

天然来源的降木脂素类化合物及其生物活性研究进展

吴倩¹, 王思成^{2#}, 盛文兵¹, 姚萌¹, 袁汉文¹, 王炜¹, 李斌^{1*}, 彭彩云^{1*}

1. 湖南中医药大学药学院 中药民族药物创新发展国际实验室, 中巴中医药民族医药研究国际合作基地, 创新药物研究所, 湖南长沙 410208

2. 浙江大学竺可桢学院, 浙江杭州 310012

摘要:天然来源的降木脂素类化合物, 结构类型复杂多样, 分布广泛, 根据 2 个苯丙素分子连接方式和连接位置的不同可将降木脂素分为降木脂素和降新木脂素。降木脂素类化合物具有抗肿瘤、抗过敏、抗炎、抗氧化和抗 HIV 及激素样作用等多种生物活性。主要对天然来源的降木脂素类化合物的结构类型及生物活性进行综述, 为降木脂素类化合物的研究开发和应用提供依据。

关键词:降木脂素; 降新木脂素; 天然来源; 结构类型; 生物活性

中图分类号: R284; R285 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2021)05-1522-14

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2021.05.034

Advances on natural sources norlignan compounds and their biological activities

WU Qian¹, WANG Si-cheng², SHENG Wen-bing¹, YAO Meng¹, YUAN Han-wen¹, WANG Wei¹, LI Bin¹, PENG Cai-yun¹

1. TCM and Ethnomedicine Innovation & Development International laboratory, School of pharmacy, Sino-Pakistan TCM & Ethnomedicine International Cooperation Base, Innovative Materia Medica Research Institute, School of Pharmacy, Hunan University of Chinese Medicine, Changsha 410208, China

2. Chu Kochen Honors College, Zhejiang University, Hangzhou 310012, China

Abstract: As a natural source compound, norlignan compounds have complex and diverse structure types with a wide of sources. Norlignan can be divided into norlignan and norneolignan by the difference of connection mode and position of two phenylpropanoid molecules. Norlignan have various biological activities such as anti-tumor, anti-allergy, anti-inflammatory, antioxidant, anti-HIV, and hormone-like effects. This review mainly describes the structure types and biological activities of natural sources of norlignan, providing a basis for the research development and application of norlignan.

Key words: norlignan; norneolignan; nature source; structure type; biological activities

木脂素是指由 2 个苯丙素单元 (C₆-C₃) 通过 β-β' 键或 8-8' 键相连而形成的一类天然化合物, 该类化合物广泛分布在植物树脂或木质部中, 因而被称为木脂素。木脂素类又可被分为木脂素、新木脂素、寡聚木脂素、杂木脂素和降木脂素等亚类。其中降木脂素是在木脂素母核结构的基础上缺少 1 个或 2 个碳原子而形成的, 是木脂素类天然化合物中最罕见的结构类型, 天然的降木脂素具有多种生物学活性, 包括抗肿瘤、抗过敏、抗炎、抗氧化和

抗人类免疫缺陷病毒 (human immunodeficiency virus, HIV) 及激素样作用等。因此, 降木脂素的研究引起了广泛的关注, 本文对天然来源的降木脂素类化合物的结构类型和生物学活性进行综述, 为降木脂素类化合物的进一步深入研究提供参考。

1 降木脂素的结构分类

降木脂素类化合物分为降木脂素和降新木脂素, 通过苯丙素侧链连接的称为降木脂素, 苯丙素侧链与另一苯丙素的苯环通过 C-C 键或 C-O-C 键连

收稿日期: 2020-05-17

基金项目: 湖南省自然科学基金 (2020JJ4064); 湖南省教育厅科研项目 (20K095); 湖南省科学技术厅重点研发计划项目 (2018SK2119); 湖南省药学一流学科开发基金项目 (2020YX05); 湖南中医药大学科研基金项目 (2019XJJ003)

作者简介: 吴倩 (1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为中药化学与分析。Tel: 19174153109 E-mail: 1530893422@qq.com

*通信作者: 李斌 (1979—), 硕士研究生导师, 副教授, 主要从事天然产物化学成分与活性研究。E-mail: libin-hucm@hotmail.com

彭彩云 (1972—), 硕士研究生导师, 教授, 主要从事天然产物化学成分与活性研究。E-mail: caiyunpeng-hucm@qq.com

#并列第一作者: 王思成 (2000—), 男, 本科生, 研究方向为药物化学。Tel: 17775851807 E-mail: 1578051623@qq.com

接的称为降新木脂素。

1.1 降木脂素

降木脂素又可根据苯丙素侧链不同的连接位置, 分为 α - α' 型、 α - β' 型、 γ - α' 型、 β - α' 型、 β - β' 型和

γ - β' 型等常见降木脂素, 在自然界中还存在一些结构较为特殊的降木脂素, 如 2 个苯丙素侧链存在 1 个以上的连接位置, 或者苯环被氧化成了内酯结构。常见的降木脂素类化合物的结构通式见图 1。

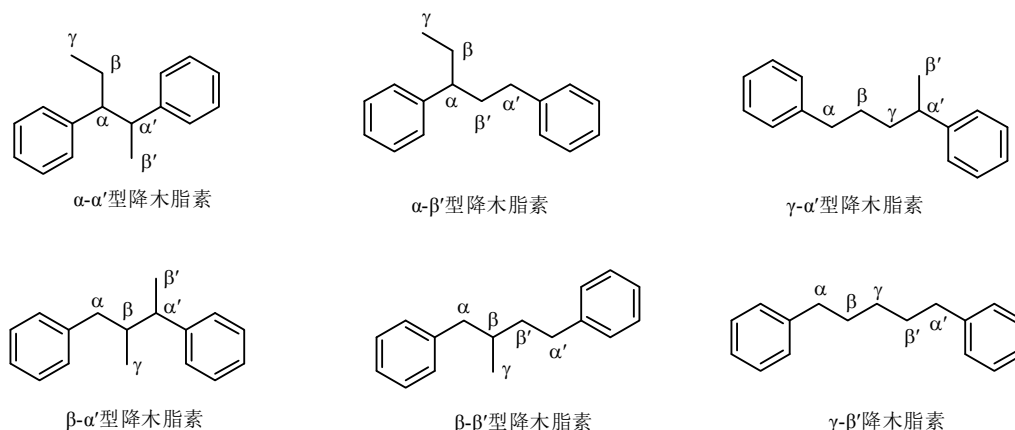


图 1 常见的降木脂素结构通式

Fig. 1 Common structural formulas of norlignans

1.1.1 α - α' 型降木脂素 α - α' 型降木脂素是指 1 个苯丙素单元侧链的 α 位与另一苯丙素单元侧链的 α' 位相连, 这种连接方式的降木脂素化合物数量较少, 且通常失去 1 个或 1 个以上的碳原子。Wu 等^[1]从叶下珠属植物青灰叶下珠 *Phyllanthus glaucus* Wall. 中分离了 2 对 α - α' 型降木脂素对映异构体, 分别是 (7R,8R)-4,4'-二羟基-3,7,3'-三甲氧基-8,1'-7',8',9'-三降-新木脂素-9-醇 [(7R,8R)-4,4'-dihydroxy-3,7,3'-trimethoxy-8,1'-7',8',9'-trinor-neolignan-9-ol, **1**] 和 (7S,8S)-4,4'-二羟基-3,7,3'-三甲氧基-8,1'-7',8',9'-三降-新木脂素-9-醇 [(7S,8S)-4,4'-dihydroxy-3,7,3'-trimethoxy-8,1'-7',8',9'-trinor-neolignan-9-ol, **2**], (7S,8R)-4,4'-二羟基-3,7,3'-三甲氧基-8,1'-7',8',9'-三降-新木脂素-9-醇 [(7S,8R)-4,4'-dihydroxy-3,7,3'-trimethoxy-8,1'-7',8',9'-trinor-neolignan-9-ol, **3**] 和 (7R,8S)-4,4'-二羟基-3,7,3'-三甲氧基-8,1'-7',8',9'-三降-新木脂素-9-醇 [(7R,8S)-4,4'-dihydroxy-3,7,3'-trimethoxy-8,1'-7',8',9'-trinor-neolignan-9-ol, **4**]。赵君等^[2]从复齿鼯鼠的粪便中分离了一个 α - α' 型降木脂素成分 3-羟基-(3-羟基苯基)-苯基丙醇 [3-hydroxy-(3-hydroxyphenyl)-benzene-propanol, **5**]。该类降木脂素的结构见图 2。

1.1.2 α - β' 型降木脂素 α - β' 型降木脂素是指 1 个苯丙素单元侧链的 α 位与另 1 个苯丙素单元侧链的 β' 位相连。该类降木脂素的结构和来源分别见表 1 和

