

木栓烷型三萜类化学成分及药理活性研究进展

刘铭玺^{1,2}, 郝静雯³, 李亚婷⁴, 李石飞^{1*}

(1. 山西大学分子科学研究所, 化学生物学与分子工程教育部重点实验室, 山西 太原 030006;
2. 山西大学中医药现代研究中心, 山西 太原 030006; 3. 云南农业大学国际学院, 云南 昆明 650201;
4. 山西中医药大学/实验管理中心, 山西 晋中 030619)

摘要: 木栓烷型三萜是一类广泛分布于植物界的重要天然产物,也是众多中药的活性物质成分,具有抗肿瘤、抗炎、抗菌等药理活性。本文在检索国内外近十年相关文献的基础上,对源于植物(包括中药)的木栓烷型三萜类化学成分和药理作用研究进展进行综述。

关键词: 木栓烷型三萜;植物来源;药理活性

中图分类号: R285.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-2723(2025)05-0099-14

DOI: 10.19288/j.cnki.issn.1000-2723.2025.05.013

Advances in Chemical Constituents and Pharmacological Activities of Friedelane Triterpenoids

LIU Mingxi^{1,2}, HAO Jingwen³, LI Yating⁴, LI Shifei¹

(1. Key Laboratory of Chemical Biology and Molecular Engineering of Ministry of Education, Institute of Molecular Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;
2. Modern Research Center for Traditional Chinese Medicine, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;
3. International College of Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;
4. Shanxi University of Chinese Medicine/Experiment Centre, Jinzhong 030619, China)

ABSTRACT: The friedelane triterpenoids are the significant natural products extensively found within the plantae, they are also active ingredients in many traditional Chinese medicine, with anti-tumor, anti-inflammatory, antibacterial and other pharmacological activities. This review systematically summarizes the advancements in research on the chemical constituents and pharmacological effects of friedelane triterpenoids derived from plants (including traditional Chinese medicine), based on related literature in recent ten years at home and abroad.

KEY WORDS: friedelane triterpenoids; plant origin; pharmacological activity

木栓烷型三萜(friedelane triterpenoids)是一类重要的天然五环三萜类化合物,其独特的基本骨架由 6 个异戊二烯单元(C_5H_8)经特征性环化形成的 5 个六元环(A/B/C/D/E 环)构成,其中 A/B、B/C 和 C/D 环呈反式构型,D/E 环则为顺式构型,这种特殊的排布形成了其标志性的立体构型特征。在骨架上分布的 8 个甲基中,C-20 位的偕二甲基、C-4、5、9、14、17 位的 β -甲基

与 C-13 位 α -甲基共同构成了其特有的取代模式。此外,木栓烷型三萜可通过氧化重排、环系重构等次级代谢途径产生丰富的衍生物,其中羟基($-OH$)、羰基($C=O$)及羧基($-COOH$)等官能团的引入不仅改变了分子的极性特征,更能改变空间构型来显著影响其生物活性。现代药理学研究表明,该类化合物具有抗肿瘤、抗炎、抗菌等多重药理活性,其构效关系研究已成

基金项目: 山西省自然科学基金项目(202203021211290;202304021301062)

作者简介: 刘铭玺(2000-),男,在读硕士研究生,E-mail: 202424303007@email.sxu.edu.cn;

郝静雯(1984-),共同第一作者,女,硕士,E-mail: 793716237@qq.com

* 通信作者: 李石飞(1983-),男,副教授,博士生导师,研究方向:天然药物化学生物学及中药资源学,E-mail: lisf@sxu.edu.cn

为天然药物化学和中药化学领域的研究热点。

在植物界中,木栓烷型三萜主要分布于卫矛科、青钟麻科、堇菜科等植物类群,且在卫矛属和南蛇藤属植物中呈现显著的化学多样性,例如从雷公藤中分离得到的雷公藤红素,具有抗炎、抗肿瘤活性和治疗代谢疾病的潜力^[1]。此外,独子藤、五层龙等中药也含有多木栓烷型三萜成分。近年来,随着分离鉴定技术的进步,新型木栓烷型三萜及其衍生物不断被发现,其结构复杂性与生物活性的研究持续推动着该领域发展。

由于木栓烷型三萜具有结构独特、生物活性多样以及分布广泛等特点,该类化合物在中医药、植物化学和天然产物研究等领域具有广泛的研究价值和应用前景。本文在 ScienceDirect、CNKI 等数据库中检索

木栓烷型三萜相关文献,对近十年来的从植物(包括中药)中发现的木栓烷型三萜类化学成分及其药理活性研究进展进行整理和归纳,以期为此类活性天然产物以及富含此类活性天然产物的植物与中药的研究开发提供借鉴和参考。

1 化学成分研究

查阅近十年国内外文献,整理来源于植物界(包括中药)的木栓烷型三萜类化合物共 117 个,其中在卫矛科五层龙属、美登木属、南蛇藤属、青钟麻科香犬玫属和堇菜科囊果堇属中分布较多(图 1)。根据 A 环的氧化、芳香化程度等不同结构特点,将其分为饱和木栓烷型三萜、木栓烷-3-酮型三萜、醌甲基型三萜、开环木栓烷型三萜及其他木栓烷型三萜 5 种类型^[2-3]。

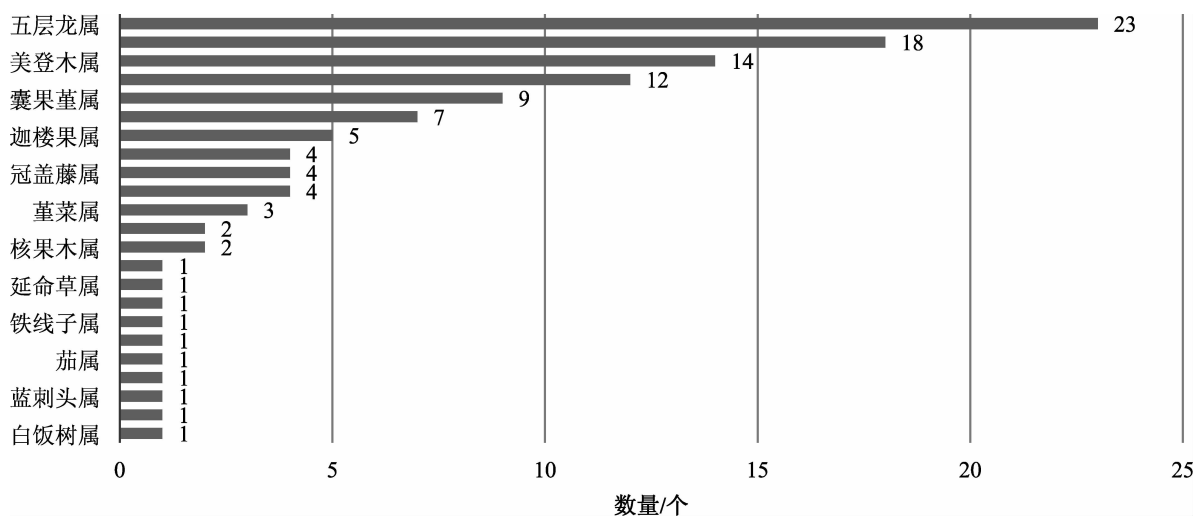


图 1 木栓烷型三萜在不同属植物中的分布数量

1.1 饱和木栓烷型三萜 饱和木栓烷型三萜的 A 环为饱和六元环,具有木栓烷母核的结构特征,C-3 位常有羟基取代,此类化合物在兜帽果科迦楼果属 *Anacolosia poilanei*、青钟麻科香犬玫属 *Caloncoba glauca* 等多种植物中发现较多,从冠盖藤^[8]、金英树^[13]、红厚壳^[18]、七星莲^[44]等中药中也分离得到了此类三萜,包括化合物 1~40(表 1,图 2)。

1.2 木栓烷-3-酮型三萜 木栓烷-3-酮型三萜的 A 环上 C-3 位被氧化为酮羰基,具有木栓酮(friedelin)母核结构特征,主要发现于卫矛科美登木属 *Maytenus robusta*、南蛇藤属 *Celastrus monospermus*、五层龙属 *Salacia grandifolia*、青钟麻科香犬玫属

Caloncoba welwitschii、堇菜科囊果堇属 *Anchietea pyrifolia* 等多种植物,包括多种中药如冠盖藤^[8]、显柱南蛇藤^[19]、雷公藤^[22]、海南五层龙^[29]、海南核果木^[30]、独子藤^[33]、皮刺茄^[41]、七星莲^[44]、紫花杜鹃^[51]等。此类结构占从植物中分离得到的木栓烷三萜的多数,包括化合物 41~94(表 2,图 3)。

