠偏头痛的影响及其作用机制，结果显示，与对照组相比，白芷挥发油组能够有效减少偏头痛大鼠甩头、前肢挠头和后腿拍脸次数，主要作用机制是通过降低血清和脑组织中 NO 水平及血浆中钙调素基因相关肽（Calcitonin gene related peptide，CGRP）和内皮素（Endothelin，ET）水平来实现的。研究还发现，随着剂量增加，白芷挥发油效果越来越明显[59]。高小坤等[60]研究人员将小鼠随机分为白芷香豆素组、白芷挥发油组和对照组，以观察白芷挥发油的镇静、镇痛效果，结果表明白芷挥发油组对小鼠扭体次数的抑制效果显著优于其他两组。小鼠热板法实验表明白芷总挥发油对小鼠热板反应有明显的抑制作用，说明白芷总挥发油对热刺激引起的伤害性反应有一定的镇痛作用；小鼠扭体实验表明白芷总挥发油能明显抑制扭体反应，可见其对冰醋酸引起的疼痛有一定的镇痛作用[61]。薛艳萍等[62]对比了白芷总香豆素和白芷挥发油的抗炎镇痛效果，发现白芷总香豆素能够显著减轻二甲苯引起的小鼠耳廓肿胀，而白芷挥发油对抑制小鼠腹腔毛细血管通透性效果更为显著。聂红等[63]研究发现白芷挥发油可提高 β 内啡肽和 NO 含量，从而显著增加下丘脑和脑干促阿片 - 黑素细胞皮质素原（Pro - opiomelanocortin，POMC）信使 RNA（Messenger RNA，mRNA）表达阳性细胞数量，这通过增加中枢 POMC m RNA 表达阳性细胞数量和内源性镇痛物质含量来实现，从而激活内源性镇痛机制并发挥镇痛作用。根据小鼠跳跃反应试验和小鼠竖尾反应实验观察以及热板法考察，结果显示白芷挥发油对小鼠镇痛、镇静作用没有明显生理依赖性[64]。

3.3 抗肿瘤 国外学者实验研究表明白芷挥发油经诱导线粒体介导的生长内源性凋亡途径，降低基质金属蛋白酶（Matrix metalloproteinases，MMPs）活性，减少 B16F10 细胞的迁移、侵袭和集落形成，进而发挥抗小鼠黑色素瘤作用[65]。郑立辉等[66]利用水蒸气蒸馏法提取白芷精油，研究其对亚硝酸钠的去除效果，研究结果表明白芷挥发油中的醇类和酚类化合物对亚硝酸钠去除率最高，其主要机制为将 NO2 - 还原为 NO。实验研究

发现白芷挥发油可促进 NO 和 TNF－α 分泌，激活丝裂原活化蛋白激酶（Mitogen－activated protein kinase，MAPK）通路的细胞外调节蛋白激酶（Extracellular regulated protein kinases，ERK1/2）、c－Jun 氨基末端激酶（c－Jun N－terminal kinase，JNK）和 P38 蛋白表达，发挥治疗肠癌和免疫调节作用[67]。

3.4 抗过敏 白芷具有散风除湿、通窍止痛、消肿排脓的功效，古籍中记载用于治疗鼻炎，现代临床多以白芷治疗小儿过敏性鼻炎、变异性鼻炎、支气管哮喘等[68]。多项动物实验研究表明白芷挥发油能够发挥抗过敏作用。例如，在大鼠同种被动皮肤过敏反应影响实验中，杜红光等[69]证实白芷挥发油可降低小鼠因组胺升高的毛细血管通透性，抑制 5－羟色胺等生物活性物质释放，从而发挥抗过敏作用，其所含白芷挥发油剂量浓度越高，抗过敏效果则越明显。涂兴明等[70]经实验证实白芷挥发油组与对照组比较，对被动皮肤过敏反应（Passive cutaneous ana－phylaxis reaction，PCA）、大鼠颅骨骨膜肥大细胞脱颗粒、组胺致小鼠毛细血管通透性增高有显著差异。