图 2。

1.1.3 γ - α' 型降木脂素 γ - α' 型降木脂素是指 1 个苯丙素单元侧链的 γ 位与另 1 个苯丙素单元侧链的 α' 位相连。Wang 等^[16-17]从仙茅属植物绒叶仙茅 *Curculigo crassifolia* (Baker) Hook. f 和短葶仙茅 *C. breviscapa* S. C. Chen 的根茎中各分离了一个 γ - α' 型降木脂素, 分别是绒叶仙茅苷 C (crassifogenin C, **38**)、短葶仙茅苷 B (breviscaside B, **39**)。朱翠翠^[18]从仙茅属植物大叶仙茅 *C. capitulate* (Lour.) O. Ktze. 中分离了 1 个 γ - α' 型降木脂素成分, 绒叶仙茅苷 F (crassifoside F, **40**)。该类化合物的化学结构见图 3。

1.1.4 β - α' 型降木脂素 β - α' 型降木脂素是指 1 个苯丙素单元侧链的 β 位与另 1 个苯丙素单元侧链的 α' 位相连。Chen 等^[19]从雾水葛属植物多枝雾水葛 *Pouzolzia zeylanica* (L.) Benn. var. *microphylla* (Wedd.) W. T. Wang. 中分离了 5 个 β - α' 型降木脂素, 即雾水葛木脂素 (pouzolignan) F (**41**)、G (**42**)、H (**43**)、I (**44**)、J (**45**)。该类化合物化学结构见图 3。

1.1.5 β - β' 型降木脂素 β - β' 型降木脂素是指 1 个苯丙素单元侧链的 β 位与另 1 个苯丙素单元侧链的 β' 位相连, 该类化合物的化学结构及主要来源见表 2 和图 3。

1.1.6 γ - β' 型降木脂素 γ - β' 型降木脂素是指 1 个苯丙素单元侧链的 γ 位与另 1 个苯丙素单元侧链的 β' 位相连, 该类降木脂素的化学结构和主要来源见表 3 和图 4。

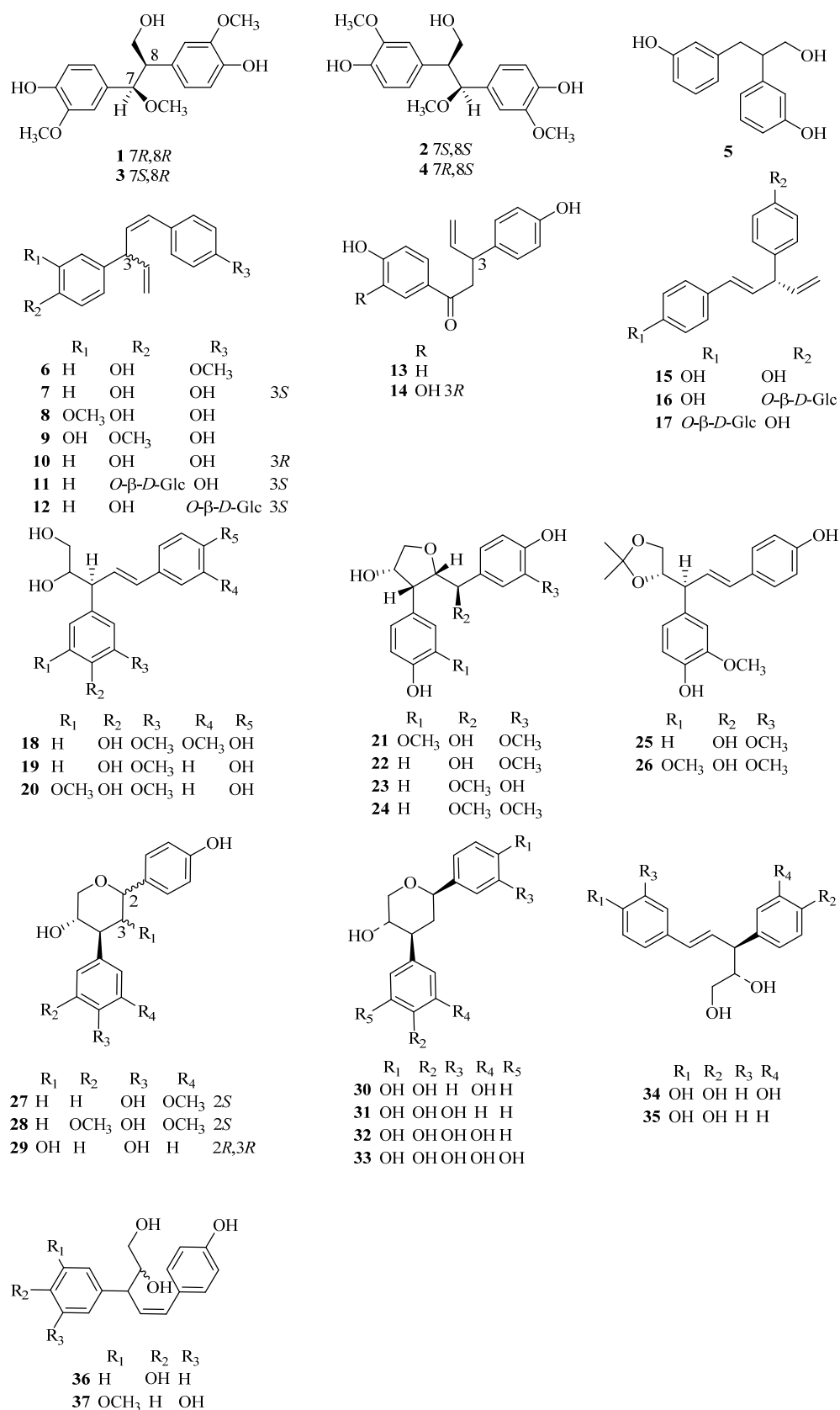
图 2 $\alpha\text{-}\alpha'$ 型与 $\alpha\text{-}\beta'$ 型降木脂素类化合物结构Fig. 2 Structures of $\alpha\text{-}\alpha'$ type and $\alpha\text{-}\beta'$ type norlignans

表 1 α - β '型降木脂素化合物名称和来源
Table 1 Name and origin of α - β ' type norlignans

序号	化合物名称	化合物来源			文献
		属	植物拉丁名	部位	
6	4'-O-甲基尼亚萨酚 (4'-O-methylnyasol)	知母属	<i>Anemarrhena asphodeloides</i>	根	3
7	尼亚萨酚 (nyasol)	知母属	<i>A. asphodeloides</i>	根	3
8	3''-甲氧基尼亚萨酚 (3''-methoxynyasol)	知母属	<i>A. asphodeloides</i>	根	3
9	3''-羟基-4''-甲氧基-4''-去羟基尼亚萨酚 (3''-hydroxy-4''-methoxy-4''-dehydroynyasol)	知母属	<i>A. asphodeloides</i>	根	3
10	顺式-扁柏脂酚 (cis-hinokiresinol)	知母属	<i>A. asphodeloides</i>	根	4
11	3S-4''-O- β -D-葡萄糖尼亚萨酚 (3S-4''-O- β -D-glucopyranosylnyasol)	三尖杉属	<i>Cephalotaxus oliveri</i>	树枝	5
12	3S-4'-O- β -D-葡萄糖尼亚萨酚 (3S-4'-O- β -D-glucopyranosylnyasol)	三尖杉属	<i>C. oliveri</i>	树枝	5
13	1,3-二-对羟基苯基-4-戊烯-1-酮 (1,3-di- <i>p</i> -hydroxyphenyl-4-penten-1-one)	知母属	<i>A. asphodeloides</i>	根	4
14	(R)-1-(3,4-二羟基苯基)-3-对羟基苯基-戊-4-烯-1-酮 [(R)-1-(3,4-dihydroxyphenyl)-3- <i>p</i> -hydroxyphenyl-pent-4-en-1-one]	菱属	<i>Trapa natans</i> L.	果皮	6
15	扁柏脂酚 (hinokiresinol)	扁柏属	<i>Chamaecyparis formosensis</i>	芯材	7
16	3S-4''-O- β -D-葡萄糖扁柏脂酚 (3S-4''-O- β -D-glucopyranosylhinokiresinol)	三尖杉属	<i>Cephalotaxus oliveri</i>	树枝	5
17	3S-4'-O- β -D-葡萄糖扁柏脂酚 (3S-4'-O- β -D-glucopyranosylhinokiresinol)	三尖杉属	<i>C. oliveri</i>	树枝	5
18	水杉灵素 D (metasequirin D)	水杉属	<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	茎、叶	8
19	北美红杉素 B (sequosempervirin B)	北美红杉属	<i>Sequoia sempervirens</i>	枝叶	9
20	北美红杉素 C (sequosempervirin C)	北美红杉属	<i>S. sempervirens</i>	枝叶	9
21	水杉灵素 E (metasequirin E)	水杉属	<i>M. glyptostroboides</i>	茎、叶	8
22	水杉灵素 F (metasequirin F)	水杉属	<i>M. glyptostroboides</i>	茎、叶	8
23	水杉灵素 G (metasequirin G)	水杉属	<i>M. glyptostroboides</i>	茎、叶	10
24	水杉灵素 H (metasequirin H)	水杉属	<i>M. glyptostroboides</i>	茎、叶	10
25	北美红杉素 D (sequosempervirin D)	北美红杉属	<i>S. sempervirens</i>	枝叶	9
26	北美红杉素 E (sequosempervirin E)	北美红杉属	<i>S. sempervirens</i>	枝叶	9
27	北美红杉素 F (sequosempervirin F)	北美红杉属	<i>S. sempervirens</i>	枝叶	9
28	北美红杉素 G (sequosempervirin G)	北美红杉属	<i>S. sempervirens</i>	枝叶	9
29	(2R,3R,4S,5S)-2,4-双-(4-羟基苯基)-3,5-二羟基-四氢呋喃 [(2R,3R,4S,5S)-2,4-bis(4-hydroxyphenyl)-3,5-dihydroxy-tetrahydropyran]	落羽杉属	<i>Taxodium ascendens</i>	枝叶	11
30	红杉素 B (sequirin B)	北美红杉属	<i>S. sempervirens</i>	枝叶	12
31	红杉素 E (sequirin E)	巨杉属	<i>Sequoiadendron giganteum</i>	芯材	13
32	红杉素 F (sequirin F)	巨杉属	<i>S. giganteum</i>	芯材	13
33	红杉素 G (sequirin G)	巨杉属	<i>S. giganteum</i>	芯材	13
34	红杉素 C (sequirin C)	北美红杉属	<i>S. sempervirens</i>	枝叶	12
35	agatharesinol	贝壳杉属	<i>Agathis australis</i>	芯材	14
36	iso-agatharesinol	天门冬属	<i>Asparagus gobicus</i>	根	15
37	天门冬素 A (gobicusin A)	天门冬属	<i>A. gobicus</i>	根	15

