

## • 化学成分 •

## 黄芪茎叶中 2 个新的降环阿尔廷烷型三萜类化合物

程艳刚, 郝祥榕, 赵俪瑾, 李 佩, 赵佳欣, 张 翼, 王颖莉\*, 谭金燕\*

山西中医药大学中药与食品工程学院, 山西 晋中 030619

**摘要:** 目的 研究黄芪 *Astragalus membranaceus* 茎叶中降环阿尔廷烷型三萜类化学成分。方法 综合运用硅胶、ODS 等柱色谱及高效液相色谱技术进行分离纯化, 并通过现代波谱学方法鉴定化合物结构。采用 MTT 法评价化合物对 PC12 细胞的细胞毒性。结果 从黄芪茎叶 70%乙醇提取物的正丁醇萃取部位中分离得到了 2 个降环阿尔廷烷型三萜, 分别为 1 $\alpha$ ,3 $\beta$ ,12 $\beta$ ,16 $\beta$ -tetrahydroxy-25,26,27-trinorcycoartan-24-oic acid methyl ester (1) 和 1 $\alpha$ ,3 $\beta$ ,12 $\beta$ -trihydroxy-25,26,27-trinorcycoartan-24,16 $\beta$ -olide (2)。MTT 实验显示, 在 5~100  $\mu$ mol/L 浓度内, 化合物 1 和 2 对 PC12 细胞展现出不同程度的细胞毒性。结论 化合物 1 和 2 为新的降环阿尔廷烷型三萜, 命名为黄芪茎叶环阿尔廷烷三萜 K (1) 和黄芪茎叶环阿尔廷烷三萜 L (2)。化合物 1 和 2 对 PC12 细胞具有细胞毒性。

**关键词:** 蒙古黄芪; 三萜; 降环阿尔廷烷型; 大鼠嗜铬细胞瘤细胞系; 黄芪茎叶环阿尔廷烷三萜 K; 黄芪茎叶环阿尔廷烷三萜 L  
中图分类号: R284.1 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)02-0393-07

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.02.001

Two new trinorcycoartane triterpenoids from stems and leaves of *Astragalus membranaceus*

CHENG Yangang, HAO Xiangrong, ZHAO Lijin, LI Pei, ZHAO Jiaxin, ZHANG Yi, WANG Yingli, TAN Jinyan  
Institute of Pharmaceutical & Food Engineering, Shanxi University of Chinese Medicine, Jinzhong 030619, China

**Abstract: Objective** To investigate trinorcycoartane triterpenoids from the stems and leaves of *Astragalus membranaceus* (AMSL). **Methods** Comprehensive separation and purification were performed using silica gel, ODS column chromatography, and high-performance liquid chromatography (HPLC). The structures of the compounds were identified by modern spectroscopic techniques. The cytotoxic activities of the compounds against PC12 cells were assessed using the MTT assay. **Results** Two trinorcycoartane triterpenoids were isolated from the *n*-butanol fraction of the 70% ethanol extract of AMSL, namely 1 $\alpha$ ,3 $\beta$ ,12 $\beta$ ,16 $\beta$ -tetrahydroxy-25,26,27-trinorcycoartan-24-oic acid methyl ester (1) and 1 $\alpha$ ,3 $\beta$ ,12 $\beta$ -trihydroxy-25,26,27-trinorcycoartan-24,16 $\beta$ -olide (2). The MTT assay showed that compounds 1 and 2 exhibited varying degrees of cytotoxicity against PC12 cells within the concentration range of 5–100  $\mu$ mol/L. **Conclusions** Compounds 1 and 2 are identified as new trinorcycoartane triterpenoids, named cycloastrane K (1) and cycloastrane L (2), respectively. Both compounds 1 and 2 demonstrate cytotoxicity against PC12 cells.

**Key words:** *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao; triterpenoids; trinorcycoartane; PC12 cells; cycloastrane K; cycloastrane L

黄芪是豆科植物蒙古黄芪 *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao 或膜荚黄芪 *A. membranaceus* (Fisch.) Bge. 的干

燥根, 主要分布于山西、陕西、内蒙古及宁夏等地。作为一味经典补气药, 黄芪首载于《神农本草经》, 其性甘、微温, 归肺、脾二经, 具有补气升阳、益气固

收稿日期: 2025-11-11

基金项目: 山西中医药大学杏林英才计划 (2025XK17); 2025 年度中医药产业发展现代化支撑项目 (2025zyycy09); 山西省中医药管理局中医药创新团队建设计划 (zytd2024033); 山西中医药大学科技创新能力培育计划项目 (2021PY-JC-09); 山西中医药大学学科建设项目 (2025XK35)

作者简介: 程艳刚 (1992—), 副教授, 研究方向为中药及复方药效物质基础。E-mail: chengyg1992@163.com

\*通信作者: 王颖莉 (1967—), 教授, 研究方向为中药药效物质基础。E-mail: wyltyut@163.com

谭金燕 (1991—), 副教授, 研究方向为中药药效物质基础及其作用机制。E-mail: 15636833827@163.com

表、利水消肿、敛疮生肌、生津养血等功效<sup>[1-2]</sup>。现代研究显示,黄芪中含有三萜、皂苷、黄酮、多糖、氨基酸和生物碱等多种类型成分,具有免疫调节、抗氧化、改善心脑血管功能及抑制肿瘤增殖等药理作用,现已被广泛用于心血管系统、免疫系统、糖尿病及消化系统疾病的治疗<sup>[3-6]</sup>。

