广西植物 Guihaia Aug. 2026, 46(8): 1385-1393 http://www.guihaia-journal.com

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202511014

杨敏, 谭晶, 杨孙缘, 等, 2026. 黄花棘豆中1个新的黄酮苷化合物及生物活性研究[J]. 广西植物, 46(8): 1385-1393.
Yang M, Tan J, Yang S Y, et al., 2026. A new flavonoid glycoside from *Oxytropis ochrocephala* and its biological activities [J]. Guihaia, 46(8): 1385-1393.

黄花棘豆中1个新的黄酮苷化合物及生物活性研究

杨 敏[1], 谭 晶[1], 杨孙缘[1], 熊荣琴[1], 曾艳荣[1], 张 振[2], 路 浩[3], 谭承建[1*]

(1. 贵州民族大学 民族医药学院, 贵阳 550025; 2. 贵州科学院, 贵阳 550025; 3. 西北农林科技大学 动物医学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为研究黄花棘豆的化学成分及其抗氧化活性,该研究采用硅胶色谱柱、Sephadex LH-20色谱柱及半制备高效液相色谱等色谱技术对黄花棘豆醇提物进行分离纯化,并综合运用UV、IR、HR-MS、NMR等波谱学方法鉴定其化合物结构,以及通过1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)和2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)(ABTS)的自由基清除实验评价化合物的抗氧化活性。结果表明:(1)从黄花棘豆中分离鉴定出12个黄酮类成分,分别为ochrocephalamine Q(**1**)、(6*aR*,11*aR*)-10-hydroxy-3,9-dimethoxypterocarpan(**2**)、3′,7-二羟基-2′,4′-二甲氧基异黄烷(**3**)、bosenegaloside A(**4**)、5-hydroxy-2-(4-hydroxyphenyl)-7-methoxy-3-[6-*O*-(1-oxohexadecyl)-α-D-altropyranosyl]-4*H*-1-benzopyran-4-one(**5**)、鼠李柠檬素(**6**)、3,5,7-三羟基-4′-甲氧基黄酮醇(**7**)、3-*O*-鼠李柠檬素-6-*O*-苯甲酰基-β-D-吡喃葡萄糖苷(**8**)、鼠李柠檬素-3-*O*-β-D-半乳糖苷(**9**)、异槲皮苷(**10**)、鼠李素-3-*O*-β-D-半乳糖苷(**11**)及鼠李柠檬素-3-*O*-β-D-葡萄糖苷(**12**)。其中,化合物**1**为新化合物,化合物**2**、**4**、**5**为首次从该物种中分离得到。(2)化合物**6**、**10**、**11**在DPPH自由基清除实验中表现出较强的抗氧化活性,其IC_{50}值分别为(4.90±0.35)、(0.80±0.06)、(1.07±0.02) μg·mL^{-1},强于阳性对照维生素C[IC_{50}值为(5.72±0.52) μg·mL^{-1}]。同时,在ABTS自由基清除实验中,化合物**11**亦表现出较强的抗氧化活性,其IC_{50}值为(0.32±0.05) μg·mL^{-1}。该研究结果进一步丰富了黄花棘豆的化学成分,为其潜在资源的开发与利用提供了研究资料。

关键词: 黄花棘豆, 黄酮, 化学成分, 自由基清除, 抗氧化

中图分类号: Q946 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-3142(2026)08-1385-09

A new flavonoid glycoside from *Oxytropis ochrocephala* and its biological activities

YANG Min[1], TAN Jing[1], YANG Sunyuan[1], XIONG Rongqin[1], ZENG Yanrong[1], ZHANG Zhen[2], LU Hao[3], TAN Chengjian[1*]

(1. *School of Ethnic-Minority Medicine*, *Guizhou Minzu University*, Guiyang 550025, China; 2. *Guizhou Academy of Sciences*, Guiyang 550025, China; 3. *College of Veterinary Medicine*, *Northwest A & F University*, Yangling 712100, Shaanxi, China)

收稿日期: 2026-03-08 **接受日期**: 2026-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(32160110,31660103); 贵州省研究生教育创新计划项目(2024YJSKYJJ225)。

第一作者: 杨敏(2001—),硕士研究生,研究方向为天然药物化学,(E-mail)18085879040@163.com。

*通信作者: 谭承建,博士,教授,主要从事天然药物化学研究,(E-mail)tcj1229@163.com。

Abstract: To investigate the chemical constituents of *Oxytropis ochrocephala* and their antioxidant activities, the ethanol extract of *O. ochrocephala* was separated and purified using chromatographic techniques including silica gel column chromatography, Sephadex LH-20 chromatography and semi-preparative high-performance liquid chromatography. The structures of the isolated compounds were elucidated by comprehensive spectroscopic analyses, including UV, IR, HR-MS and NMR. The antioxidant activities of the isolated compounds were evaluated using 1, 1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) and 2, 2-azinobis-(3-ethyl-benzothiazole-6-sulfonic acid) (ABTS) radical scavenging assays. The results were as follows: (1) Twelve compounds were isolated and identified as ochrocephalamine Q (**1**), (6*aR*, 11*aR*)-10-hydroxy-3, 9-dimethoxypterocarpan (**2**), 3′, 7-dihydroxy-2′, 4′-dimethoxyisoflavan (**3**), bosenegaloside A (**4**), 5-hydroxy-2-(4-hydroxyphenyl)-7-methoxy-3-[6-*O*-(1-oxohexadecyl)-*α*-D-altropyranosyl]-4*H*-1-benzopyran-4-one (**5**), rhamnocitrin (**6**), 3, 5, 7-trihydroxy-4′-methoxyflavonol (**7**), 3-*O*-rhamnocitrin-6-*O*-benzoyl-*β*-D-glucopyranoside (**8**), rhamnocitrin-3-*O*-*β*-D-galactoside (**9**), isoquercitrin (**10**), rhamnetin 3-*O*-*β*-D-galactoside (**11**) and rhamnocitrin 3-*O*-*β*-D-glucoside (**12**). Among these, Compound **1** was a new compound, while compounds **2**, **4** and **5** were reported in this species for the first time. (2) Compounds **6**, **10** and **11** exhibited notable antioxidant activities in the DPPH radical scavenging assay, with IC_{50} values of (4.90±0.35), (0.80±0.06) and (1.07±0.02) μg · mL^{-1}, respectively, which were stronger than that of the positive control vitamin C [IC_{50} value of (5.72±0.52) μg · mL^{-1}]. In addition, in the ABTS radical scavenging assay, Compound **11** also showed strong antioxidant activity, with an IC_{50} value of (0.32±0.05) μg · mL^{-1}. These findings further enrich the chemical constituents of *O. ochrocephala* and provide valuable information for its potential resource development and utilization.

