• 化学成分 •

红花中 2 个新的 γ-丁内酯衍生物

马　坤[1]，范国莲[1]，李明昊[1,2]，黄湘华[1,2]，熊　亮[1,2]，刘　娟[1*]，彭　成[1*]

1. 成都中医药大学药学院，中药种质资源创新与高效利用实验室，四川 成都　611137
2. 成都中医药大学现代中药产业学院，四川 成都　611137

摘　要：目的　研究红花 *Carthamus tinctorius* 的化学成分及抗炎活性。**方法**　采用硅胶、Sephadex LH-20 凝胶、聚酰胺柱色谱、制备薄层色谱以及半制备高效液相色谱等多种分离技术，对红花的化学成分进行分离纯化，运用 MS、1D-NMR、2D-NMR 等现代波谱学手段鉴定化合物结构，并对化合物进行抗炎活性评价。**结果**　从红花中共分离得到 8 个化合物，分别鉴定为 (4*R*,5*R*)-4-(4-羟基苯基)-5-甲基-γ-丁内酯（**1**）、(5*S*)-3-羟基-4-(4-羟基苯基)-5-甲基-γ-丁烯内酯（**2**）、scopoletin（**3**）、二氢阿魏酸乙酯（**4**）、决明顺反二聚苯丙素（**5**）、(*E*)-4-(对羟基苯基)-3-丁烯-2-酮（**6**）、对羟基苯乙酸乙酯（**7**）、acetoisovanillone（**8**）。**结论**　化合物 **1** 和 **2** 为新化合物，命名为吴茱萸新内酯 C 和吴茱萸新内酯 D，化合物 **4** 为首次从红花中分离得到，化合物 **5** 为首次从菊科中分离得到。化合物 **4** 和 **6** 在 50 μmol/L 下均能够不同程度地抑制脂多糖（lipopolysaccharide，LPS）诱导的 RAW264.7 细胞一氧化氮释放，表现出较好的抗炎活性。

关键词：红花；γ-丁内酯衍生物；吴茱萸新内酯 C；吴茱萸新内酯 D；二氢阿魏酸乙酯；决明顺反二聚苯丙素；抗炎活性

中图分类号：R284.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0253 - 2670(2026)21 - 8393 - 07

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.21.001

Two new γ-butyrolactone derivatives from *Carthamus tinctorius*

MA Kun[1], FAN Guolian[1], LI Minghao[1,2], HUANG Xianghua[1,2], XIONG Liang[1,2], LIU Juan[1], PENG Cheng[1]

1. Lab for Innovation & Effective Uses of Chinese Drug Germplasm Resources, School of Pharmacy, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 611137, China
2. School of Modern Industry for Traditional Chinese Medicine, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 611137, China

Abstract: Objective　To investigate the chemical constituents of *Carthamus tinctorius* and evaluate their anti-inflammatory activity. **Methods**　Various separation techniques, including silica gel, Sephadex LH-20 gel, polyamide column chromatography, preparative thin-layer chromatography (TLC), and semi-preparative high-performance liquid chromatography (HPLC), were employed to isolate and purify the chemical constituents from *C. tinctorius*. The structures of the isolated compounds were elucidated by modern spectroscopic methods such as MS, 1D-NMR and 2D-NMR. The anti-inflammatory activity of the compounds was evaluated *in vitro*. **Results**　Eight compounds were isolated and identified as (4*R*,5*R*)-4-(4-hydroxyphenyl)-5-methyl-γ-butyrolactone (**1**), (5*S*)-3-hydroxy-4-(4-hydroxyphenyl)-5-methyl-γ-butenolide (**2**), scopoletin (**3**), ethyl dihydroferulate (**4**), cassia *cis-trans* diphenylpropanoid (**5**), (*E*)-4-(*p*-hydroxyphenyl)-3-buten-2-one (**6**), ethyl-*p*-hydroxyphenylacetate (**7**) and acetoisovanillone (**8**). **Conclusion**　Compounds **1** and **2** are new compounds, named evodinoid C and evodinoid D, compound **4** was isolated from *C. tinctorius* for the first time and compound **5** represents the first report from the Asteraceae family. Compounds **4** and **6** significantly inhibited nitric oxide (NO) release in LPS-induced RAW264.7 cells at 50 μmol/L, exhibiting good anti-inflammatory activity.