1.3 醌甲基型三萜 醌甲基型三萜的结构特征是 A/B 环体系中具有甲基取代的醌类结构,以作为中药雷公藤的活性成分之一的雷公藤红素(celastrol)为代表,主要来自于卫矛科五层龙属(*Salacia impressifolia*)、美登木属(*Maytenus guianensis*)等多种植物,从中药显柱南蛇藤^[19]中也分离得到,包括化合物 95~104(表 3,图 4)。

表 1 饱和木栓烷型三萜的来源

编号	化合物名称	来源	文献
1	friedelin-3 α -ol	<i>D. albidum</i>	4
2	friedelin-3 β -ol		
3	trichadenic acid A	<i>A. poilanei</i>	5
4	3 α -(3,4-dihydroxycinnamoyl)-D:A-friedo-oleanan-27-oic acid		
5	3 α -p-coumaroyl-D:A-friedo-oleanan-27-oic acid		
6	polysperol	<i>S. polysperma</i>	6
7	pachysandiol A	<i>S. cochinchinensis</i>	7
8	epifriedelinol	<i>P. viburnoides</i>	8
9	friedelane		
10	glaucanoic acid	<i>C. glauca</i>	9
11	friedelane-3 α ,16 β -diol	<i>D. congestiflora</i>	10
12	2 α ,3 α ,22 β -trihydroxy-21-oxo-29-nor-friedelan-24-oic acid	<i>S. crassifolia</i>	11
13	lacefriedelic acid	<i>M. obovata</i>	12
14	galphimidin	<i>G. glauca</i>	13
15	galphimidin B		
16	glaucacetalin E		
17	methyl(3S,4R,4 α S,6 β R,8 α S,10S,12 β R,14 α S)-3,10-dihydroxy-4,4 α ,6 β ,8 α ,14 α -pentamethyl-11-methyleneicosahydronicene-12 β (1H)-carboxylate	<i>P. glandulosus</i>	14
18	friedelane-3 β ,29-diol	<i>C. cognatum</i>	15
19	3 β -hydroxyfriedelane-28-oic acid	<i>M. bidoupensis</i>	16
20	23-[(E)-ferulyloxy]-3 β -hydroxyfriedelan-27-oic acid	<i>A. pyrifolia</i>	17
21	3 β -hydroxy-23-[(E)-4-hydroxycinnamoyloxy]friedelan-27-oic acid		
22	3 β -hydroxy-23-[(Z)-4-hydroxycinnamoyloxy]friedelan-27-oic acid		
23	27-[(E)-p-coumaroyloxy]canophyllic acid	<i>C. inophyllum</i>	18
24	27-[(Z)-p-coumaroyloxy]canophyllic acid		
25	28-hydroxyl salaspermic acid	<i>S. cochinchinensis</i>	7
26	orthosphenic acid	<i>C. stylosus</i>	19
27	3 β ,24 β -epoxy-29-methoxy-2 α ,3 α ,6 α -trihydroxy-D:A-friedelane	<i>M. cuzcoina</i>	20
28	(3S,5 α R,7 β R,9 α R,13 β S,15 α R,16R)-7 β ,9 α ,12,12,13 β ,15 α ,16-heptamethyloctadecahydro-5H-3,5 α -methanochryseno[2,1-c]oxepin-3(2H)-ol	<i>R. oblongifolia</i>	21
29	wilforic acid I	<i>T. wilfordii</i>	22
30	salaspermic acid		
31	3 α -(3,4-dihydroxycinnamoyl)-D:A-friedo-oleanan-27,15 α -lactone	<i>A. poilanei</i>	5
32	glaucalactone C	<i>C. glauca</i>	9
33	(3S,4 α R,6S,6 α R,6 β S,8 α S,9R,10S,12 α S,12 β S,14 α R,14 β R)-3,10-dihydroxy-4 α ,6 α ,8 α ,9,12 β -pentamethyl-2-methyleneicosahydro-2H-6,14 α -(epoxymethano)picen-15-one	<i>E. gracilis</i>	23
34	glaucalactone A	<i>C. glauca</i>	24
35	glaucalactone B		
36	muellerilactone	<i>P. muellerianus</i>	25
37	odolactone		
38	welwitschiilactone A	<i>C. welwitschii</i>	26
39	3-acetoxylglaucalactone	<i>C. glauca</i>	27
40	laphocarpanol	<i>C. lophocarpa</i>	28

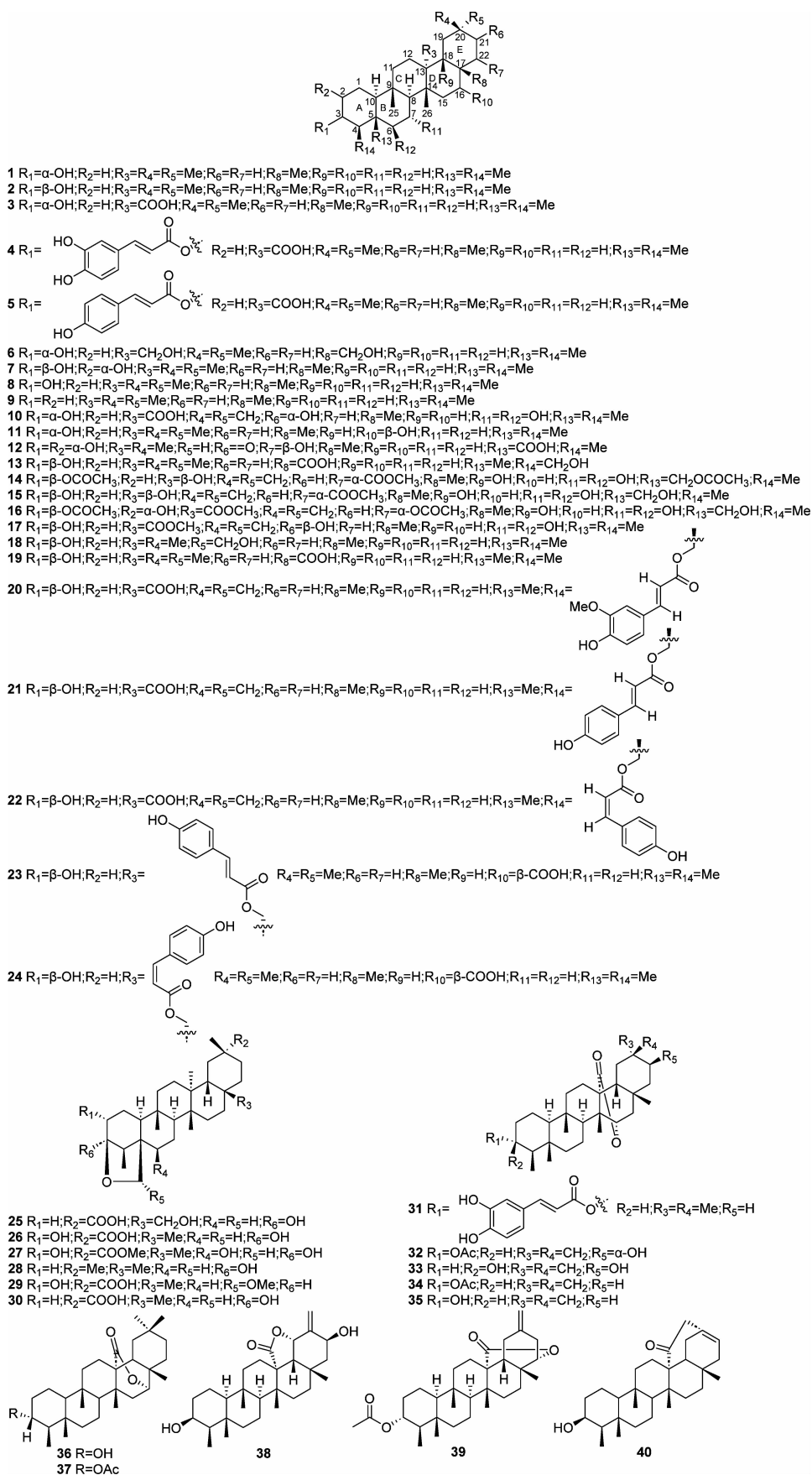
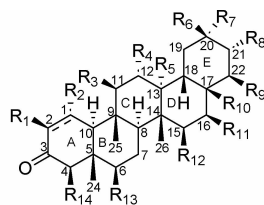