Key words: *Oxytropis ochrocephala*, flavonoids, chemical constituents, free radical scavenging, antioxidant

黄花棘豆(*Oxytropis ochrocephala*)为豆科(Fabaceae)棘豆属(*Oxytropis* DC.)多年生草本植物,是我国特有的一种植物资源(中国科学院中国植物志编辑委员会,1998)。牧草缺乏的季节,羊、马、牛、骆驼等家畜常因饥饿被迫采食黄花棘豆,而发生中毒,给当地畜牧业造成严重经济损失(赵宝玉和莫重辉,2017)。

近年来,土地盐碱化、荒漠化、过度放牧等因素导致该植物在我国宁夏南部、甘肃南部和西部、青海东南部、四川西部、西藏东南部及新疆昆仑山北坡的天然草原大量蔓延,并已成为当地优势物种,分布面积超过 1 100 万 hm^2(张洪艳等,2024)。在不破坏生态平衡的条件下,通过系统分离和鉴定其化学成分,并开展药理活性研究,有助于探索其潜在药用价值,对西部草场的资源利用具有重要意义。

课题组前期从黄花棘豆中发现了 48 个生物碱成分,其中 ochrocephalamines C-F 表现出较好的抗 HBV 的生物活性(Zhou et al., 2019;Xue et al., 2022;张洪艳等,2024)。Zhang 等(2026)以从黄花棘豆中分离得到的生物碱-槐定碱为母体化合物,合成了 11 个衍生物用于抗斜纹夜蛾活性测试,首次发现了兼具杀虫、促进植物生长作用的槐定碱衍生物。除生物碱成分以外,黄花棘豆中是否还有其他的药用成分未被发现。鉴于此,本研究以黄花棘豆为研究对象,继续对黄花棘豆化学成分进行分离和纯化,结果从中发现了 12 个黄酮类化合物,其中化合物 **1** 为一个新的黄酮醇类化合物。通过 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1, 1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)和 2, 2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)[2, 2-azinobis-(3-ethyl-benzothiazole-6-sulfonic acid), ABTS]自由基清除实验,评价了化合物的抗氧化活性。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 材料来源 实验材料于 2023 年 9 月采自青海省海东市平安区石灰窑回族乡红崖村,由青海大学莫重辉教授鉴定为黄花棘豆,植物编号为 Tancj 202309,保存于贵州民族大学民族医药学院天然药物化学实验室。

1.1.2 试剂和仪器 高效液相色谱(high-performance liquid chromatography,HPLC)仪(赛默飞世尔科技有限公司,UItiMate 3000);Nucifera C18E 色谱柱(江苏汉邦科技有限公司);旋转蒸发仪(Heidolph,Made in Germany);循环水式真空泵(巩义市予华仪器有

限公司)；层析柱(江苏三爱思科学仪器有限公司)；GF 254 薄层板(青岛海洋化工产品)；甲醇、无水乙醇、二氯甲烷、正丁醇(分析纯，成都科隆化学品有限公司)；1，1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)(福州飞净生物科技有限公司)；D-葡萄糖、L-葡萄糖(上海源叶生物科技有限公司)；L-半胱氨酸甲酯盐酸盐、邻甲苯异硫氰酸酯(上海阿拉丁生化科技股份有限公司)；维生素 C(Vitamin C，Vc)、2，2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)(ABTS)(合肥巴斯夫生物科技有限公司)；过硫酸钾(分析纯，天津市百世化工有限公司)；全波长酶标仪(Thermo Fisher)。

1.2 化学成分提取和分离

黄花棘豆全草 11.5 kg，经干燥粉碎后以 95% 乙醇加热回流提取 3 次，得粗浸膏 2.0 kg。热水溶解后，依次用石油醚、二氯甲烷和正丁醇萃取。得到石油醚部位 138.73 g、二氯甲烷部位 129.75 g 和正丁醇部位 656.58 g。二氯甲烷部位通过硅胶色谱柱(石油醚-乙酸乙酯，6/1、4/1、2/1、1/1，*V/V*)洗脱，得 8 个组分 Fr. A - Fr. H。正丁醇部位通过 RP-18 色谱柱(甲醇-水，40% ~ 100%，*V/V*)洗脱，得到组分 Fr. I - Fr. P。

Fr.D(26.05 g)通过硅胶色谱柱(石油醚-乙酸乙酯，6/1、4/1、2/1、1/1，*V/V*)洗脱，得到 $Fr.D_1$ - $Fr.D_9$。$Fr.D_5$(1.39 g)通过 Sephadex LH-20 色谱柱(二氯甲烷-甲醇，1/1，*V/V*)纯化，得到化合物 **3**(30.0 mg)和化合物 **6**(161.0 mg)。$Fr.D_6$(2.49 g)通过 Sephadex LH-20 色谱柱(二氯甲烷-甲醇，1/1，*V/V*)纯化，重结晶得到化合物 **7**(258.70 mg)。

Fr.E(46.78 g)通过硅胶色谱柱(石油醚-乙酸乙酯，6/1、4/1、2/1、1/1，*V/V*)分离得到 $Fr.E_1$ - $Fr.E_8$。$Fr.E_3$(1.76 g)经过 Sephadex LH-20(二氯甲烷-甲醇，1/1，*V/V*)纯化得到 $Fr.E_{3-1}$ - $Fr.E_{3-7}$，$Fr.E_{3-5}$(0.69 g)通过硅胶色谱柱(二氯甲烷-甲醇，25/1，*V/V*)分离，得到化合物 **2**(5.0 mg)。

Fr.G(22.64 g)利用 RP-18 色谱柱(甲醇-水，20% ~ 100%，*V/V*)洗脱，得到 $Fr.G_1$ - $Fr.G_{11}$。$Fr.G_6$(1.54 g)通过 Sephadex LH-20 色谱柱(纯甲醇)纯化得 $Fr.G_{6-1}$ - $Fr.G_{6-6}$，$Fr.G_{6-5}$(100.1 mg)通过半制备 HPLC(甲醇-水，65/35，*V/V*，2 mL · min^{-1})分离，得到化合物 **4**(45.0 mg，t_R = 17.55 min)。$Fr.G_7$(1.66 g)通过 Sephadex LH-20 色谱柱(纯甲醇)纯化得到 $Fr.G_{7-1}$ - $Fr.G_{7-6}$，$Fr.G_{7-4}$(0.19 g)通过硅胶色谱柱(二氯甲烷-甲醇，30/1，*V/V*)洗脱，得到 $Fr.G_{7-4-1}$ - $Fr.G_{7-4-3}$，$Fr.G_{7-4-2}$(111.0 mg)借助半制备 HPLC(甲醇-水，67/33，*V/V*，2 mL · min^{-1})分离，得到化合物 **1**(18.0 mg，t_R = 28.2 min)和化合物 **8**(41.0 mg，t_R = 21.5 min)。$Fr.G_9$(4.21 g)通过硅胶色谱柱(二氯甲烷-甲醇，25/1，*V/V*)洗脱，得到 $Fr.G_{9-1}$ - $Fr.G_{9-7}$，$Fr.G_{9-3}$(0.27 g)通过 Sephadex LH-20 色谱柱(二氯甲烷-甲醇，1/1，*V/V*)纯化得 $Fr.G_{9-3-1}$ 和 $Fr.G_{9-3-2}$。$Fr.G_{9-3-2}$(0.24 g)以硅胶层析柱(二氯甲烷-甲醇，25/1，*V/V*)洗脱，再通过 Sephadex LH-20 色谱柱(二氯甲烷-甲醇，1/1，*V/V*)纯化，得到化合物 **5**(60.0 mg)。