1.1.7 特殊降木脂素 除了常见的降木脂素外,自然界中还存在一些结构较为特殊的降木脂素, Li 等^[46]从胡椒属植物豆瓣绿 *Peperomia tetraphylla* (Forst. f.) Hook.中分离了 1 种 2 个苯丙素单元侧链

的 α 位和 β 位都进行连接形成 1 个环丁烷结构特殊降木脂素豆瓣绿素 (peperotetraphin, **94**)。Li 等^[47]从仙茅属植物大叶仙茅的根茎中分离了 3 个特殊降木脂素, 大叶仙茅内酯 (capitulactone) A (**95**)、

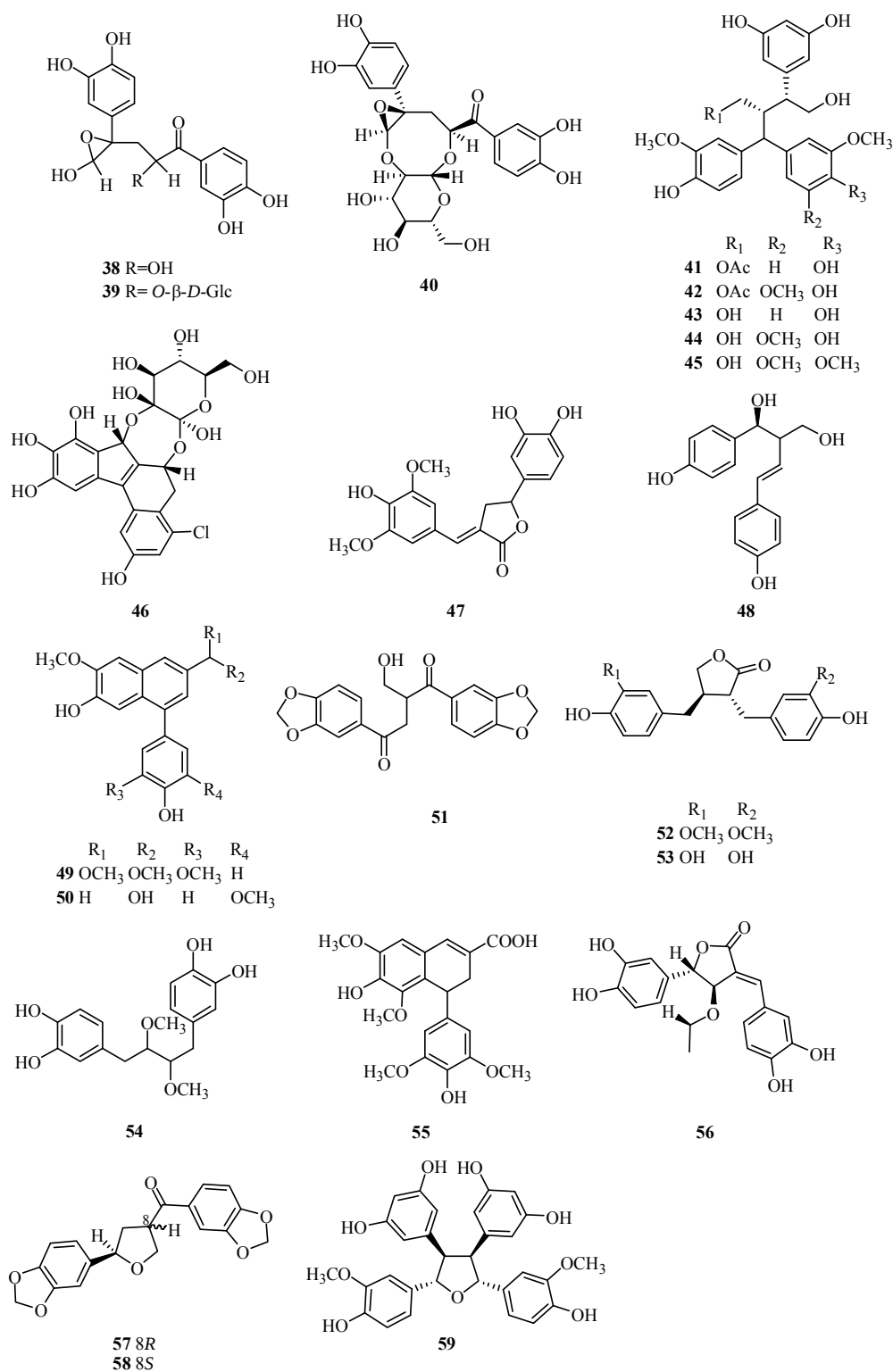


图 3 γ-α'-型、β-α'-型及 β-β'-型降木脂素类化合物结构

Fig. 3 Structures of γ-α', β-α', and β-β' type norlignans

B (96)、C (97)，其母核结构中的 1 个苯环被氧化成了七元内酯结构。特殊降木脂素化合物的结构见图 4。

1.2 降新木脂素

降新木脂素的连接方式为 1 个苯丙素单元的侧

链碳或苯环碳与另 1 个苯丙素单元的苯环碳通过 C-C 键或 C-O-C 键相连。以 C-C 键相连的降新木脂素又可再分为苯丙素单元的苯环与苯环相连，即 Ar（芳环）-Ar'-型降新木脂素；苯丙素单元的侧链与苯

表 2 β - β' 型降木脂素化合物名称和来源
Table 2 Name and origin of β - β' type norlignans

序号	化合物名称	化合物来源			文献
		属	植物拉丁名	部位	
46	绒叶仙茅苷 H (crassifoside H)	仙茅属	<i>Curculigo sinensis</i>	根茎	20
47	9'-降-3',4,4'-三羟基-3,5-二甲氧基木质素-7-烯-9,7'-内酯 (9'-nor-3',4,4'-trihydroxy-3,5-dimethoxylign-7-eno-9,7'-lactone)	夜香树属	<i>Cestrum parqui</i>	叶	21
48	yatersinol	扁柏属	<i>Chamaecyparis formosensis</i>	芯材	7
49	noralashinol A	丁香属	<i>Syringa pinnatifolia</i>	茎皮	22
50	noralashinol C	丁香属	<i>S. pinnatifolia</i>	茎皮	23
51	野靛棵素醇 (justiflorinol)	野靛棵属	<i>Justicia patentiflora</i>	茎、叶	24
52	(-)-arctigenin	接骨木属	<i>Sambucus williamsii</i>	茎、树枝	25
53	(-)-dihydroxyenterolactone	接骨木属	<i>S. williamsii</i>	茎、树枝	25
54	nordihydroguaiaretic acid	接骨木属	<i>S. williamsii</i>	茎、树枝	25
55	播娘蒿酸 (descuraic acid)	播娘蒿属	<i>Descurainia sophia</i>	种子	26
56	4-乙酰基-E-3-(3,4-二羟基亚苄基)-5-(3,4-二羟基苯基)呋喃-2-酮[4-ethyoyl-E-3-(3,4-dihydroxybenzylidene)-5-(3,4-dihydroxyphenyl)furan-2-one]	假芝属	<i>Amauroderma rude</i>	实体	27
57	hyperione A	金丝桃属	<i>Hypericum monogynum</i>	根	28
58	hyperione B	金丝桃属	<i>H. monogynum</i>	根	28
59	(2R,3S,4R,5S)-2,5-双-(4-羟基-3-甲氧基苯基)-3,4-双(3,5-二羟基苯基)四氢呋喃 [(2R,3S,4R,5S)-2,5-bis(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-3,4-bis(3,5-dihydroxybenzene)terahydrofuran]	雾水葛属	<i>Pouzolzia zeylanica</i> var. <i>microphylla</i>	地上部分	29