据报道,黄芪地上部分的生物量可达根部的数倍,占植株总生物量的 60% 以上<sup>[7]</sup>。研究表明,黄芪茎叶中同样富含三萜、黄酮和多糖等活性成分<sup>[8]</sup>,其部分成分含量甚至高于根部<sup>[9]</sup>。但传统采收加工中茎叶常被视为“非药用部位”而被废弃,造成资源浪费<sup>[10]</sup>。近年来,随着资源经济学理论在中药领域的深入<sup>[11]</sup>,黄芪茎叶的潜在价值逐步受到关注,其提取物具有免疫调节、抗氧化、抗肿瘤与代谢调节等多种药理活性<sup>[12-16]</sup>。尽管如此,与根部相比,黄芪茎叶的化学成分研究仍较薄弱,尤其是其特征性三萜类成分的系统分离与结构鉴定尚缺乏报道。

黄芪茎叶中以三萜类成分为主,其中环阿尔廷烷型三萜因其独特的四环骨架结构,在抗炎、保肝、糖脂代谢调节及抗肿瘤等方面表现出良好活性<sup>[17]</sup>。目前,从黄芪根中已分离鉴定的环阿尔廷烷型三萜超过 30 种,而茎叶中该类成分的研究仍较为有限<sup>[18]</sup>。为实现黄芪资源的全面利用,本研究采用现代分离技术,系统开展黄芪茎叶的化学成分研究,从中分离得到了 2 个新的环阿尔廷烷型三萜(图 1),分别鉴定为  $1\alpha,3\beta,12\beta,16\beta$ -tetrahydroxy-25,26,27-trinor-cycloartan-24-oic acid methyl ester 和  $1\alpha,3\beta,12\beta$ -trihydroxy-25,26,27-trinor-cycloartan-24,16 $\beta$ -olide。值得注意的是,这 2 个化合物在结构上属于更为稀有和结构特殊的降环阿尔廷烷型三萜,分别命名为黄芪茎叶环阿尔廷烷三萜 K 和黄芪茎叶环阿尔廷烷三萜 L。本研究进一步丰富了黄芪茎叶中三萜类成分的结构类型与研究价值。

## 1 仪器与材料

P850 Pro 旋光仪(济南海能仪器有限公司); Thermo Q-Exactive Focus 液相色谱-质谱联用仪(美国 Thermo Scientific 公司); Buchi Sepacore 中压液相色谱系统(瑞士步琦有限公司); Essentia LC-16P 制备型高压液相色谱仪(日本 SHIMADZU 公司,配备 RID-20A 示差折光光检测器); Bruker Avance III 400/DPX 600 超导核磁共振光谱仪(德国 Bruker 公司); Essentia LC-16P 型高效液相色谱仪(日本 SHIMADZU 公司,配备 Essentia ELSD-16、SPD-

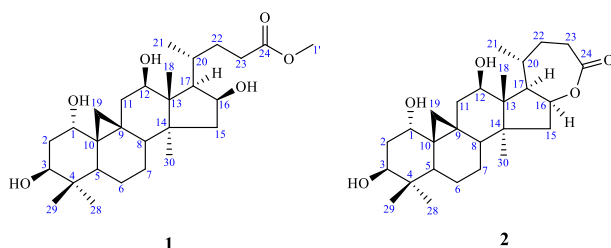


图 1 化合物 1 和 2 的结构

Fig. 1 Structures of compounds 1 and 2

M40 二极管阵列检测器); N-1300 型旋转蒸发仪(上海爱朗仪器有限公司,配备 NVP-1000 真空泵、CA-1116A 冷却水循环装置); Axioscope 5 型倒置荧光显微镜[蔡司科技(苏州)有限公司]; HAJ-3-160 二氧化碳细胞培养箱(上海跃进医疗器械有限公司); EPOCH 型全波长酶标仪(上海森纳捷生物科技有限公司); SW-CJ-2FD 型超净工作台(苏州净化有限公司); AE31 正置显微镜(上海光学仪器厂); 色谱柱 ACQUITY UPLC BEH C<sub>18</sub> (100 mm×2.1 mm, 1.8 μm, 美国 Waters 公司); Sharpsil-U C<sub>18</sub> 柱(250 mm×21.2 mm, 5 μm, 上海柯澜木实验科技有限公司); 柱色谱硅胶(200~300、80~120 目, 青岛海洋化工厂); GF<sub>254</sub> 硅胶板(烟台诚诺有限公司); 柱色谱 ODS(日本 YMC 公司); 质谱所用试剂为质谱级[赛默飞世尔科技(中国)有限公司]; 分析和制备型高效液相色谱所用试剂为色谱纯(广州欧普森科技股份有限公司); 其他均为分析纯(天津市致远化学试剂有限公司); RPMI 1640 培养基(武汉塞维尔生物科技有限公司); 胎牛血清[赛澳美细胞技术(北京)有限公司]; 青链霉素混合液(武汉塞维尔生物科技有限公司); 0.25% 胰蛋白酶消化液(武汉塞维尔生物科技有限公司); PBS(武汉塞维尔生物科技有限公司); DMSO(北京索莱宝科技有限公司); MTT(Sigma-Aldrich 公司)。PC12 细胞购自 BeNa Culture Collection 细胞库(BNCC100235)。

黄芪茎叶于 2021 年 8 月采收于山西浑源县,经山西中医药大学中药与食品工程学院裴香萍教授鉴定为豆科蒙古黄芪 *A. membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao 的干燥茎与叶。随后置于通风干燥处阴干后用于后续实验,标本(20210820)储存于中药微乳技术国家地方联合工程实验室。