Fr.H(49.72 g)通过硅胶色谱柱(二氯甲烷-甲醇，50/1，*V/V*)洗脱，得到 $Fr.H_1$ - $Fr.H_6$。$Fr.H_5$(11.83 g)通过 Sephadex LH-20 色谱柱(二氯甲烷-甲醇，1/1，*V/V*)分离纯化，得到 $Fr.H_{5-1}$ - $Fr.H_{5-4}$，$Fr.H_{5-4}$(0.59 g)通过硅胶层析柱(二氯甲烷-甲醇，15/1，*V/V*)洗脱，得到化合物 **9**(60.0 mg)。

Fr.K(17.0 g)通过 Sephadex LH-20 色谱柱(纯甲醇)分离得到 $Fr.K_1$ - $Fr.K_{10}$，$Fr.K_8$(0.59 g)通过硅胶色谱柱(二氯甲烷-甲醇，15/1，*V/V*)洗脱得 $Fr.K_{8-1}$ - $Fr.K_{8-3}$。$Fr.K_{8-3}$(0.45 g)通过 Sephadex LH-20 色谱柱(二氯甲烷-甲醇，1/1，*V/V*)纯化，得到化合物 **10**(128.0 mg)。

Fr.M(22.92 g)通过硅胶色谱柱(二氯甲烷-甲醇，50/1，*V/V*)洗脱，得 $Fr.M_1$ - $Fr.M_4$，$Fr.M_2$(7.06 g)通过 Sephadex LH-20 色谱柱(纯甲醇)纯化，得到化合物 **11**(75.0 mg)。

Fr.N(19.96 g)通过 Sephadex LH-20 色谱柱(纯甲醇)分离得到 $Fr.N_1$ - $Fr.N_8$，$Fr.N_5$(8.17 g)以硅胶色谱柱(二氯甲烷-甲醇，20/1，*V/V*)洗脱，得到化合物 **12**(26.0 mg)。

1.3 化合物 1 的酸水解和衍生化

取化合物 **1** 约 1 mg，加入 2 mol · L^{-1} HCl(3 mL)在 90 ℃条件下加热 2.5 h，水解。减压浓缩溶液，干燥后加入 1 mL 水溶解，乙酸乙酯萃取 3 次，每次 1 mL。乙酸乙酯萃取得其苷元；水层减压浓缩后得单糖。向单糖中加入 1 mg 的 L-半胱氨酸甲酯盐酸盐和 1mL 吡啶，于 60 ℃水浴加热 1.5 h。再加入 20 μL 邻甲苯异硫氰酸酯反应 1.5 h。另取 D-葡萄糖、L-葡萄糖标准品进行相同衍生化操作，将所得衍生化样品和衍生化标准品通过液相色谱仪分析，色谱条件如下：0.3 mL · min^{-1}，流动相为 A(甲醇)：B(水)(0 ~ 10 min，10% A；10 ~ 20 min，

40% A;20~30 min,60% A;30~40 min,80% A;40~60 min,100% A),通过对比供试品衍生物与各标准品衍生物的保留时间,判断化合物所含单糖结构(牛惠莹等,2025)。

1.4 抗氧化实验

1.4.1 DPPH 自由基清除实验 分别取 100 μL 0.2 mmol·L^{-1} DPPH 乙醇溶液和 100 μL 不同浓度样品溶液于 96 孔板中混合,室温下静置 30 min,在 517 nm 波长下测定吸光值 A。另取 100 μL DPPH 乙醇溶液和 100 μL 去离子水混合测定吸光值 A_0,取 100 μL 去离子水和 100 μL 不同浓度样品混合测定吸光值 A_1(霍晓敏等,2021)。以 Vc 为阳性对照,按上述方法进行测定,计算其清除率。

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%)=\frac{A_0-(A-A_1)}{A_0}\times 100。$$

1.4.2 ABTS 自由基清除实验 将浓度为7.0 mmol·L^{-1} ABTS 二铵盐溶液和 5.0 mmol·L^{-1}过硫酸钾溶液等体积混合,避光反应 18 h 后用无水乙醇将其稀释,使其吸光度在 734 nm 波长下为 0.7 ± 0.02,即得 ABTS 溶液。分别取 100 μL ABTS 溶液和 100 μL 不同浓度样品溶液混合,避光反应 10 min,于 734 nm 波长下测定吸光值 A。另取 100 μL ABTS 和 100 μL 去离子水混合测定吸光值 A_0,取 100 μL 去离子水和 100 μL 不同浓度样品溶液混合测定吸光值 A_1(霍晓敏等,2021)。以 Vc 为阳性对照,按上述方法进行测定,计算其清除率。

$$\text{ABTS 自由基清除率}(\%)=\frac{A_0-(A-A_1)}{A_0}\times 100。$$

2 结果与分析

2.1 结构鉴定

化合物 **1**:黄色固体,溶于吡啶,$[\alpha]_D^{25}$ = 27.5°(c = 0.104,吡啶),$UV_{\lambda max}^{MeOH}$:203(3.24);IR(KBr) ν_{max}3 428、2 940、1 656、1 596、1 501、1 279、1 213、1 177。高分辨质谱准分子离子峰 HR-ESI-MS m/z:705.178 6 $[M+Na]^+$(计算值 705.179 5,$C_{34}H_{34}NaO_{15}$),确定化合物 **1** 的分子式为 $C_{34}H_{34}O_{15}$,不饱和度为 18。

^{1}H-NMR 数据(表 1)显示化合物含有鼠李柠檬素特征吸收峰 δ_H 6.48(1H, d, J = 2.1 Hz, H-6)、6.57(1H, d, J = 2.7 Hz, H-8)、8.50(2H, d, J = 8.9 Hz, H-2′, 6′)、7.22(2H, d, J = 8.9 Hz, H-3′, 5′)和 1 个甲氧基信号 δ_H 3.74(3H, s)。^{13}C-NMR显示化合物含有 34 个碳信号,包括鼠李柠檬素基团信号 δ_C 98.9(C-6)、92.9(C-8)、179.4(C-4)、158.5(C-2)、135.6(C-3)、162.6(C-5)、166.3(C-7)、157.6(C-9)、106.4(C-10)、56.4(7-OCH_3)、122.3(C-1′)、132.5(C-2′, 6′)、116.6(C-3′, 5′)、162.3(C-4′),葡萄糖基团信号 δ_C 104.9(C-1″)、73.5(C-2″)、75.2(C-3″)、70.4(C-4″)、75.5(C-5″)、65.0(C-6″),1 个羰基信号 δ_C 167.3,1 个双键信号 δ_C 145.6、118.1,3 个甲氧基信号 δ_C 61.1、56.6、56.6 和其他 6 个芳香碳信号 δ_C 154.4、154.4、141.3、130.9、106.6、106.6。结合^{1}H-NMR图谱中 1 个糖端基质子信号 δ_H 6.22(J = 7.7 Hz)和酸水解及其衍生化结果,确定该结构中含有 β-D-葡萄糖。^{1}H-NMR 中 2 个反式耦合常数(J = 16.6 Hz)的烯烃质子 δ_H 6.60(H-8‴)、7.80(H-7‴),2 个芳香质子信号 δ_H 6.89(2H, s)及 3 个甲氧基信号 δ_H3.93(s, 3H)、3.82(s, 6H),推测化合物含有 1,3,4,5-四取代苯丙烯酸结构。除 C-5‴(δ_C 116.65)向低场位移了 37.75 ppm,C-6‴(δ_C 124.07)向高场位移了 17.47 ppm 以外,其核磁共振数据与 bosenegaloside A 相似(Morgan et al., 2014)。因此,推测化合物的 C-5‴被甲氧基取代。