表 3 γ - β' 型降木脂素化合物名称和来源
Table 3 Name and origin of γ - β' type norlignans

序号	化合物名称	化合物来源			文献
		属	植物拉丁名	部位	
60	仙茅苷 (curculigenin)	仙茅属	<i>Curculigo capitulata</i>	根茎	30
61	仙茅素 (curculigine)	仙茅属	<i>C. capitulate</i>	根茎	31
62	1-O-甲基仙茅素 (1-O-methylcurculigine)	仙茅属	<i>C. capitulate</i>	根茎	30
63	绒叶仙茅苷 E (crassifoside E)	仙茅属	<i>C. crassifolia</i>	根茎	16
64	异仙茅苷 (isocurculigenin)	仙茅属	<i>C. capitulata</i>	根茎	30
65	异仙茅素 (isocurculigine)	仙茅属	<i>C. capitulate</i>	根茎	30
66	1-O-甲基异仙茅素 (1-O-methylisocurculigine)	仙茅属	<i>C. capitulate</i>	根茎	30
67	绒叶仙茅苷 G (crassifoside G)	仙茅属	<i>C. crassifolia</i>	根茎	32
68	(1R)-4-(3,4-二羟基苯基)-1-[(R)-(3,4-二羟基苯基)甲氧基甲基]-3-丁炔-1-基 [(1R)-4-(3,4-dihydroxyphenyl)-1-[(R)-(3,4-dihydroxyphenyl)methoxymethyl]-3-butyn-1-yl]	仙茅属	<i>C. capitulate</i>	根茎	33
69	(1R)-4-(3,4-二羟基苯基)-1-[(R)-(3,4-二羟基苯基)羟甲基]-3-丁炔-1-基 [(1R)-4-(3,4-dihydroxyphenyl)-1-[(R)-(3,4-dihydroxyphenyl)hydroxymethyl]-3-butyn-1-yl]	仙茅属	<i>C. capitulate</i>	根茎	33

续表 3

序号	化合物名称	化合物来源			文献
		属	植物拉丁名	部位	
70	(1R)-4-(3,4-二羟基苯基)-1-[(R)-(3,4-二羟基苯基)丁甲基]-3-丁炔-1-基 [(1R)-4-(3,4-dihydroxyphenyl)-1-[(R)-(3,4-dihydroxyphenyl)butylmethyl]- 3-butyn-1-yl]	仙茅属	<i>C. crassifolia</i>	根茎	33
71	(1S)-4-(3,4-二羟基苯基)-1-[(S)-(3,4-二羟基苯基)甲氧基甲基]-3-丁炔-1-基 [(1S)-4-(3,4-dihydroxyphenyl)-1-[(S)-(3,4-dihydroxyphenyl)methoxymethyl]- 3-butyn-1-yl]	仙茅属	<i>C. crassifolia</i>	根茎	34
72	(1S)-4-(3,4-二羟基苯基)-1-[(S)-(3,4-二羟基苯基)羟甲基]-3-丁炔-1-基 [(1S)-4-(3,4-dihydroxyphenyl)-1-[(S)-(3,4-dihydroxyphenyl)hydroxymethyl]- 3-butyn-1-yl]	仙茅属	<i>C. crassifolia</i>	根茎	35
73	(1S)-4-(3,4-二羟基苯基)-1-[(S)-(3,4-二羟基苯基)丁甲基]-3-丁炔-1-基 [(1S)-4-(3,4-dihydroxyphenyl)-1-[(S)-(3,4-dihydroxyphenyl)butylmethyl]-3- butyn-1-yl]	仙茅属	<i>C. capitulate</i>	根茎	33
74	(1R,2R)-绒叶仙茅素 D [(1R,2R)-crassifogenin D]	仙茅属	<i>C. crassifolia</i>	根茎	36
75	(1S,2R)-绒叶仙茅素 D [(1S,2R)-crassifogenin D]	仙茅属	<i>C. crassifolia</i>	根茎	36
76	(1R,2R)-1-O-甲基尼亚考昔 [(1R,2R)-1-O-methylnyasicoside]	仙茅属	<i>C. crassifolia</i>	根茎	36
77	(1S,2R)-1-O-甲基尼亚考昔 [(1S,2R)-1-O-methylnyasicoside]	仙茅属	<i>C. crassifolia</i>	根茎	36
78	尼亚考昔 (nyasicoside)	仙茅属	<i>C. capitulate</i>	根茎	37
79	curcapicycloside	仙茅属	<i>C. capitulate</i>	根茎	37
80	capituloside	仙茅属	<i>C. capitulate</i>	根茎	30
81	pilosidine	仙茅属	<i>C. breviscapa</i>	根茎	38
82	orchioside B	仙茅属	<i>C. orchioideis</i>	根茎	39
83	绒叶仙茅苷 I (crassifoside I)	仙茅属	<i>C. capitulate</i>	根茎	40
84	绒叶仙茅苷 A (crassifoside A)	仙茅属	<i>C. crassifolia</i>	根茎	35
85	绒叶仙茅苷 crassifoside D	仙茅属	<i>C. crassifolia</i>	根茎	41
86	非洲马铃薯酚 (rooperol)	小金梅草属	<i>Hypoxis hemerocallidea</i>	球茎	42
87	hypoxoside	小金梅草属	<i>H. hemerocallidea</i>	球茎	43
88	(1R,2R)-orchioside D	仙茅属	<i>C. crassifolia</i>	根茎	35
89	(1S,2R)-orchioside D	仙茅属	<i>C. orchioideis</i>	根茎	44
90	中华仙茅素 B (sinensigenin B)	仙茅属	<i>C. sinensis</i>	根茎	45
91	短葶仙茅素 C (breviscapin C)	仙茅属	<i>C. breviscapa</i>	根茎	38
92	中华仙茅素 A (sinensigenin A)	仙茅属	<i>C. sinensis</i>	根茎	45
93	中华仙茅素 C (sinensigenin C)	仙茅属	<i>C. capitulate</i>	根茎	18

环相连,即 Ar-R-Ar'型降新木脂素。以 C-O-C 键相连的降新木脂素又可再分为苯丙素单元的苯环与苯环通过醚键相连,即 Ar-O-Ar'型降新木脂素;苯丙素单元的侧链与苯环通过醚键相连,即 Ar-R-O-Ar'型降新木脂素。其中 Ar-O-Ar'型降新木脂素在自然界中还有待被发现。

1.2.1 C-C 键相连的降新木脂素

(1) Ar-Ar'型降新木脂素: Zhu 等^[48]从活血丹属植物活血丹 *Glechoma longituba* (Nakai) Kupr.中分离了 2 个 Ar-Ar'型降新木脂素活血丹酚 (glechomol) A (98) 和 B (99)。Ar-Ar'型降新木脂素化合物结构见图 5。

(2) Ar-R-Ar'型降新木脂素: Ar-R-Ar'型降新木脂素主要代表化合物的结构和来源见图 5 和表 4。

1.2.2 C-O-C 键相连的降新木脂素 Lu 等^[56]从菖蒲属植物石菖蒲 *Acorus tatarinowii* Schott 的根茎中分离了 3 个 Ar-R-O-Ar'型降新木脂素,石菖蒲木脂素 (acortatarinowin) A (111)、B (112) 和 C (113)。Li 等^[57]从山楂属植物山里红 *Crataegus pinnatifida* Bge. var. *major* N. E. Brown 的种子中分离 1 个 Ar-R-O-Ar'型降新木脂素, (7S,8S)-4-[2-羟基-2-(4-羟基-3-甲氧基苯基)-1-(羟甲基)乙氧基]-3,5-二甲氧基-苯甲醛 [(7S,8S)-4-[2-hydroxy-2-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-1-(hydroxymethyl)ethoxy]-3,5-dimethoxy-