## 2 提取与分离

取干燥的黄芪茎叶 6 kg, 用 8 倍量 70% 乙醇回

流提取 3 次, 每次 2 h, 合并提取液后减压浓缩得总浸膏为 1.23 kg。加入适量蒸馏水将所得的 1.23 kg 浸膏混悬分散, 依次采用石油醚、醋酸乙酯和正丁醇萃取 3 次, 回收溶剂得到石油醚、醋酸乙酯和正丁醇 3 个萃取部位。取正丁醇部位 (约 200 g), 经硅胶柱色谱, 采用二氯甲烷-甲醇 (50:1、20:1、10:1、5:1、3:1、2:1、1:1、0:1) 梯度洗脱, 根据薄层色谱分析, 最终正丁醇部位合并为 10 个组分 Fr. 1~10。Fr. 7 通过 ODS 柱色谱, 甲醇-水 (10:90~100:0) 梯度洗脱, 得到共 11 个组分 Fr. 7A~7K。Fr. 7G 经制备型 HPLC (甲醇-水 64:36, 体积流量 6 mL/min) 分离得到化合物 **1** (4.1 mg,  $t_R=29.7$  min) 和 **2** (4.8 mg,  $t_R=29.4$  min)。

### 3 结构鉴定

化合物 **1**: 白色无定型粉末;  $[\alpha]_D^{20}+45.0$  (c 0.10, MeOH)。HR-ESI-MS 显示离子峰  $[M+HCOO]^-$  的

$m/z$  为 523.327 1 (计算值  $C_{29}H_{47}O_8$  为 523.327 1), 结合 NMR 数据推测其分子式为  $C_{28}H_{46}O_6$ , 不饱和度为 6。

化合物 **1** 的  $^1H$ -NMR (400 MHz,  $CD_3OD$ ) 谱 (表 1) 显示 4 个角甲基质子信号:  $\delta_H$  0.97 (3H, s, H<sub>3</sub>-28), 0.78 (3H, s, H<sub>3</sub>-29), 1.12 (3H, overlapped, H<sub>3</sub>-18) 和 0.94 (3H, s, H<sub>3</sub>-30)。在高场区还观察到  $\delta_H$  1.17 (3H, overlapped, H<sub>3</sub>-21) 处的甲基质子信号。此外, 谱图中显示 4 个连氧碳上的质子信号:  $\delta_H$  3.49 (1H, t,  $J=2.7$  Hz, H-1), 3.66 (1H, overlapped, H-3), 3.81 (1H, d,  $J=7.6$  Hz, H-12 Hz), 4.45 (1H, m, H-16), 并清晰可见环阿尔廷烷型三萜特征性的 H<sub>2</sub>-19 质子信号 [ $\delta_H$  0.68 (1H, d,  $J=4.5$ , H-19a), 0.59 (1H, d,  $J=4.5$ , H-19b)]。化合物 **1** 的  $^{13}C$ -NMR (100 MHz,  $CD_3OD$ ) 谱 (表 1) 显示 28 个碳信号, 结合 DEPT 135 和 HSQC 谱可归类为: 6 个甲基 (包括 1 个甲氧基)、8 个亚

表 1 化合物 **1** 和 **2** 的  $^1H$ -NMR 和  $^{13}C$ -NMR 数据  
Table 1  $^1H$ -NMR and  $^{13}C$ -NMR data of compounds **1** and **2**

碳位	<b>1</b>		<b>2</b>	
	$\delta_C$	$\delta_H$	$\delta_C$	$\delta_H$
1	74.1	3.49 (t, $J=2.7$ Hz)	74.0	3.51 (t, $J=2.7$ Hz)
2	38.0	1.81 (overlapped)	38.0	1.82 (overlapped)
3	74.5	3.66 (overlapped)	74.4	3.68 (dd, $J=10.2, 6.4$ Hz)
4	41.6		41.6	
5	40.7	1.86 (m)	40.6	1.88 (dd, $J=12.6, 4.6$ Hz)
6	22.0	1.68 (m), 0.86 (m)	21.9	1.69 (m), 0.90 (m)
7	26.7	1.33 (m), 1.12 (overlapped)	26.6	1.36 (m), 1.15 (m)
8	49.0	1.49 (m)	48.4	1.57 (overlapped)
9	21.7		21.6	
10	30.2		30.4	
11	40.0	2.97 (dd, $J=15.8, 8.4$ Hz), 1.16 (overlapped)	39.9	2.99 (overlapped), 1.20 (m)
12	73.5	3.81 (d, $J=7.6$ Hz)	73.1	3.86 (m)
13	51.7		52.0	
14	48.8		48.8	
15	49.1	2.00 (dd, $J=13.2, 8.2$ Hz), 1.44 (m)	45.5	2.07 (dd, $J=13.3, 8.4$ Hz), 1.73 (dd, $J=13.3, 5.2$ Hz)
16	73.2	4.45 (m)	82.8	5.10 (dd, $J=13.3, 7.8$ Hz)
17	58.7	1.81 (overlapped)	58.5	2.00 (m)
18	13.1	1.12 (overlapped)	12.9	1.12 (s)
19	30.7	0.68 (d, $J=4.5$ Hz), 0.59 (d, $J=4.5$ Hz)	30.6	0.73 (d, $J=4.5$ Hz), 0.61 (d, $J=4.5$ Hz)
20	31.0	1.71 (m)	30.2	1.57 (overlapped)
21	18.9	1.17 (overlapped)	21.7	1.24 (d, $J=5.9$ Hz)
22	32.8	2.07 (m), 1.31 (m)	31.2	1.82 (overlapped), 1.57 (overlapped)
23	32.4	2.42 (m)	32.0	2.99 (overlapped), 2.43 (dd, $J=13.9, 9.8$ Hz)
24	177.4		177.2	
28	25.9	0.97 (s)	25.9	0.98 (s)
29	13.8	0.78 (s)	13.8	0.79 (s)
30	20.9	0.94 (s)	20.4	1.01 (s)
1'	52.1	3.66 (overlapped)		