Key words: *Carthamus tinctorius* L.; γ-butyrolactone derivatives; evodinoid C; evodinoid D; ethyl dihydroferulate; cassia *cis-trans* diphenylpropanoid; anti-inflammatory activity

收稿日期：2026-10-13

基金项目：国家自然基金区域重点项目（U24A20790）；四川省自然科学基金（2025NSFSC0569，2024NSFSC0054）；四川省科技教育联合基金重点项目（2025NSFSC2033）；西藏自治区重点研发计划（XZ202501ZY0052）；四川省中医药管理局科学技术研究专项（2024ZD02）

作者简介：马　坤，硕士，主要从事中药药效物质基础研究。E-mail: 3158941575@qq.com

***通信作者：**刘　娟，副教授，研究方向为中药药效物质基础及开发应用研究。E-mail: liuj02022@163.com

彭　成，博士生导师，教授，研究方向为中药药效与毒理研究。Tel: (028)61800232　E-mail: pengchengchengdu@126.com

红花为菊科（Asteraceae）红花属植物红花 *Carthamus tinctorius* L.的干燥花，为我国传统活血化瘀类中药，始载于《开宝本草》，历代本草均有收录[1]。红花主要分布于新疆、河南、四川、云南等地，现全国多地均有栽培，多生于干燥温暖气候[2]。具有活血通经、散瘀止痛等功效[3]，临床常用于经闭、痛经、胸痹心痛及跌打损伤等症。现代药理研究表明，红花具有改善微循环、抗炎、抗动脉粥样硬化及心脑血管保护等多种活性[4-5]。

近年来，已从红花中分离鉴定出黄酮、酚酸、聚炔、木脂素等多种类型化合物[6-8]。目前，研究主要聚焦于红花黄酮类成分，尤其以羟基红花黄色素 A 为代表的黄酮类研究较多[9-11]。而针对红花非黄酮类小分子天然化合物研究相对较少，尤其是丁内酯衍生物在红花中报道较为少见。课题组前期从红花中发现了新颖的聚炔苷和倍半萜成分[12-13]。为进一步发现更多的新颖非黄酮类成分，本研究综合运用多种色谱分离技术，对红花的非黄酮类化学成分进行系统分离，结合波谱学手段进行结构鉴定（图 1），分别为 (4*R*,5*R*)-4-(4-羟基苯基)-5-甲基-γ-丁内酯 [(4*R*,5*R*)-4-(4-hydroxyphenyl)-5-methyl-γ-butyrolactone，**1**]、(5*S*)-3-羟基-4-(4-羟基苯基)-5-甲基-γ-丁烯内酯 [(5*S*)-3-hydroxy-4-(4-hydroxyphenyl)-5-methyl-γ-butenolide，**2**]、scopoletin（**3**）、二氢阿魏酸乙酯（ethyl dihydroferulate，**4**）、决明顺反二聚苯丙素（cassia *cis-trans* diphenylpropanoid，**5**）、(*E*)-4-(对羟基苯基)-3-丁烯-2-酮 [(*E*)-4-(*p*-hydroxyphenyl)-3-buten-2-one，**6**]、对羟基苯乙酸乙酯（ethyl-*p*-hydroxyphenylacetate，**7**）、acetoisovanillone（**8**）。其中，化合物 **1** 和 **2** 为新化合物，命名为吴茱萸新内酯 C 和吴茱萸新内酯 D；化合物 **4** 为首次从红花中分离得到，化合物 **5** 为首次从菊科中分离得到。采用脂多糖（lipopolysaccharide，LPS）诱导的 RAW264.7 巨噬细胞炎症模型评价所获得化合物的体外抗炎活性，旨在丰富红花化学成分的结构多样性，并为其抗炎药效物质基础研究及合理开发利用提供科学依据。

