

白术的化学成分及其药理作用研究进展

孙古月^{1,2}, 赵相轩^{1,2}, 徐书³



1. 辽宁中医药大学药学院 (辽宁大连 116600)
2. 辽宁中医药大学实验动物医学院 (沈阳 110847)
3. 北京中医药大学深圳医院肿瘤科 (广东深圳 518100)

【摘要】 白术 (*Atractylodis macrocephalae* Rhizoma) 作为传统常用中药, 近年来其化学成分与药理作用研究取得了一系列重要进展。本文系统梳理了白术中挥发油、倍半萜内酯、多糖、聚乙炔类等多种生物活性成分的新发现, 重点总结了白术多糖、白术内酯 I / III、苍术酮等代表性活性物质在双向调节胃肠功能、增强免疫、抗氧化、抗衰老、改善老年痴呆、舒缓子宫平滑肌、骨保护等方面的多靶点网络整合药理作用。通过归纳现有研究成果, 本文旨在全面呈现白术药理活性的研究现状, 以期为基于白术的中药新药创制与临床合理应用提供有益参考。

【关键词】 白术; 化学成分; 药理作用; 多靶点; 抗氧化; 抗衰老; 抗癌; 研究进展

【中图分类号】 R284; R285

【文献标识码】 A

Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of *Atractylodis macrocephalae* Rhizoma

SUN Guyue^{1,2}, ZHAO Xiangxuan^{1,2}, XU Shu³

1. College of Pharmacy, Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, Dalian 116600, Liaoning Province, China
2. College of Laboratory Animal Medicine, Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, Shenyang 110847, China
3. Department of Oncology, Shenzhen Hospital, Beijing University of Chinese Medicine, Shenzhen 518100, Guangdong Province, China

Corresponding author: ZHAO Xiangxuan, Email: xiangxuanzhao@163.com

【Abstract】 In recent years, research on the chemical constituents and pharmacological effects of *Atractylodis macrocephalae* Rhizoma, a traditional and commonly used Chinese medicinal herb, has made a series of important advances. This review systematically summarizes the newly discovered bioactive components of *Atractylodis macrocephalae* Rhizoma, including volatile oils, sesquiterpene lactones, polysaccharides, and polyacetylenes. It particularly highlights the multi-target and network-integrated pharmacological actions of representative active substances such as *Atractylodis macrocephalae* Rhizoma polysaccharides, atractylenolides I / III, and atractylon. This actions include dual-directional regulation of gastrointestinal function, immunoenhancement, antioxidant activity, anti-aging effects, amelioration of Alzheimer's disease, relaxation of uterine

DOI: 10.12173/j.issn.2097-4922.202604065

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31371425); 辽宁省教育厅自然科学类高校基本科研项目 (LJ212510162011)

通信作者: 赵相轩, 博士, 教授, 博士研究生导师, Email: xiangxuanzhao@163.com

<https://yxqy.whuznhmedj.com>

smooth muscle, and bone protection. By synthesizing the current research findings, this review aims to comprehensively present the current state of knowledge regarding the pharmacological activities of *Atractylodis macrocephalae* Rhizoma, with the goal of providing useful references for the development of novel Chinese medicine formulations based on *Atractylodis macrocephalae* Rhizoma and its rational clinical application.

【Keywords】 *Atractylodis macrocephalae* Rhizoma; Chemical constituents; Pharmacological effects; Multi-target; Antioxidant; Anti-aging; Anticancer; Research progress

中药白术 (*Atractylodis macrocephalae* Rhizoma) 为菊科植物白术 (*Atractylodes macrocephala* Koidz.) 的干燥根茎^[1], 又名于术、於术、山蓟、天蓟、山连等, 属于“浙八味”药材之一, 始载于《尔雅·释草》^[2], 记为“术, 山蓟”;《神农本草经》^[3] 将“术”列为上品。南北朝时期, 梁朝陶弘景在《本草经集注》^[4] 中将“术”明确区分为苍术和白术, 载其“术乃有两种: 白术, 叶大有毛而作桎, 根甜而少膏; 可作丸散用; 赤术 (即苍术, 首载于《证类本草》^[5]), 叶细无桎, 根小苦而多膏, 可作煎用”。白术含有丰富多样的化学成分, 其中包括挥发油类、内酯类、多糖等, 是白术发挥广泛药理作用的重要物质基础, 因其独特的功效和丰富的药用价值被广泛引用、记载和应用,《本草求真》赞誉白术为脾脏补气第一要药,《中国药典》2025年版^[1]中描述白术“气清香, 味甘、微辛, 嚼之略带黏性”“苦、甘、温, 归脾、胃经”“健脾益气, 燥湿利水, 止汗, 安胎, 可用于脾虚食少, 腹胀泄泻, 痰饮眩悸, 水肿, 自汗, 胎动不安”。

白术药性平和、补而不滞、温而不燥, 不良反应轻微, 适宜长期调理机体。其药理作用丰富广泛, 依托多糖、白术内酯、挥发油等丰富活性成分, 可作用于人体消化、心血管、神经、免疫及肝、肾等多个生理系统, 能够有效改善机体代谢紊乱、减轻氧化炎症损伤、修护受损组织^[6]。近年来, 白术的化学成分及其药理作用被深入挖掘并获得长足进展。例如新分离鉴定出的白术均一多糖 (新型果聚糖 AMP) 被发现可依托肠道菌群调控磷脂酰肌醇3-激酶/蛋白激酶B通路, 修复肠道损伤、改善溃疡性结肠炎^[7]; 白术内酯 I 能抑制主动脉扩张、延缓炎症发展, 调节炎症因子表达, 起到抗炎作用^[8]。白术不同活性成分可通过多条信号通路、多种作用机制发挥药效, 显示出多靶点、多通路的药效特点。本文梳理了近5年白术化学成分和药理作用相关研究新进展,

以便为基于白术的中医药新药创制提供有益线索。

1 白术的化学成分

白术中含有丰富的化学成分, 主要包括挥发油类、倍半萜及内酯类、多糖类、苷类、氨基酸类、聚乙炔类、微量元素及其他成分等, 能够广泛作用于消化系统、神经系统、免疫系统等。这些化学成分陆续被发现可通过多途径, 多靶点发挥药效。

1.1 挥发油

白术根茎中挥发油含量达1.4%, 主要为倍半萜类及其内酯类成分。苍术酮是主要挥发油成分, 占挥发油总含量的31.93%~61.00%, 此外还含有白术内酯 I~III、双白术内酯等物质^[9-10]。

白术挥发油类物质的提取方法、炮制工艺的差异均会导致提取出的白术挥发油的化学成分和含量有所差异, 有研究比较水蒸气蒸馏法、超声波溶剂提取法和超临界二氧化碳萃取法对白术挥发油提取效果的影响, 发现以超临界二氧化碳萃取法的提取效率为优, 且能获取更全面的挥发油类成分^[11-12]。冉晓燕等^[13]发现水蒸气蒸馏法提取得到的热敏性、易氧化的白术挥发油成分较少; 超声辅助法提取得到的高沸点组分的相对含量较高; 超临界二氧化碳萃取法提取得到的低沸点成分较多。贾天柱等^[14]发现采用麸炒、土炒2种方法炮制白术后, 白术挥发油的含量减少; 相反, 清炒白术却会使其挥发油含量增加。

白术挥发油核心活性成分为倍半萜类, 以苍术酮为特征标志物, 含桉烷、愈创木烷等多骨架亚型, 搭配单萜、芳香烃等, 成分复杂多样。此类物质活性广谱, 兼具抗肿瘤、胃肠调节、抗炎抑菌、保肝、调节糖脂代谢、抗氧化多重作用。现有研究已明确, 提取方法、产地、炮制等不同会显著改变挥发油的组分与含量。麸炒可使苍术酮转化为白术内酯, 缓和燥性、优化健脾活性;

当前，挥发油易氧化、稳定性差，制约制剂开发^[15-16]。

1.2 倍半萜及内酯类

倍半萜类物质主要以挥发油的形式存在于白术中，其结构形式多样，可分为桉叶烷、愈创木烷、雪松烷、榄烷、檀香烷、双白术内酯等。其中桉叶烷是白术中最常见的倍半萜类物质之一。内酯类物质是白术中最具代表性的倍半萜类活性

物质^[17-19]。内酯类物质主要包括白术内酯 I、II、III 等，白术内酯 I 和 III 是最主要的活性成分，且白术中白术内酯 III、I、II 的含量依次递减^[20-22]。现代研究表明，白术富含苍术素、苍术酮和白术内酯^[23]。本文汇总了白术中倍半萜类成分共 123 种（表 1），其中包括近年新鉴定出的成分，如双白术内酯、二聚倍半萜等微量新成分，具体化学结构见图 1。

表 1 白术中不同骨架类型的倍半萜类成分

Table 1. Sesquiterpenoids with different skeletons from *Atractylodis macrocephalae* Rhizoma

骨架类型	编号	化合物名称	化学式	参考文献
桉烷型倍半萜	1	白术内酯 I	C ₁₅ H ₁₈ O ₂	[24]
	2	白术内酯 II	C ₁₅ H ₂₀ O ₂	[24]
	3	白术内酯 III	C ₁₅ H ₂₀ O ₃	[24]
	4	桉叶醇	C ₁₅ H ₂₆ O	[25]
	5	α-桉叶醇	C ₁₅ H ₂₆ O	[26]
	6	β-桉叶醇	C ₁₅ H ₂₆ O	[24]
	7	刺柏脑	C ₁₅ H ₂₆ O	[27]
	8	β-桉叶二烯	C ₁₅ H ₂₄	[28]
	9	顺-1-(1,2-二甲基-3-亚甲基环戊基)-4-甲基苯	C ₁₅ H ₂₀	[29]
	10	苍术二醛	C ₁₅ H ₂₀ O ₂	[28]
	11	白术桉叶烷二聚体 A-D、I、J	C ₃₀ H ₄₀ O ₆	[30]
	12	8β-甲氧基白术内酯 I	C ₁₆ H ₂₂ O ₃	[17]
芹子烷型倍半萜	13	α-芹子烯	C ₁₅ H ₂₄	[28]
	14	β-芹子烯	C ₁₅ H ₂₄	[24]
	15	γ-芹子烯	C ₁₅ H ₂₄	[28]
艾里莫酚烷型倍半萜	16	β-香根烯	C ₁₅ H ₂₂	[28]
	17	瓦伦亚烯	C ₁₅ H ₂₄	[28]
香木兰烷型倍半萜	18	香树烯	C ₁₅ H ₂₄	[28]
	19	香橙烯	C ₁₅ H ₂₄	[28]
	20	α-古芸烯	C ₁₅ H ₂₄	[26]
	21	愈创木醇	C ₁₅ H ₂₆ O	[24]
愈创木烷型倍半萜	22	α-愈创木烯	C ₁₅ H ₂₄	[24]
	23	异愈创木二烯	C ₁₅ H ₂₄	[28]
榄烷型倍半萜	24	β-榄香烯	C ₁₅ H ₂₄	[24]
	25	γ-榄香烯	C ₁₅ H ₂₄	[31]
丁香烷型倍半萜	26	β-石竹烯	C ₁₅ H ₂₄	[24]
	27	氧化石竹烯	C ₁₅ H ₂₄ O	[26]
蛇麻烷型倍半萜	28	α-葎草烯	C ₁₅ H ₂₄	[24]
没药烷型倍半萜	29	α-姜烯	C ₁₅ H ₂₄	[24]
	30	β-倍半水芹烯	C ₁₅ H ₂₄	[24]
	31	(+)-苜蓿烯	C ₁₅ H ₂₄	[24]
苍术烷型倍半萜	32	苍术酮	C ₁₅ H ₂₀ O	[24]
吉马烷型倍半萜	33	广木香内酯	C ₁₅ H ₂₀ O ₂	[27]
杜松烷型倍半萜	34	白菖烯	C ₁₅ H ₂₄	[28]
花柏烷型倍半萜	35	花柏烯	C ₁₅ H ₂₄	[24]

续表 1

骨架类型	编号	化合物名称	化学式	参考文献
檀香烷型倍半萜	36	檀香醇	$C_{15}H_{24}O$	[24]
雪松烷型倍半萜	37	γ -雪松烯	$C_{15}H_{24}$	[28]
喇叭烷型倍半萜	38	喇叭烯	$C_{15}H_{24}$	[28]
香附子烷型倍半萜	39	香附子烯	$C_{15}H_{24}$	[28]
	40	α -香附烯酮	$C_{15}H_{22}O$	[29]
马兜铃烷型倍半萜	41	马兜铃烯	$C_{15}H_{24}$	[28]
	42	马兜铃酮	$C_{15}H_{22}O$	[27]
新丁香三环烯型倍半萜	43	(-)- α -新丁香三环烯	$C_{15}H_{24}$	[28]
	44	γ -新丁香烯	$C_{15}H_{24}$	[28]
紫罗酮型	45	β -紫罗酮	$C_{13}H_{20}O$	[24]
	46	α -紫罗兰酮	$C_{13}H_{20}O$	[28]
链状倍半萜	47	橙花叔醇	$C_{15}H_{26}O$	[28]
单萜类	48	α -蒎烯	$C_{10}H_{16}$	[26]
	49	柠檬烯	$C_{10}H_{16}$	[26]
	50	百里香酚	$C_{10}H_{14}O$	[25]
	51	乙酸龙脑酯	$C_{12}H_{20}O_2$	[26]
二萜类	52	乙酸植醇酯	$C_{22}H_{42}O_2$	[24]
烷(烯)烃类	53	正十三烷	$C_{10}H_{28}$	[26]
	54	长叶烯	$C_{15}H_{24}$	[26]
	55	2-甲基-1-十六烷醇	$C_{17}H_{36}O$	[31]
芳香类	56	橄榄醇	$C_{11}H_{16}O_2$	[26]
	57	苯甲醛	C_7H_6O	[26]
	58	苯乙醛	C_8H_8O	[26]
	59	2-甲氧基-4-甲基-1-(1-甲基乙基)苯	$C_{11}H_{16}O$	[32]
	60	苯乙酰胺	C_8H_9NO	[32]
	61	α -戊基肉桂醇	$C_{14}H_{20}O$	[32]
	62	庚醛	$C_7H_{14}O$	[32]
	63	2,6-二甲基吡嗪	$C_6H_8N_2$	[26]
	64	2-乙基-3-甲基吡嗪	$C_7H_{10}N_2$	[26]
其他类	65	双白术内酯	$C_{30}H_{38}O_4$	[24]
	66	双白术内酯A-C	$C_{30}H_{40}O_6$	[33]
	67	双白术内酯D	$C_{30}H_{38}O_5$	[33]
	68	双白术内酯E	$C_{36}H_{44}O_5$	[33]
	69	莪术醇	$C_{15}H_{24}O_2$	[24]
	70	桉油烯醇	$C_{15}H_{24}O$	[24]
	71	亚油酸甲酯	$C_{19}H_{34}O_2$	[24]
	72	乙酸金合欢酯	$C_{17}H_{28}O_2$	[26]
	73	异戊酸	$C_5H_{10}O_2$	[26]
	74	α -甲基丁酸	$C_5H_{10}O_2$	[26]
	75	亚甲基环丙烷甲酸	$C_5H_6O_2$	[26]
	76	呋喃酮	$C_6H_8O_3$	[26]
	77	5-羟甲基糠醛	$C_6H_6O_3$	[26]
	78	atramacronin E-H、K	$C_{30}H_{12}O_{11}$	[30]
	79	atramacronin L	$C_{27}H_{40}O_4$	[30]
	80	atramacronin M	$C_{30}H_{42}O_6$	[30]