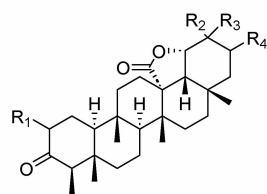
图 2 饱和木栓烷型三萜的结构

表 2 木栓烷-3-酮型三萜的来源

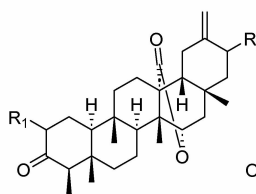
编号	化合物名称	来源	文献
41	friedelin	<i>D. albidum</i>	4
42	2 β , 6 β , 21 α -trihydroxyfriedelan-3-one		
43	trichadonic acid	<i>A. poilanei</i>	5
44	28-hydroxyfriedelan-3-one-29-oic acid	<i>S. polysperma</i>	6
45	kokoonol		
46	pristimeronol	<i>S. cochinchinensis</i>	7
47	canophyllal	<i>P. viburnoides</i>	8
48	4-epifriedelin		
49	methyl 21 β -hydroxy-3-oxo-30-norfriedel-20(29)-en-27-oate	<i>A. pyrifolia</i>	17
50	polpunonic acid	<i>C. stylosus</i>	19
51	salacinin C	<i>S. hainanensis</i>	29
52	hainanenone A	<i>D. hainanensis</i>	30
53	friedel-1-en-3, 16-dione	<i>M. robusta</i>	31
54	1 α , 29-dihydroxyfriedelan-3-one		
55	16 β , 28, 29-trihydroxyfriedelan-3-one		
56	12 α , 29-dihydroxyfriedelan-3-one		
57	29-hydroxyfriedelin		
58	16 β , 29-dihydroxyfriedelan-3-one		
59	29-hydroxyfriedelan-3, 16-dione		
60	friedelan-3, 16-dione		
61	friedocaloncobic acid	<i>C. welwitschii</i>	32
62	3-oxo-28-friedelanoic acid		
63	celasmonolane I	<i>C. monospermus</i>	33
64	3-oxo-12 α -hydroxyfriedelane		
65	monospermonol		
66	anchietin D	<i>A. pyrifolia</i>	34
67	anchietin E		
68	welwitschioic acid	<i>C. welwitschii</i>	35
69	28-hydroxyfriedelane-3, 15-dione	<i>S. grandifolia</i>	36
70	15 α -hydroxyfriedelan-3-one		
71	canophyllol		
72	30-hydroxyfriedelan-3-one		
73	friedelane-3, 15-dione		
74	obovatinol A	<i>S. obovatilimba</i>	37
75	obovatinol B		
76	22 β -hydroxy friedel-1-ene		
77	16 β -hydroxyfriedelin	<i>M. guianensis</i>	38
78	friedelan-3, 21-dione	<i>T. micrantha</i>	39
79	maytenfoliol	<i>C. vulcanicola</i>	40
80	welwitschiilactone B	<i>P. muellerianus</i>	34
81	welwitschiilactone C		
82	2 β , 21 β -dihydroxy-3-oxo-30-norfriedel-20(29)-en-27, 19 α -lactone		
83	welwitschiilactone E	<i>C. welwitschii</i>	35
84	welwitschiilactone F		
85	caloncobalactone	<i>C. glauca</i>	9
86	anchietin A	<i>A. pyrifolia</i>	34
87	anchietin B		
88	anchietin C		
89	21 β -hydrox ycaloncobalactone	<i>P. muellerianus</i>	
90	maytenfolone	<i>S. polysperma</i>	6
91	24-nor-friedelan-6 α , 10-dihydroxy-1, 2-dioxo-4, 7-dien-29-oic acid	<i>C. stylosus</i>	19
92	20, 20-dimethyl-3, 27-dioxo-(D:A)-friedeo-olean-27, 22 α -lactone	<i>C. glauca</i>	27
93	welwitschiilactone D	<i>C. welwitschii</i>	35
94	aculeastrumone A	<i>S. aculeastrum</i>	41



- 41 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=R_7=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 42 $R_1=OH; R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=R_7=Me; R_8=OH; R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=R_{12}=H; R_{13}=OH; R_{14}=Me$
 43 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=COOH; R_6=R_7=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 44 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=Me; R_6=COOH; R_7=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=CH_2OH; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 45 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=CH_2OH; R_6=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 46 $R_1=R_2=R_3=H; R_4=O; R_5=CH_2OH; R_6=R_7=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 47 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=R_7=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=CHO; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 48 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=R_7=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=\alpha-CH_3$
 49 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=COOCH_3; R_6=R_7=CH_2; R_8=\beta-OH; R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 50 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=Me; R_7=COOH; R_8=R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 51 $D^{1,2}; R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=R_7=Me; R_8=OH; R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 52 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=R_7=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=R_{12}=R_{13}=R_{14}=H$
 53 $D^{1,2}; R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=R_7=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=O; R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 54 $R_1=H; R_2=OH; R_3=R_4=H; R_5=R_6=Me; R_7=CH_2OH; R_8=R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 55 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=Me; R_7=CH_2OH; R_8=R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=OH; R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 56 $R_1=R_2=R_3=H; R_4=OH; R_5=R_6=Me; R_7=CH_2OH; R_8=R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 57 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=Me; R_7=CH_2OH; R_8=R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 58 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=Me; R_7=CH_2OH; R_8=R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=OH; R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 59 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=Me; R_7=CH_2OH; R_8=R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=O; R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 60 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=R_7=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=O; R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 61 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=R_7=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=COOH; R_{11}=H; R_{12}=OH; R_{13}=H; R_{14}=Me$
 62 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=R_7=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=COOH; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 63 $R_1=R_2=H; R_3=R_4=OH; R_5=R_6=R_7=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 64 $R_1=R_2=R_3=H; R_4=OH; R_5=R_6=R_7=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 65 $R_1=R_2=R_3=H; R_4=O; R_5=R_6=R_7=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=CH_2OH; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 66 $R_1=OH; R_2=R_3=R_4=H; R_5=COOCH_3; R_6=R_7=CH_2; R_8=OH; R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 67 $R_1=OH; R_2=R_3=R_4=H; R_5=COOCH_3; R_6=R_7=CH_2; R_8=\beta-OH; R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 68 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=Me; R_7=COOH; R_8=R_9=H; R_{10}=COOH; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 69 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=R_7=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=CH_2OH; R_{11}=H; R_{12}=O; R_{13}=H; R_{14}=Me$
 70 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=R_7=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=H; R_{12}=O; R_{13}=H; R_{14}=Me$
 71 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=R_7=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=CH_2OH; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 72 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=Me; R_6=CH_2OH; R_7=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 73 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=R_7=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=H; R_{12}=O; R_{13}=H; R_{14}=Me$
 74 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=R_7=Me; R_8=H; R_9=OH; R_{10}=CH_2OH; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 75 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=R_7=Me; R_8=H; R_9=OH; R_{10}=Me; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 76 $D^{1,2}; R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=R_7=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=O; R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 77 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=R_7=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=OH; R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 78 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=R_6=R_7=Me; R_8=O; R_9=H; R_{10}=Me; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$
 79 $R_1=R_2=R_3=R_4=H; R_5=Me; R_6=CH_2OH; R_7=Me; R_8=R_9=H; R_{10}=CH_2OH; R_{11}=R_{12}=R_{13}=H; R_{14}=Me$

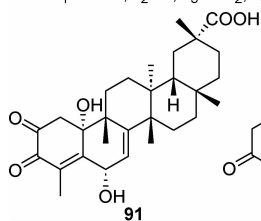
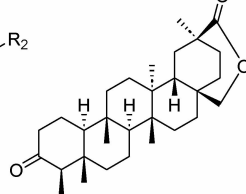


- 80 $R_1=H; R_2=R_3=O; R_4=\beta-OH$
 81 $R_1=\alpha-OH; R_2=R_3=O; R_4=\beta-OH$
 82 $R_1=\beta-OH; R_2=R_3=O; R_4=\beta-OH$
 83 $R_1=R_2=H; R_3=CH_2; R_4=O$
 84 $R_1=\alpha-OH; R_2=H; R_3=CH_2; R_4=O$

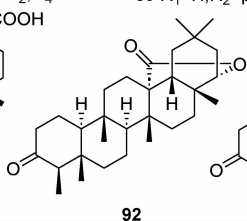


- 85 $R_1=R_2=H$
 86 $R_1=\beta-OH; R_2=\beta-OH$
 87 $R_1=\beta-OH; R_2=\alpha-OH$
 88 $R_1=H; R_2=\alpha-OH$
 89 $R_1=H; R_2=\beta-OH$