根据 HMQC 和 HMBC 谱图可知,δ_H 3.82(3‴、5‴-OCH_3)与 C-3‴(C-5‴)相关,δ_H 3.93(4‴-OCH_3)与 C-4‴相关,表明 C-3‴、C-4‴和 C-5‴各自与甲氧基相连,且 H-2‴(δ_H 6.89)与 C-4‴、C-3‴(C-5‴)、C-7‴相关,进一步确定了化合物的 C-5‴被甲氧基取代。基于上述分析,最终确定化合物 **1** 的结构(图 1)。

化合物 **2**:白色针状结晶。ESI-MS m/z:301 $[M+H]^+$,分子式为 $C_{17}H_{16}O_5$。^{1}H-NMR(400 MHz, Pyridine-d_5)δ:12.36(1H, s, H-10), 11.23(1H, m, H-1), 10.85(1H, m, H-7), 10.63(2H, m, H-2, H-8), 10.51(s, 1H, H-4), 10.20(1H, m, H-11a), 9.29(1H, m, H-6), 4.95(1H, m, H-6a), 7.97(3H, s, -OCH_3), 7.38(3H, s, -OCH_3);^{13}C-NMR(101 MHz, Pyridine-d_5)δ:161.0(C-3), 157.7(C-4a), 154.1(C-9), 152.5(C-11), 135.1(C-10), 133.2(C-1), 122.8(C-6b), 119.3(C-7), 112.0(C-11b), 111.2(C-2), 105.9(C-8), 104.5(C-4), 80.0(C-11a), 66.9(C-6), 60.7(-OCH_3), 56.6(-OCH_3), 40.6(C-6a)。以上数据与文献(Dong et al., 2010)报道的基本一致,

表 1　化合物 1 的 ^{1}H-NMR 和 ^{13}C-NMR 波谱数据(500/126 MHz, Pyridine-d_5)

Table 1　^{1}H-NMR and ^{13}C-NMR spectral data of Compound **1**(500/126 MHz, Pyridine-d_5)

No.	^{1}H	^{13}C	No.	^{1}H	^{13}C
1	—	—	2″	4.80(1H, t, J = 8.4 Hz)	73.5
2	—	158.5	3″	4.34(1H, m)	75.2
3	—	135.6	4″	4.43(1H, d, J = 3.5 Hz)	70.4
4	—	179.4	5″	4.33(1H, d, J = 3.5 Hz)	75.5
5	—	162.6	6″	5.11(1H, dd, J = 11.6, 8.0 Hz) 4.74(1H, dd, J = 11.6, 4.8 Hz)	65.0
6	6.48(1H, d, J = 2.1 Hz)	98.9	1‴	—	130.9
7	—	166.3	2‴, 6‴	6.89(s, 2H)	106.6
8	6.57(1H, d, J = 2.7 Hz)	92.9	3‴, 5‴	—	154.4
9	—	157.6	4‴	—	141.3
10	—	106.4	7‴	7.80, (1H, d, J = 16.6 Hz)	145.6
1′	—	122.3	8‴	6.60, (1H, d, J = 16.6 Hz)	118.1
2′, 6′	8.50(2H, d, J = 8.9 Hz)	132.5	9‴	—	167.3
3′, 5′	7.22(2H, d, J = 8.9 Hz)	116.6	4‴-OCH_3	3.93(3H, s)	61.1
4′	—	162.3	3‴, 5‴-OCH_3	3.82(6H, s)	56.6
1″	6.22(1H, d, J = 7.7 Hz)	104.9	7-OCH_3	3.74(3H, s)	56.4

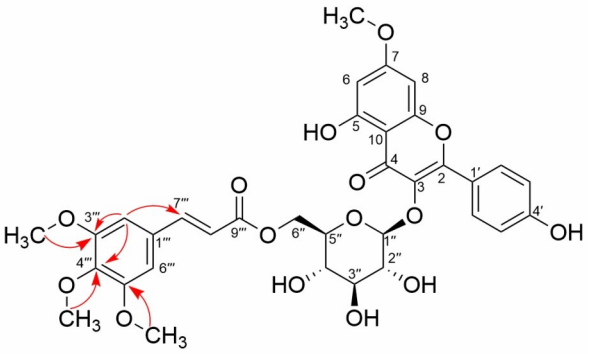

图 1　化合物 1 的结构和相关的 HMBC 信号

Fig. 1　Structure and related HMBC signals of Compound **1**

故鉴定化合物 **2** 为(6*aR*, 11*aR*)-10-hydroxy-3, 9-dimethoxypterocarpan。

化合物 **3**：白色针状结晶。ESI-MS *m/z*：303 [M+H]$^{+}$，分子式为 $C_{17}H_{18}O_5$。^{1}H-NMR(400 MHz, CD_3OD) δ：2.75(1H, dd, J = 16.3, 5.4 Hz, 4-Heq), 2.84(1H, dd, J = 16.1, 11.3 Hz, 4-Hax), 3.40(1H, m, 3-H), 3.80(3H, s, -OCH_3), 3.81(3H, s, -OCH_3), 3.88(1H, t, J = 10.5 Hz, 2-Hax), 4.15(1H, d, J = 10.8 Hz, 2-Heq), 6.25(1H, d, J = 2.9 Hz, 8-H), 6.33(1H, dd, J = 8.5, 2.5 Hz, 6-H), 6.56(1H, d, J = 8.5 Hz, 6′-H), 6.67(1H, d, J = 8.8 Hz, 5′-H), 6.85(1H, d, J = 8.2 Hz, 5-H)。^{13}C-NMR(101 MHz, CD_3OD) δ：157.5(C-7), 156.2(C-9), 149.0(C-2′), 147.2(C-4′), 140.6(C-3′), 131.2(C-5), 128.5(C-1′), 117.7(C-6′), 114.8(C-10), 109.1(C-6), 108.4(C-5′), 103.8(C-8), 71.6(C-2), 61.3(-OCH_3), 56.6(-OCH_3), 33.1(C-3), 32.4(C-4)。以上数据与文献(Li et al., 2025)报道的基本一致，故鉴定化合物 **3** 为 3′,7-二羟基-2′,4′-二甲氧基异黄烷。