续表 1

骨架类型	编号	化合物名称	化学式	参考文献
	81	atramacronin N、O	$C_{30}H_{42}O_4$	[30]
	82	atramacronin P	$C_{30}H_{40}O_4$	[30]
	83	atramacronin I	$C_{30}H_{38}O_5$	[30]
	84	atramacronin J	$C_{30}H_{38}O_4$	[30]
	85	atractylodimer A	$C_{30}H_{38}O_5$	[34]
	86	atractylodimer B	$C_{30}H_{42}O_4$	[34]
	87	atractylodimer C	$C_{30}H_{42}O_4$	[34]
	88	atractylodimer D	$C_{30}H_{42}O_4$	[34]
	89	白术酮 A	$C_{15}H_{20}O_3$	[35]
	90	9β-羟基紫菀内酯	$C_{15}H_{20}O_3$	[35]
	91	白术内酯 H	$C_{15}H_{18}O_3$	[35]
	92	白术内酯 J	$C_{17}H_{20}O_4$	[35]
	93	α-石竹烯	$C_{15}H_{24}$	[26]
	94	橄榄醇	$C_{11}H_{16}O_2$	[26]
	95	木香烃内酯	$C_{15}H_{20}O_2$	[29]
	96	石竹素	$C_{15}H_{24}O$	[24]
	97	2-异丙烯基-4a,8-二甲基-1,2,3,4,4a,5,6,8a-八氢萘	$C_{15}H_{24}$	[29]
	98	β-人参烯	$C_{15}H_{24}$	[28]
	99	1,2,3,3a,8,8a-六氢-2,2,8-三甲基-5,6-萹二甲醛	$C_{15}H_{20}O_2$	[29]
	100	α-衣兰油烯	$C_{15}H_{24}$	[26]
	101	β-橄榄烯	$C_{15}H_{24}$	[27]
	102	(-)-α-异科蒙烯	$C_{15}H_{24}$	[27]
	103	亚甲基-双甲基铈	$C_{31}H_{40}O_2$	[36]
	104	乙基烯-双甲基铈	$C_{32}H_{42}O_2$	[36]
	105	呋喃-2-甲三三基-双旋基苯	$C_{35}H_{42}O_3$	[36]
	106	5-呋喃甲醇-2-甲基三烯-双旋基	$C_{36}H_{44}O_4$	[36]
	107	呋喃-5-甲基二甲酰-2-甲二三酰-三环基铈	$C_{51}H_{62}O_4$	[36]
	108	β-瓦替伦烯	$C_{15}H_{22}$	[25]
	109	去氢夫金酮	$C_{15}H_{22}O$	[25]
	110	1,2,3,4,4a,7-六氢-1,6-二甲基-4-(1-甲基乙基)萘	$C_{15}H_{24}$	[32]
	111	雪松醇	$C_{15}H_{26}O$	[32]
	112	反式-努西弗醇	$C_{15}H_{22}O$	[32]
	113	卡拉烯	$C_{15}H_{24}$	[32]
	114	1,2,3,6-四甲基双环[2.2.2]辛-2,5-二烯	$C_{12}H_{18}$	[32]
	115	1-金刚烷基乙醇	$C_{12}H_{20}O$	[32]
	116	β-喜马烯	$C_{15}H_{24}$	[32]
	117	沉香螺醇	$C_{15}H_{26}O$	[32]
	118	10S,11S-喜马烯-3(12),4-二烯	$C_{15}H_{24}$	[32]
	119	去氢香橙烯	$C_{15}H_{22}$	[32]
	120	3,7,11-三甲基十二碳-2,4,6,10-四烯醛	$C_{15}H_{22}O$	[32]
	121	斯巴醇	$C_{15}H_{24}O$	[32]
	122	普洛色林	$C_{15}H_{18}O_2$	[32]
	123	榄香醇	$C_{15}H_{26}O$	[26]

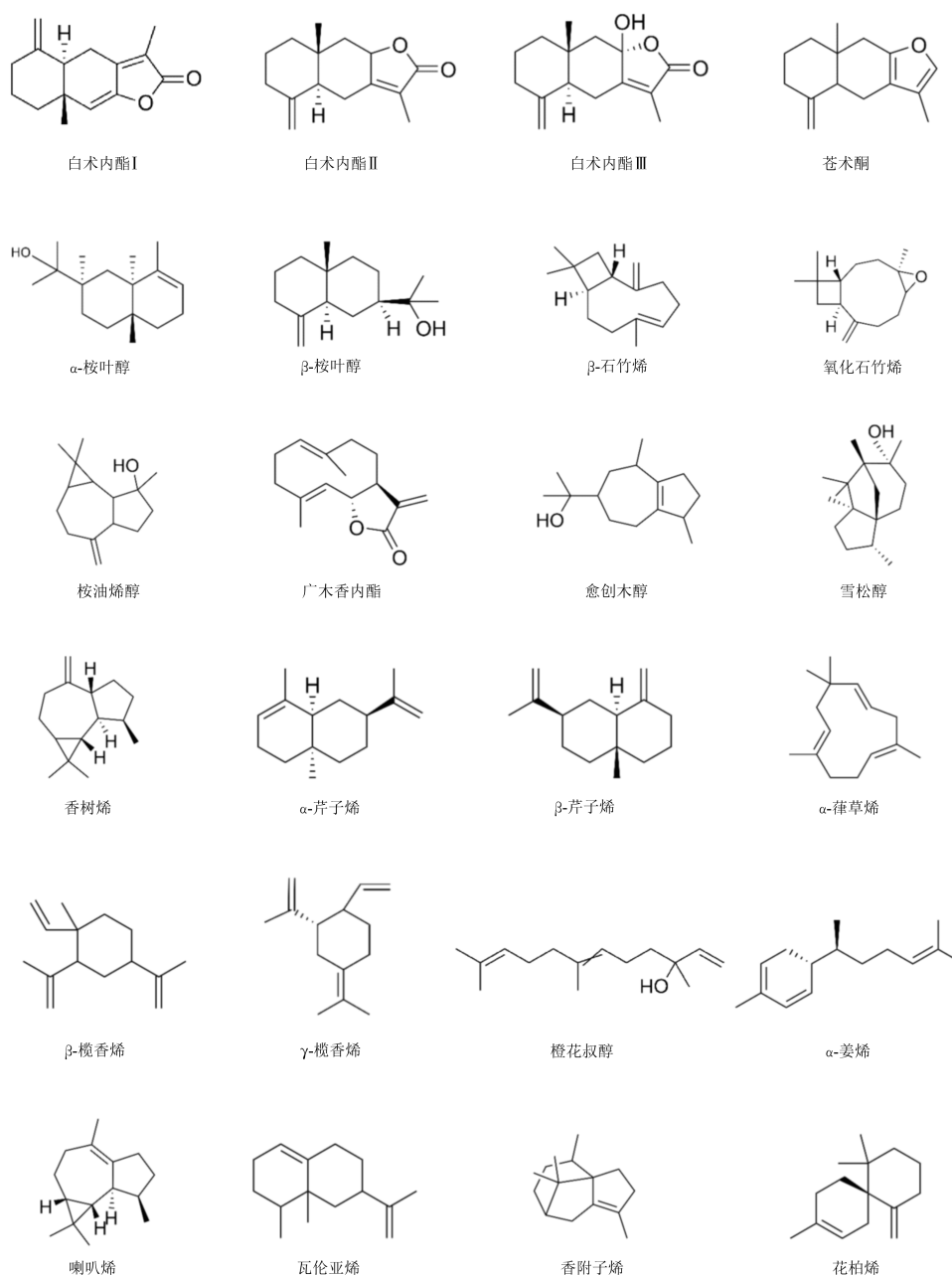


图1 白术倍半萜及其内酯类代表性成分结构式

Figure 1. Structures of representative sesquiterpenoids and sesquiterpene lactones from *Atractylodes macrocephalae* Rhizoma

1.3 多糖类

白术多糖是杂多糖，由阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、甘露糖等多种单糖组成。白术多糖提取方法大致可分为热水浸提法、酶法、微波辅助提取法3类^[37-38]。池玉梅等^[38]分离纯化提取白术多糖，得到2种杂多糖PSAM-1和PSAM-2，半乳糖、鼠李糖、阿拉伯糖、甘露糖组成PSAM-1；木糖、阿拉伯糖、半乳糖组成PSAM-2。有文献^[7]报道，从白术中分离得到一种均一多糖，主要由果糖（92.4%）和葡萄糖（7.6%）组成。

研究证实，白术多糖对溃疡性结肠炎具有显著疗效，是一种具有前景的功能性食品成分或溃疡性结肠炎天然治疗剂^[7]。近年来，白术中多糖类成分的提取鉴定逐渐增多，分离出单糖组成葡萄糖与阿拉伯糖的摩尔比约为129:1的中性葡聚糖AMP1^[39]、木葡甘聚糖、水溶性聚糖XGM^[40]、用于预防微重力条件下神经炎症相关的认知功能下降的菊粉型多糖^[41]等。白术多糖作为白术主要活性成分，具有保护肝脏、抗肿瘤、调节胃肠道等多种药理作用^[42]。多糖类化学成分见表2。

表 2 白术多糖类成分及其结构特征总结

Table 2. Summary of polysaccharides and their structural characteristics from *Atractylodis macrocephalae* Rhizoma

序号	名称	分子量 (kDa)	单糖组成	结构组成	分离方法	参考文献
1	AMP	23.9	甘露糖-葡萄糖醛酸-葡萄糖-阿拉伯糖 (12 : 6 : 72 : 10)	典型 β-吡喃糖结构	GPC-RI MALS; HPLC-PMP	[43]
2	AMP	8.37	葡萄糖-半乳糖-鼠李糖-甘露糖 (7.36 : 1 : 3.05 : 1.52)	α-(1→4) 和 β-(1→4) 糖苷键	HPLC; GC (鲎试验法)	[43]
3	AMAP-1	138	半乳糖醛酸 > 半乳糖 > 阿拉伯糖 > 鼠李糖	α-(1→4)-吡喃半乳糖醛酸骨架, 带有阿拉伯糖/半乳糖侧链; RG-I 样果胶结构域	HPGPC; GC-MS; FT-IR; NMR	[43]
4	AMAP-2	162	半乳糖醛酸 > 半乳糖 > 阿拉伯糖 > 鼠李糖	α-(1→4)-吡喃半乳糖醛酸骨架与 (1→2) / (1→2,4)-鼠李糖连接; 阿拉伯聚糖/AG-I 侧链	HPGPC; GC-MS; FT-IR; ¹ H/ ¹³ C NMR	[43]
5	AMAP-3	85	半乳糖醛酸 > 阿拉伯糖 ≈ 半乳糖 > 鼠李糖	由 α-(1→4) 连接的 D-半乳糖醛酸 (约占 73%); 少量 RG-I 结构域; C-6 位甲酯化	HPGPC; GC-MS; FT-IR; ¹ H/ ¹³ C NMR	[43]
6	AMP-B	—	葡萄糖-半乳糖-甘露糖-阿拉伯糖-鼠李糖 (3 : 2.5 : 1.3 : 3.5 : 1)	复合杂多糖; 中性糖 50.3%, 糖醛酸 40.4%, 蛋白质 11.5%	元素分析; GC; 生化测定	[43]
7	AP	4.25	阿拉伯糖-半乳糖-葡萄糖-甘露糖-半乳糖醛酸	具有不规则片状微观结构的杂多糖; 红外光谱呈现典型的碳水化合物特征	GPC-RI MALS; HPLC; SEM; FT-IR (波长 4 000 ~ 400 cm ⁻¹)	[43]
8	BZP-1-BZP-5	0.8 ~ 90	古洛糖醛酸-甘露糖-氨基葡萄糖-鼠李糖-葡萄糖醛酸-半乳糖醛酸-氨基半乳糖-葡萄糖-半乳糖-木糖-阿拉伯糖	α/β-吡喃葡萄糖苷键与 α-吡喃半乳糖苷键; 形貌、结晶度、三螺旋结构经炒制后发生改变	HPLC-ELSD; FT-IR; HPLC-PMP; SEM; ¹ H/ ¹³ C NMR; AFM; XRD; 刚果红实验	[43]
9	PAM	28.8	鼠李糖-葡萄糖-甘露糖-木糖-半乳糖 (0.03 : 0.25 : 0.15 : 0.41 : 0.15)	β-吡喃糖结构; 卷曲形貌	HPGPC; GC-MS; FT-IR; AFM	[43]
10	PAMK	4.75	葡萄糖-半乳糖-阿拉伯糖-果糖-甘露糖 (67 : 12 : 10 : 1 : 1)	β-型吡喃糖构型	GPC-RI MALS; 离子色谱法	[43]
11	RAMPS	109.4	葡萄糖 66.4%-甘露糖-阿拉伯糖-半乳糖-木糖-核糖-鼠李糖	富含吡喃半乳糖的杂多糖, 含有 (1→6) / (1→3) 连接的 β-D-吡喃半乳糖	GPC; GC-MS; ¹ H/ ¹³ C NMR	[43]
12	RAMP	145	葡萄糖-半乳糖-阿拉伯糖-甘露糖-鼠李糖-糖醛酸 (67 : 15 : 9 : 5 : 3 : 13)	硫酸化杂多糖, 具有 α/β-糖苷键; 吡喃糖环	HPGPC; GC-MS; FT-IR; SEM; AFM; ¹ H/ ¹³ C NMR	[43]
13	RAMP2	4.35	甘露糖-半乳糖醛酸-葡萄糖-半乳糖-阿拉伯糖 (1.00 : 8.58 : 27.28 : 3.68 : 4.99)	β-葡聚糖主链, 带有 α-吡喃半乳糖醛酸和阿拉伯糖侧链	HPSEC MALLS; HPGPC; FT-IR; HPLC-PMP; ¹ H/ ¹³ C NMR; TEM; SEM	[43]
14	RAMPS	—	D-核糖, D-阿拉伯糖, L-鼠李糖, D-甘露糖, D-葡萄糖, D-半乳糖 (1.0 : 4.3 : 0.1 : 5.7 : 2.8 : 2.2)	中性杂多糖; 葡萄糖、甘露糖、阿拉伯糖为主要单糖	GC-MS; 苯酚-硫酸法	[43]
15	RAMPtp	1.87	葡萄糖-甘露糖-鼠李糖-阿拉伯糖-半乳糖 (60.67 : 14.99, 10.61, 8.83, 4.90)	β-(1→3) / (1→6) 连接的 D-半乳糖; 吡喃糖构型; 无定形形貌	HPLC-PMP; FT-IR; ¹ H/ ¹³ C NMR; SEM; GPC	[43]
16	PRAM2	19.6	鼠李糖-木糖-阿拉伯糖-葡萄糖-甘露糖-半乳糖 (1 : 1.3 : 1.5 : 1.8 : 2.1 : 3.2)	中性杂多糖, 糖醛酸含量约 18.1%; RG-I 型分支结构	HPSEC; GC; 苯酚-硫酸法; 间羟基联苯法; 考马斯亮蓝法	[43]
17	WAM-1	—	葡萄糖-半乳糖 (3 : 1)	刚性链状多糖, 具有多分支结构	GC-MS; NMR; AFM	[43]
18	WAMPa	4.07	葡萄糖-阿拉伯糖-半乳糖 (35.9 : 7.1 : 1.7)	带有少量 α-L-呋喃阿拉伯糖的分支型 β-D-吡喃葡萄糖主链; α/β-糖苷键	SEM; HPGPC; UV; FT-IR; GC-MS; HPLC-PMP; 一维/二维 NMR	[43]