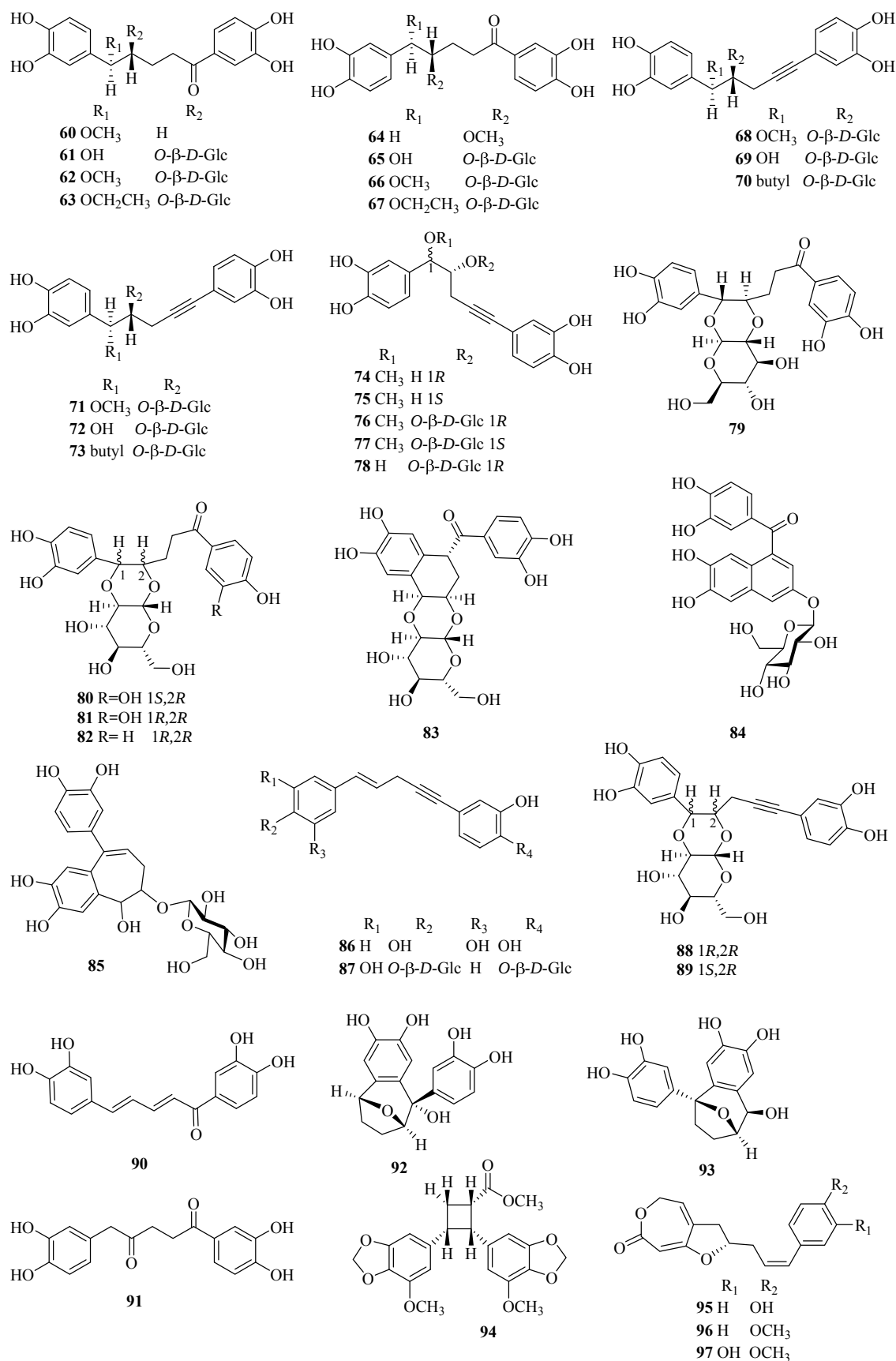


图 4 γ - β' 型降木脂素及特殊降木脂素类化合物结构
Fig. 4 Structures of γ - β' type lignans and special norlignans

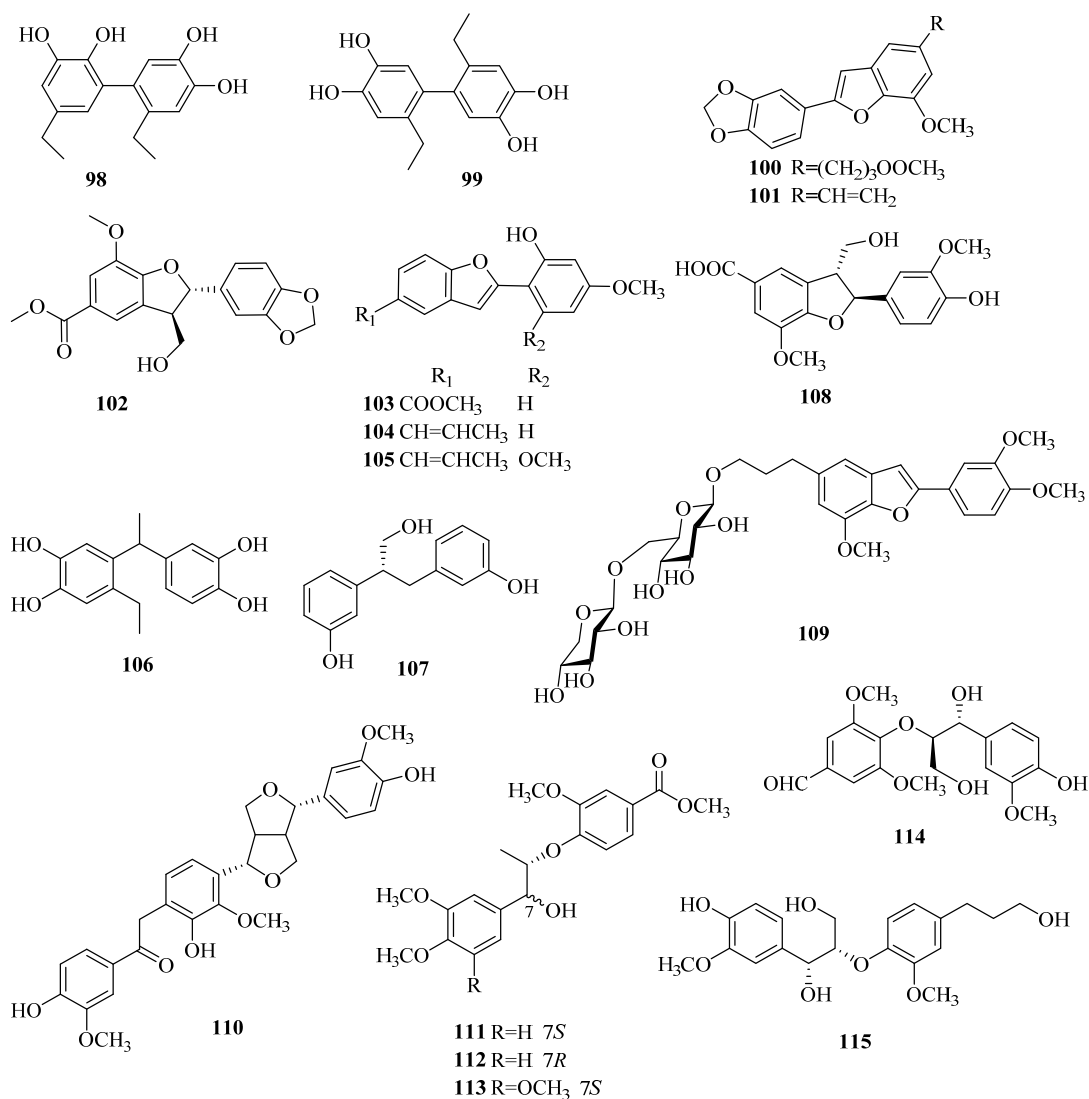


图 5 降新木脂素类化合物结构

Fig. 5 Structures of norneolignans

benzaldehyde, **114**]. Xiao 等^[25]从接骨木属植物接骨木 *Sambucus williamsii* Hance 的茎中分离了 1 个 Ar-R-O-Ar'型降新木脂素 (7R,8S)-1-(4-羟基-3-甲氧基苯基)-2-[4-(3-羟丙基)-2-甲氧基苯氧基]-1,3-丙二醇 [(7R,8S)-1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-2-[4-(3-hydroxypropyl)-2-methoxyphenoxy]-1,3-propanediol, **115**]. 化合物的结构见图 5。

2 降木脂素的生物合成途径

降木脂素除了可以通过莽草酸途径天然合成以外^[58], 还可通过酶催化生成, 如(Z)-扁柏脂酚 [(Z)-hinokiresinol]^[59]和大叶仙茅内酯 A、B、C^[47]。具体生物合成途径见图 6、7。

3 降木脂素的药理作用

降木脂素作为一种生物活性广泛且显著的物

质, 其主要的生物活性有细胞毒活性、抗过敏、心血管作用、抗氧化、抗炎和激素样作用等。

3.1 细胞毒活性

Dong 等^[8]通过 MTT 试验发现从水杉中分离出来的降木脂素类化合物水杉灵素 D~F (**18**、**21**、**22**)对 5 种人体肿瘤细胞(HL-60、SMMC-7721、A549、MCF-7 和 SW480)具有细胞毒性。Yang 等^[15]发现从戈壁天门冬中分离的尼亚萨酚(**7**)在体外显示出很强的抗人卵巢癌细胞 HO-8910 和人肝癌细胞 Bel-7402 活性, 其最大半数抑制浓度(IC₅₀)分别为 30.6 和 29.4 μmol/L。Li 等^[46]发现从豆瓣绿中分离的豆瓣绿素(**94**)能使 Bcl-2 相关的 X 蛋白(Bcl-2 associated X protein, Bax)和半胱氨酸蛋白酶-3(Caspase-3)表达上调, 使 B 淋巴细胞瘤-2 基因

表 4 Ar-R-Ar'型降新木脂素化合物名称和来源
Table 4 Names and origin of AR-R- AR' type norneolignans