化合物 **4**：黄色固体。ESI-MS *m/z*：661 [M+Na]$^{+}$，分子式为 $C_{32}H_{30}O_{14}$。^{1}H-NMR(400 MHz, DMSO-d_6) δ：6.16(1H, s, H-6), 6.58(1H, s, H-8), 8.08(2H, d, J = 8.8 Hz, H-2′, 6′), 6.88(2H, d, J = 8.9 Hz, H-3′, 5′), 5.42(1H, d, J = 8.5 Hz, H-1″), 4.26(1H, dd, J = 11.2, 8.5 Hz, H-6″), 4.04(1H, dd, J = 11.6, 4.4 Hz, H-6″), 7.12(1H, d, J = 1.9 Hz, H-6‴), 6.75(1H, d, J = 8.9 Hz, H-5‴), 6.86(1H, d, J = 1.9Hz, H-2‴), 7.26(1H, d, J = 15.7 Hz, H-7‴), 6.17(1H, d, J = 15.7 Hz, H-8‴), 3.89(3H, s, 3‴-OCH_3), 3.71(3H, s, 7-OCH_3)；^{13}C-NMR(101 MHz, DMSO-d_6) δ：177.6(C-4), 166.2(C-9‴), 165.0(C-7), 160.8(C-5), 160.1(C-4′), 156.7(C-2), 156.2(C-8a), 149.3(C-4‴), 147.8(C-3‴), 144.9(C-7‴), 133.3(C-3), 131.0(C-2′, 6′), 125.5(C-1‴), 123.0(C-6‴), 120.8(C-1′),

115.3(C-3′, 5′), 115.1(C-5‴), 113.8(C-8‴), 110.9(C-2‴), 104.8(C-4a), 101.4(C-1″), 97.7(C-6), 92.2(C-8), 73.1(C-3″), 72.9(C-2″), 71.0(C-5″), 68.3(C-4″), 63.0(C-6″), 55.9(7-OCH_3), 55.6(3‴-OCH_3)。以上数据与文献(Morgan et al.,2014)报道的基本一致,故鉴定化合物**4**为 bosenegaloside A。

化合物**5**:黄色无定型粉末。ESI-MS *m/z*:701 $[M+H]^+$,分子式为 $C_{38}H_{52}O_{12}$。^{1}H-NMR(400 MHz, DMSO-d_6)δ:12.56(1H, s, 5-OH), 10.17(1H, s, 4′-OH), 6.27(1H, s, H-6), 6.68(1H, s, H-8), 8.04(2H, d, J = 9.2 Hz, H-2′, 6′), 6.84(2H, d, J = 9.2 Hz, H-3′, 5′), 3.81(3H, s, 7-OCH_3); ^{13}C-NMR(101 MHz, DMSO-d_6)δ:177.9(C-4), 172.6(C-1‴), 165.3(C-7), 161.2(C-5), 160.4(C-4′), 156.9(C-2), 156.5(C-8a), 133.6(C-3), 131.2(C-2′, 6′), 120.9(C-1′), 115.3(C-3′, 5′), 105.1(C-4a), 101.6(C-1″), 98.0(C-6), 92.3(C-8), 73.3(C-5″), 73.1(C-3″), 71.2(C-2″), 68.5(C-4″), 63.4(C-6″), 56.2(7-OCH_3), 14.1($CH_3(-CH_2)_{14}$)。以上数据与有关专利(Taisho Pharma Co. Ltd., 1993)记载的基本一致,故鉴定该化合物为 5-hydroxy-2-(4-hydroxyphenyl)-7-methoxy-3-[6-*O*-(1-oxohexadecyl)-α-D-altropyranosyl]-4*H*-1-benzopyran-4-one。

化合物**6**:黄色絮状晶体。ESI-MS *m/z*:301 $[M+H]^+$,分子式为 $C_{16}H_{12}O_6$。^{1}H-NMR(400 MHz, DMSO-d_6)δ:12.48(1H, s, 5-OH), 8.06(2H, d, J = 8.8 Hz, H-2′, H-6′), 6.93(2H, d, J = 8.8 Hz, H-3′, H-5′), 6.73(1H, d, J = 2.2 Hz, H-8), 6.33(1H, s, H-6)和 3.84(3H, s, 7-OCH_3); ^{13}C-NMR(101 MHz, DMSO-d_6)δ:176.1(C-4), 164.9(C-7), 160.4(C-9), 159.4(C-5), 156.1(C-4′), 147.3(C-2), 136.0(C-3), 129.6(C-2′, 6′), 121.6(C-1′), 115.5(C-3′, 5′), 104.1(C-10), 97.5(C-6), 92.0(C-8), 56.0(-OCH_3)。以上数据与文献(Hu et al.,2017)报道的基本一致,故鉴定化合物**6**为鼠李柠檬素。

化合物**7**:黄色针状结晶。ESI-MS *m/z*:301 $[M+H]^+$,分子式为 $C_{16}H_{12}O_6$。^{1}H-NMR(400 MHz, DMSO-d_6)δ:12.49(1H, s, 5-OH), 10.11(1H, s, 7-OH), 9.41(1H, s, 3-OH), 8.04(2H, d, J = 8.6 Hz, H-2′, 6′), 6.92(2H, d, J = 8.9 Hz, H-3′, 5′), 6.70(1H, m, H-8), 6.30(1H, m, H-6)和 3.74(3H, s, 4′-OCH_3); ^{13}C-NMR(101 MHz, DMSO-d_6)δ:175.8(C-4), 164.7(C-7), 160.2(C-4′), 159.1(C-9), 155.9(C-5), 147.1(C-2), 135.8(C-3), 129.4(C-2′, 6′), 121.4(C-1′), 115.3(C-3′, 5′), 103.8(C-10), 97.3(C-6), 91.8(C-8), 55.8(-OCH_3)。以上数据与文献(刘志平等,2007)报道的基本一致,故鉴定化合物**7**为 3,5,7-三羟基-4′-甲氧基黄酮醇。