续表 2

序号	名称	分子量 (kDa)	单糖组成	结构组成	分离方法	参考文献
19	菊粉型	5.84	果糖-葡萄糖-阿拉伯糖 (93 : 5 : 2)	菊粉型果聚糖; 线性 β -D-呋喃果糖, 存在1,2,6-连接分支, 末端为吡喃葡萄糖	HPSEC MALLS-RID; GC-MS; FT-IR; $^1\text{H}/^{13}\text{C}$ NMR	[43]
20	菊粉型	2.3	葡萄糖-果糖 (α -D-吡喃葡萄糖单元和 β -D-呋喃果糖单元; 聚合度=3~20)	菊粉型果聚糖 (聚合度3~20), 包含蔗果四糖与1F-呋喃果糖基蔗果四糖	ESI-MS; FT-IR; HILIC-ELSD; 氢谱/二维 NMR; HPLC-ELSD	[43]
21	AMP ZnONPs	2.7	阿拉伯糖-半乳糖-葡萄糖-木糖-甘露糖-核糖-半乳糖醛酸-葡萄糖醛酸 (21.9 : 12.3 : 34.2 : 1 : 0.4 : 0.9 : 0.9 : 28.8 : 0.7)	富含糖醛酸的白术多糖接枝于氧化锌纳米颗粒; α/β -构型; 氧化锌晶格得以保留	HPGPC; HPAEC; FT-IR; SEM; TEM-EDS; XRD; XPS; Zeta 电位法	[43]
22	RAMP-1	32.8	阿拉伯糖-半乳糖-葡萄糖-甘露糖 (1 : 0.74 : 1.88 : 1.07)	$\rightarrow$ 3- β -吡喃葡萄糖-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 3,6- β -吡喃葡萄糖-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 6- β -吡喃葡萄糖-(1 $\rightarrow$, 末端- β -吡喃葡萄糖-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 4- α -吡喃半乳糖醛酸-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 4- α -	ELSD; IR; PC; GC; GC-MS; FGC/SAW	[44]
23	RAMP	—	阿拉伯糖-半乳糖-葡萄糖-甘露糖 (1 : 0.74 : 1.88 : 1.07)	吡喃半乳糖醛酸-6-O-甲基-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 5- α -呋喃阿拉伯糖-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 4,6- β -吡喃甘露糖-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 4- β -吡喃半乳糖-(1 $\rightarrow$	GC; GC-MS; FGC/SAW; IR	[44]
24	RAMP-2	4.354	甘露糖-半乳糖醛酸-葡萄糖-半乳糖-阿拉伯糖 (1 : 8.58 : 27.28 : 3.68 : 4.99)	—	NMR; FT-IR; HPGPC HPSEC MALLS; TEM; HPLC; SEM	[44]
25	PAMPS	—	核糖-阿拉伯糖-鼠李糖-甘露糖-葡萄糖-半乳糖 (1 : 4.3 : 0.1 : 5.7 : 2.8 : 2.2)	1,6-葡萄糖连接	GC-MS	[44]
26	PAMPS	220, 2.15	葡萄糖-甘露糖-阿拉伯糖-半乳糖-木糖-核糖-鼠李糖 (10 : 3.2 : 0.85 : 0.40 : 0.35 : 0.17 : 0.10)	1 $\rightarrow$ 3- β -D-吡喃半乳糖, 1 $\rightarrow$ 6- β -D-吡喃半乳糖	GPC; GC-MS; NMR	[44]
27	UAM	2921	葡萄糖	1 $\rightarrow$ 3- β -D-糖苷键, 1 $\rightarrow$ 3, 6- β -D-分支糖苷键	HPLC; GC; NMR; IR; UV	[44]
28	RAMP _{tp}	2.325	葡萄糖-甘露糖-鼠李糖-阿拉伯糖-半乳糖 (10 : 2.47 : 1.75 : 1.46 : 0.81)	1 $\rightarrow$ 3-D-吡喃半乳糖, 1 $\rightarrow$ 6-D-吡喃半乳糖	NMR; HPLC; GPC; SEM	[44]
29	PAMK	4.1	阿拉伯糖-葡萄糖-半乳糖 (1.5 : 5 : 1)	α -D-吡喃半乳糖, α -D-吡喃葡萄糖, α -L-呋喃阿拉伯糖	GC-MS; FT-IR; HPGPC; GC; NMR	[44]
30	PAMK	4.7	阿拉伯糖-葡萄糖-半乳糖 (1 : 1.25 : 6.78)	$\rightarrow$ 3- β -D-吡喃葡萄糖-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 3,6- β -D-吡喃葡萄糖-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 6- β -D-吡喃葡萄糖-(1 $\rightarrow$, 末端- β -D-吡喃葡萄糖, $\rightarrow$ 4- α -吡喃半乳糖醛酸-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 4- α -	GPC-RI-MALS; IC; MS	[44]
31	APA	2.1	阿拉伯糖-葡萄糖 (1 : 4.57)	吡喃半乳糖醛酸-O-甲基-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 5- α -呋喃阿拉伯糖-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 4,6- β -吡喃甘露糖-(1 $\rightarrow$, $\rightarrow$ 4- β -吡喃半乳糖-(1 $\rightarrow$	GC; FT-IR; HPGPC	[44]
32	PAM	28.773	鼠李糖-葡萄糖-甘露糖-木糖-半乳糖 (0.3 : 2.5 : 1.5 : 4.1 : 1.5)	—	GC-MS; FT-IR; GC; HPGPC; NMR	[44]
33	AMP	23.91	甘露糖-半乳糖醛酸-葡萄糖-阿拉伯糖 (12.05 : 6.02 : 72.29 : 9.64)	—	HPLC; GPC	[44]
34	AMP	8.374	葡萄糖-半乳糖-鼠李糖-甘露糖 (7.36 : 1.00 : 3.05 : 1.52)	α -(1 $\rightarrow$ 4) 糖苷键, β -(1 $\rightarrow$ 4) 糖苷键	HPLC; GC	[44]

续表 2

序号	名称	分子量 (kDa)	单糖组成	结构组成	分离方法	参考文献
35	PRAM2	19.6	鼠李糖-木糖-阿拉伯糖-葡萄糖-甘露糖-半乳糖 (1 : 1.3 : 1.5 : 1.8 : 2.1 : 3.2)	—	GC-MS; HPLC; HPLC; PSEC	[44]
36	AMP-B	—	葡萄糖-半乳糖-甘露糖-阿拉伯糖-鼠李糖 (3 : 2.5 : 1.3 : 3.5 : 1)	—	GC-MS	[44]
37	YPF-P	3.5	甘露糖-葡萄糖-半乳糖-阿拉伯糖 (1 : 239 : 18.6 : 19.3)	—	HPLC-GPC; TLC	[44]
38	YY13008	6.545	果糖-葡萄糖 (40 : 1)	(2→1)-β-D-吡喃岩藻糖, 末端为α-吡喃葡萄糖基	HPLC; GC; NMR; GPC-MALLS	[44]
39	RAMPS	109.4	葡萄糖-甘露糖-阿拉伯糖-半乳糖-木糖-核糖-鼠李糖 (10 : 3.2 : 0.85 : 0.34 : 0.35 : 0.17 : 0.1)	1→6-吡喃葡萄糖糖苷键	GPC; GC-MS; NMR; FT-IR	[44]
40	PSAM-1	136	鼠李糖-阿拉伯糖-甘露糖-半乳糖 (0.68 : 3.38 : 1 : 4.2)	α-构型; β-构型	HPLC-ELSD; NMR	[44]
41	PSAM-2	104	木糖-阿拉伯糖-半乳糖 (9.33 : 0.64 : 1)	β-构型	HPLC-ELSD; NMR	[44]
42	AM-1	31	甘露糖	β-构型	IR; UV; GC	[44]
43	AM-2	11	果糖	β-构型	IR; UV; GC	[44]
44	AMAP-1	137.5	半乳糖醛酸-阿拉伯糖-半乳糖-鼠李糖	1, 4-吡喃半乳糖醛酸占比 41.5%; 吡喃半乳糖占比 13.9%	HPGPC; HPLC-ELSD; FT-IR; GC-MS; NMR	[44]
45	AMAP-2	161.9	半乳糖醛酸-阿拉伯糖-半乳糖-鼠李糖	1, 4-吡喃半乳糖醛酸占比 52.7%	HPGPC; HPLC-ELSD; FT-IR; GC-MS; NMR	[44]
46	AMAP-3	85.3	半乳糖醛酸-阿拉伯糖-半乳糖-鼠李糖	1, 4-吡喃半乳糖醛酸占比 73.1%	HPGPC; HPLC-ELSD; FT-IR; GC-MS; NMR	[44]
47	BZJP	5.465	葡萄糖-甘露糖-木糖 (6.8 : 3.0 : 1)	β-吡喃木糖-[(1→3)-β-吡喃木糖] ₆ -(1→6)-α-吡喃葡萄糖-[(1→4)-α-吡喃葡萄糖] ₄₀ -(1→2)-α-吡喃甘露糖] ₁₂	GC-MS; NMR; IR	[44]
48	BZ-3-1	56.5	葡萄糖-甘露糖-鼠李糖-阿拉伯糖-木糖-半乳糖 (1.6 : 0.3 : 1 : 2.79 : 0.1 : 0.3)	—	HPGPC; GC-MS	[44]
49	BZ-3-2	55.9	葡萄糖-甘露糖-鼠李糖-阿拉伯糖-半乳糖 (8.24 : 2.78 : 0.34 : 1 : 0.8)	—	HPGPC; GC-MS	[44]
50	BZ-3-3	55.1	葡萄糖-甘露糖 (5.49 : 1)	—	HPGPC; GC-MS	[44]
51	WAM-1	—	葡萄糖-半乳糖 (3.01 : 1)	—	HPLC; GC; AFM	[44]
52	WAM	3.263	葡萄糖-半乳糖 (3.01 : 1)	β-D-1→3-吡喃葡萄糖; β-D-1→3,6-吡喃葡萄糖	HPLC; GC-MS; NMR; IR; AFM	[44]
53	菊粉型多糖	2.265	葡萄糖-果糖 (1 : 2)	α-D-吡喃葡萄糖-[(1→2)-β-D-呋喃岩藻糖] _{n-1} -(1→2)-β-D-呋喃岩藻糖 (n=3 ~ 20)	ESI-MS; NMR; IR; HPLC-ELSD	[44]

注: GPC-RI MALS.凝胶渗透色谱-示差折光-多角度激光光散射联用; HPLC-PMP.高效液相色谱-PMP柱前衍生化法; HPGPC.高效凝胶渗透色谱法; GC-MS.气相色谱-质谱联用; FT-IR.傅里叶变换红外光谱法; NMR.核磁共振波谱法; SEM.扫描电子显微镜; HPLC-ELSD.高效液相色谱-蒸发光散射检测器联用; AFM.原子力显微镜; XRD.X射线衍射; EDS.能量色散X射线光谱; ELSD.蒸发光散射检测器; ESI.电喷雾电离; FT-IR.傅里叶变换红外光谱; HILIC.亲水相互作用液相色谱; HPAEC.高效阴离子交换色谱; HPGPC.高效凝胶渗透色谱; HPSEC.高效尺寸排阻色谱; IC.离子色谱; IR.红外光谱; MALS.多角度(激光)光散射; NMR.核磁共振; PC.纸色谱; PMP.1-苯基-3-甲基-5-吡啶酮; RI.示差折光检测器; SEM.扫描电子显微镜; TEM.透射电子显微镜; TLC.薄层色谱; UV.紫外光谱; XPSX.射线光电子能谱; XRD.X射线衍射; FGC/SAW.气相色谱-表面声波检测器联用; HPSEC MALLS-RID.高效尺寸排阻色谱-多角度激光光散射-示差折光检测联用法; PC.纸色谱法; —表示文献未提及。

1.4 氨基酸类

氨基酸是生物有机体组成蛋白质的基本单元,可维持生物体基本生理功能。白术中含有天冬氨酸、苏氨酸、丝氨酸、谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸、半胱氨酸、缬氨酸、精氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸、组氨酸、脯氨酸共17种氨基酸。氨基酸类物质以谷氨酸为主,种类多、含量高,是白术成为药食同源药材的重要原因之一^[45-46]。白术总氨基酸中含有7种人体必需氨基酸,占12.7%:苏氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸,以及4种半必需氨基酸^[45-46]。

1.5 苷类

白术中苷类成分大多为倍半萜糖苷和黄酮苷。当前,从白术中提取出多个苷类化合物,比如苍术苷A、苍术苷B、10-表苍术苷A、淫羊藿次苷D1、淫羊藿次苷F2、紫丁香苷、二氢紫丁香苷^[47]等。此外,在白术提取物中还发现了尿苷^[48]。从白术地上部分提取分离出6个黄酮苷:7-甲氧基乔松苷(7-methoxy-pinocembrin-7-O- β -D-glucopyranoside)、异牡荆素(apigenin-8-C- β -D-glucopyranoside)、4'-咖啡酰-木犀草素-6-吡喃葡萄糖苷(4'-caffeoyl-luteolin-6-glucopyranoside)、高车前素(luteolin-6-C- β -D-glucopyranoside)、牡荆素(apigenin-6-C- β -D-glucopyranoside)、木犀草素(luteolin)^[49]。白术中的苷类成分见表3,结构见图2。

表3 白术苷类化学成分信息总结

Table 3. Summary of glycoside constituents from *Atractylodis macrocephalae* Rhizoma

编号	化合物	化学式	参考文献
1	苍术苷 A	C ₂₁ H ₃₆ O ₁₀	[47]
2	淫羊藿次苷 F2	C ₁₈ H ₂₆ O ₁₀	[47]
3	紫丁香苷	C ₁₇ H ₂₄ O ₉	[47]
4	高车前素	C ₂₁ H ₂₀ O ₁₁	[49]
5	木犀草素	C ₁₅ H ₁₀ O ₆	[49]

1.6 聚乙炔类

目前已从白术中分离出多种聚乙炔类成分。白术的主要聚炔母核为呋喃-烯-二炔-烯和单烯-二炔-二烯共轭体系^[50-51]。Zhou等^[52]从白术乙酸乙酯提取物中分离得到两个新的新聚乙炔化合物:(5*Z*,12*E*)-14-hydroxytetradeca-5,12-dien-8,10-diyn-1-yl3-methylbut-2-enoate ((5*Z*,12*E*)-14-羟基十四-5,12-二烯-8,10-二炔-1-基3-甲基丁-2-烯酸酯)、5*S*,1'*R*-(6*E*,12*E*)-1-hydroxytetradeca-6,12-dien-8,10-diyn-5-yl2-methylbutanoate (5*S*,1'*R*-十四碳-6*E*,12*E*-二烯-8,10-二炔-1,5-二醇-5-基-2-甲基丁酸酯),这两种物质在肝癌细胞(HepG2和Huh7)中表现出细胞毒活性,表明白术有抗肝癌的潜力。此外,Chen等^[53]从白术中最新分离出6种新的聚乙炔类成分,进一步丰富了该类成分的已知种类。白术中的聚乙炔类成分见表4,具体结构见图3。

1.7 微量元素

白术中含有48种微量元素的含量。其中B、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Se、Rb、Sr、

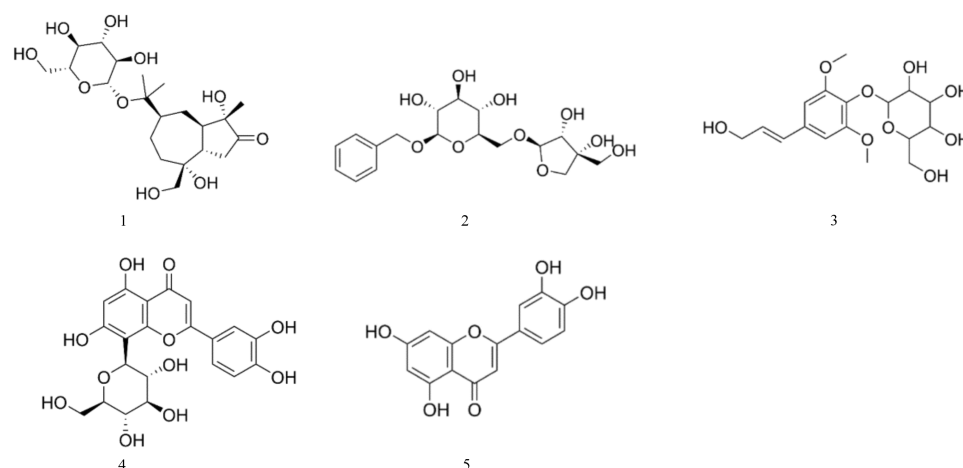


图2 白术中苷类成分的结构式

Figure 2. Structures of glycosides from *Atractylodis macrocephalae* Rhizoma

注: 1~5与表3编号对应。

Mo、Sn 等人体必需微量元素含量较高^[54]。汤洪波等^[45]测定白术中 Zn、Fe、Cu、Mg、Cr、Mn、Pb、Cd、K、Ni、Co 共 11 种元素的含量。其中人体的常量元素包括 Mg、K，必需微量元素包括

Cu、Fe、Zn、Cr、Mn、Co、Ni，非必需微量元素包括 Pb、Cd。这些元素构成了白术的药效基础，各元素间相互作用，为其药效的广泛应用提供有力依据。白术中的微量元素信息见表 5。

表 4 白术中的聚乙炔类成分信息总结

Table 4. Summary of glycoside constituents from *Atractylodis macrocephalae* Rhizoma