甲基、8 个次甲基（包括 4 个氧代次甲基）和 6 个非质子化碳（包括 1 个羰基碳），推测该化合物为降环阿尔廷烷型三萜。进一步分析化合物 **1** 的 1D NMR 数据发现，其结构与已知降环阿尔廷烷型三萜类化合物 schipropin F 非常相近<sup>[19]</sup>，区别在于化合物 **1** 中 C-1、C-3 和 C-16 位为氧代次甲基，而后者 C-1、C-16 位为亚甲基，C-3 位为羰基。此外，化合物 **1** 中 C-7 位为亚甲基，而后者相应位置为氧代次甲基。

通过对化合物 **1** 的  $^1\text{H}$ - $^1\text{H}$  COSY 和 HMBC 相关谱图的解析，进一步证实了上述的推断，具体的相关数据如下： $^1\text{H}$ - $^1\text{H}$  COSY 谱（图 2）中识别出以下 3 个自旋系统片段，即 H-1/H<sub>2</sub>-2/H-3、H-5/H<sub>2</sub>-6/H<sub>2</sub>-7/H-8 和 H<sub>2</sub>-15/H-16/H-17/H-20 (21-CH<sub>3</sub>)/H<sub>2</sub>-22/H<sub>2</sub>-23；HMBC 谱（图 2）中的关键相关信号包括：H<sub>3</sub>-28/29 与 C-3 ( $\delta_{\text{C}}$  74.5)、C-4 ( $\delta_{\text{C}}$  41.6)、C-5 ( $\delta_{\text{C}}$  40.7) 相关，H-1 与 C-3、C-5、C-10 ( $\delta_{\text{C}}$  30.2) 相关，H<sub>2</sub>-

19 与 C-1 ( $\delta_{\text{C}}$  74.1)、C-5、C-8 ( $\delta_{\text{C}}$  49.0)、C-9 ( $\delta_{\text{C}}$  21.7)、C-10、C-11 ( $\delta_{\text{C}}$  40.0) 相关，H<sub>2</sub>-11 与 C-13 ( $\delta_{\text{C}}$  51.7) 相关，H<sub>3</sub>-18 与 C-12 ( $\delta_{\text{C}}$  73.5)、C-13、C-14 ( $\delta_{\text{C}}$  48.8)、C-17 ( $\delta_{\text{C}}$  58.7) 相关，H<sub>3</sub>-30 与 C-8、C-13、C-14、C-15 ( $\delta_{\text{C}}$  49.1) 相关，H<sub>2</sub>-22 与 C-24 ( $\delta_{\text{C}}$  177.4) 相关，H<sub>2</sub>-23 与 C-24 相关，-OCH<sub>3</sub> 与 C-24 相关，通过这些 HMBC 相关将结构片段相连，确定了化合物 **1** 的平面结构。

通过 NOESY 谱图（图 3）确定了化合物 **1** 的相对构型。基于生源合成，H<sub>2</sub>-19 被指定为  $\beta$  取向，而 H<sub>3</sub>-28 和 H<sub>3</sub>-30 为  $\alpha$  取向。H-1 与 H<sub>2</sub>-19、H-3 与 H<sub>3</sub>-28、H-12 与 H<sub>3</sub>-30、H<sub>3</sub>-30 与 H-17、H<sub>3</sub>-21 与 H-17、H<sub>3</sub>-30 与 H-16 间的相关信号表明，3-OH、12-OH 和 16-OH 为  $\beta$  取向，而 1-OH、H-17 和 H<sub>3</sub>-21 具有  $\alpha$  取向。综上信息，确定了化合物 **1** 的结构，如图 1 所示。经 Scifinder 数据库检索为新化合物，命名为黄芪茎叶环阿尔廷烷三萜 **K**。

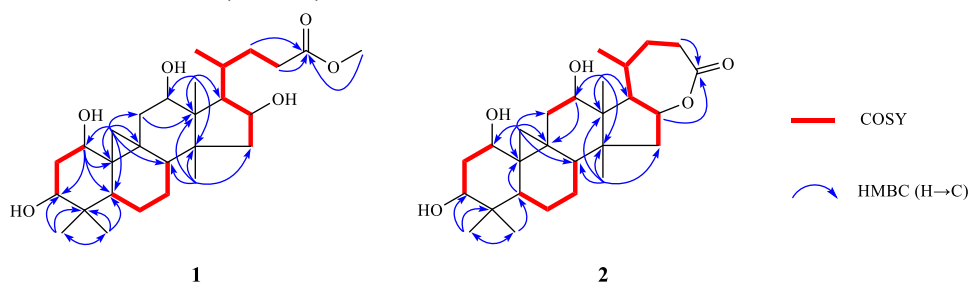


图 2 化合物 1 和 2 的  $^1\text{H}$ - $^1\text{H}$  COSY 和关键 HMBC 相关

Fig. 2  $^1\text{H}$ - $^1\text{H}$  COSY correlations and key HMBC correlations of compounds 1 and 2