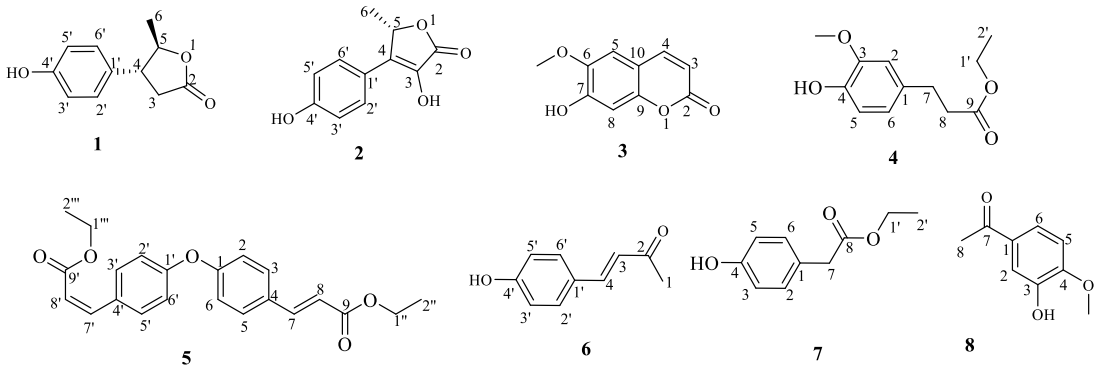


图 1　红花中的化合物结构

Fig. 1　Structures of compounds from *C. tinctorius*

1　仪器与材料

1.1　仪器

Agilent 6230 LC/TOF 高分辨质谱仪（美国 Agilent 公司）；Bruker-600 MHz 核磁共振波谱仪（德国 Bruker 公司）；Agilent 1220 型高效液相色谱仪（美国 Agilent 公司）；SQP 型分析天平（北京赛多利斯科学仪器有限公司）；RE-2000A 旋转蒸发仪（上海贤德实验仪器有限公司）；Millipore Milli-Q water purification system 纯水仪（美国 Merck Millipore 公司）；Rudolph Autopol I 自动旋光仪（美国 Rudolph 公司）；Spectrum One FT-IR Spectrometer 红外光谱仪（美国 PerkinElmer 公司）；圆二色光谱仪（英国 Applied Photophysics 公司）；可调式移液器（美国 Thermo Fisher Scientific 公司）；SW-CJ-2F 型双人双面净化工作台（苏州净化设备有限公司）；Varioskan Flash Multiskan MK3 酶标仪（美国 Thermo 公司）；D101 型大孔吸附树脂（成都市科隆化学品有限公司）；柱色谱硅胶（200～300 目，烟台江友硅胶开发有限公司）；Sephadex LH-20 凝胶（瑞典 Amersham Pharmacia 公司）；GF_{254} 薄层层析硅胶及 GF_{254} 高效制备薄层板（安徽良臣硅源材料有限公司）；Ultimate XB-C_{18} 色谱柱 [250 mm×10 mm，5 μm，月旭科技（上海）股份有限公司]；甲醇（色谱级，美国 Sigma 公司）；氘代甲醇（上海泰坦科技股份有限公司）；其余试剂均为分析纯（成都市科隆化学品有限公司）。

1.2 细胞与试剂

小鼠单核巨噬细胞 RAW264.7 购自赛百慷（上海）生物技术股份有限公司；DMEM 培养基购自赛默飞世尔科技有限公司；胎牛血清、青霉素-链霉素溶液购自武汉普诺赛生命科技有限公司；LPS 购自北京索莱宝科技有限公司；一氧化氮检测试剂盒购自上海碧云天生物技术有限公司；CCK-8 试剂盒购自白鲨生物科技有限公司；姜黄素购自成都曼斯特生物科技有限公司。

红花药材于 2018 年 6 月采自四川省巴中市平昌县石垭乡锣乐村。经成都中医药大学药学院高继海副教授鉴定为菊科红花属植物红花 *C. tinctorius* L.的干燥花，药材标本（CT-20180608）现存于成都中医药大学西南特色药材创新药物成分研究所。

2 方法

2.1 提取与分离

取干燥红花药材 50 kg，粉碎后加水煎煮提取 2 次，每次 1 h，合并水煎液，经减压浓缩得到浸膏 16 kg。采用 D-101 大孔吸附树脂对红花水提物浸膏进行分离，依次用去离子水、20%乙醇、50%乙醇、70%乙醇、90%乙醇进行洗脱，回收溶剂后得到各洗脱部位（A～E），其中 C 部位用于后续分离。

C 部位采用聚酰胺柱色谱进行分离，以 30%、50%、70%、95%乙醇为流动相进行洗脱，得到 4 个流分（Fr. 1～4）。Fr. 1 经硅胶柱色谱分离，以二氯甲烷-甲醇为流动相进行梯度洗脱（50∶1～0∶1），得到 13 个流分（Fr. 1-1～1-13）。

其中，Fr. 1-4 经 Sephadex LH-20 凝胶柱色谱分离（二氯甲烷-甲醇 10∶1）得到 12 个亚组分（Fr. 1-4-1～1-4-12）。Fr. 1-4-11 经反相半制备高效液相色谱（甲醇-水 45∶55）纯化得到化合物 **2**（1.61 mg，t_R＝25 min）。

Fr. 1-4-7 通过制备薄层色谱分离，以二氯甲烷-甲醇（10∶1）展开，得到 1 个亚组分 Fr. 1-4-7-1，该组分再经反相半制备高效液相色谱（甲醇-水 40∶60）纯化得到化合物 **6**（6.03 mg，t_R＝34 min）。