3.5 抗氧化 氧化应激是一种细胞内外环境变化引起的细胞应激反应，会导致细胞内氧化物的增加，从而引发一系列炎症反应和细胞损伤。氧化应激和细胞损伤的关键原因是自由基导致。郑立辉等基于水蒸气蒸馏法获取白芷挥发油，研究白芷精油的清除 1，1－二苯基－2－苦味酰基（1，1－diphenyl－2－picrylhydrazyl，DPPH）自由基作用。研究结果表明，白芷挥发油主要成分包括环十二烃、1－十五烯醇和丁子香酚均能够显著清除 DPPH 自由基。当白芷挥发油质量浓度在 32.93 mg/mL 时，清除率最高达到95.09%[71]。白芷挥发油经证实65目为抗氧化之粉碎粒度，20∶1（mL/g）为液料比是其最佳提取工艺，浸泡时间为 2.3 h，提取时间为 5.4 h，在此条件下对羟自由基的 IC_{50} 为 0.882 mg/mL，对 DDPH 自由基的 IC_{50} 为 0.722 mg/mL[54]。

3.6 美白 自古以来，白芷一直被广泛运用于美白护肤领域。《本草纲目》载白芷“长肌肤，润泽颜色，可作面脂”[72]。黑色素、氧合血红蛋白、还氧血红蛋白和胡萝卜素等多种生物色素共同作用，决定了皮肤的颜色。其中，酪氨酸酶是合成黑色素的关键酶，其突变可能会导致铜结合中断，使催化活性丧失，从而抑制黑色素形成[73]。白芷挥发油主要通过抑制酪氨酸酶发挥美白作用，其抑制机制可逆，可降低酪氨酸酶催化效率抑制其活性[74]。黄立森等[75]研究发现白芷挥发油联合芦荟提取物较之单品抗氧化、清除 DPPH 自由基和抑制酪氨酸酶活性更强。国外学者指出白芷挥发油可扩张面部动脉，增加血液供应，提供氧气和营养物质到皮肤细胞，促进细胞再生和修复，改善皮肤质地和弹性，进而减少面部肤色不均和改善斑点问题[76]。

3.7 其他 白芷挥发油还具有延长代谢、升糖等作用。梁新丽等[77]研究发现延胡索总生物碱联合白芷挥发油能够延长延胡索乙素（Tetrahydropalmatine，TET）在大鼠体内滞留时间，减缓体内消除速率，提高生物利用度。通过研究白芷挥发油及其急性毒性较之 PGE2 和血糖的关系，发现白芷挥发油对外周前列腺素影响不大，但可升高甲醛所致伤害性疼痛模型大鼠的血糖，可为机体在伤害性刺激下自我调控提供能量供应[78]。

具体药理作用详见表 6。

表 6 白芷挥发油的药理作用

功效	调控机理	细胞/生物模式	剂量	给药途径	作用机制	参考文献
抗炎	↓	关节炎大鼠模型	70、140 mg/kg	灌胃	降低血清内 NOS 活力和 TNF－α、PGE2、NO 含量	[56]
	↓	马拉色菌	50 μL/10 mL	滴入	减少细胞中麦角固醇的合成	[58]
	↓	SD 豚鼠	10 g/kg	涂抹	降低 IL－1β、TNF－α 水平	[57]
镇痛、镇静	↓	小鼠	0.05、0.1、0.2 mL/kg	腹腔注射	抑制 TRPV1 通道	[60]
	↓	偏头痛大鼠模型	25、50、100 mg/kg	灌胃	NO 水平降低，血浆中 CGRP 和 ET 水平降低	[59]
	↓	小鼠	0.05、0.1、0.2mL/kg	腹腔注射	抑制中枢大脑皮层神经冲动	[61]
	↓	小鼠	0.2 mL/10g	灌胃	抑制毛细血管通透性	[62]
	↑	伤害性疼痛模型大鼠	0.1 mL/kg	灌胃	升高下丘脑 NO 的含量，增加中枢 POMC m RNA 表达阳性细胞数和内源性镇痛物质含量	[63]
	↓	小鼠	25.00 mg/kg	灌胃	血浆中 CGRP 和 ET 水平降低	[64]
抗肿瘤	↓	B16F10 黑色素瘤细胞	200 mg/kg/day	灌胃	诱导线粒体介导的生长内源性凋亡途径，还能促进基质金属蛋白酶（MMPs）活性及其表达的下调	[65]
	↓	紫外分光光度	5、7.5、10、12.5 μg	浸泡	将 NO_2－还原为 NO，抑制亚硝酸钠合成	[66]
	↑	大肠癌荷瘤裸鼠模型	0.02 mL/g	灌胃	加强 NO、TNF－α 分泌，促进 MAPK 通路 JNK、ERK1/2、p38 相关表达	[67]
抗过敏	↓	SD 大鼠	0.1 mL、0.3 mL/kg	静脉注射	抑制颅骨骨膜大鼠 PCA 和肥大细胞脱颗粒反应，抑制组胺升高毛细血管通透性	[69]
	↓	SD 大鼠	0.1/0.3 mL·kg	皮下注射	减弱血管通透性和肥大细胞脱颗粒反应	[70]
升糖	↑	SD 大鼠	0.05、0.1 ml/kg	皮下注射	甲醛致伤害性疼痛大鼠模型血糖升高	[78]
美白	↓	紫外分光光度	0.1 mL/100 mL	浸泡 1 h	抑制酸酶活性	[5]
	↓	L－DOPA	1.00、2.00、4.00 mg/mL	浸泡 3 h	清除 DPPH 自由基，抑制酸酶活性	[75]
延长代谢	↓	SD 大鼠	17 mg/kg	灌胃	减弱 TET 在总生物碱中的消除率	[77]
抗氧化	↓	紫外分光光度	0.1 mmol/mL	浸泡 2、3 h	清除羟自由基	[54]
	↓	无水乙醇溶液吸光度	2.5 mL 75 μmol/L	浸泡 30 min	清除 DPPH 自由基	[66]