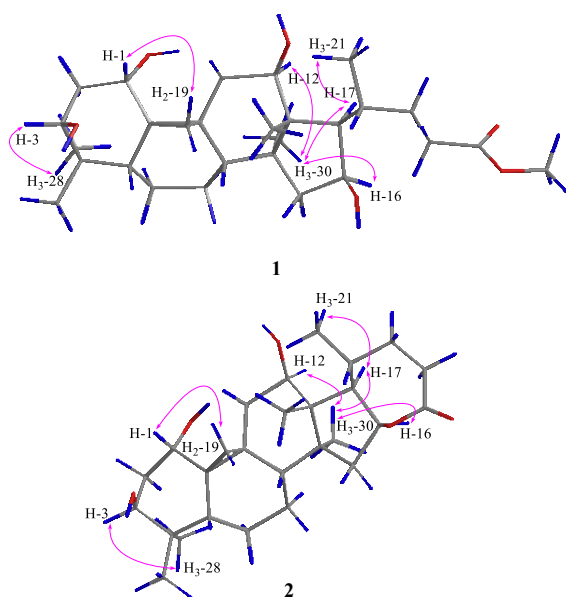


图 3 化合物 1 和 2 的关键 NOESY 相关

Fig. 3 Key NOESY correlations of compounds 1 and 2

化合物 **2**：白色无定型粉末； $[\alpha]_{\text{D}}^{20} +1.0$  (c 0.10, MeOH)。HR-ESI-MS 显示  $m/z$  491.301 5  $[\text{M} + \text{HCOO}]^-$  (计算值为  $\text{C}_{28}\text{H}_{43}\text{O}_7$ , 491.300 9)，结合 NMR 数据推断其分子式为  $\text{C}_{27}\text{H}_{42}\text{O}_5$ ，不饱和度为 7。

$^1\text{H}$ -NMR (600 MHz,  $\text{CD}_3\text{OD}$ ) 谱（表 1）中显示 4 个角甲基质子信号  $\delta_{\text{H}}$  1.12 (3H, s, H<sub>3</sub>-18), 0.98 (3H, s, H<sub>3</sub>-28), 0.79 (3H, s, H<sub>3</sub>-29), 1.01 (3H, s, H<sub>3</sub>-30)；高场区可见  $\delta_{\text{H}}$  1.24 (3H, d,  $J = 5.9$  Hz, H<sub>3</sub>-21) 处的双峰甲基质子信号。此外，谱图中还出现了 3 个连氧碳上的质子信号  $\delta_{\text{H}}$  3.51 (1H, t,  $J = 2.7$  Hz, H-1), 3.68 (1H, dd,  $J = 10.2, 6.4$  Hz, H-3), 3.86 (1H, m, H-12)。  $\delta_{\text{H}}$  0.73 和 0.61 处出现呈 AB 四重峰的质子信号 (1H, d,  $J = 4.5$  Hz, H-19a; 1H, d,  $J = 4.5$  Hz, H-19b)，表明存在环丙烷亚甲基结构，提示化合物 **2** 可能属于环阿尔廷烷型三萜<sup>[20]</sup>。

对化合物 **2** 的  $^{13}\text{C}$ -NMR (150 MHz,  $\text{CD}_3\text{OD}$ ) 和 DEPT 135 谱（表 1）分析显示其含有 27 个碳信号，

包括 1 个酯基、5 个甲基、8 个亚甲基、8 个次甲基（包括 4 个氧代次甲基）和 5 个季碳，推测属于降环阿尔廷烷型三萜类化合物。进一步分析发现，化合物 **2** 的 1D NMR 数据与已知降环阿尔廷烷型三萜 3-oxo-7,12-dihydroxy-25,26,27-trinorcycloartan-24,16R-olide 非常相似，主要区别在于：化合物 **2** 中 C-1 和 C-3 为连氧次甲基，而己知化合物中 C-1 为非连氧亚甲基、C-3 为羰基；此外，化合物 **2** 中 C-7 为亚甲基，而对应己知物中该位置为连氧次甲基。

通过分析 HSQC、 $^1\text{H}$ - $^1\text{H}$  COSY 和 HMBC 谱，推导出了化合物 **2** 的平面结构。 $^1\text{H}$ - $^1\text{H}$  COSY 谱（图 2）中识别出以下 4 个自旋系统片段：H-1/H<sub>2</sub>-2/H-3、H-5/H<sub>2</sub>-6/H<sub>2</sub>-7/H-8、H<sub>2</sub>-11/H-12、H<sub>2</sub>-15/H-16/H-17/H-20(21-CH<sub>3</sub>)/H<sub>2</sub>-22/H<sub>2</sub>-23。HMBC 谱（图 2）中的关键相关信号包括： $\delta_{\text{H}}$  0.98 (H<sub>3</sub>-28) 和  $\delta_{\text{H}}$  0.79 (H<sub>3</sub>-29) 处的甲基质子信号与 C-3 ( $\delta_{\text{C}}$  74.4)、C-4 ( $\delta_{\text{C}}$  41.6) 和 C-5 ( $\delta_{\text{C}}$  40.6) 相关； $\delta_{\text{H}}$  0.73 (H-19a) 和  $\delta_{\text{H}}$  0.61 (H-19b) 处的亚甲基质子信号与 C-1 ( $\delta_{\text{C}}$  74.0)、C-8 ( $\delta_{\text{C}}$  48.4)、C-9 ( $\delta_{\text{C}}$  21.6)、C-10 ( $\delta_{\text{C}}$  30.4) 和 C-11 ( $\delta_{\text{C}}$  39.9) 相关； $\delta_{\text{H}}$  1.88 (H-5) 处的质子信号与 C-10 相关； $\delta_{\text{H}}$  1.12 (H<sub>3</sub>-18) 单峰甲基质子信号与 C-12 ( $\delta_{\text{C}}$  73.1)、C-13 ( $\delta_{\text{C}}$  52.0)、C-14 ( $\delta_{\text{C}}$  48.8) 和 C-17 ( $\delta_{\text{C}}$  58.5) 相关； $\delta_{\text{H}}$  1.01 (H<sub>3</sub>-30) 甲基质子信号与 C-8、C-13、C-14 和 C-15 ( $\delta_{\text{C}}$  45.5) 相关； $\delta_{\text{H}}$  3.86 (H-12) 处的质子信号与 C-9 相关； $\delta_{\text{H}}$  3.00 (H-23a) 和  $\delta_{\text{H}}$  2.43 (H-23b) 质子信号与 C-24 ( $\delta_{\text{C}}$  177.2) 相关； $\delta_{\text{H}}$  5.10 (H-16) 质子信号与 C-24 相关。通过这些 HMBC 相关将结构片段相连，确定了化合物 **2** 的平面结构。