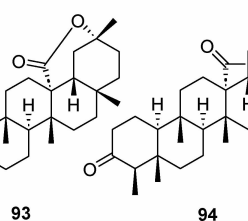
90



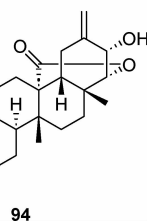
91



92



93



94

图 3 木栓烷-3-酮型三萜的结构

表 3 醌甲基型三萜的来源

编号	化合物名称	来源	文献
95	celastrol	<i>C. stylosus</i>	19
96	pristimerin		
97	22β-hydroxypristimerin	<i>M. guianensis</i>	38
98	22β-hydroxytingenone		
99	tingenone		
100	30-hydroxypristimerin	<i>S. impressifolia</i>	42
101	isoiguesterin		
102	22-hydroxytingenone		
103	netzahualcoyene		
104	iguesterin	<i>D. obscura</i>	43

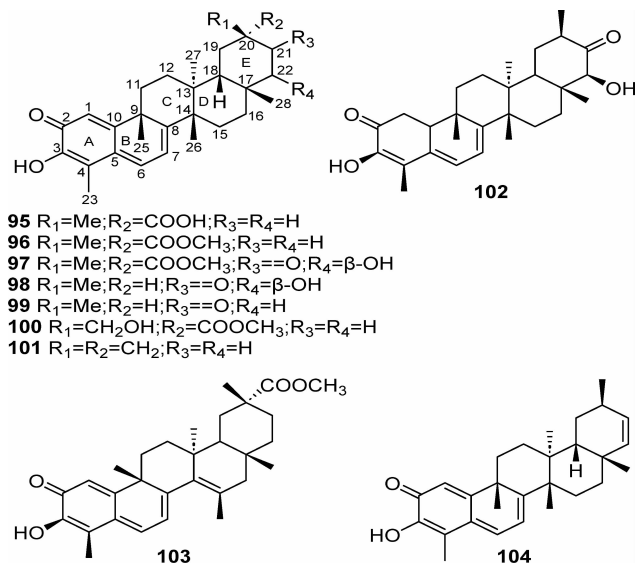


图 4 醌甲基型三萜的结构

1.4 开环木栓烷型三萜 开环木栓烷型三萜结构特征是母环中 A 环的开环,最常见的开环位置为C-3、C-4,且开环部位一般与氧原子相连,在中药七星莲^[44]、白饭树^[45]等植物中被发现,包括化合物**105**~**109**(表 4,图 5)。

1.5 其他木栓烷型三萜 其他木栓烷型三萜包括酚

性木栓烷型降三萜、木栓烯型三萜、木栓烷-1-酮型三萜等。酚性木栓烷型降三萜的结构特征是 A 环为苯环,多为 C-2、C-3 位羟基取代,母核多为 24-去甲基木栓烷结构。其他木栓烷型三萜类化合物主要从中药显柱南蛇藤^[19]、雷公藤^[22]、独子藤^[33]、余甘子^[46-47]等分离得到,包括化合物**110**~**117**(表 5,图 6)。

表 4 开环木栓烷型三萜的来源

编号	化合物名称	来源	文献
105	2β-hydroxy-3,4-seco-friedelolactone-27-oic acid	<i>V. diffusa</i>	44
106	2β,28β-dihydroxy-3,4-seco-friedelolactone-27-oic acid		
107	2β,30β-dihydroxy-3,4-seco-friedelolactone-27-lactone		
108	(2R,4S)2,4-epoxy-4,23,29-trihydroxy-3,4-seco-30-nor-friedel-19-en-3-oic acid methyl ester	<i>F. virosa</i>	45
109	secofriedelanophyllemblicine	<i>P. emblica</i>	46,47

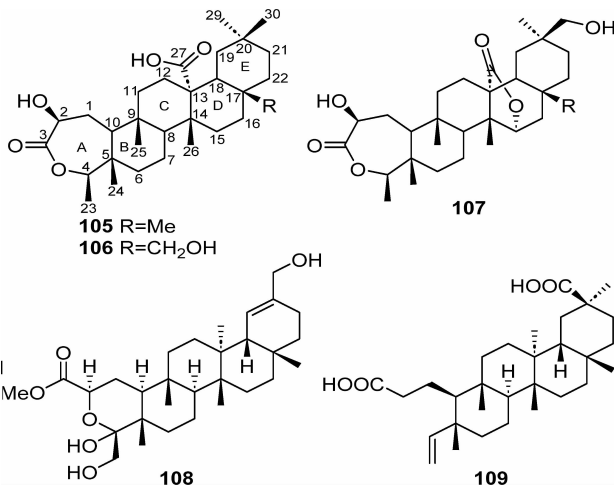


图 5 开环木栓烷型三萜的结构

表 5 其他木栓烷型三萜的来源

编号	化合物名称	来源	文献
110	23-nor-6-oxodemethyl-pristimerol	<i>C. stylosus</i>	19
111	wilforol A		
112	demethylzeylasteral	<i>C. monospermus</i>	33
113	caryopristerin	<i>S. crassifolia</i>	11
114	wilforic acid G	<i>T. wilfordii</i>	22
115	wilforic acid H		
116	regeol A	<i>S. impressifolia</i>	42
117	3α,28-dihydroxyfriedelan-1-one	<i>M. fulvum</i>	48

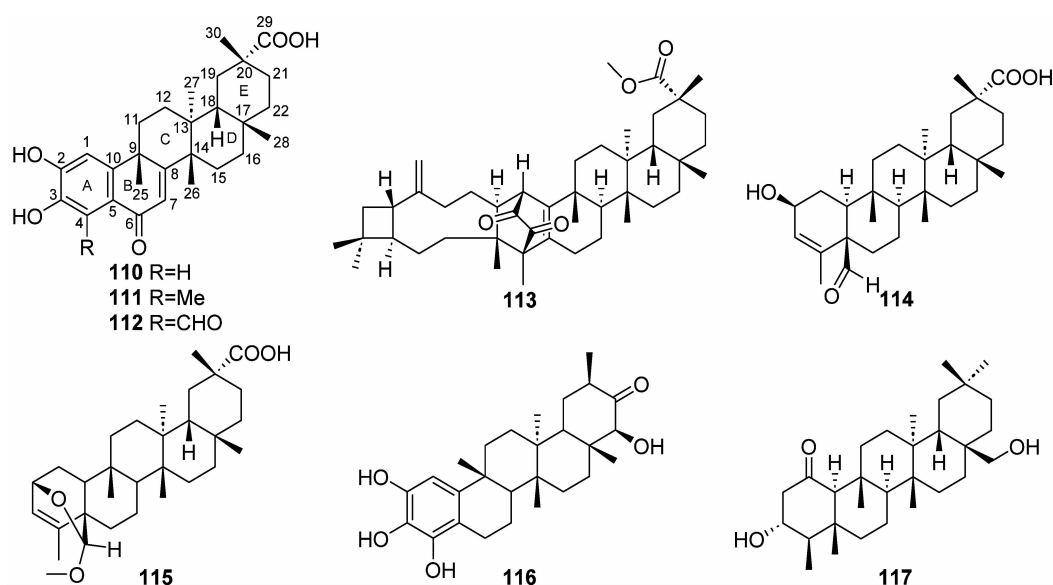


图 6 其他木栓烷型三萜的结构

2 药理活性研究

木栓烷型三萜作为一类广泛存在于植物中的天然三萜类化合物,因其多样的药理活性受到广泛关注,近十年的研究表明,木栓烷型三萜在抗肿瘤、抗菌、抗疟、抗炎和抗病毒等方面表现出显著的生物活性。以下是对近十年有关木栓烷型三萜的药理活性研究进展的整理。

2.1 抗肿瘤活性 以木栓酮、雷公藤红素为代表的木栓烷型三萜因具有抗肿瘤活性受到广泛研究,是天然产物药物开发的重要候选分子,其抗肿瘤机制多样,涉及诱导凋亡、抑制增殖、调控信号通路等。

Doan 等^[9]评价了来自兜帽果科迦楼果属 *Anacolosia poilanei* 的三种化合物 **4**、**5**、**31** 对 HepG2、MCF7、LU-1 和 KB 细胞系的增殖抑制活性。其中 **5** 对 4 种肿瘤细胞显示出中等的增殖抑制活性,IC₅₀ 值分别为 11.3、14.8、10.0 和 12.2 μM。**4** 和 **31** 对 KB 和 HepG2 细胞系的增殖抑制活性 (IC₅₀ 值在 10 ~ 30 μM 范围内) 比对 LU-1 和 MCF7 细胞系 (IC₅₀ > 50 μM) 更强,表明 **4** 和 **31** 的增殖抑制活性可能存在一定的选择性。比较 **4** 和 **5** 的构效关系,发现位于 A 环 C-3 上的反式肉桂酰基团的 C-3' 羟基可能影响其生物活性。