化合物**8**:黄色无定型粉末。ESI-MS *m/z*:567 $[M+H]^+$,分子式为 $C_{29}H_{26}O_{12}$。^{1}H-NMR(400 MHz, Pyridine-d_5)δ:8.48(2H, d, J = 8.9 Hz, H-2′, 6′), 8.05(2H, d, J = 7.8 Hz, H-3‴, 5‴), 7.47(1H, t, J = 7.8 Hz, H-4‴), 7.34(2H, m, H-2‴, 6‴), 6.63(2H, s, H-3′, 5′), 6.25(1H, d, J = 8.9 Hz, H-8), 5.05(1H, d, J = 8.2 Hz, H-6), 5.02(1H, d, J = 7.6 Hz, H-1″), 4.87(1H, dd, J = 11.4, 4.6 Hz, H-6″), 4.81(1H, t, J = 7.9 Hz, H-6″), 4.46(1H, d, J = 2.6 Hz, H-5″), 4.37(1H, m, H-4″), 4.34(1H, m, H-2″), 3.81(3H, s, -OCH_3), 3.63(1H, m, H-3″); ^{13}C-NMR(101 MHz, Pyridine-d_5)δ:179.1(C-4), 166.6(C-7‴), 166.1(C-7), 162.5(C-5), 162.1(C-4′), 158.2(C-2), 157.5(C-9), 135.3(C-3), 133.4(C-4‴), 132.2(C-2′, 6′), 130.9(C-1‴), 130.0(C-2‴, C-6‴), 128.9(C-3‴, C-5‴), 122.0(C-1′), 116.4(C-3′, 5′), 106.4(C-10), 104.4(C-1″), 98.9(C-6), 92.7(C-8), 75.3(C-5″), 74.8(C-3″), 73.2(C-2″), 70.1(C-4″), 65.2(C-6″), 56.3(-OCH_3)。以上数据与文献(Li et al.,2013)报道的基本一致,故鉴定化合物**8**为 3-*O*-鼠李柠檬素-6-*O*-苯甲酰基-β-D-吡喃葡萄糖苷。

化合物**9**:黄色粉末。ESI-MS *m/z*:463 $[M+H]^+$,分子式为 $C_{22}H_{22}O_{11}$。^{1}H-NMR(400 MHz, DMSO-d_6)δ:5.95(1H, d, J = 2.2 Hz, H-6), 6.31(1H, d, J = 2.3 Hz, H-8), 7.70(2H, d, J = 9.5 Hz, H-2′, 6′), 6.47(2H, d, J = 9.1 Hz, H-3′, 5′), 4.99(1H, d, J = 7.1 Hz, H-1″), 2.78(1H, s, H-6″), 2.12(1H, s, H-6″), 4.21(3H, s, 7-OCH_3); ^{13}C-NMR(101 MHz, DMSO-d_6)δ:178.2(C-4), 165.7(C-7), 161.4(C-9), 160.6(C-5), 157.4(C-4′), 156.9(C-2), 134.1(C-3), 131.7(C-2′, 6′), 121.3(C-1′), 115.7(C-3′, 5′), 105.5(C-10), 102.2(C-1″), 98.5(C-6), 92.8(C-

8)，76.3(C-3″)，73.7(C-2″)，71.8(C-5″)，68.5(C-4″)，60.8(C-6″)，56.7(-OCH_3)。以上数据与文献(刘忠艳等，2016)报道的基本一致，故鉴定化合物 **9** 为鼠李柠檬素-3-*O*-*β*-D-半乳糖苷。

化合物 **10**：黄色粉末。ESI-MS *m/z*：465 [M+H]$^+$，分子式为 $C_{21}H_{20}O_{12}$。^{1}H-NMR (400 MHz, DMSO-d_6) *δ*：12.54(1H, s, 5-OH)，7.49(2H, m, H-2′, 6′)，6.74(1H, d, *J* = 9.8 Hz, H-5′)，6.31(1H, d, *J* = 2.1 Hz, H-8)，6.11(1H, d, *J* = 2.1 Hz, H-6)；^{13}C-NMR(101 MHz, DMSO-d_6) *δ*：177.5(C-4)，164.2(C-7)，161.3(C-5)，156.4(C-2)，156.2(C-9)，148.5(C-4′)，144.9(C-3′)，133.4(C-3)，121.7(C-6′)，121.2(C-1′)，116.3(C-5′)，115.3(C-2′)，104.0(C-10)，100.9(C-1″)，98.7(C-6)，93.6(C-8)，77.6(C-5″)，76.6(C-3″)，74.2(C-2″)，70.0(C-4″)，61.0(C-6″)。以上数据与文献(苗青等，2008)报道的基本一致，故鉴定化合物 **10** 为异槲皮苷。

化合物 **11**：黄色固体。ESI-MS *m/z*：501 [M+Na]$^+$，分子式为 $C_{22}H_{22}O_{12}$。^{1}H-NMR (400 MHz, DMSO-d_6) *δ*：6.36(1H, d, *J* = 2.3 Hz, H-6)，6.69(1H, d, *J* = 2.2 Hz, H-8)，7.68(1H, dd, *J* = 8.2, 2.3 Hz, H-6′)，7.59(1H, d, *J* = 2.3 Hz, H-2′)，6.85(1H, d, *J* = 8.7 Hz, H-5′)，3.85(3H, s, 7-OCH_3)；^{13}C-NMR(101 MHz, DMSO-d_6) *δ*：177.7(C-4)，165.2(C-7)，161.0(C-5)，156.7(C-2)，156.3(C-9)，148.7(C-4′)，144.9(C-3′)，133.8(C-3)，122.1(C-6′)，121.1(C-1′)，116.2(C-2′)，115.2(C-5′)，105.0(C-10)，101.8(C-1″)，97.9(C-6)，92.2(C-8)，75.9(C-5″)，73.3(C-3″)，71.3(C-2″)，68.0(C-4″)，60.2(C-6″)，56.2(-OCH_3)。以上数据与文献(汪洋等，2024)报道的基本一致，故鉴定化合物 **11** 为鼠李素-3-*O*-*β*-D-半乳糖苷。

化合物 **12**：黄色粉末。ESI-MS *m/z*：463 [M+H]$^+$，分子式为 $C_{22}H_{22}O_{11}$。^{1}H-NMR (400 MHz, DMSO-d_6) *δ*：12.60(1H, s, 5-OH)，8.07(2H, d, *J* = 8.8 Hz, H-2′, 6′)，6.91(2H, d, *J* = 8.6 Hz, H-3′, 5′)，6.36(1H, s, H-6)，6.72(1H, s, H-8)，5.50(1H, d, *J* = 7.6 Hz, H-1″)，3.85(3H, s, 7-OCH_3)；^{13}C-NMR(101 MHz, DMSO-d_6) *δ*：177.5(C-4)，165.0(C-7)，160.8(C-9)，159.9(C-5)，156.4(C-4′)，156.2(C-2)，133.3(C-3)，130.8(C-2′, 6′)，120.7(C-1′)，115.0(C-3′, 5′)，104.8(C-10)，100.7(C-1″)，97.7(C-6)，92.1(C-8)，77.4(C-3″)，76.3(C-2″)，74.1(C-5″)，69.7(C-4″)，60.7(C-6″)，56.0(-OCH_3)。以上数据与文献(Zhou et al., 2009)报道的基本一致，故鉴定化合物 **12** 为鼠李柠檬素-3-O-*β*-D-葡萄糖苷。

化合物 **1**–**12** 的化学结构见图 2。

2.2 抗氧化实验结果

化合物 **3**、**4**、**6**、**7**、**10**–**12** 表现出抗氧化活性(表 2)。其中，化合物 **6**、**10** 和 **11** 对 DPPH 自由基清除的 IC_{50} 值分别为(4.90±0.35)、(0.80±0.06)、(1.07±0.02) μg·mL^{-1}，清除效果强于 Vc。化合物 **3** 和 **11** 对 ABTS 自由基清除的 IC_{50} 分别为(0.72±0.05)、(0.32±0.05) μg·mL^{-1}，其清除效果与 Vc 相当。这表明黄花棘豆中黄酮类化合物具有较强抗氧化活性。