通过 NOESY 谱图（图 3）确定了化合物 **2** 的相对构型。与化合物 **1** 一致，化合物 **2** 的 H<sub>3</sub>-19 被指定为  $\beta$  取向、H<sub>3</sub>-28 和 H<sub>3</sub>-30 为  $\alpha$  取向。H-1 与 H<sub>2</sub>-19、H-3 与 H<sub>3</sub>-28、H-12 与 H<sub>3</sub>-30、H-17 与 H<sub>3</sub>-30、H-16 与 H<sub>3</sub>-30、H<sub>3</sub>-21 与 H-17 相关信号表明，3-OH 和 12-OH 为  $\beta$  取向，而 1-OH、H-16 和 H<sub>3</sub>-21 具有  $\alpha$  取向。综上信息，确定了化合物 **2** 的结构，如图 1 所示。经 Scifinder 数据库检索为新化合物，命名为黄芪茎叶环阿尔廷烷三萜 L。

#### 4 细胞毒性评价

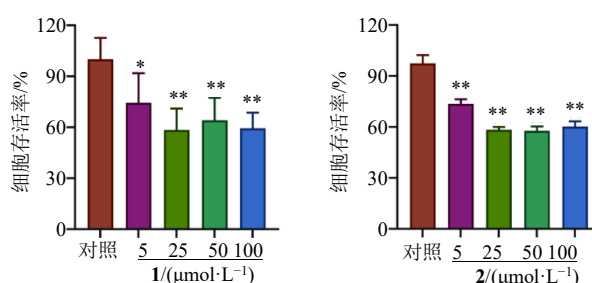
PC12 细胞是一种来源于大鼠肾上腺髓质嗜铬细胞瘤的细胞系，兼具神经内分泌细胞与神经元的部分特性，广泛应用于神经损伤、神经退行性疾病及记忆障碍等相关机制研究和药物筛选。项目组前期研究发现，黄芪茎叶中部分环阿尔廷烷型三萜能

够显著改善 A $\beta_{25-35}$  诱导的 PC12 细胞损伤。因此，本研究拟评价分离得到的 2 个降环阿尔廷烷型三萜对 A $\beta_{25-35}$  诱导的 PC12 细胞损伤的影响。

首先，采用 MTT 法检测化合物 **1** 和 **2** 对 PC12 细胞的细胞毒性。取对数生长期的 PC12 细胞，以每孔  $1 \times 10^5$  个/mL 的密度接种于 96 孔板中，每孔加入 100  $\mu\text{L}$  细胞悬液，每组设 6 个复孔。将细胞置于 37  $^{\circ}\text{C}$ 、5% CO<sub>2</sub> 培养箱中培养 24 h，待细胞充分贴壁后进行药物干预。实验设置对照组、药物组（化合物 **1** 和 **2**）以及不含细胞的空白组，药物组分别向各孔加入浓度为 5、25、50、100  $\mu\text{mol/L}$  的化合物 **1** 或 **2**（溶剂为无血清 RPMI 1640 培养基）。空白组和对照组加入无血清 RPMI 1640 培养基，将处理好的细胞置于 37  $^{\circ}\text{C}$ 、5% CO<sub>2</sub> 培养箱中继续孵育 24 h 后向每孔中分别加入 10  $\mu\text{L}$  MTT 试剂，再避光孵育 4 h，向每孔内添加 100  $\mu\text{L}$  的 DMSO，避光条件下于 37  $^{\circ}\text{C}$  孵育 10 min。在 490 nm 波长下测定吸光度 ( $A$ ) 值，按照公式计算细胞存活率。采用 GraphPad Prism 9.0 软件对统计数据进行分析，结果以  $\bar{x} \pm s$  表示，数据若符合正态分布则采用单因素方差分析；反之则采用非参数检验。

$$\text{细胞存活率} = (A_{\text{给药}} - A_{\text{空白}}) / (A_{\text{对照}} - A_{\text{空白}})$$

结果如图 4 所示，与对照组相比，化合物 **1** 和 **2** 在所有测试浓度下均能降低 PC12 细胞存活率 ( $P < 0.05$ 、 $0.01$ )，表现出一定的细胞毒性。因此，后续未在 A $\beta_{25-35}$  诱导的 PC12 细胞损伤模型上进一步开展活性研究。



与对照组比较：\* $P < 0.05$  \*\* $P < 0.01$ 。

\* $P < 0.05$  \*\* $P < 0.01$  vs control group.