序号	化合物名称	化合物来源			文献
		属	植(动)物拉丁名	部位	
100	9'-乙酰氧基-3'-甲氧基-3,4-亚甲二氧基-4',7-环氧-9-降-8,5'-新木脂素 (9'-acetoxoy-3'-methoxy-3,4-methylenedioxy-4',7-epoxy-9-nor-8,5'-neolignan)	甘蜜树属	<i>Nectandra lineata</i>	叶	49
101	7,8'-二烯-3'-甲氧基-3,4-亚甲基二氧基-4'-7-环氧-9-降-8,5'-新木脂素 (7,8'-diene-3'-methoxy-3,4-methylenedioxy-4'-7-epoxy-9-nor-8,5'-neolignan)	甘蜜树属	<i>N. lineata</i>	叶	49
102	toonin C	香椿属	<i>Toona sinensis</i>	根	50
103	krametosan	刺球果属	<i>Kranzeria tornentosa</i>	根	51
104	ratanhiaphenol I	刺球果属	<i>K. tornentosa</i>	根	51
105	2-(2'-羟基-4',6'-二甲氧基苯基)-5-(E)-丙烯基苯并呋喃 [2-(2'-hydroxy-4',6'-dimethoxyphenyl)-5-(E)-propenylbenzofura]	刺球果属	<i>K. tornentosa</i>	根	51
106	活血丹酚 C (glechomol C)	活血丹属	<i>Glechoma longituba</i>	整株	48
107	(R)-3,3'-(3-羟基丙烷-1,2-二基)二酚 [(R)-3,3'-(3hydroxypropane-1,2-diyl)diphenol]	复齿鼯鼠属	<i>Trogopterus xanthipes</i>	粪便	52
108	肥牛木素 (ceplignan)	肥牛木属	<i>Cephalom appasinensis</i>	枝条	53
109	野茉莉木脂内酯 A (styraxlignolide A)	安息香属	<i>Styrax japonica</i>	茎	54
110	波棱酮 (herpetone)	波棱瓜属	<i>Herpetospermum pedunculosum</i>	种子	55

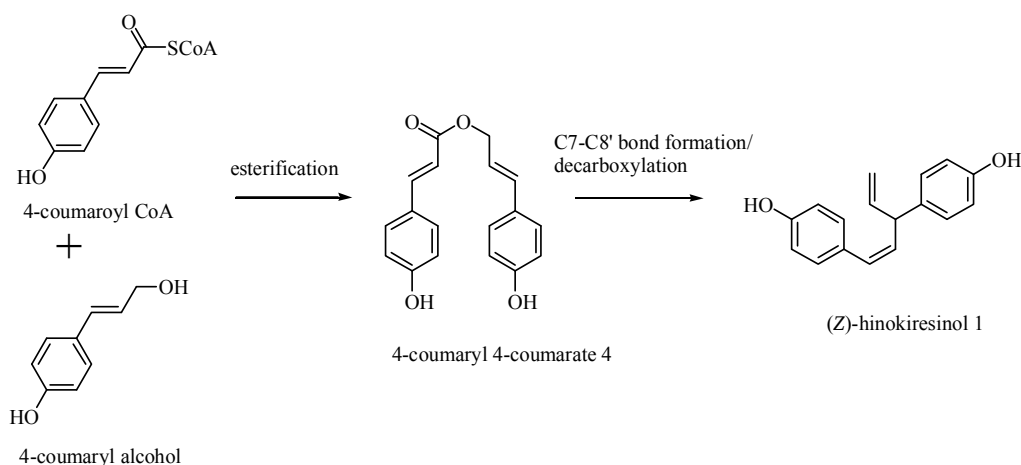


图 6 (Z)-扁柏脂酚生物合成途径^[59]

Fig. 6 Biosynthesis pathway of (Z)-hinokiresinol

(B-cell lymphoma-2, Bcl-2) 表达下调, 从而促进人前列腺癌 PC-3 细胞凋亡, 并且能够使细胞阻滞于 G₁ 期, 从而抑制肿瘤细胞增殖, 发挥抗肿瘤作用。Susplugas 等^[24]发现从爵床科棱茎野靛棵中分离的降木脂素类化合物野靛棵素醇 (51) 对人口腔表皮样癌 KB 细胞、人结肠癌 HCT116 细胞和人乳腺癌 MCF-7 细胞具有体外细胞毒活性并且能将细胞周期阻滞在 G₀/G₁ 期, 从而发挥抗肿瘤作用。

3.2 抗过敏作用

Bak 等^[3]发现从知母中分离的 4 种降木脂素 4'-O-甲基尼亚萨酚 (6)、尼亚萨酚 (7)、3''-甲氧基尼亚萨酚 (8)、3''-羟基-4''-甲氧基-4''-去羟基尼亚萨酚 (9) 能有效抑制 β-氨基己糖苷酶从免疫球蛋白 E/二硝基苯酚-牛血清白蛋白和佛波醇-12-十四酸酯-13-乙酸酯共同处理的大鼠原代肥大细胞中的释放。其中化合物 9 的作用最强, 其 IC₅₀ 值为 2.85 μmol/L。Jeong 等^[4]发现从知母中分离的降木脂素顺

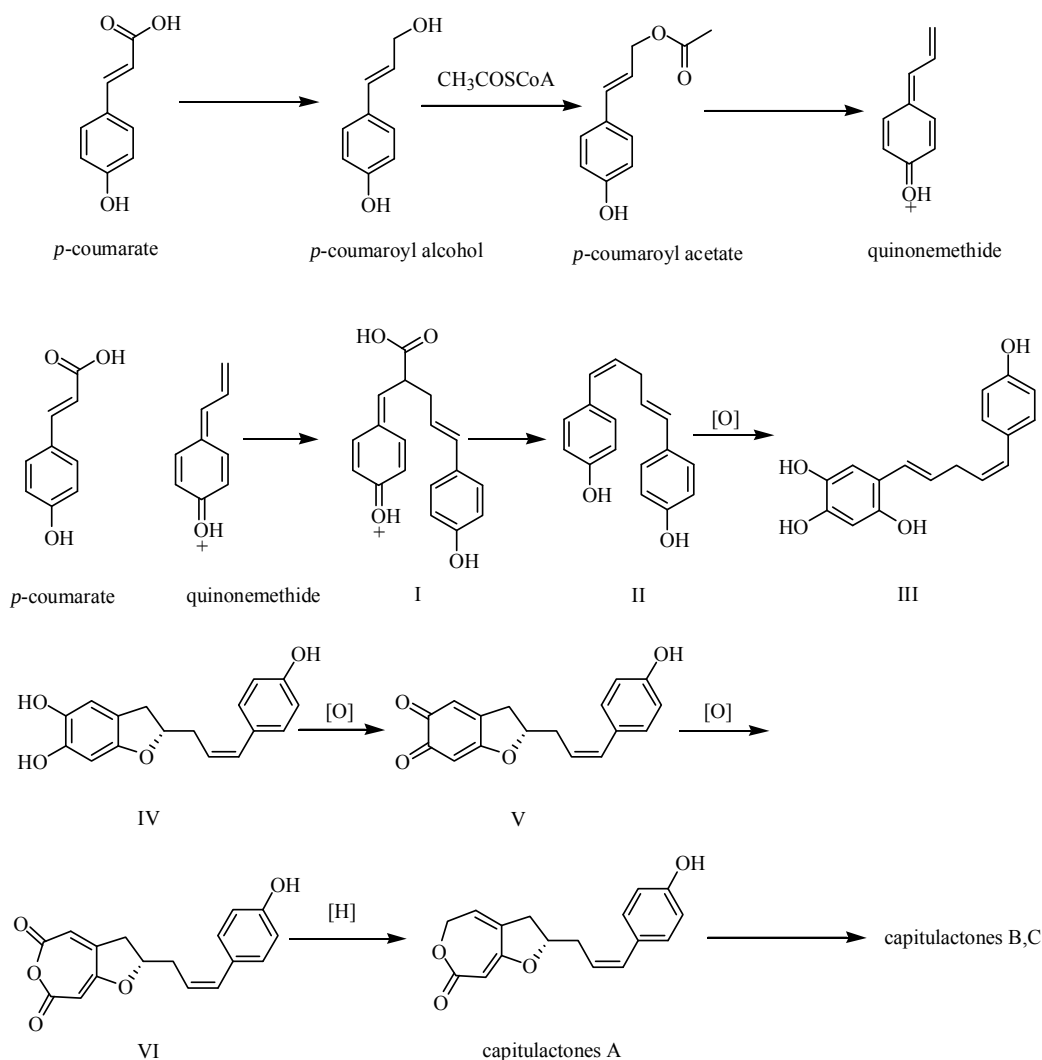


图 7 大叶仙茅内酯 A~C 生物合成途径

Fig. 7 Biosynthesis pathway of capitulactone A—C

式-扁柏脂酚 (10)、1,3-二对羟基苯基-4-戊烯-1-酮 (13) 具有透明质酸酶抑制活性, 其 IC_{50} 值分别为 2.06、1.89 mmol/L, 实验所用阳性对照药的 IC_{50} 值为 1.78 mmol/L, 说明化合物 10、13 具有开发成为抗过敏药物的潜力。

3.3 心血管作用

Chang 等^[37]发现从大叶仙茅中分离的的降木脂素糖苷尼亚考苷 (78) 具有显著的抗哇巴因诱发的心律失常的活性。Chen 等^[19]通过 MTT 试验发现从多枝雾水葛中分离的降木脂素雾水葛木脂素 F~J (41~45) 对脂多糖诱导的小鼠腹膜巨噬细胞中一氧化氮 (NO) 的产生具有抑制活性。Jeong 等^[60]通过 MTT 实验发现从知母中分离的顺式-扁柏脂酚 (10) 体内外能通过抑制碱性成纤维细胞生长因子 (basic fibroblast growth factor, bFGF) 或血管内皮生长因