4 讨论

白芷挥发油化学成分复杂,成分含量易受白芷产地、炮制工艺、提取方法等因素影响,主要成分稳定性较差,室温条件下易氧化水解。白芷挥发油的药理作用丰富,具有抗炎、镇痛、镇静、抗肿瘤、抗氧化、美白等多种药理活性,在抗氧化、美白应用方面尤为突出。白芷挥发油刺激性较强、稳定性较差,实际生产中多以包合物形式入药,以达到维持其稳定性的效果,目前实验研究的新方向为将其制成微乳或自微乳等新型制剂,发挥药辅合一作用[79]。但目前白芷挥发油的研究应用中还存在许多问题。①白芷挥发油作为白芷的主要药效成分,药典并未对其质量控制的标准进行规定,成分含量较高者能否作为控制白芷挥发油质量的决定性因素,尚需要进一步研究。②白芷挥发油成分分析方法较为单一,成分与药效之间关系的建立还有很大发展空间,且未对白芷的产地加工方式、采收年限与挥发油成分的关系进行细化研究。后续可以充分利用主成分分析和聚类分析等化学计量学的方式,对白芷挥发油成分与产地、部位、炮制及提取方法之间的联系进行深入的探索。③目前关于白芷挥发油药理作用和药效机制研究为浅层阶段,主要是白芷挥发油的整体性研究,对其单体化合物的研究较少,成分间的相互作用并不明确、缺乏体内代谢的相关研究,且目前没有研究证明白芷挥发油的安全性,不良反应及最大使用剂量也没有明确规定。随着人工智能、生物信息学、计算机药物辅助设计、多种测序技术和组学技术的发展,为深入研究白芷挥发油防治各系统疾病详细机制提供了基础,运用现代技术揭示白芷挥发油作用机制是科研工作者需要挖掘的方向。