编号	化合物	化学式	参考文献
1	(12 <i>R</i> ,2 <i>E</i> ,8 <i>E</i> ,10 <i>E</i>)-12-乙酰氧基-14-阿魏酰基十四碳-2,8,10-三烯-4,6-二炔	C ₂₆ H ₂₆ O ₆	[53]
2	(12 <i>R</i> ,2 <i>E</i> ,8 <i>E</i> ,10 <i>E</i>)-12-乙酰氧基-14-阿魏酰基十四碳-2,8,10-三烯-4,6-二炔	C ₂₆ H ₂₆ O ₆	[53]
3	(12 <i>R</i> ,2 <i>E</i> ,8 <i>E</i> ,10 <i>E</i>)-12-乙酰氧基-14-顺式阿魏酰基十四碳-2,8,10-三烯-4,6-二炔	C ₂₆ H ₂₆ O ₆	[53]
4	(12 <i>R</i> ,2' <i>S</i> ,2 <i>E</i> ,8 <i>E</i> ,10 <i>E</i>)-12-甲基丁基-14-阿魏酰基十四碳-2,8,10-三烯-4,6-二炔-1-醇	C ₂₉ H ₃₂ O ₇	[53]
5	(12 <i>R</i> ,2 <i>E</i> ,8 <i>E</i> ,10 <i>E</i>)-12-异戊酰基-14-阿魏酰基十四碳-2,8,10-三烯-4,6-二炔-1-醇	C ₂₉ H ₃₂ O ₇	[53]
6	(8 <i>S</i> ,2 <i>E</i>)-8-异戊酰氧基-1-乙酰氧基-2-三烯-4,6-二炔	C ₁₇ H ₂₂ O ₄	[53]
7	(5 <i>Z</i> ,12 <i>E</i>)-14-羟基十四碳-5,12-二烯-8,10-二炔-1-基 3-甲基丁-2-烯酸酯	C ₁₉ H ₂₄ O ₃	[52]
8	(5 <i>S</i> ,1' <i>R</i>)-(6 <i>E</i> ,12 <i>E</i>)-1-羟基十四碳-6,12-二烯-8,10-二炔-5-基 2-甲基丁酸酯	C ₁₉ H ₂₆ O ₃	[52]
9	(2 <i>E</i> ,8 <i>E</i>)-12β-甲基丁酰基十四碳-2,8-二烯-4,6-二炔-1,14-二醇	C ₂₂ H ₃₂ O ₃	[52]
10	(<i>E</i>)-5-[5-(丁-3-烯-1-炔-1-基)噻吩-2-基]戊-2-烯-4-炔-1-基乙酸酯	C ₁₆ H ₁₄ O ₂ S	[52]

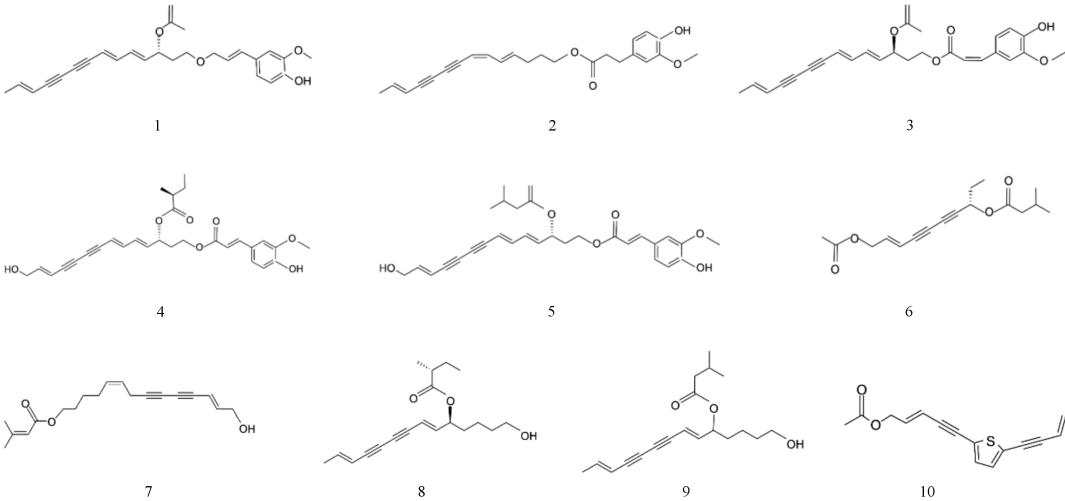


图 3 白术中聚乙炔类物质的结构式

Figure 3. Structures of polyacetylenes from *Atractylodis macrocephalae* Rhizoma

注：1~10 与表 4 编号对应。

表 5 白术不同类别微量元素及含量总结

Table 5. Summary of various types of trace elements and their contents from *Atractylodis macrocephalae* Rhizoma

编号	类别	名称	含量 (μg/g)	参考文献
1	必需元素	硼 (B)	27.660	[54]
2		铬 (Cr)	27.110	[54]
3		锰 (Mn)	38.539	[54]
4		钴 (Co)	0.557	[54]
5		镍 (Ni)	11.455	[54]
6		铜 (Cu)	122.578	[54]
7		锌 (Zn)	30.989	[54]
8		硒 (Se)	0.133	[54]
9		钒 (V)	3.858	[54]
10		锡 (Sn)	28.271	[54]
11		钼 (Mo)	0.235	[54]

续表6

编号	类别	名称	含量 (μg/g)	参考文献
12	有益元素	锂 (Li)	1.255	[54]
13		镓 (Ga)	0.501	[54]
14		锗 (Ge)	0.298	[54]
15		铯 (Cs)	0.181	[54]
16		铷 (Rb)	12.344	[54]
17		锶 (Sr)	38.559	[54]
18	潜在毒性元素	砷 (As)	0.601	[54]
19		银 (Ag)	0.069	[54]
20		镉 (Cd)	0.111	[54]
21		锑 (Sb)	37.169	[54]
22		钡 (Ba)	17.091	[54]
23		汞 (Hg)	0.120	[54]
24	稀土元素	铊 (Tl)	0.032	[54]
25		铅 (Pb)	1.006	[54]
26		铋 (Bi)	0.045	[54]
27		钐 (Sm)	0.139	[54]
28		铕 (Eu)	0.027	[54]
29		钕 (Nd)	0.735	[54]
30		镨 (Pr)	0.209	[54]
31		铈 (Ce)	1.767	[54]
32		镧 (La)	1.004	[54]
33		镱 (Lu)	0.009	[54]
34		镱 (Yb)	0.068	[54]
35		铥 (Tm)	0.009	[54]
36		铒 (Er)	0.066	[54]
37		铥 (Ho)	0.019	[54]
38		镝 (Dy)	0.141	[54]
39		铽 (Tb)	0.021	[54]
40		钪 (Sc)	0.598	[54]
41		钆 (Gd)	0.141	[54]
42	其他元素	钇 (Y)	1.098	[54]
43		钛 (Ti)	93.672	[54]
44		铍 (Be)	0.065	[54]
45		铌 (Nb)	0.266	[54]
46		钽 (Ta)	0.012	[54]
47		钨 (W)	0.068	[54]
48		锆 (Zr)	1.793	[54]

1.8 其他成分

除上述成分外,白术还含有 β -谷甾醇等植物甾醇类化合物;蒲公英萜醇乙酸酯、 β -香树脂醇乙酸酯、角鲨烯3种三萜类成分;菝葜亭、瑞香素、滨蒿素、奥索内酯4种香豆素类化合物;树脂、白术三醇、黄酮类和苯醌类物质,且苯醌类成分经研究发现均有抗肿瘤活性^[47, 55-58]。

2 炮制、提取工艺、产地及采收年限因素对化学成分的影响

2.1 炮制及提取工艺

与炮制前的白术生品相比,白术炮制品的活性成分含量有所变化。比如,炮制后的苍术酮含量下降,内酯类成分含量上升。据此分析,白术

经炮制后苍术酮转化为白术内酯类成分。其中，土炒白术的苍术酮含量的下降程度最大；白术内酯Ⅰ、Ⅲ的含量显著升高。在麸炒白术中的质量分数最高；白术内酯Ⅱ含量升高不明显，土炒含量最高；总挥发油含量明显下降，土炒白术含量最低，白术内酯类的含量则有不同程度的升高可能由于苍术酮熔点低、性质不稳定，在一定温度下暴露在空气中遇热、见光转化为白术内酯Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ等成分，使苍术酮的含量降低、燥性缓和、白术内酯类含量增加，土炒、麸炒、清炒白术的多糖含量均高于生品，土炒含量最高，蒸白术含量最低；白术炮制品的抗氧化活性均高于生品，清炒最高，蒸白术最低^[59]。

炮制白术可以影响白术活性成分的含量。因此确定最佳提取炮制工艺对白术化学成分获得以及改善药效等方面至关重要。赵若含等^[60]研究发现麸炒白术的最佳炮制工艺参数为 100 g 白术用 10 g 麦麸，在 240 ℃下炒制 6 min；朱慧萍等^[61]确定了最佳工艺条件为在 270 ℃下以 10% 麦麸炒 21 min。孟振豪等^[62]通过测得蜜麸炒白术的最佳工艺为蜜糠用量 55.8%，炒温 261 ℃，炒时 3 ~ 4 min。由此可见，确定最佳炮制工艺可有效提升白术化学成分分离的效率和相应的药效，也可降低药材毒性、改善药材特性、保持质

量稳定，最终适配临床需求。

2.2 产地及采收年限

不同产地的白术在药性、化学成分的含量也有不同。研究对产自浙江、安徽、湖北、湖南、河北、河南六个省份的白术提取出的苍术酮进行含量测定，发现产自浙江和湖南省的白术含有苍术酮的含量居于首位^[29]。邱细敏等^[63]研究浙江、怀化和平江三地产出的白术发现，浙江与平江产出的白术，多糖含量相近，但高于怀化白术的多糖含量；而浙江与白术两地产出白术的葡萄糖含量相近；三地白术的水溶性糖含量高于其中含有的还原性糖。

3 白术及其化学成分的主要药理作用

白术作为临床最常用的传统健脾益气类中药材之一，具有药性平和、补益温和等特点。补而不滞、温而不燥。作为一种药食同源性中药，其不良反应轻微，适宜长期调理机体。白术药理活性丰富广泛，所含的白术多糖、白术内酯、挥发油等丰富的活性成分可作用于人体消化、心血管、神经、免疫及肝肾等。白术能够有效改善机体代谢紊乱、减轻氧化炎症损伤、修护受损脏腑组织，持续增强机体内环境稳态。通过多靶点、多通路整合机制对人体机能进行调理和改善。主要药理作用见表6。

表6 白术的主要药理作用

Table 6. Main pharmacological effects of *Atractylodis macrocephalae* Rhizoma

药理作用	代表活性成分	关键机制	参考文献
抗肿瘤	白术内酯、白术挥发油、白术多糖	抑制肿瘤细胞增殖；抑制肿瘤的侵袭和转移；抑制肿瘤细胞活性、干细胞特性和上皮间质转化能力	[64-78]
调节胃肠道	白术内酯、白术挥发油、白术多糖	白术内酯Ⅲ抑制 MMP-2/9 保护胃黏膜；白术内酯Ⅱ/Ⅲ协同苍术酮、β-桉叶醇经 STIM1-TRPC1 通路促进肠上皮修复；白术挥发油促进胃肠运动；白术挥发油与白术多糖通过调节菌群结构与代谢通路，改善结肠炎症与腹泻	[79-84]
健脾运脾	白术内酯	—	[85-86]
保护肝脏	白术多糖、白术内酯、白术挥发油	白术多糖调控信号通路，调节氧化应激指标，改善炎症性肝损伤；白术内酯抑制 M1 巨噬细胞极化，减少促炎因子，改善急性肝衰竭；白术挥发油激活 AMPK/Nrf2 抗氧化通路；激活自噬；降低转氨酶，改善药物性急性肝损伤	[87-89]
保护心脏	白术内酯	白术内酯Ⅰ激活 HIF-1α/VEGF 信号通路，发挥抗凋亡和抗炎作用，改善急性心肌梗死，缩小心肌梗死面积；白术内酯Ⅱ抑制心肌细胞凋亡、纤维化及氧化应激，改善自发性高血压心功能；白术内酯Ⅲ调控 GRP78/PERK/CHOP 信号通路抑制内质网应激相关凋亡，改善心肌细胞损伤	[90-92]
利尿	苍术酮	非竞争性抑制 Na ⁺ ，K ⁺ -ATP 酶，减少 Na ⁺ 重吸收，促进水钠排泄，改善水肿	[93-94]
抗衰老	白术多糖	提高抗氧化物酶活性、清除自由基代谢产物、保护 DNA 免受氧化损伤，发挥抗衰老作用	[95]
抗老年痴呆	白术多糖、白术内酯	抑制乙酰胆碱酯酶活性，改善阿尔茨海默病所致的记忆力衰退	[96-97]
调节免疫力	白术多糖	增加免疫细胞数量、提高免疫分子水平、调控细胞内信号传导，增强机体特异性免疫和非特异性免疫功能	[98-99]

续表6

药理作用	代表活性成分	关键机制	参考文献
调节神经系统	白术内酯	白术内酯Ⅲ抑制炎症通路和胱天蛋白酶介导的凋亡通路, 保护神经元免受炎症和兴奋性毒性损伤; 白术多糖通过肠-脑轴间接调控中枢神经, 调节肠道微生态, 通过丁酸屏障修复, 抑制TLR4/NF- κ B炎症通路, 发挥系统性神经保护效应	[41, 100–101]
抗炎、抗病毒、抗菌	白术内酯、白术挥发油	白术内酯抑制NLRP3/NF- κ B炎症通路减轻胃黏膜炎症损伤, 保护消化系统; 白术内酯Ⅰ~Ⅲ干扰病毒生物合成与吸附过程直接灭活轮状病毒; 白术挥发油通过广谱抑菌作用对抗多种病原菌	[25, 102–103]
抗氧化	白术多糖、白术挥发油	白术多糖提高抗氧化酶活性, 缓解氧化应激, 保护肠道组织免受化学药物损伤; 白术挥发油增强机体对缺氧环境的耐受力, 体现抗氧化保护效应	[104–105]
舒缓子宫平滑肌	白术提取物	直接对子宫平滑肌产生抑制作用, 对抗多种因素诱导的子宫异常收缩	[106–107]
抗抑郁	白术多糖	直接调节HPA轴和脑内神经递质水平, 修复海马神经元损伤, 发挥中枢性抗抑郁效应; 通过肠-脑轴间接发挥作用, 调节肠道微生态, 经“菌群-代谢物-屏障-炎症”链条阻断外周炎症信号向中枢的传递, 保护海马神经元, 发挥抗抑郁作用	[108–109]
降血糖	白术多糖	修复受损的胰岛组织, 恢复胰岛素分泌功能; 提高外周组织对胰岛素的敏感性, 增强现有胰岛素的生物学效应, 改善糖耐量	[110]
调节代谢综合征(肥胖、高血脂)	白术提取物	激活AMPK信号通路抑制脂肪酸合成途径中的关键酶和转录因子, 减少内源性脂质生成, 降低血脂水平, 减轻肥胖和脂肪肝程度	[111–112]
骨保护	白术内酯	抑制NF- κ B信号通路, 阻断破骨细胞分化和活化, 减少破骨细胞生成、破坏破骨细胞骨架结构、降低氧化应激水平, 干预骨吸收过程, 对抗骨量丢失	[113]

注: MMP.基质金属蛋白酶; STIM1.基质相互作用分子1; TRPC1.经典瞬时受体电位通道1; AMPK.AMP活化蛋白激酶; Nrf2.核因子E2相关因子2; HIF-1 α .缺氧诱导因子1 α ; VEGF.血管内皮生长因子; GRP78.葡萄糖调节蛋白78; PERK.蛋白激酶R样内质网激酶; CHOP.C/EBP同源蛋白; TLR4.Toll样受体4; NF- κ B.核因子 κ B; NLRP3.NLR家族含热蛋白结构域蛋白3; HPA.下丘脑-垂体-肾上腺轴; AMPK.AMP活化蛋白激酶; —表示文献未提及。