子 (vascular endothelial growth factor, VEGF) 诱导的内皮细胞增殖, 从而抑制血管生成。Zhu 等^[48]发现从活血丹中分离的降木脂素活血丹酚 A~C (98、99、106) 对 H_2O_2 诱导的心肌细胞损伤有显著的保护作用。

3.4 抗氧化作用

Wu 等^[1]发现从青灰叶下珠中分离的 (7S,8S)-4,4'-二羟基-3,7,3'-三甲氧基-8,1'-7',8',9'-三降-新木脂素-9-醇 (2) 具有潜在的自由基清除活性, 其 IC_{50} 值为 $(5.987 \pm 1.212) \mu\text{g/mL}$ 。Kabanda 等^[42]通过密度泛函理论发现非洲马铃薯酚 (86) 能够清除自由基, 抑制脂质过氧化, 并减少过渡金属离子通过 Cu (I 和 II) 螯合能力和氢转移而发挥抗氧化作用。Nair 等^[61]发现非洲马铃薯中的低氧化组分能在体内转化为非洲马铃薯酚, 它能够降低大鼠肝匀

浆中喹啉酸诱导的脂质过氧化作用, 并且在 30 $\mu\text{g/mL}$ 剂量下清除超氧阴离子, 从而显示出自由基清除活性, 发挥抗氧化作用。Wang 等^[16]发现从绒叶仙茅中提取的降木脂素绒叶仙茅苷元 C (38) 显示出了很强的自由基清除活性。

3.5 抗炎作用

Lee 等^[62]发现从知母中分离的(-)-尼亚萨酚(7)在脂多糖激活的 BV-2 小胶质细胞中显示出抗炎作用。(-)-尼亚萨酚能诱导一氧化氮合酶和环氧合酶-2 的表达, 从而抑制 NO 和前列腺素 E_2 的生成。(-)-尼亚萨酚还能抑制活化的小胶质细胞中肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor- α , TNF- α) 和白细胞介素-1 β (interleukin-1 β , IL-1 β) mRNA 的表达水平。(-)-尼亚萨酚可以使 p38 丝裂原活化蛋白激酶 (mitogen-activated protein kinase, p38 MAPK) 失活并抑制脂多糖诱导的核因子- κB 抑制蛋白 α (inhibitor of nuclear factor- κB , I- $\kappa\text{B}\alpha$) 降解, 从而达到抑制神经炎症的作用。

3.6 激素样作用

Xiao 等^[25]发现从接骨木中分离的(7R,8S)-1-(4-羟基-3-甲氧基苯基)-2-[4-(3-羟丙基)-2-甲氧基苯氧基]-1,3-丙二醇 (115) 能诱导核转录因子 Runx2、碱性磷酸酶 (alkaline phosphatase, ALP) 和骨钙素 mRNA 的表达, 促进成骨细胞 MC3T3-E1 和 UMR 106 的增殖, 并且能够调节不同阶段的成骨细胞分化; 还能通过配体非依赖性, 独立的雌激素反应元件 (estrogen response element, ERE) 和丝裂原活化蛋白 (mitogen-activated protein, MAP) 激酶介导的快速非基因组在成骨样细胞雌激素受体 (estrogen receptor, ER) 信号通路中发挥类似雌激素的作用。

3.7 其他作用

Nair 等^[43]发现从非洲马铃薯中分离的 hypoxis (87) 能在体外诱导与药物代谢相关的运输蛋白和 P 糖蛋白, 并且抑制由细胞色素 P450 介导的药物标志物底物的分解。Huang 等^[6]发现从菱角中分离的降木脂素(R)-1-(3,4-二羟基苯基)-3-对羟基苯基-戊-4-烯-1-酮 (14) 能增强骨骼肌细胞 C2C12 肌管对 2-去氧葡萄糖的摄取作用。Min 等^[54]发现从野茉莉中分离的降木脂素野茉莉木脂内酯 A (109) 具有抗补体活性, 其 IC_{50} 为 123.65 $\mu\text{mol/L}$ 。

4 结语

降木脂素类化合物在自然界中分布广泛, 生物活性多样, 是一种重要的天然化合物。近年来, 天

然来源的降木脂素化合物的结构及其活性研究发展迅速, 备受关注。其具有的抗肿瘤、抗过敏、抗炎、抗氧化和抗 HIV 作用及激素样作用使得降木脂素类化合物存在较大的药物开发研究价值。随着人们对天然植物、海洋生物及微生物的进一步探索, 更多天然来源的降木脂素类化合物有待被发现。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Wu Z D, Lai Y J, Zhou L, et al. Enantiomeric lignans and neolignans from *Phyllanthus glaucus*: Enantioseparation and their absolute configurations [J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 24809.
- [2] 赵君, 戴丽香, 雷婷, 等. 中药五灵脂的化学成分研究 [J]. *天然产物研究与开发*, 2010, 22(4): 541-543.
- [3] Bak J P, Cho Y M, Kim I, et al. Inhibitory effects of norlignans isolated from *Anemarrhena asphodeloides* on degranulation of rat basophilic leukemia-2H3 cells [J]. *Biomed Pharm*, 2016, 84: 1061-1066.
- [4] Jeong S J, Ahn N H, Kim Y C, et al. Norlignans with hyaluronidase inhibitory activity from *Anemarrhena asphodeloides* [J]. *Planta Med*, 1999, 65(4): 367-368.
- [5] Meng F C, Liu H, Huang X J, et al. Four new norlignan glycoside isomers from the twigs of *Cephalotaxus oliveri* Mast [J]. *Tetrahed: Asymm*, 2017, 28(12): 1686-1689.
- [6] Huang H C, Chao C L, Liaw C C, et al. Hypoglycemic constituents isolated from *Trapa natans* L. Pericarps [J]. *J Agric Food Chem*, 2016, 64(19): 3794-3803.
- [7] Chen T H, Liao B C, Wang S Y, et al. Isolation and cytotoxicity of the lignanoids from *Chamaecyparis formosensis* [J]. *Planta Med*, 2008, 74(15): 1806-1811.
- [8] Dong L B, He J, Wang Y Y, et al. Terpenoids and norlignans from *Metasequoia glyptostroboides* [J]. *J Nat Prod*, 2011, 74(2): 234-239.
- [9] Zhang Y M, Tan N H, Yang Y B, et al. Norlignans from *Sequoia sempervirens* [J]. *Chem Biodivers*, 2005, 2(4): 497-505.
- [10] 曾琦. 三种药用植物的化学成分研究及活性筛选 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [11] Zhang Y M, Tan N H, Zeng G Z, et al. A new norlignan from *Taxodium ascendens* [J]. *Fitoterapia*, 2009, 80(6): 361-363.
- [12] Hatam N, Whiting D A. Constituents of californian redwood the structures of sequirin B and C [J]. *Tetrahedron Lett*, 1967, 8(9): 781-785.
- [13] Henley-Smith P, Whiting D A. New norlignans of *Sequoiadendron gigantea*; phytochemical comparison