参考文献

[1] 曾维浩. 离骚[M]. 南京: 江苏人民出版社,2009:483 - 484.
[2] 吴文平,索彩仙,霍文杰,等. 不同产地白芷药材质量评价[J]. 亚太传统医药,2021,17(10): 28 - 34.
[3] 李冰,宋欢,王露露,等. 白芷的化学成分和药理作用研究进展[J]. 人参研究,2022,34(6): 50 - 52.
[4] 任星宇,罗敏,邓才富,等. 白芷挥发油提取方法及药理作用的研究进展[J]. 中国药房,2017,28(29): 4167 - 4170.
[5] 徐广,任星宇,罗敏,等. 鲜白芷挥发油提取工艺优化、成分分析及其抑制酪氨酸酶活性研究[J]. 时珍国医国药,2018,29(8): 1854 - 1856.
[6] 徐广,任星宇,杨丹,等. 不同处理方法对白芷挥发油提取量、成分及美白活性的影响[J]. 化学世界,2021,62(11): 677 - 685.
[7] 杨先国,肖海英,彭学著. 茶陵白芷挥发油成分的 GC - MS 分析[J]. 吉林医药学院学报,2018,39(6): 416 - 418.
[8] 高岩,王知斌,杨春娟,等. GC - MS 联用法分析白芷挥发油的化学成分[J]. 化学工程师,2016,30(11): 20 - 22.
[9] 胡志妍,齐天,杨光,等. 白芷、川芎药对配伍挥发油成分的 GC - MS 分析[J]. 第二军医大学学报,2014,35(2): 177 - 184.
[10] 胡晴雯. β - 石竹烯通过 NRF2/HO - 1 调控铁死亡改善大鼠局灶性脑缺血再灌注损伤研究[D]. 重庆: 重庆医科大学,2022: 27.
[11] 王娜. 不同产地白芷及其近缘野生种的对比研究[D]. 成都: 成都中医药大学,2009: 39 - 40.
[12] 田恩伟,成欣,刘银榕,等. 五类栽培白芷与兴安白芷的挥发油成分及其化学亲缘关系[J]. 南方医科大学学报,2022,42(3): 360 - 366.
[13] 陈伟兰,黎映琼,罗球珠. HS - SPME - GC - MS 分析结合主成分分析技术在白芷挥发油中的应用研究[J]. 辽宁中医杂志,2023,50(11): 178 - 181.
[14] 邹菊英,苏维,潘意,等. 白芷化学成分和药理作用研究进展及其质量标志物(Q - marker)的预测分析[J]. 世界科学技术 - 中医药现代化,2023,25(7): 2535 - 2548.
[15] 张世洋,王晶,盛永成,等. 六种不同产区白芷药材挥发性成分比较分析[J]. 保鲜与加工,2019,19(4): 176 - 183.
[16] 朱立俏,盛华刚. 白芷挥发性成分的 GC - MS 分析[J]. 广州化工,2012,40(23): 103 - 104,119.
[17] VIEIRA G,CAVALLI J,GONÇALVES E C D,et al. Antidepressant - like effect of terpineol in an inflammatory model of depression: involvement of the cannabinoid system and D2 dopamine receptor[J]. Biomolecules,2020,10(5): 792.
[18] 段贤春,汪永忠,居靖,等. 人参炔醇研究进展[J]. 安徽医药,2008,12(1): 1 - 3.
[19] 汤建,赵康琦,张腾腾,等. 白芷挥发油抗炎镇痛活性成分的虚拟筛选[J]. 中医药信息,2021,38(2): 35 - 39.
[20] 韩进华,李生慧,于钰. 黄连油化学成分分析安全性和体外抗炎活性研究[J]. 中国化妆品,2021(9): 104 - 109.
[21] 马逾英,王娜,张利,等. 亳白芷挥发油成分的气相色谱 - 质谱联用分析[J]. 时珍国医国药,2009,20(11): 2667 - 2669.
[22] 姚川,周成明,崔国印,等. 白芷挥发油化学成分的鉴定[J]. 中药材,1990,13(12): 34 - 36.
[23] 孙婷婷. 肉豆蔻挥发油抗抑郁作用及机制研究[D]. 郑州: 河南中医学院,2014: 38 - 40.
[24] 霍梦逸,刘新,林於,等. 柴胡挥发油中有效解热成分的研究[J]. 药物分析杂志,2013,33(7): 1202 - 1209.
[25] 杜琳琳,张华. 芳烃与烷烃化合物参与的光化学与电化学硼化反应[J]. 有机化学,2023,43(5): 1726 - 1741.
[26] 王蕊,刘军,杨大宇,等. 白芷化学成分与药理作用研究进展[J]. 中医药信息,2020,37(2): 123 - 128.
[27] 黄奭. 范子计然·1 卷[M]. 广陵:广陵古籍刻印社,1984:432.
[28] 凤良元,鄢顺琴,杨瑞琴,等. 五种不同产地白芷药理作用的比较研究[J]. 安徽中医学院学报,1990,9(2): 56 - 59.
[29] 苏颂,撰. 图经本草: 辑复本[M]. 胡乃长,王致谱,辑注. 福州: 福建科学技术出版社,1988.
[30] 寇宗奭. 本草衍义[M]. 北京: 人民卫生出版社,1990:784.
[31] 李丽,张村,肖永庆,等. 白芷饮片产地加工方法探索[J]. 中国实验方剂学杂志,2011,17(5): 60 - 62.
[32] 王艺涵,赵佳琛,翁倩倩,等. 经典名方中防风的本草考证[J]. 中国现代中药,2020,22(8): 1331 - 1339.
[33] 王梦月,贾敏如. 白芷本草考证[J]. 中药材,2004,27(5): 382 - 385.
[34] 李博园,王娟,高静,等. 杭白芷根中分泌道发生方式、分布及其挥发油积累过程研究[J]. 广西植物,2020,40(4): 471 - 481.
[35] 赵爱红,杨秀伟,杨鑫宝,等. 祁白芷挥发油成分的 GC - MS 分析[J]. 中国中药杂志,2011,36(5): 603 - 607.
[36] 张强,李章万. 杭白芷挥发油成分的 GC - MS 分析[J]. 中药材,1997,20(1): 28 - 30.