Fr. 1-4-8 经反相 C_{18} 柱色谱分离，以甲醇-水（10∶90～100∶0）为流动相进行梯度洗脱，得到 5 个亚组分（Fr. 1-4-8-1～1-4-8-5）。其中，Fr. 1-4-8-1 经反相半制备高效液相色谱（甲醇-水 35∶65）纯化得到化合物 **3**（1.87 mg，t_R＝33 min）、**1**（8.02 mg，t_R＝35 min）和 **8**（1.32 mg，t_R＝31 min）；Fr. 1-4-8-3 经反相半制备高效液相色谱（甲醇-水 45∶55）纯化得到化合物 **7**（2.25 mg，t_R＝43 min）；Fr. 1-4-8-4 经反相半制备高效液相色谱（甲醇-水 50∶50）纯化得到化合物 **4**（1.47 mg，t_R＝29 min）；Fr. 1-4-8-5 经反相半制备高效液相色谱（甲醇-水 50∶50）纯化得到化合物 **5**（5.11 mg，t_R＝33 min）。

2.2 抗炎活性研究

2.2.1 细胞毒活性 采用 CCK-8 法检测化合物 **1**～**8** 对小鼠巨噬细胞 RAW264.7 的细胞毒性[14]。在 37 ℃、5% CO_2 的条件下，将 RAW264.7 细胞置于含 10%胎牛血清和 1%青霉素-链霉素溶液的 DMEM 培养基中培养。取对数生长期细胞，以 4×10^4 个/孔的密度接种于 96 孔板，培养 24 h。待测化合物的初筛浓度为 50 μmol/L，每孔体积为 100 μL，同时设置空白组（培养基）和溶剂对照组（等量的二甲基亚砜），所有组均设置 3 个复孔。在培养箱中继续培养 24 h 后，弃去培养基，每孔加入 100 μL 含有 10%CCK-8 的培养基，孵育 1～2 h，采用酶标仪在 450 nm 波长处测定吸光度（A）值。按公式计算细胞活力。

$$细胞活力=(A_{样品}-A_{空白})/(A_{溶剂对照}-A_{空白})$$

2.2.2 细胞抗炎活性 采用 Griess 法评价化合物对 LPS 诱导的 RAW264.7 释放 NO 的影响[15]。取对数生长期的 RAW 264.7 细胞，以 4×10^4 个/孔的密度接种于 96 孔板，培养 24 h 后吸弃培养基。对照组加入等量的培养基，模型组、阳性组（姜黄素）和实验组均加入 1 μg/mL 的 LPS，随后，阳性组加入姜黄素（12.5 μmol/L），实验组加入不同化合物溶液（50 μmol/L），每组均设置 3 个复孔，孵育 24 h 后，各组取 50 μL 细胞上清液，先加 50 μL Griess 试剂 I 混合，避光静置 5 min 后，再加入 50 μL Griess 试剂 II 混合，再避光静置 5 min，采用酶标仪在 540 nm 波长下测定 A 值。实验重复 3 次。

3 结果

3.1 结构鉴定

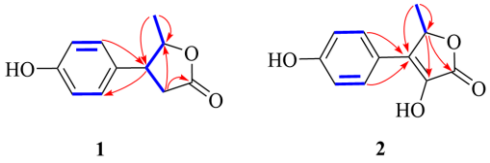
化合物 **1**：黄色油状物，HR-ESI-MS 谱显示准分子离子峰 *m/z*: 215.068 0 $[M+Na]^+$（计算值 215.068 4），推测其分子式为 $C_{11}H_{12}O_3$，不饱和度为 6。化合物 **1** 的 ^{1}H-NMR 谱 (600 MHz, CD_3OD) 中，可观察到 1 个 AA′XX′自旋系统的芳香质子信号 [δ 7.15 (2H, d, J = 8.4 Hz, H-2′, 6′), 6.77 (2H, d, J = 8.4 Hz, H-3′, 5′)]，1 个连氧次甲基信号 [δ 4.52 (1H, m, H-5)]，1 个次甲基信号 [δ 3.21 (1H, dd, J = 9.0, 1.8 Hz, H-4)]，1 个亚甲基信号 [δ 2.83 (1H, dd, J = 1.2,