来自卫矛科五唇藤属 *Cheiloclinium cognatum* 的化合物 **2** 对 THP-1 和 K562 细胞系表现出较强的增殖抑制活性,IC₅₀ 值分别为 15.75 μM 和 14.18 μM。

进一步研究表明,**2** 的增殖抑制活性的机制可能为通过线粒体内源性途径导致细胞早期凋亡^[15]。从桑寄生科鞘花属 *Macrosolen bidoupensis* 分离得到的化合物 **3** 对 RD 细胞表现出中等的增殖抑制活性,IC₅₀ 值为 (29.07 ± 3.47) μM^[16]。

Funasaki 等^[17]以紫杉醇和长春新碱为阳性对照,评价了从堇菜科囊果堇属植物 *Anchietea pyrifolia* 分离得到的化合物 **20**、**21** 和 **49** 对 HeLa 和 HL-60 以及 NIH-3T3 细胞系的增殖抑制活性。结果表明 **20**、**21** 和 **49** 对 HeLa 和 HL-60 细胞系表现出中等的增殖抑制活性,IC₅₀ 值在 5.7~30.2 μM 之间。而 **49** 的选择性指数 (SI) 较高,SI 值为 9.5 (NIH-3T3/HeLa)。

Ying 等^[19]用 MTT 细胞活力测定法评价了从显柱南蛇藤 (*Celastrus stylosus*) 根中分离得到的木栓烷型三萜 (化合物 **26**、**50**、**91**、**95**、**96**、**110**、**111**) 对 6 种人肿瘤细胞 (PANC-1, A549, PC-3, HepG2, SGC-7901, HCCLM3) 的增殖抑制活性。显柱南蛇藤属于卫矛科南蛇藤属植物,其茎可入药,味苦、辛,性平,归肾、膀胱经,具小毒,有祛风除湿、活血止痛、利尿通淋的功效。实验结果表明 **95** 和 **96** 对 6 种细胞系均表现出较强的增殖抑制活性 (IC₅₀ 值在 0.54~3.07 μM 之间),特别是 **96** 对 PC-3 和 HepG2 细胞系表现出了更强的活性,IC₅₀ 值分别为 0.54 ± 0.02 μM 和 0.66 ± 0.02 μM。进一步的构效关系分析表明,**95** 和 **96** 的 A/B 环体系

中完整的醌甲基结构在其增殖抑制活性方面可能发挥了关键作用。

Yoneda 等^[34]使用 MTT 法评价了从堇菜科囊果堇属植物(*Anchietea pyrifolia*)中分离的化合物 **66~67**、**80~82**、**86~89** 对 HeLa 和 HL-60 细胞系的细胞毒性。结果显示,**66**、**67** 和 **82** 对 HL-60 细胞具有中等的增殖抑制活性,IC₅₀ 值在 10~30 μM 范围内。此外,所有化合物对 HeLa 细胞均无增殖抑制活性(IC₅₀>60 μM),表明这 3 种化合物的增殖抑制活性可能存在一定的选择性。

余甘子(*Phyllanthus emblica*)为叶下珠科叶下珠属植物,以干燥成熟果实入药,味甘、酸、涩,性凉,归肺、胃经,具有清热凉血、消食健胃、生津止咳的功效,现代药理学研究发现其有抗炎镇痛、调节代谢、抗氧化与抗衰老的作用,从余甘子根中分离得到的化合物 **109** 在 K562 和 HepG2 细胞系中显示了一定的增殖抑制活性,其中对 K562 细胞的增殖抑制活性比对 HepG2 更强(IC₅₀ 值分别为 46.7 ± 4.1 μg/mL, 70.7 ± 0.7 μg/mL)^[46]。此外,**109** 对 MCF-7 细胞具有明显的抑制作用,进一步的流式细胞术分析显示,**109** 是 MCF-7 细胞周期的调节因子,能抑制 MCF-7 细胞的增殖,并将细胞周期进程阻滞在 G2 期^[47]。

2.2 乙酰胆碱酯酶抑制活性 乙酰胆碱酯酶(AChE)是胆碱能系统中的关键酶,负责快速水解神经递质乙酰胆碱(ACh),终止神经信号传递,通过深入研究 AChE 抑制作用及其机制,可为神经疾病治疗和新型药物开发提供重要策略。Sousa 等^[31]采用 Ellman 法测定了从卫矛科美登木属植物 *Maytenus robusta* 分离得到的化合物 **54** 和 **58** 的 AChE 抑制活性,结果显示 **54** 和 **58** 有较弱的 AChE 抑制活性, AChE 抑制率分别为 32.3%和 27.0%。

2.3 抗菌活性 多项研究发现,一些木栓烷型三萜类化合物能对多种病原微生物表现出不同程度的抑制作用。Friedelin-3α-ol(**1**)对金黄色葡萄球菌有中等的抑菌活性(IC₅₀ = 13.07 μg/mL)、friedelin(**41**)对蜡样芽孢杆菌有中等的抑菌活性(IC₅₀ = 11.40 μg/mL),均表明了木栓烷型三萜成分具有一定的抑菌活性^[4]。菊科蓝刺头属 *Echinops gracilis* 中发现的

化合物 **33** 具有抗葡萄球菌和沙门氏菌活性(MIC = 16 μg/mL)^[23]。青钟麻科香犬玫属 *Caloncoba glauca* 中分离得到的化合物 **34** 对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的 MIC 值为 125 μg/mL,抑菌效果较弱^[24]。*Caloncoba lophocarpa* 中发现的化合物 **40** 对弗氏志贺氏菌的抑菌作用较弱, MIC 值为 62.5 μg/mL^[28]。

Sousa 等^[31]测定了来自 *Maytenus robusta* 的化合物 **54** 和 **58** 对革兰氏阳性菌(金黄色葡萄球菌和单核增生李斯特菌)、革兰氏阴性菌(铜绿假单胞菌和弗氏柠檬酸杆菌)和白色念珠菌的抑菌活性。在 250 μg/mL 的浓度下,化合物 **54** 对所有微生物的抑制作用均强于化合物 **58**,该化合物对白色念珠菌的抑制率为 42%,对铜绿假单胞菌的抑制率为 34%。

2.4 抗炎活性 红厚壳(*Calophyllum inophyllum*)为红厚壳科红厚壳属植物,根与叶味微苦涩、性平,归肝、肺经,可煎汤内服或外敷,主治风湿疼痛、跌打损伤、外伤出血及痛经等症;种子加工后可供药用或食用,适用于心腹烦满、咽喉肿痛、皮肤病等,兼具祛热毒作用。Thanh 等^[18]采用 ELISA 法评价了从红厚壳叶片中分离出的化合物对 LPS 诱导的 RAW264.7 细胞的抗炎活性,化合物 **23** 和 **24** 显示出了抗炎作用,**23** 可通过抑制 NO、IL-1β 和 TNF-α 等促炎介质表现出最强的抗炎活性(IC₅₀ = 2.44 ± 0.88 μM),同时进一步研究发现 **23** 能抑制诱导型一氧化氮合酶(iNOS)的活性,其抗炎活性与 NF-κB 信号通路的下调有关。

Sousa 等^[31]通过卡拉胶诱导的大鼠足爪肿胀实验对化合物 **57~60** 的体内抗炎活性进行了评价。实验 4 h 后,**58~60** 在 10 mg/kg 剂量下显示炎症反应抑制率分别为 59%、75%和 71%,**57** 的炎症反应抑制活性则不明显;在剂量为 20 mg/kg 时化合物 **58~60** 的炎症反应抑制率分别为 61%、77%和 68%。比较 **57~60** 结构和活性关系,推测 C-16、C-29 位的羟基取代、C-16 羟基氧化为羰基可能提高该类结构的抗炎活性。

2.5 抗疟活性 一些木栓烷型三萜类化合物在多项研究中表现出潜在的抗恶性疟原虫活性。Sikam 等^[9]评价了来源于 *Caloncoba glauca* 的化合物对恶性疟原虫 3D7(*Pf*3D7)和 Dd2(*Pf*Dd2)菌株的抗疟原虫作用,其中化合物 **10** 对 *Pf*Dd2 和 *Pf*3D7 的 IC₅₀ 值分