[37] 李宏宇,戴跃进,谢成科,等. 川白芷的挥发油成分分析[J]. 华西药学杂志,1990,5(2):79-82.
[38] CAO G,LI Q L,ZHANG J D,et al. A purge and trap technique to capture volatile compounds combined with comprehensive two-dimensional gas chromatography/time-of-flight mass spectrometry to investigate the effect of sulfur-fumigation on *Radix* Angelicae Dahuricae[J]. Biomed Chromatogr,2014,28(9):1167-1172.
[39] 王常顺,王晓蕾,段吉平,等. 硫磺熏蒸对白芷质量的影响及产地替代加工方式探讨[J]. 中国药物警戒,2024,21(3):355-360.
[40] 周冰. 白芷药材品质评价与适宜干燥加工方法优化研究[D]. 南京:南京中医药大学,2015:54.
[41] 张志梅,杨太新,翟志席,等. 干燥方法对白芷中香豆素类成分含量的影响[J]. 中国中药杂志,2005,30(21):63-64.
[42] 刘培,陈京,周冰,等. 不同干燥加工方法及其条件对杭白芷中香豆素及挥发油类化学成分的影响[J]. 中国中药杂志,2014,39(14):2653-2659.
[43] 赵恒,周斌,孔英华,等. 产地加工方法对白芷化学成分的影响[J]. 中药材,1996,19(3):134-136.
[44] 戴跃进,李宏宇,谢成科. 川白芷采收加工的质量研究[J]. 华西药学杂志,1990,5(4):241-242.
[45] 张志梅. 白芷质量性状形成及栽培调控研究[D]. 北京:中国农业大学,2005:34.
[46] 陈莹,胡正海,胡本祥,等. 杭白芷根的分泌道超微结构与其挥发油分泌的关系[J]. 西北植物学报,2015,35(4):716-722.
[47] 陈莹,惠楠,童珍珍. 白芷营养器官形态结构及其挥发油的组织化学定位[J]. 时珍国医国药,2014,25(9):2162-2164.
[48] 马逾英,王娜. 不同前处理方法所得白芷挥发油成分的 GC-MS 分析[J]. 成都中医药大学学报,2009,32(4):50-53.
[49] 舒任庚,王光发,梁新丽,等. 微波辅助提取与水蒸气蒸馏杭白芷挥发油的比较[J]. 中国药房,2011,22(31):2916-2918.
[50] 崔秋兵,张艺,王楠,等. 均匀设计优化白芷超临界 CO_2 萃取工艺及萃取物的 GC×GC/TOF MS 分析[J]. 中成药,2011,33(7):1260-1262.
[51] 杨祖金,雷华平,葛发欢. 超临界 CO_2 萃取白芷挥发油的 GC-MS 分析[J]. 中药材,2005,28(8):661-662.
[52] 肖梦媛,黄杰,文艳霞,等. 白芷美白防晒霜的制备[J]. 广州化工,2020,48(19):77-81.
[53] 段天华,徐荣荣,李蕊,等. 祁白芷 UPLC 指纹图谱的建立及其抗氧化谱效关系研究[J]. 中国药学杂志,2024,59(10):896-903.
[54] 黄培池. 响应面法优化白芷挥发油提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. 中国食品添加剂,2021,32(9):31-38.
[55] 朱宇超,韦小翠,程建明,等. 都梁方中挥发油质量控制方法初步研究[J]. 时珍国医国药,2020,31(1):100-102.
[56] 孙守坤,丛立新,郭环宇. 白芷总挥发油对大鼠佐剂性关节炎的影响[J]. 中国老年学杂志,2016,36(22):5544-5546.
[57] 毛应岚,刘克舜,姜维,等. 川芎白芷对过敏性皮炎模型的血流变及炎性因子表达影响的实验研究[J]. 现代生物医学进展,2021,21(10):1829-1833,1858.