3　讨论与结论

本研究从黄花棘豆中分离得到 12 个单体化合物，包括 10 个黄酮醇类化合物 [ochrocephalamine Q (**1**)、bosenegaloside A (**4**)、5-hydroxy-2-(4-hydroxyphenyl)-7-methoxy-3-[6-*O*-(1-oxohexadecyl)-*α*-D-altropyranosyl]-4*H*-1-benzopyran-4-one (**5**)、鼠李柠檬素(**6**)、3,5,7-三羟基-4′-甲氧基黄酮醇(**7**)、3-*O*-鼠李柠檬素-6-*O*-苯甲酰基-*β*-D-吡喃葡萄糖苷(**8**)、鼠李柠檬素-3-*O*-*β*-D-半乳糖苷(**9**)、异槲皮苷(**10**)、鼠李素-3-*O*-*β*-D-半乳糖苷(**11**)、鼠李柠檬素-3-*O*-*β*-D-葡萄糖苷(**12**)]，1 个异黄酮类化合物 [3′,7-二羟基-2′,4′-二甲氧基异黄烷(**3**)] 和 1 个紫檀烷类化合物 [(6*aR*, 11*aR*)-10-hydroxy-3, 9-dimethoxypterocarpan(**2**)]。化合物 **1** 为新的黄酮醇类化合物，化合物 **2**、**4** 和 **5** 首次从黄花棘豆中分离得到。

通过 DPPH 和 ABTS 的自由基清除实验评价化合物 **1**–**12** 的抗氧化活性。化合物 **3**、**4**、**6**、**7**、**10**–**12** 均表现出自由基清除活性，其中化合物 **6**、**10** 和 **11** 在 DPPH 自由基清除实验的 IC_{50} 值分别为(4.90±0.35)、(0.80±0.06) 和 (1.07±0.02) μg·mL^{-1}，强于阳性对照 Vc [IC_{50} 值为(5.72±0.52) μg·mL^{-1}]。在 ABTS 自由基清除实验中，化合物 **11** 亦表现出较强的抗氧化活性，其 IC_{50} 值为(0.32±0.05) μg·mL^{-1}。

化合物 **1** 没有表现出对 DPPH 和 ABTS 的自由

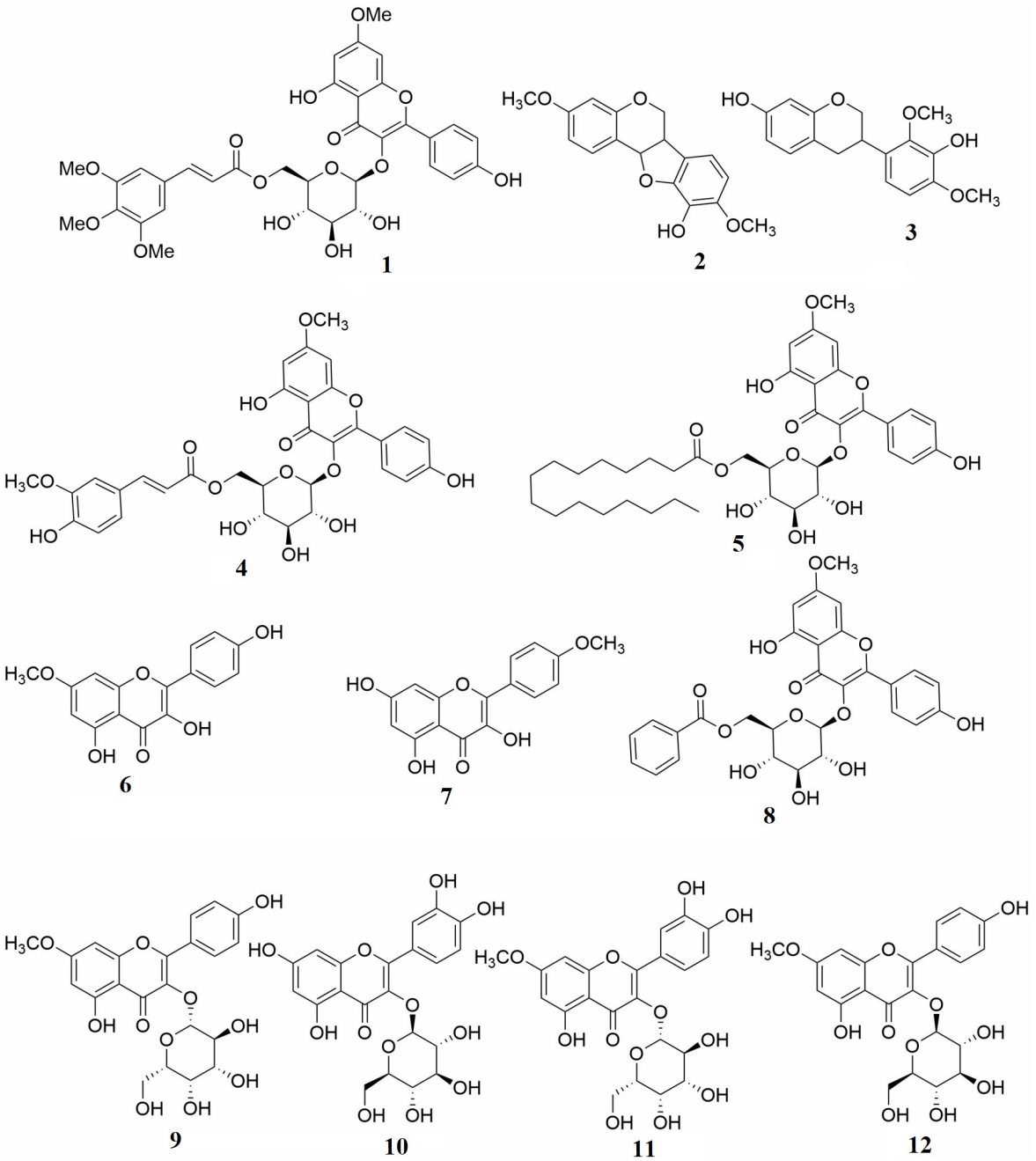

图 2 化合物 1-12 的化学结构式

Fig. 2 Chemical structural formulas of compounds **1-12**

基清除活性,但是从化学结构上看,其以苯丙烯酸与鼠李柠檬素-3-*O*-*β*-D-葡萄糖 C-6″连接的形式存在(化合物 **1** 和 **4**),且首次在黄花棘豆中发现。化合物 **4** 对可溶性环氧化物水解酶(soluble epoxide hydrolase,sEH)具有抑制作用,抑制常数 Ki 为(7.6±3.2) μmol · L^{-1}(Morgan et al., 2014)。sEH 的抑制可以有效维持内源性环氧二烯三烯酸水平,降低二羟二烯三烯酸水平,对心血管、中枢神经系统和代谢性疾病具有治疗潜力(Sun et al., 2021)。然而,化合物 **1** 是否具有治疗心血管疾病和神经性疾病的作用,有待于进一步研究。