别为 $(3.5 \pm 0.1) \mu\text{g/mL}$ 和 $(4.6 \pm 0.7) \mu\text{g/mL}$, 而化合物 **32** 对 *PfDd2* ($\text{IC}_{50} = 9.4 \pm 0.1 \mu\text{g/mL}$) 和 *Pf3D7* ($\text{IC}_{50} = 15.9 \pm 2.3 \mu\text{g/mL}$) 的抑制作用较微弱。此外, 化合物 **85** 表现出微弱的对 *Pf3D7* 的选择性抑制活性 ($\text{IC}_{50} = 34.8 \pm 2.4 \mu\text{g/mL}$), 而化合物 **80** 和 **81** 对这两种菌株均无活性。构效关系分析表明这类结构的抗疟原虫活性可能由于骨架 C-3 位的羟基的存在而增强, 而且 C-27、C-28 甲基的氧化也可能提高活性。然而, C-3 氧化为酮基或内酯化时, 结构中游离羟基和羧基的数量减少, 活性可能因此降低。

Douanla 等^[32]对从青钟麻科香犬玫属植物 *Caloncoba welwitschii* 分离得到的化合物 **61**、**62** 进行了体外抗 *Pf3D7* 菌株的活性评价, 其中 **61** 无活性, **62** 的 IC_{50} 值为 $10.27 \pm 1.31 \mu\text{M}$ 。**61** 仅在 C-15 羟基上与 **62** 不同, 表明三萜骨架上存在 C-15 羟基可能降低抗疟原虫活性。从荨麻科红珠麻属 *Urera gravenreuthii* 中分离得到的 friedelin(**41**)也表现出了对 *Pf3D7* 的弱抑制活性, IC_{50} 值为 $(21.1 \pm 4.8) \mu\text{M}$ ^[49]。

2.6 强心作用 Nko'o 等^[27]对青钟麻科香犬玫属植物 *Caloncoba glauca* 的三萜成分的强心作用进行了试验。结果表明, 化合物 3-acetoxyglaucalactone(**39**)能通过正性肌力和变时作用产生强心活性。进一步研究表明, **39** 的正性肌力和变时作用机制可能是通过 β_1 -肾上腺素能受体或钙通道开放直接刺激 β -肾上腺素能通路所致。

2.7 NO 抑制作用 一氧化氮(NO)是一种重要的气体信号分子, 在多种生理和病理过程如免疫调控、神经调节、酶活性抑制、炎症调控等中具有重要作用。Li 等^[18]研究了从冠盖藤 *Pileostegia viburnoides* 中分离得到的化合物对脂多糖(LPS)刺激 BV2 小胶质细胞产生 NO 的抑制作用。冠盖藤为绣球科冠盖藤属植物, 以根和枝叶入药, 具有祛风除湿、散瘀止痛、消肿解毒的功效, 现代研究表明其还具有抗氧化、抗菌消炎作用。在测试的化合物中, 化合物 **8** 和 **41** 在浓度为 $80 \mu\text{M}$ 时能适度降低 NO 的产生, 抑制率分别为 45.4% 和 46.6%。这一结果表明, **8** 和 **41** 可能具有潜在的抗神经炎症活性, 需要进一步研究来评估这些活性化合物的抗神经炎症活性和机制。

化合物 **66**、**67**、**80**、**82**、**86**~**89** 对 LPS 诱导的 NO 生成具有抑制作用, 其中 **86** 表现出最强的抑制活性 ($\text{IC}_{50} = 2.4 \pm 0.17 \mu\text{M}$), 而 **80**、**82** 和 **89** 表现出中等的抑制活性, IC_{50} 值分别为 19.2、16.3 和 $18.6 \mu\text{M}$ ^[34]。进一步的构效关系研究表明, 由 C-27 和 C-15 或 C-27 和 C-19 形成的内酯环以及 C-21 β -OH 的存在可能是影响抑制活性的重要因素。此外, C-27/C-15 内酯环与 C-2 β -OH 同时存在可能有助于提高活性。同时, 在 LPS 和 IFN- γ 存在的条件下, **86** 能以浓度依赖的方式抑制 iNOS 的 mRNA 表达, 表明 **86** 可能具有潜在的抗炎活性。

Villar-Lorenzo 等^[40]对从卫矛科南蛇藤属植物 *Celastrus vulcanicola* 中分离得到的化合物 **50** 和 **79** 的对 LPS 诱导 RAW 264.7 细胞产生 NO 的抑制活性进行了评价, 结果显示 **50** 和 **79** 分别在 25 和 $50 \mu\text{M}$ 浓度下显著抑制 LPS 诱导的 NO 释放, 并且降低促炎细胞因子的 mRNA 的表达。进一步研究表明, 这两种化合物均抑制了 LPS 介导的半胱天冬酶-1(caspase-1)和白细胞介素 1β (IL- 1β)前体的活化过程, 反映了它们靶向炎症小体的抗炎能力。

2.8 抗病毒活性 Oliveira 等^[36]评估了卫矛科五层龙属植物 *Salacia grandifolia* 中分离得到的木栓烷型三萜在 L929 细胞系中对鼠冠状病毒 MHV-3 的抗病毒活性, 结果显示化合物 **69** 和 **71** 的抗病毒活性最强, EC_{50} 值分别为 69 ± 6 和 $2.9 \pm 0.3 \mu\text{M}$ 。**69** 和 **71** 在 C-28 上都有一个羟基, 其他未显示活性的化合物是在 C-28 缺少羟基的三萜结构, 表明 C-28 上的羟基对于抗病毒活性可能是必需的。此外, 单羰基化合物 **71** 的活性比 **69** 提高了 23 倍, 说明第二羰基的存在可能降低了活性。为进一步研究这些化合物抗病毒活性的机制, 需要对 C-28 羟基化的木栓烷型三萜类进行进一步测试, 建立更详细的构效关系。

Dai 等^[44]通过 HBV 转染 HepG 2.2.15 细胞系评价了从七星莲 *Viola diffusa* 中分离得到的化合物 **8**、**41**、**105**~**107** 的抗 HBV 活性。七星莲为堇菜科堇菜属植物, 全草可入药, 性寒, 味苦、辛, 归肺、肝经, 具有清热解毒、散瘀消肿、止咳平喘的功效, 现代研究表明其具有利尿、抗炎、抗病毒潜力。结果显示, **105** 和 **106**

对 HBsAg 和 HBeAg 均有抑制作用, 其对 HBsAg 的 IC_{50} 值分别为 26.2 μM 和 33.7 μM , 对 HBeAg 的 IC_{50} 值分别为 8.0 μM 和 15.2 μM , **8** 则选择性抑制 HBeAg 的分泌。这些结果表明三萜骨架中的 7 元内酯环可能是其抗 HBV 活性的重要组成部分。

白饭树(*Flueggea virosa*)为叶下珠科白饭树属植物, 以全株入药, 味苦、微涩, 性凉, 归肺、心经, 具有清热解毒、消肿止痛、止痒止血的功效, 主治风湿痹痛、湿疹瘙痒、疮疖溃烂、烧烫伤等症; 以根入药, 可祛风湿、清湿热、化瘀止痛, 用于湿痹痛、跌打损伤、咳嗽等症; 以叶入药, 可祛风除湿、杀虫拔脓, 外治黄脓白泡疮、湿疹、铁钉入肉等, 但含小毒, 多作外用, 不宜内服。从白饭树根中分离得到的化合物 **108** 在 HCVcc 感染试验中表现出了较强的抗 HCV 活性 ($EC_{50} = 49.9 \pm 4.9 \mu M$)^[45]。

2.9 α -葡萄糖苷酶抑制活性 α -葡萄糖苷酶能够加快糖类消化, 导致血糖快速升高, 抑制该酶可延缓糖分吸收, 降低血糖峰值。因此, 表现出 α -葡萄糖苷酶抑制活性的木栓烷型三萜类化合物则具有开发成降血糖药物的潜力。牛琦等^[6]对来自多籽五层龙 *Salacia polysperma* 的化合物 **6**、**44**、**45**、**90** 进行了 α -葡萄糖苷酶抑制活性的评价。结果显示, **44** 对 α -葡萄糖苷酶有较弱的抑制作用, IC_{50} 值为 15.1 μM , **6**、**45** 和 **90** 也表现出一定的 α -葡萄糖苷酶抑制作用, IC_{50} 值分别为 39.4、27.6 和 57.8 μM 。**44** 的活性显著强于 **90**, 表明 C-28 与 C-29 的内酯化可能降低 α -葡萄糖苷酶抑制活性。许浩楠等^[37]采用分光光度法对卫矛科五层龙属河口五层龙 *Salacia obovatilimba* 中分离得到的化合物进行了 α -葡萄糖苷酶抑制活性的评价。结果显示, 化合物 **71**、**74**~**76** 对 α -葡萄糖苷酶有一定的抑制作用, IC_{50} 值在 21.81~29.22 μM 之间。