[58] 赵海婷. 中药挥发油对马拉色菌的抑菌活性及相关产品初步研究[D]. 南昌:江西中医药大学,2023.
[59] 倪红霞,王春梅. 白芷总香豆素联合白芷挥发油对大鼠偏头痛的预防作用及其机制[J]. 吉林大学学报(医学版),2018,44(3):487-492.
[60] 高小坤. 白芷挥发油镇痛、镇静作用实验研究[J]. 现代中西医结合杂志,2013,22(35):3880-3882,3888.
[61] 王卫华,李琳,赵训允,等. 白芷总挥发油的镇痛作用[J]. 齐齐哈尔医学院学报,2011,32(5):687-688.
[62] 薛艳萍,秦旭华,胡黄婉莹,等. 白芷总香豆素和挥发油镇痛抗炎作用的比较研究[J]. 中国民族民间医药,2016,25(8):20-22,25.
[63] 聂红,沈映君. 白芷总挥发油对疼痛模型大鼠的 β-内啡肽、促肾上腺皮质激素、一氧化氮及前阿黑皮素的影响[J]. 中国中药杂志,2002,27(9):690-693.
[64] 聂红,沈映君,吴俊梅,等. 白芷挥发油镇痛、镇静作用和身体依赖性研究[J]. 中药新药与临床药理,2002,13(4):221-223,269.
[65] HWANGBO H,CHOI E O,KIM M Y,et al. Suppression of tumor growth and metastasis by ethanol extract of *Angelica dahurica Radix* in murine melanoma B16F10 cells[J]. Biosci Trends,2020,14(1):23-34.
[66] 郑立辉,王鹏君,李伟,等. 白芷精油 GC/MS 解析及清除亚硝酸钠作用研究[J]. 中国粮油学报,2014,29(11):60-64.
[67] 李大宇,滕萍英. 白芷提取物对大肠癌荷瘤裸鼠模型抗肿瘤和免疫调节作用的研究[J]. 中医药信息,2019,36(5):8-12.
[68] 吕明. 从寒论治变应性鼻炎的古今用药规律研究[D]. 天津:天津中医药大学,2023:53.
[69] 杜红光,谢黛. 白芷挥发油抗过敏的实验研究[J]. 海峡药学,2008,20(11):24-26.
[70] 涂兴明,吴康郁,熊颖. 白芷挥发油抗过敏的实验研究[J]. 海峡药学,2008,20(3):45-47.
[71] 郑立辉,王鹏君,李伟,等. 白芷精油成分分析及清除 DPPH 自由基活性[J]. 食品科学,2014,35(14):180-183.
[72] 李时珍,王杰,何国浓,等. 本草纲目[M]. 南昌:二十一世纪出版社,2014.
[73] 徐媛媛,陈萌,徐晓飞,等. 绣球菌浓缩液抑制黑色素合成和抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报,2023,14(17):261-268.
[74] 马畅,李妍. 白芷、白芍水和乙醇提取物对酪氨酸酶的抑制效应[J]. 香料香精化妆品,2023(2):54-58.
[75] 黄立森,张瞳昕,庞海月,等. 芦荟、白芷提取物联合应用的抗氧化和美白活性评估[J]. 化学与生物工程,2016,33(7):58-60.
[76] LIN S Y,WANG J,ZHAO P,et al. Optimized antioxidant peptides fractions preparation and secondary structure analysis by MIR[J]. Int J Biol Macromol,2013,59:151-157.
[77] 梁新丽,廖正根,王光发,等. 白芷提取物与延胡索总碱配伍对延胡索乙素在大鼠体内药代动力学的影响[J]. 药学学报,2009,44(6):645-650.
[78] 王玉春,聂红. 白芷挥发油的急性毒性及对 PGE_2 和血糖的影响[J]. 江苏中医药,2002,34(10):54-55.
[79] 吴萍,郑广晶,赵源慧,等. 风寒感冒颗粒挥发油的提取及包合工艺研究[J]. 吉林中医药,2020,40(12):1647-1650.