1.8 Hz, H-3a), 2.81 (1H, dd, *J* = 1.8, 3.0 Hz, H-3b)] 以及 1 个甲基信号 [*δ* 1.35 (3H, d, *J* = 7.2 Hz, H-6)]。^{13}C-NMR (150 MHz, CD_3OD) 显示化合物 1 共有 11 个碳信号（表 1），可归属为 1 个甲基 (δ_C 19.0)，6 个次甲基 [包含 4 个芳香碳 (δ_C 129.5 × 2、116.7 × 2)]，1 个亚甲基 (δ_C 38.4) 以及 3 个季碳 [包含 1 个酯羰基 (δ_C 178.5)]。综合上述数据和分子式，推断化合物 **1** 是 1 个类似 evodinoid B[16]的 γ-丁内酯衍生物，其主要区别在于化合物 **1** 的 C-3′位缺少 1 个羟基。在 ^{1}H-^{1}H COSY 谱中，H-3/H-4/H-5/H-6 存在连续相关信号（图 2）；HMBC 谱中，H-3 与 C-2、C-5 相关，H-6 与 C-4、C-5 相关，证实了化合物 **1** 含有 1 个甲基取代的五元内酯环，且甲基连接在 C-5 上，此外，HMBC 谱中 H-3 与 C-1′，以及 H-4 与 C-2′，C-6′的相关信号，表明对羟基苯基连接在 C-4 位，故化合物 **1** 的平面结构得以确定。化合物的相对构型通过 NOESY 数据确定，在化合物 **1** 的 NOESY 谱中，发现 H-4 与 H-6，H-5 和 H-2′相关信号，表明 H-4 与甲基位于同侧，而 H-5 和苯环处于同侧（图 3）。为进一步确定化合物 **1** 的绝对构型，测定了化合物 **1** 的圆二色谱（ECD），并计算其理论 ECD 谱。通过比较发现，化合物 **1** 的实测 ECD 谱与(4*R*,5*R*)-**1** 的理论 ECD 谱基本一致（图 4）。因此，化合物 **1** 的结构鉴定为 (4*R*,5*R*)-4-(4-羟基苯基)-5-甲基-γ-丁内酯，并将其命名为吴茱萸新内酯 C。

表 1　化合物 1 和 2 的 ^{1}H-NMR 及 ^{13}C-NMR 数据 (600/150 MHz, CD_3OD)

Table 1　^{1}H NMR and ^{13}C NMR data for compounds 1 and 2 (600/150 MHz, CD_3OD)

碳位	1		2	
	δ_H	δ_C	δ_H	δ_C
2		178.5		171.8
3	2.83 (1H, dd, *J* = 1.2, 1.8 Hz) 2.81 (1H, dd, *J* = 1.8, 3.0 Hz)	38.4		136.7
4	3.21 (1H, q, *J* = 9.0, 1.8 Hz)	50.2		134.0
5	4.52 (1H, m)	85.1	5.43 (1H, dd, *J* = 6.6, 1.2 Hz)	76.9
6	1.35 (3H, d, *J* = 7.2 Hz)	19.0	1.46 (3H, d, *J* = 6.6 Hz)	21.0
1′		130.3		123.3
2′	7.15 (1H, d, *J* = 8.4 Hz)	129.5	7.56 (1H, d, *J* = 9.0 Hz)	130.3
3′	6.77 (1H, d, *J* = 8.4 Hz)	116.7	6.85 (1H, d, *J* = 9.0 Hz)	116.5
4′		158.0		159.3
5′	6.77 (1H, d, *J* = 8.4 Hz)	116.7	6.85 (1H, d, *J* = 9.0 Hz)	116.5
6′	7.15 (1H, d, *J* = 8.4 Hz)	129.5	7.56 (1H, d, *J* = 9.0 Hz)	130.3



1　　2

图 2　化合物 1 和 2 的主要 HMBC 和 ^{1}H-^{1}H COSY 信号

Fig. 2　Key HMBC and ^{1}H-^{1}H COSY correlations of compounds 1 and 2

化合物 **2**：白色粉末，HR-ESI-MS 准分子离子峰 *m*/*z* 207.065 7 $[M+H]^+$（计算值 207.065 2），推测其分子式为 $C_{11}H_{10}O_4$，不饱和度为 7。IR 光谱提示分子中含有羟基 (3 345 cm^{-1})，内酯羰基 (1 707 cm^{-1}) 及烯基 (1 666 cm^{-1}) 等官能团。综合分析 ^{1}H NMR、^{13}C-NMR 和 DEPT 谱数据，表明化合物 **2** 为 γ-丁内酯衍生物，其官能团与化合物 **1** 相似，均含有 1 个甲基、1 个五元内酯环和 1 个对羟基苯基，两者的主要区别在于：化合物 **2** 的 C-3 与 C-4 形成