2.10 抗焦虑活性 金英树(*Galphimia glauca*)为金虎尾科金英属植物, 以干燥成熟果实入药, 药味酸、甘、涩, 性平, 归肾、膀胱、大肠经, 主治遗精滑精、遗尿尿频、崩漏带下、久泻久痢, 具有固精缩尿、涩肠止泻的功效。Rios 等^[13]通过旷场实验、圆筒实验和孔板实验测试了来自金英树地上部分的化合物 **14**~**16** 的抗

焦虑活性, 结果表明 **14**~**16** 以剂量依赖性方式发挥抗焦虑样活性, 它们均可延长戊巴比妥诱导催眠的持续时间, 其中 **15** 的活性最强, 表明木栓烷型三萜类化合物具有潜在的抗焦虑活性。

3 总结

木栓烷型三萜是一类分布广泛的活性天然产物, 其结构特征为五环三萜骨架, 因其独特的结构、多样的生物活性和广泛的分布范围, 成为中医药、天然产物领域研究的焦点。本文对近十年来源于植物及中药的 117 个木栓烷型三萜类化学成分的结构、分布及药理作用进行了综述。

根据 A 环的氧化、芳香化程度等不同结构特点, 本文按照饱和木栓烷型三萜、木栓烷-3-酮型三萜、醌甲基型三萜、开环木栓烷型三萜及其他木栓烷型三萜 5 种类型进行了系统整理。通过整理, 我们可以发现木栓烷型三萜来源上较广, 特别是在卫矛科多种植物中具有丰富的含量及多样性, 包括雷公藤、独子藤、海南五层龙、显柱南蛇藤等中药, 从中发现的部分木栓烷型三萜具有作为中药的活性成分或质量标志物来研究和开发的潜在价值。此外, 从堇菜科、绣球科、青钟麻科等众多植物包括七星莲、冠盖藤等中药中也发现了多种不同结构、不同生物活性的木栓烷型三萜, 进一步拓展了此类天然产物的化学结构、自然分布和药理作用的多样性。

丰富的化学结构不仅赋予了木栓烷型三萜多样的药理作用, 也是众多中草药中的活性物质。药理活性研究显示, 木栓烷型三萜在抗肿瘤、抗菌、抗疟、抗炎和抗病毒等方面表现出显著的生物活性。例如, 从红厚壳中发现的化合物 **23** 能抑制促炎介质和 iNOS, 并且能下调 NF- κ B 信号通路, 表现出抗炎活性; 来自多籽五层龙的化合物 **44** 还表现出 α -葡萄糖苷酶抑制活性, 具有治疗糖尿病的潜在价值; 来源于余甘子的化合物 **109** 能调节 MCF-7 细胞的细胞周期, 抑制 MCF-7 细胞的增殖, 具有开发新的抗肿瘤药物的潜在价值。

由于木栓烷型三萜结构常伴随羟基、羧基或羰基等官能团修饰, 不同官能团的修饰能够影响其生物活性。C-3 羟基的存在可能增强抗疟活性, 但 C-3 羟基

氧化为酮基或内酯化时,抗疟活性可能降低,C-15 羟基的存在也可能降低抗疟活性,C-16 位的羟基或羰基取代可能提高抗炎活性,C-15 与 C-27 形成内酯环可能影响抑制 NO 的活性,C-27、C-28 甲基的氧化可能提高抗疟活性,C-28 上的羟基可能是影响抗病毒活性的关键官能团,C-28 与 C-29 的内酯化可能影响 α -葡萄糖苷酶抑制活性。此外,不同的环结构也会对其生物活性产生影响。A/B 环体系中完整的醌甲基结构可能影响细胞毒活性,A 环形成 7 元内酯环可能影响抗病毒活性。

总之,通过对近十年来源于植物及中药的木栓烷型三萜类化学成分的结构、分布及药理作用进行整理和归纳,可以发现现有研究大部分集中于新型木栓烷型三萜的发现、药用植物中的活性木栓烷型三萜成分的分离和活性评价,但是对木栓烷型三萜的构效关系和作用机制的深入研究以及体内药效学研究则较为薄弱,此外对体系复杂的木栓烷型三萜的分离纯化和结构解析仍较为困难。未来可进一步探索更多科属植物及中药中木栓烷型三萜的具体分布与化学多样性,完善分离纯化和结构鉴定的技术与方法,阐明生物合成路径,深入研究其构效关系和作用机制,结合人工智能建立筛选模型,加速研究成果向临床应用方向发展,促进这一类天然产物和相关中药资源的开发利用。

参考文献:

- [1] XU S, FENG Y, HE W, et al. Celastrol in metabolic diseases: progress and application prospects[J]. Pharmacol Res, 2021, 167: 105572.
- [2] 汪远超,李明炆,汪豪,等. 卫矛科木栓烷型三萜类化学成分及药理活性[J]. 现代中药研究与实践, 2015, 29(2): 7.
- [3] 刘向前,李小军,金伦喆,等. 天然产物中木栓烷型三萜核磁共振波谱特征[J]. 湖南中医药大学学报, 2017, 37(1): 87-105.
- [4] CHAMA M A, DZIWORNU G A, POPLI E, et al. Antimicrobial and in silico studies of the triterpenoids of *Dichapetalum albidum*[J]. Heliyon, 2023, 9(7): e18299.
- [5] DOAN T T A, NGUYEN T L, LITAUDON M, et al. Three new D: a friedo-oleanane triterpenes from the stem bark of *Anacolosia poilanei* and their cytotoxic activities[J]. Phytochem Lett, 2022, 47: 125-129.
- [6] 牛琦,许浩楠,王浩鑫,等. 多籽五层龙中 1 个新的木栓烷型三萜[J]. 中草药, 2024, 55(6): 1884-1889.
- [7] 张广求,尤慧梅,赵佳文,等. 柳叶五层龙中的 1 个新的木栓烷型三萜[J]. 中草药, 2019, 50(18): 4266-4271.
- [8] LI X, LIU Z, KIM K, et al. Chemical constituents from leaves of *Pileostegia viburnoides* Hook.f. et Thoms [J]. Natural Product Sciences, 2016, 22(3): 154-161.
- [9] SIKAM K G, HAPPI G M, AHMED S A, et al. 30-nor-friedelanes and other compounds from the stem bark and fruits of *Caloncoba glauca* (Achariaceae), their antiparasitodal activity, structure-activity relationship and computational validation[J]. Fitoterapia, 2023, 170: 105627.
- [10] CHEN W H, HAN C R, HUI Y, et al. Terpenoids from the stems of *Drypetes congestiflora* [J]. Helv Chim Acta, 2015, 98(5): 724-730.
- [11] SANTOS J D, RODRIGUES B, OLIVEIRA W, et al. Caryopristimerin, the first example of a sesquiterpene-triterpene homo diels-alder adduct, and a new 29-nor-friedelane from roots of *Salacia crassifolia*[J]. J Brazil Chem Soc, 2019, 30(7): 1558-1565.
- [12] AKOSUNG E, KENMOGNE S B, SONGUE J L, et al. Bioactive constituents from *Manilkara obovata* (Sapindaceae) J.H.Hemsl[J]. Nat Prod Res, 2021, 35(22): 4347-4356.
- [13] RIOS M Y, ORTEGA A, DOMINGUEZ B, et al. Glaucaetalin E and galphimidin B from *Galphimia glauca* and their anxiolytic activity[J]. J Ethnopharmacol, 2020, 259: 112939.
- [14] TEDONKEU A T, TAMOKOU J D, MPETGA J D S, et al. A new antimicrobial nor-friedelane-type triterpenoid and other constituents from *Plectranthus glandulosus* Hook. f. (Lamiaceae) [J]. Nat Prod Res, 2022, 36(18): 4587-4596.
- [15] PEREIRA R C G, EVANGELISTA F C G, JUNIOR V S D S, et al. Cytotoxic activity of triterpenoids from *Cheiloclinium cognatum* branches against chronic and acute leukemia cell lines[J]. Chem Biodivers, 2020, 17(12): e2000773.
- [16] KH L, NGUYEN T C, NGUYEN T A, et al. Cytotoxic ac-