综上所述,黄花棘豆在我国的资源储备丰富,所含黄酮类化学成分表现出较强的抗氧化活性。本研究进一步丰富了黄花棘豆中的化学成分,为其在功能食品、保健品及化妆品等领域的应用提供了基本的研究资料。

表 2　化合物的自由基清除实验结果

Table 2　Radical scavenging experiment results for compounds

化合物 Compound	DPPH IC_{50} ($\mu g \cdot mL^{-1}$)	ABTS IC_{50} ($\mu g \cdot mL^{-1}$)
3	39.40±4.06	0.72±0.05
4	83.01±4.47	5.48±0.30
6	4.90±0.35	2.80±0.29
7	10.71±0.58	1.01±0.69
10	0.80±0.06	5.14±0.66
11	1.07±0.02	0.32±0.05
12	—	51.95±3.11
Vc *	5.72±0.52	0.24±0.07

注：* 表示阳性对照；—表示无清除作用。

Note: * indicates positive control; — indicates no clearing effect.

参考文献：

Dong X R, Liang Y Z, Wang B, et al., 2010. Simultaneous separation of four flavonoids and two astragalosides from Radix Astragali by semi-preparative LC [J]. Chromatographia, 71(3): 225-231.

Editorial Committee of Flora Reipublicae Popularis Sinicae, CAS, 1998. Flora Reipublicae Popularis Sinicae: Vol. 42(2) [M]. Beijing: Science Press: 21. [中国科学院中国植物志编辑委员会, 1998. 中国植物志: 第 42(2)卷 [M]. 北京: 科学出版社: 21.]

Hu T, Liu Q M, He X W, et al., 2017. Identification of bioactives from *Astragalus chinensis* L. f. and their antioxidant, anti-inflammatory and anti-proliferative effects [J]. Journal of Food Science and Technology, 54(13): 4315-4323.

Huo X M, Xue Z, Zhang Y K, et al., 2021. Optimization of the extraction process and antioxidant activities of a potential active ingredient against mastitis from *Clerodendrum cyrtophyllum* Turez [J]. Feed Research, 44(23): 78-83. [霍晓敏, 薛站, 张雅昆, 等, 2021. 黔产大青木中潜在抗奶牛乳房炎活性组分的提取工艺及抗氧化活性研究 [J]. 饲料研究, 44(23): 78-83.]

Li G L, Liu Z Y, Xie J C, et al., 2025. Chemical constituents of *Oxytropis ochrocephala* [J]. Molecules, 30(12): 2489.

Li X, Zhang S D, Jin H Z, et al., 2013. A new flavonol from *Oxytropis ochrocephala* Bunge [J]. Natural Product Research, 27(6): 554-557.

Liu Z P, Cui J G, Liu H X, et al., 2007. Chemical constituents from leaves of *Livistona chinensis* [J]. Guihaia, 27(1): 140-142. [刘志平, 崔建国, 刘红星, 等, 2007. 蒲葵叶化学成分研究 [J]. 广西植物, 27(1): 140-142.]

Liu Z Y, Zhao B Y, Wang J J, et al., 2016. Isolation and structural identification of chemical constituents from *Astragalus strictus* [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 44(10): 360-362. [刘忠艳, 赵宝玉, 王建军, 等, 2016. 茎直黄芪化学成分分离与结构鉴定 [J]. 江苏农业科学, 44(10): 360-362.]

Miao Q, Bao H Y, Piao S J, et al., 2008. Study on chemical constituents of *Duchesnea indica* Andr. Focke [J]. Academic Journal of the Second Military Medical University, 29(11): 1366-1370. [苗青, 包海燕, 朴淑娟, 等, 2008. 蛇莓乙酸乙酯萃取物的化学成分 [J]. 第二军医大学学报, 29(11): 1366-1370.]

Morgan A M A, Kim J H, Kim S K, et al., 2014. A new flavonol glycoside from the leaves of *Boscia senegalensis* [J]. Bulletin of the Korean Chemical Society, 35(12): 3447-3452.

Niu H Y, Fang H B, Si Y Y, et al., 2025. Isolation and identification of three new compounds from *Zingiber officinale* (Ginger) peel [J]. Acta Pharmaceutica Sinica, 60(4): 1046-1051. [牛惠莹, 方鸿斌, 司盈盈, 等, 2025. 姜皮中三个新化合物的分离与鉴定 [J]. 药学学报, 60(4): 1046-1051.]

Sun C P, Zhang X Y, Morisseau C, et al., 2021. Discovery of soluble epoxide hydrolase inhibitors from chemical synthesis and natural products [J]. Journal of Medicinal Chemistry, 64(1): 184-215.

Taisho Pharma Co. Ltd., 1993. Flavonol derivative for treatment of Alzheimer's disease [P]. Japan: JP05078384 A. 1993-03-30.

Wang Y, Xue J Y, Lei Y, et al., 2024. Chemical constituents and anti-inflammatory activity of *Pimpinella candolleana* (Ⅱ) [J]. Natural Product Research and Development, 36(8): 1357-1367. [汪洋, 薛靖怡, 雷艳, 等, 2024. 杏叶防风的化学成分及抗炎活性研究(Ⅱ) [J]. 天然产物研究与开发, 36(8): 1357-1367.]

Xue Z, Zhang Y K, Yi P, et al., 2022. Ochrocephalamines E and F, two new alkaloids from *Oxytropis ochrocephala* Bung [J]. Tetrahedron Letters, 102: 153943.

Zhang H Y, Chen R J, Zhang Y K, et al., 2024. Study on the extraction technology of total alkaloids from *Oxytropis ochrocephala* Bunge and the activity of anti-*Spodoptera litura* [J]. Chemical Research and Application, 36(10): 2249-2255. [张洪艳, 陈仁俊, 张雅昆, 等, 2024. 黄花棘豆总生物碱提取工艺及抗斜纹夜蛾活性研究 [J]. 化学研究与应用, 36(10): 2249-2255.]

Zhang H Y, Zhang Y K, Chen R J, et al., 2026. Sophoridine derivatives: synthesis, anti-*Spodoptera litura* activity, and plant growth-promoting effects [J]. Process Biochemistry, 165: 62-68.

Zhao B Y, Mo Z H, 2017. Techniques for preventing and treating poisoning from toxic weeds in natural grasslands Livestock [M]. Xianyang: Northwest A & F University Press: 7. [赵宝玉, 莫重辉, 2017. 天然草原牲畜毒害草中毒防治技术 [M]. 咸阳: 西北农林科技大学出版社: 7.]

Zhou G X, Lu C L, Wang H S, et al., 2009. An acetyl flavonol from *Nervilia fordii* (Hance) Schltr [J]. Journal of Asian Natural Products Research, 11(6): 498-502.

Zhou K S, Yi P, Yang T, et al., 2019. Ochrocephalamines B-D, three alkaloids from *Oxytropis ochrocephala* Bunge [J]. Organic Letters, 21(13): 5051-5054.

（责任编辑　周翠鸣）