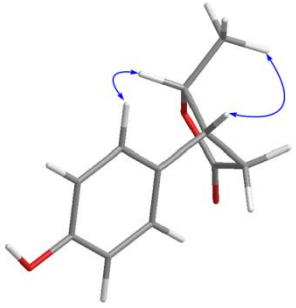


图 3　化合物 1 的 NOESY 信号

Fig. 3　Key NOESY correlations of compound 1

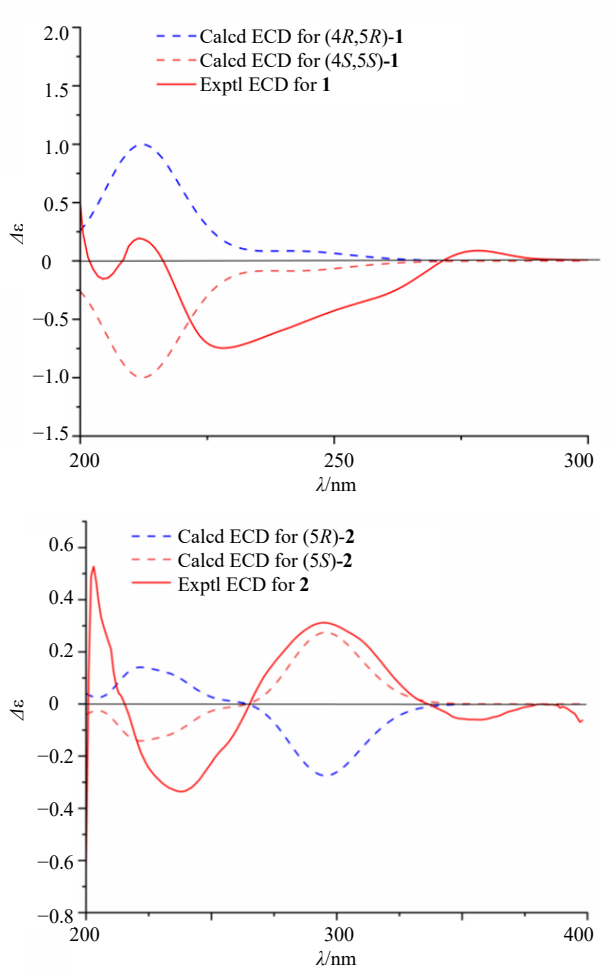


图 4　化合物 1 和 2 的实测 ECD 谱和计算 ECD 谱

Fig. 4　Experimental ECD and calculated ECD spectra of compounds 1 and 2

双键，且 C-3 位连有羟基。为进一步确证其平面结构，开展了 2D NMR 实验（图 2），在 ^{1}H-^{1}H COSY 谱中，可看到 H-5/H-6 的相关信号，在 HMBC 谱中，H-5 与 C-6、C-4、C-3 相关，H-6 与 C-5、C-4 相关，H-2′/6′与 C-4 相关，这些数据共同确定了甲基位于 C-5 位，对羟基苯甲基位于 C-4 位。综合以上信息，化合物 **2** 的平面结构得以确定。为确定其绝对构型，进一步测定了化合物 **2** 的 ECD 谱，并计算其理论 ECD 谱。通过比较发现，化合物 **2** 的实测 ECD 谱与 (5*S*)-**2** 的理论 ECD 谱基本一致（图 4）。因此，化合物 **2** 的结构被鉴定为 (5*S*)-3-羟基-4-(4-羟基苯基)-5-甲基-γ-丁烯内酯，并命名为吴茱萸新内酯 D。

化合物 **3**：黄色针状结晶（甲醇），HR-ESI-MS *m*/*z* 215.031 7 [M＋Na]$^+$（计算值 215.032 0），分子式为 $C_{10}H_8O_4$。^{1}H-NMR (600 MHz, CD_3OD) *δ*: 7.84 (1H, d, *J* = 9.0 Hz, H-4), 7.12 (1H, s, H-5), 6.77 (1H, s, H-8), 6.22 (1H, d, *J* = 9.0 Hz, H-3), 3.91 (3H, s, 6-OCH_3)；^{13}C-NMR (150 MHz, CD_3OD) *δ*: 164.1 (C-2), 153.0 (C-7), 151.4 (C-9), 147.1 (C-4), 146.1 (C-6), 112.6 (C-3), 112.5 (C-10), 109.9 (C-5), 104.0 (C-8), 56.8 (OCH_3-6)。以上数据与文献报道一致[17]，故鉴定化合物 **3** 为 scopoletin。