3.1 抗肿瘤作用

白术内酯是白术发挥抗肿瘤作用的主要化学成分之一, 其中白术内酯Ⅰ的抗肿瘤活性最好^[64]。白术内酯Ⅰ能抑制胃癌MGC-803细胞增殖, 且抑制作用呈时间和剂量依赖性; 抑制Notch信号通路中Notch1、Hey1、Jagged1和Hes1蛋白的表达水平, 进而抑制胃癌细胞增殖, 阻碍胃癌发展^[65]。此外, 白术内酯Ⅰ还可用于治疗宫颈癌^[66]、卵巢癌^[67]、膀胱癌^[68]、鼻咽癌^[69]、前列腺癌^[70]、肺癌^[71]、食管癌^[72]; 白术内酯Ⅱ和Ⅲ也显示出抗肿瘤活性。比如, 白术内酯Ⅱ可用于治疗人子宫内膜癌^[73]、大肠癌等^[74]肿瘤疾病; 白术内酯Ⅲ可用于宫颈癌^[75]治疗。

白术挥发油显示出具有抑制肿瘤的作用。以不同剂量白术挥发油对小鼠H22肝癌血道转移模型进行干预处理, 各剂量组的白术挥发油均能降低指标MMP-9的表达水平, 显著抑制肿瘤的侵袭和转移^[76]。张宗等^[77]发现以不同剂量白术挥发油腹腔给药的方法干预动物移植性肿瘤艾氏腹水癌, 各剂量组白珠慧发育均可对艾氏腹水癌产生较强抑制作用, 且大剂量给药1次, 可使小鼠的寿命延长197%, 再次说明白术挥发油具有抑制肿瘤的作用。

白术多糖同样对肿瘤具有抑制作用, 比如, 不同浓度的白术多糖干预处理肝癌HepG2细胞, 通过调节相关蛋白表达水平, 抑制HepG2细胞的活性、干细胞特性和上皮间质转化能力, 抑制蛋白激酶B(Akt)/NF- κ B磷酸化水平, 以此实现白术多糖的抗肿瘤功效^[78]。

总体来讲, 白术的抗肿瘤效应呈现典型多成分、多通路、广谱性特点。不同活性成分所产生的抗癌作用机制存在某些特异性。比如, 内酯类侧重靶向调控肿瘤增殖, 挥发油重在抑制肿瘤侵袭转移。多糖则可影响肿瘤细胞的细胞特性。

3.2 调节胃肠道作用

慢性萎缩性胃炎是一种以胃黏膜广泛性或局部性固有腺体萎缩、黏膜层变薄、黏膜肌层变厚为主要病理改变的慢性胃炎^[79], 是一种胃癌前病变状态。白术内酯Ⅲ通过抑制MMP-2和MMP-9的表达, 减少细胞外基质损伤, 保护胃黏膜并阻止胃溃疡的形成^[80]。此外, 白术内酯Ⅱ、白术内酯Ⅲ与白术中的苍术酮、 β -桉叶醇协同作用于肠上皮细胞, 通过激活STIM1-TRPC1通路增加细胞内Ca²⁺浓度, 鸟氨酸脱羧酶上调、促进G1期增加及迁移相关蛋白表达, 促进细胞增殖, 进而促进胃肠上皮修复^[81]。事实上, 白术对胃肠道的

运动还具有双向调节的作用。白术挥发油干预阿托品预处理的小鼠,通过小鼠肠推进试验和胃排空实验,证明白术挥发油对正常小鼠和阿托品预处理的小鼠均具有明显促进胃肠运动的作用^[82]。

研究证实,白术的活性成分(白术挥发油、白术多糖)对溃疡性结肠炎、脾虚泄泻具有显著疗效,能有效缓解血性腹泻、减轻结肠组织损伤和炎症反应。其机制与调节肠道菌群密切相关:抑制有害菌(如 *Turicibacter*),富集有益菌(如 *Akkermansia*),通过调控代谢物,影响氨基酸(尤其是色氨酸)、胆汁酸及视黄醇等关键代谢通路,维持肠道稳态^[83-84]。

白术通过多成分、多途径发挥胃肠保护与调控作用。即其不仅能保护胃黏膜、阻断胃癌前病变进展,还可修复肠上皮损伤,并双向调控胃肠运动,充分体现了白术调理胃肠、防病防变的药效优势,为防治胃肠疾病提供依据。

3.3 健脾运脾作用

最早在《伤寒杂病论》^[85]中即多次运用白术治疗脾胃病,并总结了多首与白术有关的方剂,例如理中丸的主要功效是温中散寒,方中白术归脾胃经,可以补气健脾;《太平惠民和剂局方》^[86]中记载的藿香正气散,方中白术、茯苓配伍,可以起到健脾利湿的效果,进以止泻,共同作用辅助藿香内化湿浊而止吐泻;枳术汤方中枳实行气,白术健脾。

3.4 保护肝脏作用

白术多糖、内酯和挥发油均可发挥保肝作用,即可改善炎症性、药物急性肝损伤。其依托抗炎、抗氧化、激活自噬的多机制起效,充分体现白术多成分、多靶点的特点。谷胱甘肽过氧化物酶和丙二醛表达水平升高可诱导脂多糖引起的肝损伤,白术多糖通过调控相关信号通路,调节蛋白表达,发挥治疗脂多糖介导肝炎小鼠的作用,实现保护肝脏的功效^[87]。白术内酯 I 也可通过抑制相关信号通路,调控 M1 巨噬细胞极化方向,减少促炎因子的分泌释放,减轻以脂多糖/D-半乳糖胺诱导构建急性肝衰竭小鼠的肝脏损伤^[88]。李铮等^[89]用白术挥发油干预对乙酰氨基酚灌胃小鼠建立的急性肝损伤,肝损伤小鼠血液中天冬氨酸转氨酶和丙氨酸转氨酶的水平均降低;肝脏内的谷胱甘肽的水平上升;AMPK 和 Nrf2 通路被激活;与氧化应激相关的蛋白表达显

著升高,证明白术挥发油通过激活抗氧化通路和自噬有效缓解了急性肝损伤。

3.5 保护心脏作用

白术内酯 I 可改善急性心肌梗死大鼠的心功能、减轻心肌损伤、缩小心肌梗死面积,这些与其可激活 HIF-1 α /VEGF 信号通路,减少细胞凋亡、降低肿瘤坏死因子- α 和白细胞介素-1 β 水平密切相关^[90];白术内酯 II 剂量依赖性改善自发性高血压大鼠体质量与心功能,抑制心肌细胞凋亡、心肌纤维化及氧化应激,有望用于高血压相关心血管疾病治疗^[91];白术内酯 III 调控 GRP78/PERK/CHOP 信号通路,上调 B 淋巴细胞瘤-2 基因、下调凋亡及应激相关分子,提升衣霉素诱导的 H9c2 心肌细胞活力、抑制凋亡,发挥心肌保护作用^[92]。

3.6 利尿作用

施文荣等^[93]发现低剂量白术水煎剂会减慢小鼠腹腔生理盐水负荷的清除,而高剂量水煎剂则加快此过程,证明白术具有燥湿利尿作用。在后续研究中,实验人员进一步明确了白术中发挥利尿作用的主要活性成分为苍术酮,苍术酮对 Na⁺, K⁺-ATP 酶有较强的非竞争性抑制作用,是 Na⁺, K⁺-ATP 酶的特异性抑制剂,通过结合 E2 构象酶能够发挥利尿作用,有效改善临床患者水肿性疾病症状^[94]。

3.7 抗衰老作用

白术水煎剂对老年小鼠连续灌胃,其中有效成分可明显降低红细胞中丙二醛的含量,显著提高全血谷胱甘肽过氧化物酶的活力,提示白术具有一定的抗衰老作用^[95]。白术多糖可提高致衰大鼠神经细胞抗氧化物酶的活性,降低自由基代谢产物的含量,减少 DNA 的损伤,实现抗衰老作用。

3.8 抗老年痴呆作用

研究表明,白术中的有效成分对阿尔茨海默病具有一定的抑制作用,通过高剂量白术醇抑制乙酰胆碱酯酶能有效提高记忆力^[96];刘洋等^[97]进一步利用水迷宫法观察双白术内酯对记忆障碍模型小鼠的影响,发现双白术内酯也可降低脑内乙酰胆碱酯酶水平、改善三氯化铝致痴呆模型小鼠的学习记忆能力。

3.9 调节免疫力作用

在大鼠基础日粮中添加不同浓度的白术多

糖,能够有效增加大鼠的外周血白细胞含量和血清溶菌酶含量,提高血清免疫球蛋白和补体水平,促进外周血、脾脏T/B淋巴细胞转化率,增加机体的免疫功能^[98]。朱南山等^[99]发现白术多糖能显著促进仔猪血淋巴细胞转化率、干扰素 γ 、细胞内一氧化氮浓度及环腺苷酸浓度,通过改变细胞内信息传导,实现对血淋巴细胞的免疫功能,有效调节免疫力。

3.10 保护神经系统作用

白术内酯Ⅲ具有神经保护作用。白术内酯Ⅲ可有效改善脊髓损伤大鼠的组织学及功能恢复。机制分析发现,其可过抑制NF- κ B、c-Jun N末端激酶(丝裂原活化蛋白激酶家族成员)、p38丝裂原活化蛋白激酶及Akt通路介导的神经炎症。此外,白术内酯Ⅲ还可促进M1巨噬细胞型向M2型转化、抑制小胶质细胞、巨噬细胞激活,进而下调相关炎症介质的表达,最终产生保护神经系统的作用^[100]。谷氨酸诱导的兴奋性毒性是引起神经系统疾病的关键因素,白术内酯Ⅲ对谷氨酸诱导的神经元凋亡具有显著的抑制效果,且呈浓度依赖性,其抗凋亡作用可能部分通过抑制胱天蛋白酶信号通路实现。这些发现提示,白术内酯Ⅲ可能会成为治疗兴奋性毒性介导的神经系统疾病的潜在药物^[101]。

白术多糖基于肠-脑轴调控,既能对抗失重所致的认知衰退,又能缓解化疗引起的抑郁,展现出广泛的中枢神经保护潜力。白术还被证实具有胃肠道保护和免疫调节作用,提示其在肠-脑轴调控中可能具有潜在价值。比如,白术多糖AMP1-1通过调节肠道菌群促进丁酸生成,从而恢复肠道和血脑屏障,抑制外周和中枢炎症,并抑制海马TLR4/髓样分化因子88/NF- κ B通路,进而缓解失重诱导的认知损伤^[41]。

3.11 抗炎、抗病毒、抗菌作用

白术内酯Ⅰ通过抑制NLRP3炎症小体信号通路,改善胃黏膜形态、增加血流量、下调炎症因子肿瘤坏死因子- α 、白细胞介素-6、上调保护因子前列腺素E₂、降低NLRP3、NF- κ B等炎症相关分子的表达,缓解吲哚美辛诱导的大鼠胃溃疡,减轻局部炎症^[102]。白术内酯Ⅰ~Ⅲ对细胞毒性及体内外轮状病毒生物合成、吸附具有抑制作用,可直接灭活轮状病毒,证明其抗病毒作用^[103]。白术挥发油具有抗菌的作用,对大肠埃希菌、铜

绿假单胞菌、沙门菌、金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌均可发挥抑制作用^[25]。

3.12 抗氧化作用

对环磷酸胺诱导的肠损伤模型补充白术多糖,能显著提高肉鸡的抗氧化能力,改善雏鸡的抗氧化酶活性、缓解氧化应激^[104]。采用白术挥发油对小鼠进行连续灌胃能显著延长小鼠常压缺氧下存活的时间和断头喘气时间,也能证明白术挥发油具有一定的抗氧化能力^[105]。

3.13 舒缓子宫平滑肌作用

白术提取物对未孕小鼠离体子宫的自发性收缩及对催产素或益母草引起的子宫兴奋性收缩呈显著抑制作用。这种作用可随药物浓度增加,抑制作用增强,与传统应用白术安胎的方法相吻合。此外,白术对子宫平滑肌具有直接作用,能够维持子宫平滑肌静息状态,可用于治疗早产^[106-107]。

3.14 抗抑郁作用

不同剂量的白术多糖能够显著改善抑郁小鼠的抑郁样行为。其中的作用机制可通过调节脑肠轴、HPA轴等实现,进而通过神经递质、炎症因子、激素水平调节等修复海马尼氏体,实现抗抑郁治疗效果^[108]。

此外,白术多糖可通过调节肠-脑轴发挥抗化疗抑郁作用。其机制具有多靶点、链条式的特征。即白术多糖AP通过调节肠道菌群,增加有益菌Alistipes(另枝菌属)的丰度并减少有害菌,进而改变肠道代谢物谱,一方面抑制肠道组织铁死亡,另一方面修复肠道屏障损伤,从而减少外周炎症向中枢的传递,最终保护海马神经元,改善化疗所致抑郁样行为^[109]。

3.15 降血糖作用

白术多糖能对四氧嘧啶引起的大鼠胰岛损伤产生一定的恢复作用,证明白术多糖对四氧嘧啶引起的糖尿病大鼠有明显的降血糖作用。利用白术多糖对自发性2型糖尿病小鼠进行灌胃干预,小鼠的空腹血糖、血浆胰岛素能显著降低;胰岛素敏感性指数上升,耐糖量改善,但其体重无明显变化,提示其降糖机制可能与降低血浆胰岛素、增强胰岛素敏感性有关^[110]。

3.16 改善代谢综合征(肥胖、高血脂)的作用

有研究采用高脂饮食诱导的代谢相关脂肪性

肝病小鼠模型验证了白术水煎剂对小鼠体重增长具有显著抑制。白术水煎剂可使得患病小鼠附睾脂肪和肝脏重量显著降低,血清总胆固醇、甘油三酯、低密度脂蛋白及血糖水平均明显下降,肝组织脂滴蓄积显著减轻。机制研究表明,白术通过激活 AMPK 磷酸化,进而抑制其下游乙酰辅酶 A 羧化酶活性,下调固醇调节元件结合蛋白 1 及脂肪酸合成酶的表达,从转录和酶活性层面双重阻断肝脏脂肪酸从头合成途径。白术不影响脂肪酸 β 氧化相关蛋白表达,提示其降脂作用主要源于抑制脂质合成而非促进分解。该研究为白术改善肥胖及相关代谢紊乱提供了实验依据^[111]。经过白术甲醇提取物连续干预高脂血症小鼠,发现白术提取物亲脂性部位可显著改善小鼠体重、血脂及肝系数相关指标,证明该亲脂性部位是白术降血脂的有效活性组分^[112]。

3.17 护骨作用

长期使用糖皮质激素会显著影响骨骼健康,其中糖皮质激素性骨质疏松症是最常见的不良反应。研究发现,白术内酯 I 可以剂量依赖性方式抑制核因子 κ B 受体活化因子配体刺激的破骨细胞分化,破坏成熟破骨细胞中 F-actin 环的结构,阻断核因子 κ B 受体活化因子配体诱导的活性氧产生,并抑制破骨细胞相关基因的表达。由此,白术内酯 I 治疗有效防止了地塞米松诱导糖皮质激素性骨质疏松症,表明白术内酯 I 可能具有作为治疗糖皮质激素性骨质疏松症药物的潜力^[113]。

3.18 白术的用药安全性与毒理学研究

急性毒性试验表明,白术毒性轻微。Yang 等^[6]采用白术挥发油开展大鼠亚慢性长期毒性试验,设置 300、100 mg/kg 2 个剂量白术挥发油乳剂连续灌胃 3 个月,结果证实该剂量范围内长期给药具备安全性,提示常规剂量下白术长期使用不会产生显著不良反应。此外,白术水提物显示无遗传毒性;白术多糖在实验浓度下未观察到细胞毒性。

值得一提的是,白术挥发油是潜在的刺激性物质基础。生白术挥发油含量较高,大剂量挥发油可造成胃肠道黏膜刺激,出现黏膜充血等损伤表现;麸炒炮制工艺能够降低挥发油含量,缓和其燥性,减轻胃肠刺激风险。配伍是降低白术挥发油刺激性、优化用药安全性的有效手段。与甘草、麦冬等滋阴甘缓药材配伍,可拮抗挥发油对

消化道黏膜的损伤;复方共煎能够调控白术内酯溶出特征,减少毒性单体体内蓄积,实现减毒目的^[6]。

4 结语

本文通过整合近年研究发现,白术中的新的化学成分被陆续发现且展示了良好的生理活性。这些生物活性成分的药效发挥依赖多成分协同、多靶点调控、多通路作用的整合效应。

白术作为经典健脾益气类中药,亦是“浙八味”之一。其药用历史悠久、物质基础明确,基于白术的中医药新药研发显示出了很高的开发和临床应用价值。本文全面总结了代表性白术化学成分和近几年鉴定出新的化学成分。白术以挥发油、倍半萜内酯、多糖、聚乙炔类为核心活性组分,其中苍术酮、白术内酯 I/III、白术多糖展示出越来越多的新型抗肿瘤、健脾、脏器保护活性,具有极大的临床应用潜力。

本文全面总结了白术的药理作用,白术展现出多靶点、多系统保护优势,白术多糖、白术内酯、苍术酮可通过调控不同信号通路,抑制癌细胞增殖、转移并诱导凋亡。同时,白术对胃肠、心、肝、肾、神经等系统具有保护作用,调节胃肠功能、增强免疫、抗氧化、抗衰老、改善老年痴呆,舒缓子宫平滑肌,重点拓展肠道菌群-肠脑轴调控、神经保护、骨保护、肥胖与高血脂等代谢综合征前沿热点通路,系统梳理各活性成分对应的靶点与信号传导网络,同时补充挥发油黏膜刺激性、长期给药安全性、配伍减毒的系统毒理学内容,契合中医“健脾益气、燥湿利水、安胎”的传统功效。

最后,值得一提的是,作为药食同源类中药,对于白术现阶段的研究,各种微量成分的分离纯化,各种化学成分在体内的代谢过程、真实作用分子靶点、人体临床数据及现代药物制剂开发仍存在诸多空白,后续工作可围绕新成分的发现,整合作用机制的阐述、有效作用成分的递送体系等进行深入探索,进而推动白术创新中药研发。

参考文献

- 1 中国药典 2025 年版. 一部[S]. 2025: 110.
- 2 先秦·佚名,撰. 刘跃进,主编. 刘志伟,李小白,点校. 尔雅[M]. 沈阳: 辽海出版社, 2025: 204–207.