- tivity and phytochemical constituents of *Macrosolen bidoupensis* Tangane & V.S.Dang[J]. Rec Nat Prod, 2020, 15(1):71–75.
- [17] FUNASAKI M, MINATO C, NONAKA M, et al. New friedelane triterpenes from *Anchietea pyrifolia*[J]. Phytochem Lett, 2019, 32:42–46.
- [18] THANH N V, JANG H J, VINH L B, et al. Chemical constituents from Vietnamese mangrove *Calophyllum inophyllum* and their anti-inflammatory effects[J]. Bioorg Chem, 2019, 88:102921.
- [19] YING Y M, LI C Y, CHEN Y, et al. Lupane- and friedelane-type triterpenoids from *Celastrus stylosus*[J]. Chem Biodivers, 2015, 12(8):1222–1228.
- [20] REYES C P, JIMÉNEZ I A, BAZZOCCHI I L. Penta-cyclic triterpenoids from *Maytenus cuzcoina*[J]. Nat Prod Commun, 2017, 12(5):675–678.
- [21] MUNVERA A M, OUAHOUB M W, MKOUNGA P, et al. Chemical constituents from leaves and trunk bark of *Rinorea oblongifolia*(Violaceae)[J]. Nat Prod Res, 2020, 34(14):2014–2021.
- [22] LI X M, YANG C M, ZHANG L N, et al. Euphane and friedelane triterpenoids from *Tripterygium wilfordii*[J]. Phytochem Lett, 2022, 47:46–50.
- [23] TCHINDA A M, NANFACK A R D, TAMOKOU J, et al. Echinograciolide, a new antibacterial nor-triterpenoid and other constituents from *Echinops gracilis* O.Hoffm. (Asteraceae)[J]. Nat Prod Res, 2022, 38(7):1108–1119.
- [24] TAMBA C N, TSOPGNI W D T, FOTSO B S H, et al. Two new 30-norfriedelane triterpenes from *Caloncoba glauca*(P.Beauv.) Gilg(Achariaceae)[J]. Nat Prod Res, 2025, 39(1):9–19.
- [25] TSAKEM B, ECKHARDT P, TCHUENGUEM R T, et al. Muellerilactone and other bioactive constituents of *Phyllanthus muellerianus*(kuntze) exell[J]. Biochem Syst Ecol, 2022, 101:104397.
- [26] KEUGWA C V T, SONGUE J L, TCHO A T, et al. Welwitschiilactone A, B and C, three new 30-norfriedelane triterpenes from the roots of *Caloncoba welwitschii*(Oliv.) Gilg(Achariaceae)[J]. Phytochem Lett, 2018, 27:15–19.
- [27] NKO'O M H J, NOULALA C G T, TSALA D E, et al. Two new friedelane lactones from the roots of *Caloncoba glauca* (Flacourtiaceae) and evaluation of their cardiotonic activity on isolated frog's heart[J]. Phytochem Lett, 2021, 42:27–35.
- [28] TCHEUKO A S, HODJIE B S F, TCHO A T, et al. A new 30-norfriedelane triterpnoid from *Caloncoba lophocarpa* (Oliv.) Gilg.(Achariaceae)[J]. Nat Prod Res, 2025, 39(2):307–314.
- [29] YU M H, SHI Z F, YU B W, et al. Triterpenoids and alpha-glucosidase inhibitory constituents from *Salacia hainanensis*[J]. Fitoterapia, 2014, 98:143–148.
- [30] HE Y, SUN Y, CHEN D, et al. Hainanenone A: a new friedelane triterpenoid from the leaves and stems of *drypetes hainanensis*[J]. Chemistry of Natural Compounds, 2015, 51(2):273–275.
- [31] SOUSA G F D, AGUILAR M G D, DIAS D F, et al. Anti-inflammatory, antimicrobial and acetylcholinesterase inhibitory activities of friedelanones from *Maytenus robusta* branches and isolation of further triterpenoids[J]. Phytochem Lett, 2017, 21:61–65.
- [32] DOUANLA P D, TCHUENDEM M H K, TCHINDA A T, et al. Chemical constituents of the leaves of *Caloncoba welwitschii* Gilg[J]. Phytochem Lett, 2018, 23:5–8.
- [33] 宁若男, 贾冬玲, 王晓婧, 等. 独子藤中1个新的木栓烷型三萜[J]. 中草药, 2022, 53(2):342–346.
- [34] YONEDA Y, YAHAGI T, HARADA K, et al. Anchietins A–E: 30-norfriedelane-type triterpenes from *Anchietea pyrifolia*[J]. Phytochemistry, 2022, 203:113388.
- [35] KEUGWA C V T, EHAWA F R E, HAPPI G M, et al. Three new 30-norfriedelane and a new friedelane triterpenes from the trunk bark of *Caloncoba welwitschii*(Oliv.) Gilg (Achariaceae)[J]. Nat Prod Res, 2023, 37(3):468–477.
- [36] OLIVEIRA L R, SERAFIM M S M, DIAS D L, et al. Isolation and in vitro biological evaluation of triterpenes from *Salacia grandifolia* Leaves[J]. ACS omega, 2024, 9(29):32153–32158.
- [37] 许浩楠, 王浩鑫, 陈林, 等. 河口五层龙石油醚部分的化学成分研究[J]. 中草药, 2024, 55(20):6838–6844.
- [38] FACUNDO V A, ULISES D O M D, MILITÃO J S L T, et al. Chemical constituents from *Maytenus guianensis* Klotzsch ex Reissek(Celastraceae) Amazon rainforest[J].

- Biochem Syst Ecol, 2015, 58: 270–273.
- [39] LOPES R P, FERREIRA F L, SOUSA G F D, et al. Activity of extracts and terpenoids from *Tontelea micrantha* (Mart.ex Schult.) A.C.Sm. (Celastraceae) against pathogenic bacteria[J]. Nat Prod Res, 2024, 39(10): 2724–2733.
- [40] VILLAR-LORENZO A, ARDILES A E, ARROBA A I, et al. Friedelane-type triterpenoids as selective anti-inflammatory agents by regulation of differential signaling pathways in LPS-stimulated macrophages[J]. Toxicol Appl Pharm, 2016, 313: 57–67.
- [41] TCHAPNDA N P T, NJAMBOUO R B N, KENMOGNE M H T, et al. Cytotoxic constituents from the fruit of *Solanum aculeastrum*[J]. Nat Prod Res, 2024, 39(10): 2863–2871.
- [42] SILVA F M A D, PAZ W H P, VASCONCELOS L S F, et al. Chemical constituents from *Salacia impressifolia* (Miers) A.C.Smith collected at the Amazon rainforest[J]. Biochem Syst Ecol, 2016, 68: 77–80.
- [43] KOUTENTIS P A, JESUS M C D, WAPLING J, et al. Phytochemical composition of *Denhamia obscura* (A. Rich.) Meisn. Ex Walp. root bark, seeds and leaves[J]. Arkivoc, 2022, 2022(4): 123–142.
- [44] DAI J J, TAO H M, MIN Q X, et al. Anti-hepatitis B virus activities of friedelolactones from *Viola diffusa* Ging[J]. Phytomedicine, 2015, 22(7–8): 724–729.
- [45] CHAO C H, CHENG J C, SHEN D Y, et al. Terpenoids from *Flueggea virosa* and their anti-hepatitis C virus activity[J]. Phytochemistry, 2016, 128: 60–70.
- [46] NGUYEN T A, DUONG T H, LE POGAM P, et al. Two new triterpenoids from the roots of *Phyllanthus emblica* [J]. Fitoterapia, 2018, 130: 140–144.
- [47] WANG C, XU H, WANG, Y. Antiproliferative effect of secofriedelanophyllemblicine, a triterpenoid present in the roots of *Phyllanthus emblica* L[J]. Nat Prod Res, 2021, 36(12): 3198–3202.
- [48] MBEUNKEU A B D, AZEBAZE A G B, TALA M F, et al. Three new pentacyclic triterpenoids from twigs of *Manniophyton fulvum* (Euphorbiaceae)[J]. Phytochem Lett, 2018, 27: 1–8.
- [49] HAPPI G M, DZOUEMO L C, KEMAYOU G P M, et al. Antiplasmodial compounds from *Urera gravenreuthii* (Urticaceae), their structure–activity relationship and chemotaxonomic significance[J]. S Afr J Bot, 2023, 157: 201–208.
- [50] SUÁREZ A I. Chemical constituents from *Senefelderosis croizatii* steyeri[J]. Biochem Syst Ecol, 2020, 90(3): 104016.
- [51] ZENG K, BAN S, CAO Z, et al. Phytochemical and chemotaxonomic study on the leaves of *Rhododendron amesiae*[J]. Biochem Syst Ecol, 2021, 95: 104232.

(收稿日期: 2025–05–31)