化合物 **4**：浅黄色粉末，HR-ESI-MS *m*/*z* 247.094 7 [M＋Na]$^+$（计算值 247.094 6，分子式为 $C_{12}H_{16}O_4$。^{1}H-NMR (600 MHz, CD_3OD) *δ*: 6.81 (1H, d, *J* = 7.8 Hz, H-5), 6.66 (1H, d, *J* = 1.8 Hz, H-2), 6.63 (1H, dd, *J* = 7.8, 1.8 Hz, H-6), 4.09 (2H, q, *J* = 7.2 Hz, H-1′), 3.81 (3H, s, 3-OCH_3), 2.79 (2H, t, *J* = 7.8 Hz, H-8), 2.55 (2H, t, *J* = 7.8 Hz, H-7), 1.21 (3H, t, *J* = 7.2 Hz, H-2′)；^{13}C-NMR (150 MHz, CD_3OD) *δ*: 174.9 (C-9), 147.5 (C-3, 4), 134.9 (C-1), 120.4 (C-6), 116.4 (C-5), 112.9 (C-2), 61.5 (C-1′), 56.5 (3-OCH_3), 37.2 (C-8), 31.7 (C-7), 14.5 (C-2′)。以上数据与文献报道一致[18]，故鉴定化合物 **4** 为二氢阿魏酸乙酯。

化合物 **5**：黄色油状物，HR-ESI-MS *m*/*z* 389.135 7 [M＋Na]$^+$（计算值 389.136 5），分子式为 $C_{22}H_{22}O_5$。^{1}H-NMR (600 MHz, CD_3OD) *δ*: 7.60 (1H, d, *J* = 16.2 Hz, H-7), 7.60 (2H, d, *J* = 8.4 Hz, H-3′, 5′), 7.45 (2H, d, *J* = 8.4 Hz, H-3, 5), 6.85 (1H, d, *J* = 12.6 Hz, H-7′), 6.80 (2H, d, *J* = 8.4 Hz, H-2, 6), 6.74 (2H, d, *J* = 8.4 Hz, H-2′, 6′), 6.31 (1H, d, *J* = 16.2 Hz, H-8), 5.75 (1H, d, *J* = 12.6 Hz, H-8′), 4.22 (2H, q, *J* = 7.2 Hz, H-1″), 4.16 (2H, q, *J* = 7.2 Hz, H-1‴), 1.31 (3H, t, *J* = 7.2 Hz, H-2″), 1.25 (3H, t, *J* = 7.2 Hz, H-2‴)；^{13}C-NMR (150 MHz, CD_3OD) *δ*: 169.3 (C-9), 168.6 (C-9′), 161.2 (C-1), 160.0 (C-1′), 146.4 (C-7), 144.7 (C-7′), 133.5 (C-3′, 5′), 131.1 (C-3, 5), 127.7 (C-4′), 127.2 (C-4), 116.9 (C-8′), 116.8 (C-2, 6), 115.8 (C-2′, 6′), 115.3 (C-8), 61.4 (C-1″), 61.2 (C-1‴), 14.6 (C-2″), 14.5 (C-2‴)。以上数据与文献报道一致[19]，故鉴定化合物 **5** 为决明顺反二聚苯丙素。

化合物 **6**：白色粉末状物，HR-ESI-MS *m*/*z* 185.058 0 [M＋Na]$^+$（计算值 185.057 8），分子式为 $C_{10}H_{10}O_2$。^{1}H-NMR (600 MHz, CD_3OD) *δ*: 7.54 (1H, d, *J* = 16.2 Hz, H-4), 7.49 (1H, d, *J* = 9.0 Hz, H-2′, 6′), 6.94 (1H, d, *J* = 9.0 Hz, H-3′, 5′), 6.63 (1H, d, *J* = 16.2 Hz, H-3), 2.34 (3H, s, H-1)；^{13}C-NMR (150 MHz, CD_3OD) *δ*: 201.6 (C-2), 161.6 (C-4′), 131.6 (C-2′, 6′),

146.4 (C-3), 127.1 (C-1′), 124.7 (C-4), 116.9 (C-3′, 5′), 27.1 (C-1)。以上数据与文献报道一致[20]，故鉴定化合物 **6** 为 (*E*)-4-对羟基苯基-3-丁烯-2-酮。