- 3 支晓娟, 整理. 神农本草经[M]. 广州: 广东科学技术出版社, 2022: 11.
- 4 梁·陶弘景, 撰. 王家葵, 辑校. 本草经集注辑复本[M]. 南京: 凤凰出版社, 2023: 105.
- 5 宋·唐慎微, 撰. 王家葵, 蒋森, 辑校. 证类本草(上)[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2021: 192.
- 6 Yang L, Yu H, Hou A, et al. A review of the ethnopharmacology, phytochemistry, pharmacology, application, quality control, processing, toxicology, and pharmacokinetics of the dried rhizome of *Atractylodes macrocephala*[J]. Front Pharmacol, 2021, 12: 727154. DOI: [10.3389/fphar.2021.727154](https://doi.org/10.3389/fphar.2021.727154).
- 7 Wu J, Xu Q, Yang Y, et al. A novel fructan from *Atractylodes macrocephala* ameliorates ulcerative colitis through gut microbiota-mediated PI3K/Akt signaling[J]. Carbohydr Polym, 2026, 375: 124764. DOI: [10.1016/j.carbpol.2025.124764](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.124764).
- 8 Chen S, Liu X, Zhou X, et al. Atractylenolide-I prevents abdominal aortic aneurysm formation through inhibiting inflammation[J]. Front Immunol, 2025, 16: 1486072. DOI: [10.3389/fimmu.2025.1486072](https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1486072).
- 9 阳柳平. 研究白术的化学成分及药理作用概况[J]. 中国医药指南, 2012, 10(21): 607–609. [Yang LP. A review on the chemical constituents and pharmacological effects of *Atractylodes macrocephalae* Rhizoma[J]. Guide of China Medicine, 2012, 10(21): 607–609.] DOI: [10.15912/j.cnki.gocm.2012.21.093](https://doi.org/10.15912/j.cnki.gocm.2012.21.093).
- 10 董岩, 辛炳炜. 白术化学成分研究新进展[J]. 山东医药工业, 2003, 22(3): 32–33. [Dong Y, Xin BW. New advances in the study of chemical constituents of *Atractylodes macrocephalae* Rhizoma[J]. Shandong Pharmaceutical Industry, 2003, 22(3): 32–33.] DOI: [10.3969/j.issn.1672-7738.2003.03.031](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7738.2003.03.031).
- 11 罗昭勇, 余晓历, 柳静蕾, 等. 白术挥发油的化学成分及药理作用研究进展[J]. 中华中医药学刊, 2024, 42(9): 189–198. [Luo SY, Yu XL, Liu JL, et al. Research progress on chemical composition and pharmacological effects of volatile oil from Baizhu (*Atractylodes macrocephala*) [J]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 2024, 42(9): 189–198.] DOI: [10.13193/j.issn.1673-7717.2024.09.038](https://doi.org/10.13193/j.issn.1673-7717.2024.09.038).
- 12 周日宝, 吴佳, 童巧珍, 等. 不同提取方法中白术挥发油成分的比较研究[J]. 中药材, 2008, 31(2): 229–232. [Zhou RB, Wu J, Tong QZ, et al. Studies on volatile oil from *Atractylodes macrocephala* with different distill methods[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2008, 31(2): 229–232.] DOI: [10.3321/j.issn:1001-4454.2008.02.019](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-4454.2008.02.019).
- 13 冉晓燕, 梁志远, 甘秀海, 等. 不同方法提取白术花挥发油的比较研究[J]. 广州化工, 2017, 45(18): 118–121, 51. [Ran XY, Liang ZY, Gan XH, et al. Comparison of volatile oil of flowers from *Atractylodes macrocephala* extracted by different methods[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2017, 45(18): 118–121, 51.] DOI: [10.3969/j.issn.1001-9677.2017.18.043](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-9677.2017.18.043).
- 14 贾天柱, 王延年, 许明. 白术炮制前后挥发油的薄层及气-质联用对比[J]. 辽宁中医杂志, 1998, (9): 47–48. [Jia TZ, Wang YN, Xu M. Comparison of volatile oils in *Rhizoma Atractylodis macrocephalae* before and after processing by TLC and GC-MS[J]. Liaoning Journal of Traditional Chinese Medicine, 1998, (9): 47–48. <https://d.wanfangdata.com.cn/periodical/QK199800391847>.
- 15 张楠, 任璐, 李春燕, 等. 白术挥发油化学成分及药理作用研究进展[J]. 中华中医药学刊, 2025, 43(9): 179–185, 4. [Zhang N, Ren L, Li CY. Research progress on chemical constituents and pharmacological activities of Baizhu (*Atractylodes macrocephala* Koidz.) essential oil[J]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 2025, 43(9): 179–185, 4.] DOI: [10.13193/j.issn.1673-7717.2025.09.033](https://doi.org/10.13193/j.issn.1673-7717.2025.09.033).
- 16 李静, 何牟, 李玲, 等. 白术挥发油化学成分及药理作用研究进展[J]. 中成药, 2024, 46(3): 881–889. [Li J, He M, Li L. Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of volatile oil from *Atractylodes macrocephala*[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2024, 46(3): 881–889.] DOI: [10.3969/j.issn.1001-1528.2024.03.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1528.2024.03.026).
- 17 王琦, 陈鸿平, 刘友平, 等. 土炒对白术挥发油含量及组成的影响[J]. 中国药业, 2014, (14): 17–19. [Wang Q, Chen HP, Liu YP, et al. Influence of soil fried on content and composition of volatile oils of *Rhizoma Atractylodis macrocephalae*[J]. China Pharmaceuticals, 2014, (14): 17–19. <https://d.wanfangdata.com.cn/periodical/ChpNaW5lclBlcmlyZGJlYWx0SEkyMDIzMTIwNBIwNmd5eTlWMTQxNDAwOjRoIcmxhaWtmYWQ%3D>.
- 18 张楠, 陶源, 李春燕, 等. 白术的化学成分及药理作用研究进展[J]. 新乡医学院学报, 2023, 40(6): 579–586. [Zhang N, Tao Y, Li CY, et al. Research progress in chemical constituents and pharmacological effect of *Atractylodes macrocephala* Koidz[J]. Journal of Xinxiang Medical University, 2023, 40(6): 579–586.] DOI: [10.7683/xyxyxb.2023.06.015](https://doi.org/10.7683/xyxyxb.2023.06.015).
- 19 Yang RW, Fan H, He BH, et al. Current progress of *Atractylodes macrocephala* Koidz.: a review of its biogeography, PAO-ZHI processing, biological activities, biosynthesis pathways, and technology applications[J]. Med Plant Biol, 2023, 2(1): 173–190. DOI: [10.48130/MPB-2023-000](https://doi.org/10.48130/MPB-2023-000).
- 20 Wang P, Zhao YN, Xu RZ, et al. Sesquiterpene lactams and lactones with antioxidant potentials from *atractylodes macrocephala* discovered by molecular networking strategy[J]. Front Nutr, 2022, 9: 865257. DOI: [10.3389/fnut.2022.865257](https://doi.org/10.3389/fnut.2022.865257).
- 21 王涵, 杨娜, 谭静, 等. 白术化学成分、药理作用及临床应用的研究进展[J]. 甘肃医药, 2018, 37(1): 232–6. [Wang H, Yang N, Tan J, et al. Research progress on chemical constituents, pharmacological effects and clinical applications of *Atractylodis macrocephalae* Rhizoma[J]. Gansu Medical Journal, 2018, 37(1): 23–26.] DOI: [10.15975/j.cnki.gsy.2018.01.008](https://doi.org/10.15975/j.cnki.gsy.2018.01.008).
- 22 李木子, 王京辉, 郭洪祝, 等. HPLC法测定白术饮片中多种化学成分的含量[J]. 药物分析杂志, 2017, 37(9): 1585–1592. [Li MZ, Wang JH, Guo HZ, et al. Simultaneous determination of multiple components in decoction pieces of *Atractylodes macrocephala* by HPLC[J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2017, 37(9): 1585–1592.] DOI: [10.16155/j.0254-1793.2017.09.06](https://doi.org/10.16155/j.0254-1793.2017.09.06).
- 23 Shirahata T, Ishikawa H, Kudo T, et al. Metabolic fingerprinting for discrimination of DNA-authenticated *Atractylodes* plants using ¹H NMR spectroscopy[J]. J Nat Med, 2021, 75(3): 475–

488. DOI: [10.1007/s11418-020-01471-0](https://doi.org/10.1007/s11418-020-01471-0).
- 24 许平翠, 寿旦, 吴人杰, 等. 白术挥发油 GC-MS 指纹图谱与抗氧化活性的谱效关系研究[J]. 中国现代应用药学, 2019, 36(11): 1322-1327. [Xu PC, Shou D, Wu RJ, et al. Study on the spectrum-effect relationship between GC-MS fingerprint and antioxidant activity of volatile oil from *Atractylodes macrocephalae* Rhizoma[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2019, 36(11): 1322-1327.] DOI: [10.13748/j.cnki.issn1007-7693.2019.11.002](https://doi.org/10.13748/j.cnki.issn1007-7693.2019.11.002).
- 25 Wu YX, Lu WW, Geng YC, et al. Antioxidant, antimicrobial and anti-inflammatory activities of essential oil derived from the Wild Rhizome of *Atractylodes macrocephala*[J]. Chem Biodivers, 2020, 17(8): e2000268. DOI: [10.1002/cbdv.202000268](https://doi.org/10.1002/cbdv.202000268).
- 26 陆家佳. 白术挥发性成分 GC-MS 分析及对五种肿瘤细胞抑制活性研究[J]. 海峡药学, 2016, 28(6): 28-31. [Lu JJ. A GC-MS analysis of volatile components of *Atractylodes macrocephala* Koidz and their research of inhibitory activity on five tumor cells[J]. Strait Pharmaceutical Journal, 2016, 28(6): 28-31.] DOI: [10.3969/j.issn.1006-3765.2016.06.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-3765.2016.06.013).
- 27 陈鸿平, 潘欢欢, 张鑫, 等. GC-MS 结合 AMDIS 和保留指数研究不同炮制火候麸炒白术挥发性成分动态变化规律[J]. 中国中药杂志, 2016, 41(14): 6. [Chen HP, Pan HH, Zhang X, et al. GC-MS combined with AMDIS and Koúts retention index to investigate dynamic change rules of volatile components from *Atractylodes macrocephalae* Rhizoma with different stir-baking degrees[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2016, 41(14): 6.] DOI: [10.4268/cjcm20161413](https://doi.org/10.4268/cjcm20161413).
- 28 Wang X, Li L, Ran X, et al. What caused the changes in the usage of *Atractylodes macrocephalae* Rhizoma from ancient to current times?[J]. J Nat Med, 2016, 70(1): 36-44. DOI: [10.1007/s11418-015-0934-4](https://doi.org/10.1007/s11418-015-0934-4).
- 29 张龙开, 覃婕媛, 赵维波, 等. 不同产地白术鉴别研究[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(23): 203-206, 54. [Zhang LK, Dian JY, Zhao WB, et al. Study on identification of *Atractylodes macrocephala* Koidz in different origins[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(23): 203-206, 54.] DOI: [10.3969/j.issn.0517-6611.2019.23.059](https://doi.org/10.3969/j.issn.0517-6611.2019.23.059).
- 30 Zhou G, Li X, Liu J, et al. Atramacronins A-P, eudesmane-type sesquiterpenoid dimers from *Atractylodes macrocephala* with anti-hepatocellular carcinoma activities[J]. Chin J Nat Med, 2026, 24(1): 119-128. DOI: [10.1016/s1875-5364\(26\)61082-5](https://doi.org/10.1016/s1875-5364(26)61082-5).
- 31 Wu YX, Lu WW, Geng YC, et al. Antioxidant, antimicrobial and anti-inflammatory activities of essential oil derived from the wild rhizome of *Atractylodes macrocephala*[J]. Chem Biodivers, 2020, 17(8): e2000268. DOI: [10.1002/cbdv.202000268](https://doi.org/10.1002/cbdv.202000268).
- 32 Gu S, Li L, Huang H, et al. Antitumor, antiviral, and anti-inflammatory efficacy of essential oils from *Atractylodes macrocephala* Koidz. produced with different processing methods[J]. Molecules, 2019, 24(16): 2956. DOI: [10.3390/molecules24162956](https://doi.org/10.3390/molecules24162956).
- 33 Zhang H, Yin L, Yu S, et al. Biatractylonoids A-E, five eudesmane-type sesquiterpenoid dimers from the rhizomes of *Atractylodes macrocephala* with anti-inflammatory activity[J]. J Org Chem, 2025, 90(44): 15748-15759. DOI: [10.1021/acs.joc.5c01988](https://doi.org/10.1021/acs.joc.5c01988).
- 34 Li B, Zhou S, Wu W, et al. Atractylodimers A-D, unprecedented sesquiterpenoid dimers with cage-like skeletons from *Atractylodes macrocephala* and their neuroprotective activities[J]. Chin J Nat Med, 2025, 23(12): 100010. DOI: [10.1016/j.cjnm.2025.100010](https://doi.org/10.1016/j.cjnm.2025.100010).
- 35 周刚刚, 刘佳佳, 王纪琼, 等. 白术根中 4 个新倍半萜类化合物[J]. 药学报, 2025, 60(1): 179-184. [Zhou GG, Liu JJ, Wang JQ, et al. Four new sesquiterpenoids from the roots of *Atractylodes macrocephala*[J]. Acta Pharmaceutica Sinica, 2025, 60(1): 179-184.] DOI: [10.16438/j.0513-4870.2024-0668](https://doi.org/10.16438/j.0513-4870.2024-0668).
- 36 Zhai CM, Zhao JP, Chittiboyina AG, et al. Newly generated atractylon derivatives in processed rhizomes of *Atractylodes macrocephala* Koidz[J]. Molecules, 2020, 25(24): 5904. DOI: [10.3390/molecules25245904](https://doi.org/10.3390/molecules25245904).
- 37 曹岗, 张晓炎, 丛晓东, 等. 白术多糖的研究进展[J]. 北京联合大学学报(自然科学版), 2009, 23(3): 14-18. [Cao G, Zhang XY, Cong XD, et al. The research progress of polysaccharides from *Atractylodes macrocephala* Koidz[J]. Journal of Beijing Union University (Humanities and Social Sciences), 2009, 23(3): 14-18.] DOI: [10.16255/j.cnki.lxbz.2009.03.014](https://doi.org/10.16255/j.cnki.lxbz.2009.03.014).
- 38 池玉梅, 李伟, 文红梅, 等. 白术多糖的分离纯化和化学结构研究[J]. 中药材, 2001, 24(9): 647-648. [Chi YM, Li W, Wen HM, et al. Studies on separation, purification and chemical structure of polysaccharide from *Atractylodes macrocephala*[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2001, 24(9): 647-648] DOI: [10.13863/j.issn1001-4454.2001.09.013](https://doi.org/10.13863/j.issn1001-4454.2001.09.013).
- 39 Meng Q, Mao M, Shentu C, et al. Structural characterization of *Atractylodes macrocephala* polysaccharide 1 and its gut microbiota-mediated alleviation of ulcerative colitis[J]. Carbohydr Polym, 2026, 377: 124863. DOI: [10.1016/j.carbpol.2025.124863](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.124863).
- 40 Ren H, Zhu T, Wang X, et al. The structurally defined polysaccharide of *Atractylodes macrocephala* Koidz demonstrates the ability to alleviate cyclophosphamide-induced immunosuppression and promote the restoration of intestinal homeostasis in mice[J]. Food Res Int, 2026, 230: 118554. DOI: [10.1016/j.foodres.2026.118554](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2026.118554).
- 41 Yan Q, Yang F, Li Q, et al. *Atractylodes macrocephala* polysaccharide AMP1-1 ameliorates weightless-induced cognitive dysfunction via the microbiota-gut-brain axis[J]. Int J Biol Macromol, 2026, 358: 151754. DOI: [10.1016/j.ijbiomac.2026.151754](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2026.151754).
- 42 杨颖, 魏梦昕, 伍耀业, 等. 白术多糖提取分离、化学组成和药理作用的研究进展[J]. 中草药, 2021, 52(2): 578-584. [Yang Y, Wei MX, Wu YY, et al. Research progress on extraction separation, chemical constitution and pharmacological activities of polysaccharide extracted from *Atractylodes macrocephala*[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2021, 52(2): 578-584.] DOI: [10.7501/j.issn.0253-2670.2021.02.032](https://doi.org/10.7501/j.issn.0253-2670.2021.02.032).
- 43 Li M, Ng CYJ, Chen H, et al. Polysaccharides from *Atractylodes macrocephala*: a review of mechanistic and therapeutic insights into intestinal disorders[J]. Nutrients, 2025, 17(23): 3722. DOI: [10.3390/nu17233722](https://doi.org/10.3390/nu17233722).