图 4 化合物 **1** 与 **2** 对 PC12 细胞存活率的影响 ( $\bar{x} \pm s$ ,  $n = 6$ )

Fig. 4 Effects of compounds **1** and **2** on survival rate of PC12 cells ( $\bar{x} \pm s$ ,  $n = 6$ )

#### 5 讨论

本研究综合运用现代色谱分离技术与波谱分析方法，从黄芪茎叶的醇提取物中成功分离并鉴定出



2 个新的降环阿尔廷烷型三萜化合物。体外细胞实验显示, 化合物 **1** 和 **2** 在测试浓度范围内均能抑制 PC12 细胞存活率, 表现出明显的细胞毒性。

目前, 已有大量环阿尔廷烷型三萜从黄芪根部分离获得<sup>[21-23]</sup>, 然而针对其茎叶中该类成分的研究仍较为匮乏。本研究从黄芪茎叶中鉴定出 2 个结构更为罕见的降环阿尔廷烷型三萜 cycloastraine K (**1**) 和 cycloastraine L (**2**)。与经典的环阿尔廷烷骨架相比, 化合物 **1** 和 **2** 在碳骨架中呈现出明显的降碳修饰, 这进一步丰富了黄芪茎叶乃至整体植株的化学成分多样性。尤其值得注意的是, 这类降环阿尔廷烷型三萜在黄芪根部中也较少见, 表明茎叶可能成为获取结构特异三萜类成分的重要补充资源。

从中药资源利用角度看, 本研究为黄芪非药用部位茎叶的系统开发提供了理论依据。传统上黄芪仅以根部入药, 占植株生物量超过 60% 的茎叶常被废弃, 造成资源浪费。已有研究显示, 黄芪茎叶中三萜皂苷、黄酮等活性成分的含量甚至高于根部<sup>[24]</sup>, 并在抗炎、抗氧化、保肝、抗肿瘤、等方面展现出良好潜力<sup>[7,25-27]</sup>, 本研究进一步从茎叶中分离得到结构新颖的降环阿尔廷烷型三萜, 提示茎叶在化学成分类型上与根部具有互补性, 可作为特异性三萜成分的可持续提取来源, 具备替代或补充根部开发的资源价值。

多项现代研究指出, 黄芪根及茎叶中的黄酮与三萜类成分在神经保护、认知功能改善及抗焦虑等方面具有潜在作用<sup>[28-30]</sup>, 提示其在神经系统疾病防治中具备重要转化前景。本研究所分离的三萜类成分虽在实验中表现出对 PC12 细胞的细胞毒性, 但这一活性特征也提示其可能具备调控神经细胞功能的潜力。值得注意的是, 化合物 **1** 和 **2** 在 C-1、C-3、C-12 及 C-16 等位点均具有羟基取代, 这类多羟基化结构可能与其生物活性密切相关, 值得进一步开展构效关系研究。

综上所述, 本研究不仅拓展了对黄芪茎叶化学成分的认识, 也从资源利用与活性发现层面为黄芪茎叶的系统开发提供了依据。后续研究应进一步开展黄芪茎叶与根部三萜类成分的化学谱对比, 明确茎叶的特异性成分群, 同时深入评估该类降环阿尔廷烷型三萜成分的作用机制与成药潜力。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

#### 参考文献

[1] 刘贵珍, 李军, 范志梁, 等. 黄芪的化学成分及药理作

用研究进展 [J]. 药物化学, 2023, 11(2): 70-80.

[2] 李博, 耿刚. 黄芪的化学成分与药理作用研究进展 [J]. 中西医结合研究, 2022(4): 262-264.

[3] 刘颖, 金丽霞. 黄芪治疗糖尿病肾病的研究进展 [J]. 临床医学进展, 2024(8): 623-629.

[4] 陆麟, 凌怡, 储泉泉, 等. 中药黄芪在糖尿病肾病治疗中的作用研究进展 [J]. 抗感染药学, 2022, 19(7): 943-945.

[5] 曾雯, 周胜强, 黄佳, 等. 黄芪免疫调节活性成分及其药理作用进展 [J]. 上海中医药杂志, 2025, 59(1): 80-88.

[6] 何嘉郡, 秦晨, 贺廉清, 等. 黄芪黄酮类成分及其药理作用研究 [J]. 辽宁中医药大学学报, 2024, 26(1): 112-119.

[7] 陈虎虎, 龚苏晓, 张铁军, 等. 黄芪茎、叶的化学成分和药理作用研究进展 [J]. 药物评价研究, 2011, 34(2): 134-137.

[8] 程艳刚, 苏琪辉, 黄玉荣, 等. 黄芪茎叶的化学成分研究 [J]. 山西中医药大学学报, 2022, 23(3): 196-199.

[9] 张宇, 李殿奎, 李桃, 等. 以黄芪茎叶为原料的药: 中国, CN200610101226.6 [P]. 2008-01-09.

[10] 宋沁洁, 杨新荣, 李国峰, 等. 黄芪废弃物的综合利用研究进展 [J]. 沈阳药科大学学报, 2023, 40(7): 977-984.

[11] 段金殿, 宿树兰, 郭盛, 等. 中药资源全产业链废弃物及副产物分级分类体系构建 [J]. 中国现代中药, 2022, 24(10): 1830-1839.

[12] 高欣缘, 李小兰, 李思卿, 等. 黄芪茎叶增强免疫力的活性部位与化学成分研究 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 342-350.