- with *Sequoia sempervirens* [J]. *Phytochemistry*, 1976, 15(8): 1285-1287.
- [14] Enzell C R, Thomas B R. Ozonolysis and perphthalic acid oxidation of the C(7): C(8) double bond in some isopimarane derivatives [J]. *Tetrahedron Lett*, 1965, 6(4): 225-232.
- [15] Yang C X, Huang S S, Yang X P, *et al.* Nor-lignans and Steroidal Saponins from *Asparagus gobicus* [J]. *Planta Med*, 2004, 70(5): 446-451.
- [16] Wang K J, Li N. Norlignan derivatives from *Curculigo crassifolia* and their DPPH radical scavenging activity [J]. *Arch Pharm Res*, 2008, 31(10): 1313-1316.
- [17] Wang K J, Zhu C C, Di L, *et al.* New norlignan derivatives from *Curculigo capitulata* [J]. *Fitoterapia*, 2010, 81(7): 869-872.
- [18] 朱翠翠. 三种仙茅属植物化学成分的研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2010.
- [19] Chen Z H, Zhang H, Tao S H, *et al.* Norlignans from *Pouzolzia zeylanica* var. *microphylla* and their nitric oxide inhibitory activity [J]. *J Asian Nat Prod Res*, 2015, 17(10): 1-8.
- [20] Li N, Wang T M, Wang K J, *et al.* Norlignans from rhizomes of *Curculigo sinensis* [J]. *Helv Chim Acta*, 2010, 93(4): 724-728.
- [21] D'abrosca B, Dellagrecia M, Fiorentino A, *et al.* Isolation and characterization of new lignans from the leaves of *Cestrum parqui* [J]. *Nat Prod Res*, 2006, 20(3): 293-298.
- [22] Su G Z, Bai R F, Yu X L, *et al.* Noralashinol A, a new norlignan from stem barks of *Syringa pinnatifolia* [J]. *Nat Prod Res*, 2016, 30(19): 2149-2153.
- [23] Zhang R F, Feng X, Su G Z, *et al.* Noralashinol B, a norlignan with cytotoxicity from stem barks of *Syringa pinnatifolia* [J]. *J Asian Nat Prod Res*, 2017, 19(4): 416-422.
- [24] Susplugas S, Hung N V, Bignon J, *et al.* Cytotoxic aryl-naphthalene lignans from a Vietnamese Acanthaceae, *Justicia patentiflora* [J]. *J Nat Prod*, 2005, 68(5): 734-738.
- [25] Xiao H H, Gao Q G, Ho M X, *et al.* An 8-O-4' norlignan exerts oestrogen-like actions in osteoblastic cells via rapid nongenomic ER signaling pathway [J]. *J Ethnopharmacol*, 2015, 170: 39-49.
- [26] Sun K, Li X, Li W, *et al.* A new nor-lignan from the seeds of *Descurainia sophia* [J]. *Nat Prod Res*, 2006, 20(6): 519-522.
- [27] 马祖红, 杨桥芬, 胡秋月, 等. 皱盖假芝子实体中 1 个新的降木脂素类化合物 [J]. *中草药*, 2019, 50(2): 315-317.
- [28] 王玮. 金丝桃化学成分的研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2010.
- [29] 莫楚铭, 陈先枚, 郭丽冰, 等. 多枝雾水葛化学成分研究 [J]. *中草药*, 2019, 50(6): 1294-1298.
- [30] Li N, Chen J J, Zhao Y X, *et al.* Three new norlignans from *Curculigo capitulata* [J]. *J Asian Nat Prod Res*, 2005, 7(3): 189-195.
- [31] Chifundera K, Palazzino G, Messina I, *et al.* Norlignan glucosides from *Curculigo recurvata* [J]. *Phytochemistry*, 1994, 35(5): 1343-1348.
- [32] Wang K J, Li N. Antioxidant phenolic compounds from rhizomes of *Curculigo crassifolia* [J]. *Arch Pharm Res*, 2007, 30(1): 8-12.
- [33] Chang W L, Lee S S. Norneolignan and phenols from *Curculigo capitulata* [J]. *Phytochemistry*, 1998, 49(7): 2133-2136.
- [34] Li N, Li S P, Wang K J, *et al.* Novel norlignan glucosides from rhizomes of *Curculigo sinensis* [J]. *Carbohydr Res*, 2012, 351: 64-67.
- [35] Li N, Chen J J, Zhou J. Four new phenolic compounds from *Curculigo crassifolia* (Hypoxidaceae) [J]. *Helv Chim Acta*, 2004, 87(4): 845-850.
- [36] Wang K J, Li N, Wang H. New acetylenic norlignan compounds from rhizomes of *Curculigo crassifolia* [J]. *Molecules*, 2008, 13(8): 1696-1701.
- [37] Chang W L, Chen C H, Lee S S. Three novel constituents from *Curculigo capitulata* and revision of C-2 stereochemistry in nyasicoside [J]. *J Nat Prod*, 1999, 62(5): 734-739.
- [38] Li N, Zhu C C, Xiao H M, *et al.* Norlignan derivatives from *Curculigo breviscapa* [J]. *Fitoterapia*, 2010, 81(6): 528-531.
- [39] Gupta M, Achari B, Pal B C. Glucosides from *Curculigo orchoides* [J]. *Phytochemistry*, 2005, 66(6): 659-663.
- [40] Li N, Tan N H, Zhou J. New chlorine-containing phenoloid from *Curculigo capitulata* [J]. *J Asian Nat Prod Res*, 2004, 6(1): 7-10.
- [41] Li N, Chen J J, Zhou J. Two new phenolic glycosides from rhizomes of *Curculigo crassifolia* [J]. *Zeitschrift Naturforschung B*, 2006, 61(5): 611-614.
- [42] Kabanda M M. Antioxidant activity of rooperol investigated through Cu (I and II) chelation ability and the hydrogen transfer mechanism: A DFT study [J]. *Chem Res Toxicol*, 2012, 25(10): 2153-2166.
- [43] Nair V D P, Foster B C, Thor Arnason J, *et al.* In vitro evaluation of human cytochrome P450 and P-glycoprotein-mediated metabolism of some phytochemicals in extracts and formulations of African

- potato [J]. *Phytomedicine*, 2007, 14(7/8):498-507.
- [44] Dall'Acqua S, Shrestha B B, Comai S, *et al.* Two phenolic glycosides from *Curculigo orchoides* Gaertn [J]. *Fitoterapia*, 2009, 80(5): 279-282.
- [45] 汪天明. 中华仙茅的化学成分研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2010.
- [46] Li Y Z, He N, Zhai C W. Peperotetraphin inhibits the proliferation of human prostate cancer cells via induction of cell cycle arrest and apoptosis [J]. *Med Oncol*, 2015, 32(2): 22.
- [47] Li S, Yu J H, Fan Y Y, *et al.* Structural elucidation and total synthesis of three 9-norlignans from *Curculigo capitulata* [J]. *J Org Chem*, 2019, 84(9): 5195-5202.
- [48] Zhu Q F, Wang Y Y, Jiang W, *et al.* Three new norlignans from *Glechoma longituba* [J]. *J Asian Nat Prod Res*, 2013, 15(3): 258-264.
- [49] Chérigo L, Polanco V, Ortega-Barria E, *et al.* Antitrypanosomal activity of a novel norlignan purified from *Nectandra lineata* [J]. *Nat Prod Res*, 2005, 19(4): 373-377.
- [50] Dong X J, Zhu Y F, Bao G H, *et al.* New limonoids and a dihydrobenzofuran norlignan from the roots of *Toona sinensis* [J]. *Molecules*, 2013, 18(3): 2840-2850.
- [51] Silva S A, de Castro J C, da Silva T G, *et al.* Krametosan, a new trinorlignan from the roots of *Krameria tomentosa* [J]. *Nat Prod Lett*, 2001, 15(5): 323-329.
- [52] Baek S, Xia X, Min B S, *et al.* Trogopterins A–C: Three new neolignans from feces of *Trogopterus xanthipes* [J]. *Beilstein J Org Chem*, 2014, 10: 2955-2962.
- [53] 梅文莉, 戴好富, 吴大刚. 肥牛木中一个新的降新木脂素 [J]. 高等学校化学学报, 2006, 27(8): 1480-1481.
- [54] Min B S, Oh S R, Ahn K S, *et al.* Anti-complement activity of norlignans and terpenes from the stem bark of *Styrax japonica* [J]. *Planta Med*, 2004, 70(12): 1210-1215.
- [55] 张梅, 董小萍, 邓赞, 等. 藏药波棱瓜子中一个新的倍半降木脂素 [J]. 药学学报, 2006, 41(7): 659-661.
- [56] Lu Y Y, Xue Y B, Liu J J, *et al.* (±)-acortatarinowins A-F, norlignan, neolignan, and lignan enantiomers from *Acorus tatarinowii* [J]. *J Nat Prod*, 2015, 78(9): 2205-2214.
- [57] Li L Z, Peng Y, Niu C, *et al.* Isolation of cytotoxic compounds from the seeds of *Crataegus pinnatifida* [J]. *Chin J Nat Med*, 2014, 11(4): 411-414.
- [58] Eklund P, Raitanen J E. 9-norlignans: Occurrence, properties and their semisynthetic preparation from hydroxymatairesinol [J]. *Molecules*, 2019, 24(2): E220.
- [59] Suzuki S, Nakatsubo T, Umezawa T, *et al.* First *in vitro* norlignan formation with *Asparagus officinalis* enzyme preparation [J]. *Chem Commun*, 2002(10): 1088-1089.
- [60] Jeong S J, Higuchi R, Ono M, *et al.* Cis-hinokiresinol, a norlignan from *Anemarrhena asphodeloides*, inhibits angiogenic response *in vitro* and *in vivo* [J]. *Biol Pharm Bull*, 2003, 26(12): 1721-1724.
- [61] Nair V D, Dairam A, Agbonon A, *et al.* Investigation of the antioxidant activity of African potato (*Hypoxis hemerocallidea*) [J]. *J Agric Food Chem*, 2007, 55(5): 1707-1711.
- [62] Lee H J, Li H, Chang H R, *et al.* (–)-Nyasol, isolated from *Anemarrhena asphodeloides* suppresses neuroinflammatory response through the inhibition of I-κBα degradation in LPS-stimulated BV-2 microglial cells [J]. *J Enzym Inhib Med Chem*, 2013, 28(5): 954-959.

[责任编辑 潘明佳]

更正

钟文蔚, 纪超, 郭立玮, 李博, 徐雪松. 基于数据科学的中药膜过程研究的思考与实践 [J]. 中草药, 2020, 51(1): 1-8. 由于作者的工作疏忽, 在论文撰写、修改、发表过程中忘记对该论文的图 1~4、表 1、表 2 标注引用文献。现经作者申请, 作者单位同意, 对该论文的图 1~4、表 1、表 2 加注文献出处且均来自于原文中, 分别为图 1^[4]、图 2^[30]、图 3^[31]、图 4^[32]、表 1^[31]、表 2^[33]。

特此更正

《中草药》杂志编辑部