- 44 Liu C, Wang S, Xiang Z, et al. The chemistry and efficacy benefits of polysaccharides from *Atractylodes macrocephala* Koidz[J]. Front Pharmacol, 2022, 13: 952061. DOI: [10.3389/fphar.2022.95206](https://doi.org/10.3389/fphar.2022.95206).
- 45 胡晓倩, 胡长玉, 张慧冲. 野生祁白术与云南白术的氨基酸含量分析[J]. 中药材, 2006, 29(7): 679–680. [Hu XQ, Hu CY, Zhang HC. Analysis of amino acid contents between wild plant QiBaizhu and YunnanBaizhu[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2006, 29(7): 679–680.] DOI: [10.3321/j.issn:1001-4454.2006.07.018](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-4454.2006.07.018).
- 46 钟艳梅, 冯毅凡, 郭姣. 基于UPLC/Q-TOFMS技术的白术药材化学成分快速识别研究[J]. 质谱学报, 2015, 36(1): 72–77. [Zhong YM, Feng YF, Guo J. Rapid identification of components from *Atractylodes macrocephalae* Rhizoma based on UPLC/Q-TOF MS[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2015, 36(1): 72–77.] DOI: [10.7538/zpxb.youxian.2014.0058](https://doi.org/10.7538/zpxb.youxian.2014.0058).
- 47 Kitajima J, Kamoshita A, Ishikawa T, et al. Glycosides of *Atractylodes ovata*[J]. Chem Pharm Bull (Tokyo), 2003, 51(9): 1106–1108. DOI: [10.1248/cpb.51.110](https://doi.org/10.1248/cpb.51.110).
- 48 李伟, 文红梅, 崔小兵, 等. 白术的化学成分研究[J]. 中草药, 2007, 38(10): 1460–1462. [Li W, Wen HM, Cui XB, et al. Chemical constituents in rhizome of *Atractylodes macrocephala*[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2007, 38(10): 1460–1462.] DOI: [10.3321/j.issn:0253-2670.2007.10.008](https://doi.org/10.3321/j.issn:0253-2670.2007.10.008).
- 49 Han JH, Kim JH, Kim SG, et al. Anti-oxidative compounds from the aerial parts of *Atractylodes macrocephala* Koidzumi[J]. Yakhak Hoeji, 2007, 51(2): 88–95. <https://www.zhangqiaokeyan.com/journal-foreign-detail/1404129833713.html>.
- 50 彭静, 潘东梅, 潘东莲, 等. 白术多糖提取分离工艺研究[J]. 中华中医药学刊, 2024, 42(5): 41–45, 16. [Peng J, Pan DM, Pan DL, et al. Study on extraction and separation process of polysaccharide from Baizhu (*Atractylodes macrocephala*)[J]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 2024, 42(5): 41–45, 16.] DOI: [10.13193/j.issn.1673-7717.2024.05.009](https://doi.org/10.13193/j.issn.1673-7717.2024.05.009).
- 51 李春彦, 孙振刚, 晏烽根, 等. 中药白术与苍术中聚炔类成分分析与质谱裂解规律研究[J]. Chinese Journal of New Drugs, 2017, 26(9): 1071–1078. [Li CY, Sun ZG, Yan FG, et al. Identification and mass spectrum fragmentation study of polyacetylenes constituents from the rhizomes of *Atractylodes macrocephalae* and *Atractylodes lancea*[J]. Chinese Journal of New Drugs, 2017, 26(9): 1071–1078.] DOI: [10.20251/j.cnki.1003-3734.2017.09.019](https://doi.org/10.20251/j.cnki.1003-3734.2017.09.019).
- 52 Zhou GG, Liu JJ, Wang JQ, et al. Two new polyacetylenes from the roots of *Atractylodes macrocephala*[J]. Nat Prod Res, 2026, 40(8): 2107–2112. DOI: [10.1080/14786419.2025.2450218](https://doi.org/10.1080/14786419.2025.2450218).
- 53 Chen T, Zheng X, Ouyang L, et al. Six polyacetylenes from *Atractylodes macrocephala* Koidz and their anti-colon cancer activity[J]. Fitoterapia, 2023, 167: 105490. DOI: [10.1016/j.fitote.2023.105490](https://doi.org/10.1016/j.fitote.2023.105490).
- 54 杨娜, 周柏松, 王亚茹, 等. ICP-MS法测定白术中48种微量元素的含量[J]. 特产研究, 2018, 40(3): 38–44, 74. [Yang N, Zhou BS, Wang YR, et al. Determination of 48 kinds of trace elements in *Atractylodes macrocephala* Koidz. by ICP-MS[J]. Special Wild Economic Animal and Plant Research, 2018, 40(3): 38–44, 74.] DOI: [10.16720/j.cnki.teyj.2018.03.009](https://doi.org/10.16720/j.cnki.teyj.2018.03.009).
- 55 Peng W, Han T, Liu QC, et al. Chemical constituents from aerial part of *Atractylodes macrocephala*[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2011. DOI: [10.4268/cjcm2011051](https://doi.org/10.4268/cjcm2011051).
- 56 Jiang H, Shi J, Li Y. Screening for compounds with aromatase inhibiting activities from *Atractylodes macrocephala* Koidz[J]. Molecules, 2011, 16(4): 3146–3151. DOI: [10.3390/molecules1604314](https://doi.org/10.3390/molecules1604314).
- 57 杨丹阳, 于欢, 吴晓莹, 等. 白术化学成分及其生物活性研究进展[J]. 中华中医药学刊, 2023, 41(5): 171–182. [Yang DY, Yu H, Wu XY, et al. Research progress on chemical constituents and their biological activities of Baizhu (*Atractylodes macrocephala*)[J]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 2023, 41(5): 171–182.] DOI: [10.13193/j.issn.1673-7717.2023.05.037](https://doi.org/10.13193/j.issn.1673-7717.2023.05.037).
- 58 Zhu B, Zhang QL, Hua JW, et al. The traditional uses, phytochemistry, and pharmacology of *Atractylodes macrocephala* Koidz.: a review[J]. J Ethnopharmacol, 2018, 226: 143–167. DOI: [10.1016/j.jep.2018.08.023](https://doi.org/10.1016/j.jep.2018.08.023).
- 59 容穗华, 林海, 高妮. 白术炮制工艺及炮制原理的研究[J]. 中国中药杂志, 2011, 36(8): 3. [Rong SH, Lin H, Gao N. Study on processing technology and processing principles of *Atractylodes macrocephalae* Rhizoma[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2011, 36(8): 3.] DOI: [10.4268/cjcm20110811](https://doi.org/10.4268/cjcm20110811).
- 60 赵若含, 单国顺, 赵启苗, 等. 基于AHP-CRITIC复合加权法结合Box-Behnken设计-响应面法优选麸炒白术的炮制工艺[J]. 中草药, 2025, 56(23): 8511–8523. [Zhao RH, Shan GS, Zhao QM, et al. Optimization of processing technology of bran-fried *Atractylodes macrocephalae* Rhizoma based on AHP-CRITIC combined weighting method combined with Box-Behnken design-response surface method[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2025, 56(23): 8511–8523.] DOI: [10.7501/j.issn.0253-2670.2025.23.005](https://doi.org/10.7501/j.issn.0253-2670.2025.23.005).
- 61 朱慧萍, 曹岗. 多指标综合评价蜜麸炒白术的炮制工艺[J]. 中华中医药杂志, 2015, 30(6): 4. [Zhu HP, Cao G. Optimization of processing technology of *Atractylodes macrocephalae* Rhizoma frying with honey bran based on multi-index comprehensive evaluation method[J]. China Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy, 2015, 30(6): 4.] DOI: [CNKI: SUN: BXYY.0.2015-06-092](https://doi.org/CNKI:SUN:BXYY.0.2015-06-092).
- 62 孟振豪, 韩永红, 钟凌云. 星点设计-效应面法优选蜜糠炒白术的炮制工艺[J]. 中国实验方剂学杂志, 2015, 21(15): 19–22. [Meng ZH, Han YH, Zhong LY. Optimization of processing technology of honey bran-fried *Atractylodes macrocephalae* Rhizoma by central composite design-response surface methodology[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2015, 21(15): 19–22.] DOI: [10.13422/j.cnki.syfx.2015150019](https://doi.org/10.13422/j.cnki.syfx.2015150019).
- 63 邱细敏, 唐小昇, 刘胜姿, 等. 白术多糖葡萄糖的含量测定[J]. 湖南师范大学学报(医学版), 2004, 1(1): 47–49. [Qiu XM, Tang XY, Liu SZ, et al. Study on content of polysaccharide dextrose in *Atractylodes macrocephala* Koidz[J]. Journal of Hunan Normal University (Medical Sciences), 2004, 1(1): 47–49.] DOI: [10.3969/](https://doi.org/10.3969/)

- j.issn.1673-016X.2004.01.015.
- 64 甘芳. 靶向性氧化石墨烯-白术内酯 I 对卵巢癌细胞凋亡及细胞周期的影响[J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(28): 4492-4496. [Gan F. Effects of targeted graphene oxide loaded with atractylenolide- I on apoptosis and cell cycle of ovarian cancer cells[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2021, 25(28): 4492-4496.] DOI: [10.12307/2021.063](https://doi.org/10.12307/2021.063).
- 65 陈远. 白术内酯 I 抑制胃癌 MGC-803 细胞增殖的机制[J]. 中国老年学杂志, 2017, 37(10): 2385-2387. [Chen Y. Mechanism of atractylenolide I in inhibiting the proliferation of gastric cancer MGC-803 cells[J]. Chinese Journal of Gerontology, 2017, 37(10): 2385-2387.] DOI: [10.3969/j.issn.1005-9202.2017.10.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-9202.2017.10.016).
- 66 邹辉, 杨柳, 易美玲, 等. 白术化学成分分离鉴定[J]. 中国实验方剂学杂志, 2016, 22(17): 6. [Zou H, Yang N, Yi ML, et al. Chemical constituents of *Atractylodes macrocephala* Rhizoma[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2016, 22(17): 6.] DOI: [10.13422/j.cnki.syfjx.201617004](https://doi.org/10.13422/j.cnki.syfjx.201617004).
- 67 龙方懿, 贾萍, 王华飞, 等. 白术内酯 I 抑制卵巢癌 SK-OV-3 与 OVCAR-3 细胞增殖作用机制的研究[J]. 局解手术学杂志, 2017, 26(2): 89-93. [Long FY, Jia P, Wang HF, et al. Mechanisms and proliferation inhibitory effects of atractylenolide I on SK-OV-3 and OVCAR-3 ovarian cancer cell[J]. Journal of Regional Anatomy and Operative Surgery, 2017, 26(2): 89-93.] DOI: [10.11659/jjssx.10E0160](https://doi.org/10.11659/jjssx.10E0160).
- 68 Yu R, Yu BX, Chen JF, et al. Anti-tumor effects of Atractylenolide I on bladder cancer cells[J]. J Exp Clin Cancer Res, 2016, 35: 40. DOI: [10.1186/s13046-016-0312-4](https://doi.org/10.1186/s13046-016-0312-4).
- 69 谭娟, 蔡小惠, 吴念花, 等. 白术内酯 I 调节 PI3K/AKT/mTOR 信号通路对鼻咽癌细胞恶性生物学行为的影响[J]. 中国老年学杂志, 2025, 45(7): 1740-1744. [Tan J, Cai XH, Wu NH, et al. Effects of atractylenolide I on the malignant biological behaviors of nasopharyngeal carcinoma cells by regulating the PI3K/AKT/mTOR signaling pathway[J]. Chinese Journal of Gerontology, 2025, 45(7): 1740-1744.] DOI: [10.3969/j.issn.1005-9202.2025.07.045](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-9202.2025.07.045).
- 70 Qiao P, Tian Z. Atractylenolide I inhibits EMT and enhances the antitumor effect of cabozantinib in prostate cancer via targeting Hsp27[J]. Front Oncol, 2022, 12: 1084884. DOI: [10.3389/fonc.2022.1084884](https://doi.org/10.3389/fonc.2022.1084884).
- 71 Xiao Q, Zheng F, Wu J, et al. Activation of ERK and mutual regulation of STAT3 and SP1 contribute to inhibition of PDK1 expression by atractylenolide-1 in human lung cancer cells[J]. Cell Physiol Biochem, 2017, 43(6): 2353-2366. DOI: [10.1159/00048438](https://doi.org/10.1159/00048438).
- 72 Lian M, Zhang Y, Li X, et al. Atractylenolide I inhibits the growth of esophageal cancer cells by inhibiting the Wnt/ β -Catenin pathway[J]. Anticancer Agents Med Chem, 2025, 25(17): 1323-1330. DOI: [10.2174/011871520636654325021307152](https://doi.org/10.2174/011871520636654325021307152).
- 73 Tian S, Ren L, Liu C, et al. Atractylenolide II suppresses glycolysis and induces apoptosis by blocking the PADI3-ERK signaling pathway in endometrial cancer cells[J]. Molecules, 2024, 29(5): 15. DOI: [10.3390/molecules2905093](https://doi.org/10.3390/molecules2905093).
- 74 王梦菊, 王霞. 白术内酯 II 对结肠癌小鼠的抗肿瘤作用及免疫调节机制[J]. 国际肿瘤学杂志, 2025, 52(9): 545-553. [Wang MJ, Wang X. Anti-tumor effect and immunomodulatory mechanism of atractylenolide II on colon cancer mice [J]. Journal of International Oncology, 2025, 52(9): 545-553.] DOI: [10.3760/cma.j.cn371439-20250704-00093](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn371439-20250704-00093).
- 75 Wang M, Meng J, Wang H, et al. Atractylodes macrocephala III suppresses EMT in cervical cancer by regulating IGF2BP3 through ETV5[J]. J Cell Mol Med, 2024, 28(4): e18081. DOI: [10.1111/jcmm.18081](https://doi.org/10.1111/jcmm.18081).
- 76 王郁金, 苏衍进. 白术挥发油对小鼠 H22 肝癌血道转移的抑制作用及机理研究[J]. 陕西中医, 2009, 30(6): 735-736. [Wang YJ, Su YJ. Study on the inhibitory effect and mechanism of atractylodes macrocephala volatile oil on hematogenous metastasis of H₂₂ hepatoma in mice[J]. Shaanxi Journal of Traditional Chinese Medicine, 2009, 30(6): 735-736.] DOI: [10.3969/j.issn.1000-7369.2009.06.072](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7369.2009.06.072).
- 77 张宗, 张鸿翔, 史天良, 等. 白术挥发油抗肿瘤作用的研究[J]. 肿瘤研究与临床, 2006, 18(12): 799-800. [Zhang Z, Zhang HX, Shi TL, et al. Research about the antitumor function of *Atractylodes macrocephala* Koidz volatile oil[J]. Cancer Research and Clinic, 2006, 18(12): 799-800.] DOI: [10.3760/cma.j.issn.1006-9801.2006.12.003](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1006-9801.2006.12.003).
- 78 李晨, 杜丽明, 孙秋, 等. 白术多糖对肝癌细胞干样特性、上皮间质转化和 Akt/NF- κ B 磷酸化的影响[J]. 临床肿瘤学杂志, 2024, 29(8): 735-739. [Li C, Du LM, Sun Q, et al. The effect of atractylodes macrocephala polysaccharide on stem cell-like properties of hepatoma cells, epithelial-mesenchymal transition and phosphorylation of Akt/NF- κ B pathway[J]. Chinese Clinical Oncology, 2024, 29(8): 735-739.] DOI: [10.3969/j.issn.1009-0460.2024.08.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-0460.2024.08.002).
- 79 铁玲玲, 姜树民. 姜树民以痢论治慢性萎缩性胃炎[J]. 实用中医内科杂志, 2014, 28(11): 10-11. [Tie LL, Jiang SM, Jiang Shumin treatment of chronic atrophic gastritis in carbuncle on the rule[J]. Journal of Practical Traditional Chinese Internal Medicine, 2014, 28(11): 10-11.] DOI: [10.13729/j.issn.1671-7813.2014.11.04](https://doi.org/10.13729/j.issn.1671-7813.2014.11.04).
- 80 Wang KT, Chen LG, Wu CH, et al. Gastroprotective activity of atractylenolide III from *Atractylodes ovata* on ethanol-induced gastric ulcer *in vitro* and *in vivo*[J]. J Pharm Pharmacol, 2010, 62(3): 381-388. DOI: [10.1211/jpp.62.03.00](https://doi.org/10.1211/jpp.62.03.00).
- 81 Ren Y, Jiang WW, Luo CL, et al. The promotive effect of the active ingredients of *Atractylodes macrocephala* on intestinal epithelial repair through activating Ca²⁺ pathway[J]. Nat Prod Commun, 2021, 16(11): 1934578X211040357. DOI: [10.1177/1934578X211040357](https://doi.org/10.1177/1934578X211040357).
- 82 陈镇, 夏泉, 黄赵刚, 等. 白术挥发油对小鼠胃肠功能的影响[J]. 中国实验方剂学杂志, 2009, 15(8): 66-68. [Chen Z, Xia Q, Huang ZG, et al. Effect of essential oils of *Atractylodes macrocephala* Koidz on gastrointestinal function of mice[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2009, 15(8): 66-68.] DOI: [10.13422/j.cnki.syfjx.2009.08.025](https://doi.org/10.13422/j.cnki.syfjx.2009.08.025).