[13] 李慧, 李静辉, 崔莹, 等. 黄芪茎叶的安全性毒理学评价 [J]. 现代食品科技, 2021, 37(10): 332-339.

[14] Cui L Y, Ma Z N, Wang D F, et al. Ultrasound-assisted extraction, optimization, isolation, and antioxidant activity analysis of flavonoids from *Astragalus membranaceus* stems and leaves [J]. *Ultrason Sonochem*, 2022, 90: 106190.

[15] 陈亚军. 膜荚黄芪叶中黄酮和三萜类化学成分及其药动学研究 [D]. 哈尔滨: 黑龙江中医药大学, 2018.

[16] 毕志明, 余庆涛, 李萍, 等. 蒙古黄芪地上部分的黄酮类成分 [J]. 中国天然药物, 2007, 5(4): 263-265.

[17] 赵引弟, 石婵婵, 苏倩霞, 等. 黄芪皂苷提取分离、生物合成、生物活性研究进展及其应用前景 [J]. 中草药, 2025, 56(10): 3759-3770.

[18] Su H F, Shaker S, Kuang Y, et al. Phytochemistry and cardiovascular protective effects of Huang-qi (*Astragalus Radix*) [J]. *Med Res Rev*, 2021, 41(4): 1999-2038.

[19] Ma R F, Hu K, Ding W P, et al. Schipropins A-J, structurally diverse triterpenoids from *Schisandra propinqua* [J]. *Phytochemistry*, 2021, 182: 112589.

[20] Xiao W L, Tian R R, Pu J X, et al. Triterpenoids from *Schisandra lancifolia* with anti-HIV-1 activity [J]. *J Nat*

- Prod, 2006, 69(2): 277-279.
- [21] 黄可心, 蒋建勤. 环阿尔廷烷类三萜的资源分布和药理作用研究进展 [J]. 现代药物与临床, 2016, 31(12): 2073-2078.
- [22] 蒋惠, 王长虹. 黄芪皂苷类成分的生物合成、体内外转化、药理作用及质量控制研究进展 [J]. 上海中医药杂志, 2025, 59(10): 80-93.
- [23] 刘玥辉, 孙视, 张涵庆, 等. 黄芪中环阿屯烷型三萜皂苷的二维核磁共振研究 [J]. 中国药科大学学报, 2008, 39(1): 15-19.
- [24] 黎映琼, 蔡庆群, 苏志强, 等. 不同产地黄芪根、茎、叶中 4 种异黄酮类成分的比较及其聚类分析 [J]. 现代中药研究与实践, 2020, 34(2): 65-69.
- [25] 黄文静, 孙晓春, 周瑞, 等. 响应面法优化黄芪茎叶总黄酮提取工艺及其抗炎活性研究 [J]. 中国现代中药, 2018, 20(7): 871-877.
- [26] 郭丽丽, 李小兰, 高欣缘, 等. 黄芪茎叶总黄酮的超声辅助双水相提取工艺优化及其抗氧化活性 [J]. 食品研究与开发, 2025, 46(5): 94-101.
- [27] 毕小凤. 黄芪茎叶主要化学成分及其部分药理作用研究 [D]. 太原: 山西中医药大学, 2017.
- [28] Li W Z, Wu W Y, Huang D K, *et al.* Protective effects of astragalosides on dexamethasone and A $\beta$ 25-35 induced learning and memory impairments due to decrease amyloid precursor protein expression in 12-month male rats [J]. *Food Chem Toxicol*, 2012, 50(6): 1883-1890.
- [29] 裴金英, 温晶钰, 刘斌, 等. 中药成分 (组分) 治疗阿尔茨海默病作用及机制研究进展 [J]. 药物评价研究, 2025(10): 3003-3016.
- [30] 张家恺, 井淑艳, 刘丹, 等. 黄芪甲苷对糖尿病大鼠认知功能障碍的改善及其作用机制 [J]. 中国老年学杂志, 2025, 45(18): 4505-4510.

[责任编辑 王文倩]

## • 封面图片介绍 •

### 白贝壳石斛



白贝壳石斛 *Dendrobium cretaceum* 因其唇瓣形似洁白的贝壳而得名, 属兰科石斛属植物, 主要分布于喜马拉雅地区, 泰国、越南、缅甸、老挝等地也有分布, 通常生长在海拔 800~1 500 m 的常绿阔叶林中, 附生在树干或岩石上, 属于典型的热带附生兰, 喜欢温暖、湿润、半阴的环境。呈棍棒状或稍纺锤形, 直立或下垂, 表面有纵向沟棱, 长度通常在 15~30 cm。叶片互生于茎秆上部, 披针形或长椭圆形, 草质, 绿色。在冬季干旱或低温季节会部分或全部落叶, 花序从落叶的老茎节上抽出, 每个花序着花 1~3 朵。花色主色调为纯白色。花萼片、花瓣均为白色, 开展。唇瓣是其最大亮点。唇瓣宽大, 呈扇形或贝壳状, 边缘有密集的流程状细裂, 犹如贝壳的花边。唇瓣中央

有一条醒目的亮黄色或橙黄色斑块, 一直延伸至喉部, 形成强烈而美丽的对比。花期主要在春季至夏初 (3~6 月), 单花寿命较长, 观赏期可达 2~3 周。具有较高的观赏价值和收藏价值。白贝壳石斛在印尼爪哇等地的民间被用于缓解耳痛等不适症状, 具备潜在的抗炎、抗感染能力。

(本封面图片由田甜提供)