- 83 Cheng H, Zhang D, Wu J, et al. *Atractylodes macrocephala* Koidz. volatile oil relieves acute ulcerative colitis via regulating gut microbiota and gut microbiota metabolism[J]. Front Immunol, 2023, 14: 1127785. DOI: [10.3389/fimmu.2023.1127785](https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1127785).
- 84 Huang S, He H, Li H, et al. Modulating the intestinal flora involves the effect of *Atractylodis macrocephalae* Rhizoma polysaccharide on spleen deficiency diarrhea[J]. Int J Biol Macromol, 2025, 321(Pt 4): 146562. DOI: [10.1016/j.ijbiomac.2025.146562](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.146562).
- 85 靳玉秋, 陈光顺, 赵哲. 《伤寒杂病论》中白术健脾功效探究[J]. 中国民间疗法, 2022, 30(11): 13–15. [Jin YQ, Chen GS, Zhao Z. A study on the spleen-strengthening effects of Baizhu (*Atractylodes macrocephala*) in the *Treatise on Cold Pathogenic and Miscellaneous Diseases*[J]. China's Naturopathy, 2022, 30(11): 13–15.] DOI: [10.19621/j.cnki.11-3555/r.2022.1105](https://doi.org/10.19621/j.cnki.11-3555/r.2022.1105).
- 86 宋·太平惠民和剂局, 编. 刘景源 点校. 太平惠民和剂局方[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1985: 288.
- 87 Guo S, Li W, Chen F, et al. Polysaccharide of *Atractylodes macrocephala* Koidz regulates LPS-mediated mouse hepatitis through the TLR4–MyD88–NFκB signaling pathway[J]. Int Immunopharmacol, 2021, 98: 107692 DOI: [10.1016/j.intimp.2021.107692](https://doi.org/10.1016/j.intimp.2021.107692).
- 88 Zhang H, Gao M, Wang H, et al. Atractylenolide I prevents acute liver failure in mouse by regulating M1 macrophage polarization[J]. Sci Rep, 2025, 15(1): 4015. DOI: [10.1038/s41598-025-86977-x](https://doi.org/10.1038/s41598-025-86977-x).
- 89 李铮. 白术挥发油对小鼠急性肝损伤的作用及其机制[J]. 长春: 吉林大学, 2020. DOI: [10.27162/d.cnki.gjlin.2020.003993](https://doi.org/10.27162/d.cnki.gjlin.2020.003993).
- 90 马伟谦, 刘明, 魏娟, 等. 白术内酯 I 调节 HIF-1α/VEGF 信号通路对急性心肌梗死大鼠心肌损伤的影响[J]. 河北医学, 2024, 30(4): 544–549. [Ma WQ, Liu M, Wei J, et al. Effect of atractylenolide I on myocardial injury in rats with AMI through adjusting HIF-1α/VEGF signaling pathway[J]. Hebei Medicine, 2024, 30(4): 544–549.] DOI: [10.3969/j.issn.1006-6233.2024.04.03](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-6233.2024.04.03).
- 91 Song X, Wang L, Liu M, et al. Atractylenolide II ameliorates myocardial fibrosis and oxidative stress in spontaneous hypertension rats[J]. Technol Health Care, 2024, 32(1): 131–142. DOI: [10.3233/thc-220601](https://doi.org/10.3233/thc-220601).
- 92 Zuo MY, Tang TJ, Wang X, et al. Atractylenolide III attenuates apoptosis in H9c2 Cells by inhibiting endoplasmic reticulum stress through the GRP78/PERK/CHOP signaling pathway[J]. Evid Based Complement Alternat Med, 2022, 2022: 1149231. DOI: [10.1155/2022/1149231](https://doi.org/10.1155/2022/1149231).
- 93 施文荣, 刘艳, 陈玲, 等. 白术燥湿利水作用的研究[J]. 福建中医药大学学报, 2007, 17(3): 29–31. [Shi WR, Liu Y, Chen L, et al. Experimental study on the effect of drying dampness and diuresis of *Atractylodes macrocephala*[J]. Journal of Fujian College of Traditional Chinese Medicine, 2007, 17(3) 29–31.] DOI: [10.13261/j.cnki.jfutcm.001839](https://doi.org/10.13261/j.cnki.jfutcm.001839).
- 94 Satoh K, Nagai F, Ushiyama K, et al. Specific inhibition of Na⁺, K⁺-ATPase activity by atractylon, a major component of byaku-jutsu, by interaction with enzyme in the E2 state[J]. Biochem Pharmacol, 1996, 51(3): 339–343. DOI: [10.1016/0006-2952\(95\)02188](https://doi.org/10.1016/0006-2952(95)02188).
- 95 李怀荆, 郭忠兴, 毛金军, 等. 白术水煎剂对老年小鼠抗衰老作用的影响[J]. 佳木斯医学院学报, 1996(1): 9–10. [Li HJ, Guo ZX, Mao JJ, et al. Anti-aging effect of *Atractylode macrocephala* Koidz decoction on the elderly mice[J]. Journal of Jiamusi Medical College, 1996(1): 9–10. <https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotat-KXJY199601006.htm>.
- 96 李佳瑛, 景永帅, 张丹参. 白术在老年痴呆与认知障碍相关疾病的药理作用[J]. 中国药理学与毒理学杂志, 2019, 33(6): 468–469. [Li JY, Jing YS, Zhang DS. Pharmacological effects of *Atractylodes macrocephala* on Alzheimer's disease and cognitive impairment-related diseases[J]. Chinese Journal of Pharmacology and Toxicology, 2019, 33(6): 468–469. <https://d.wanfangdata.com.cn/periodical/QKC20192019103000078342>.
- 97 刘洋, 廖春梅. 双白术内酯对三氯化铝致痴呆模型小鼠的作用研究[J]. 湖南师范大学学报(医学版), 2006, 3(3): 25–26, 30. [Liu Y, Liao CM. Effects of biatractylolide on the AD rats induced by AlCl₃ [J]. Journal of Hunan Normal University(Medical Sciences), 2006, 3(3): 25–26, 30.] DOI: [10.3969/j.issn.1673-016X.2006.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-016X.2006.03.008).
- 98 胡晓蕾, 胡迎利, 汪以真. 白术及白术多糖对SD大鼠生长性能和免疫功能的影响[J]. 中国兽药杂志, 2006, 40(1): 2–6. [Hu XL, Hu YL, Wang YZ. Effects of *Atractylodes macrocephala* Koidz and PAM on the growth performance and immune function of SD rats [J]. Chinese Journal of Veterinary Drug, 2006, 40(1): 2–6.] DOI: [10.3969/j.issn.1002-1280.2006.01.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-1280.2006.01.002).
- 99 朱南山, 张彬, 李丽立, 等. 白术多糖对仔猪血淋巴细胞转化及信号转导相关分子的影响[J]. 华北农学报, 2007, 22(2): 18–21. [Zhu NS, Zhang B, Li LL, et al. Effect of PAM on proliferation of lymphocytes and on signaling related molecules in peripheral blood of piglet[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2007, 22(2): 18–21.] DOI: [10.3321/j.issn.1000-7091.2007.02.005](https://doi.org/10.3321/j.issn.1000-7091.2007.02.005).
- 100 Xue MT, Sheng WJ, Song X, et al. Atractylenolide III ameliorates spinal cord injury in rats by modulating microglial/macrophage polarization[J]. CNS Neurosci Ther, 2022, 28(7): 1059–1071. DOI: [10.1111/ens.13839](https://doi.org/10.1111/ens.13839).
- 101 Liu C, Zhao H, Ji ZH, et al. Neuroprotection of atractylenolide III from *Atractylodis macrocephalae* against glutamate-induced neuronal apoptosis via inhibiting caspase signaling pathway[J]. Neurochem Res, 2014, 39(9): 1753–1758. DOI: [10.1007/s11064-014-1370-7](https://doi.org/10.1007/s11064-014-1370-7).
- 102 Yuan C, Yu C, Sun Q, et al. Atractylenolide I alleviates indomethacin-induced gastric ulcers in rats by inhibiting NLRP3 inflammasome activation[J]. J Agric Food Chem, 2024, 72(25): 14165–14176. DOI: [10.1021/acs.jafc.3c08188](https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c08188).
- 103 周若夏, 宋丽军, 施晓莹, 等. 白术内酯 I、II、III 体内外抗轮状病毒作用研究[J]. 中草药, 2019, 50(1): 104–110. [Zhou RX, Song LJ, Shi XY, et al. Effects of atractylenolide I, II, and III against rotavirus in vitro and in vivo [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2019, 50(1): 104–110.] DOI: [10.7501/j.issn.0253-2670.2019.01.017](https://doi.org/10.7501/j.issn.0253-2670.2019.01.017).

- 104 Lu B, Pan S, He J, et al. Protective effects of polysaccharide of *Atractylodes macrocephala* Koidz and Jiawei Si-jun-zi Decoction on gut health and immune function in cyclophosphamide-treated chicks[J]. Poult Sci, 2025, 104(7): 105160. DOI: [10.1016/j.psj.2025.10516](https://doi.org/10.1016/j.psj.2025.10516).
- 105 Sun CQ, Zhao Q, Hu X, et al. Atractylenolide I alleviates ischemia/reperfusion injury by preserving mitochondrial function and inhibiting caspase-3 activity[J]. Exp Ther Med, 2021, 21(4): 345. DOI: [10.3892/etm.2021.9970](https://doi.org/10.3892/etm.2021.9970).
- 106 章小莉. 早产发动的电生理机制及白术治疗早产的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008. DOI: [10.7666/d.D507172](https://doi.org/10.7666/d.D507172).
- 107 章小莉, 汪琳, 徐龙, 等. 白术对人妊娠子宫平滑肌细胞膜钙依赖钾通道电流的影响[J]. 中国妇幼保健, 2009, 24(3): 366–368. [Zhang XL, Wang L, Xu L, et al. Effects of *Atractylodes macrocephala* on the cytomembrane Ca^{2+} -activated K^{+} currents in human pregnant myometrium smooth muscle cells[J]. Maternal and Child Health Care of China, 2009, 24(3): 366–368.] DOI: [10.16333/j.1001-6880.2025.1.001](https://doi.org/10.16333/j.1001-6880.2025.1.001).
- 108 卢杨君, 陈磊, 伍春桃, 等. 白术多糖对CUMS模型小鼠抑郁样行为及其脑肠轴和HPA轴的影响[J]. 天然产物研究与开发 2025, 37(1): 1–9. [Lu YJ, Chen L, Wu CT, et al. Effects of *Atractylodes macrocephala* polysaccharides on depressive-like behavior, brain-gut axis and HPA axis in CUMS model mice [J]. Natural Product Research and Development, 2025, 37(1): 1–9.] DOI: [10.16333/j.1001-6880.2025.1.001](https://doi.org/10.16333/j.1001-6880.2025.1.001).
- 109 Liang Z, Yuan Y, Liang JC, et al. *Atractylodes macrocephala* Koidz. polysaccharide alleviates chemotherapy-induced depression-like behaviors through the gut-brain axis[J]. Int J Mol Sci, 2025, 26(20): 10189. DOI: [10.3390/ijms262010189](https://doi.org/10.3390/ijms262010189).
- 110 李燕, 陈素红, 吉星, 等. 白术多糖对自发性2型糖尿病小鼠血糖及相关指标的影响[J]. 中国实验方剂学杂志, 2015, 21(10): 162–165. [Li Y, Chen SH, Ji X, et al. Effects of polysaccharide from *Atractylodes macrocephala* on blood glucose and related indicators in spontaneous type 2 diabetes db/db mice[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2015, 21(10): 162–165.] DOI: [10.13422/j.cnki.syfjx.2015100162](https://doi.org/10.13422/j.cnki.syfjx.2015100162).
- 111 Zheng K, Zhang R, Xin Y, et al. Rhizoma *Atractylodis macrocephalae* reduces HFD-induced MAFLD in mice through activated AMPK-mediated inhibition of fatty acid synthesis[J]. Liver Res, 2025, 9(2): 157–168. DOI: [10.1016/j.livres.2025.04.004](https://doi.org/10.1016/j.livres.2025.04.004).
- 112 彭敏, 顾施健, 姜淋洁, 等. 白术提取物降血脂作用的有效部位研究[J]. 时珍国医国药, 2011, 22(10): 2363–2365. [Peng M, Gu SJ, Jiang LJ, et al. Antihyperlipidemia active fraction of *Atractylodis macrocephalae* Rhizome extracts[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2011, 22(10): 2363–2365.] DOI: [10.3969/j.issn.1008-0805.2011.10.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-0805.2011.10.020).
- 113 Liu Y, Deng X, Chen C, et al. Atractylenolide I attenuates glucocorticoid-induced osteoporosis via inhibiting NF- κ B signaling pathway[J]. Calcif Tissue Int, 2025, 116(1): 51. DOI: [10.1007/s00223-025-01358-w](https://doi.org/10.1007/s00223-025-01358-w).

收稿日期: 2026 年 04 月 16 日 修回日期: 2026 年 08 月 16 日
本文编辑: 钟巧妮 洗静怡