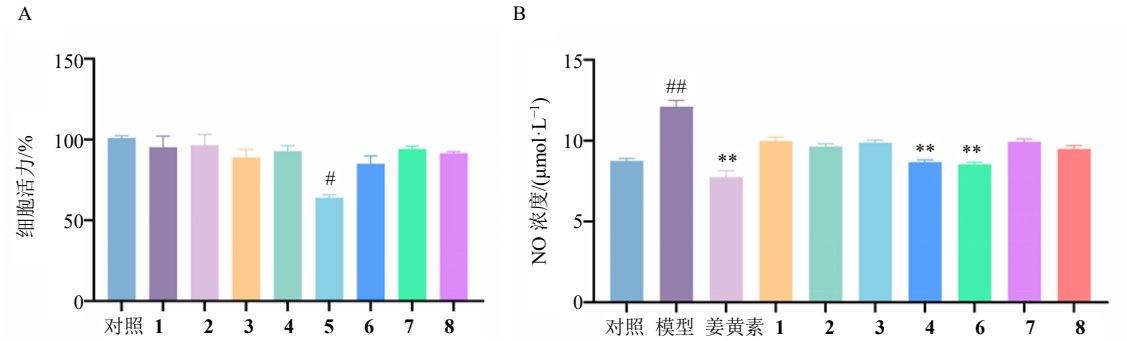
化合物 **7**：浅黄色粉末，HR-ESI-MS *m/z* 203.068 0 [M＋Na]$^+$（计算值 203.068 4），分子式为 $C_{10}H_{12}O_3$。^{1}H-NMR (600 MHz, CD_3OD) δ: 7.07 (1H, d, J = 8.4 Hz, H-2, 6), 6.72 (1H, d, J = 8.4 Hz, H-3, 5), 4.11 (2H, q, J = 6.6 Hz, H-1′), 3.51 (2H, s, H-7), 1.23 (3H, t, J = 6.6 Hz, H-2′)；^{13}C-NMR (150 MHz, CD_3OD) δ: 172.8 (C-8), 156.1 (C-4), 129.9 (C-2, 6), 125.0 (C-1), 114.9 (C-3, 5), 60.5 (C-1′), 39.8 (C-7), 13.1 (C-2′)。以上数据与文献报道一致[21]，故确定化合物 **7** 为对羟基苯乙酸乙酯。

化合物 **8**：无色针状结晶（甲醇），HR-ESI-MS *m/z* 189.052 5 [M＋Na]$^+$（计算值 189.052 8），分子式为 $C_9H_{10}O_3$。^{1}H-NMR (600 MHz, CD_3OD) δ: 7.55 (1H, dd, J = 8.4, 1.8 Hz, H-6), 7.42 (1H, d, J = 1.8 Hz, H-2)7.01 (1H, d, J = 8.4 Hz, H-5), 3.93 (3H, s, 4-OCH_3), 2.53 (3H, s, H-8)；^{13}C-NMR (150 MHz, CD_3OD) δ: 199.7 (C-7), 153.8 (C-4), 147.6 (C-3), 131.7 (C-1), 123.2 (C-6), 111.7 (C-5), 115.1 (C-2), 56.5 (OCH_3-4), 26.4 (C-8)。以上数据与文献报道一致[22]，故确定化合物 **8** 为 acetoisovanillone。

3.2　抗炎活性评价

3.2.1　化合物对 RAW264.7 细胞活力的影响　采用 CCK-8 法评估化合物 **1**～**8** 对 RAW 264.7 细胞活力的影响，如图 5-A 所示，结果表明，化合物 **5** 在 50 μmol/L 时表现出一定细胞毒性，但化合物 **1**～**4** 和 **6**～**8** 在相同浓度下对细胞活力无明显影响（细胞活力≥75%）。

3.2.2　化合物对 LPS 诱导的 RAW264.7 细胞释放 NO 的影响　采用 LPS 诱导的 RAW264.7 细胞炎症模型，以姜黄素为阳性对照，对获得的化合物 **1**～**4** 和 **6**～**8** 进行抗炎活性研究，结果表明（图 5-B），化合物 **4** 和 **6** 具有良好的抗炎活性，能显著抑制 LPS 诱导的 RAW264.7 细胞 NO 释放。



与对照组比较：$^{\#}P$<0.05　$^{\#\#}P$<0.01；与模型组比较：$^{**}P$<0.01。

$^{\#}P$ < 0.05　$^{\#\#}P$ < 0.01 *vs* control group; $^{**}P$ < 0.01 *vs* model group.

图 5　化合物 1～8 对 RAW264.7 细胞活力的影响 (A) 及其对 LPS 诱导 NO 释放的抑制作用 (B) ($\bar{x} \pm s$, n = 3)

Fig. 5　Effects of compounds 1—8 on viability of RAW264.7 cells (A) and their inhibitory effects on LPS-induced nitric oxide (NO) production (B) ($\bar{x} \pm s$, n = 3)

4　讨论

本研究采用多种现代色谱分离手段与波谱学技术，从红花水提取物中分离鉴定 8 个化合物，包括 2 个新颖的 γ-丁内酯衍生物（**1**～**2**）、1 个香豆素类化合物（**3**），2 个苯丙素类衍生物（**4**～**5**）以及 3 个芳香族小分子（化合物 **6**～**8**），其中化合物 **4** 为首次从红花中分离得到，化合物 **5** 为首次从菊科植物中分离得到。进一步活性研究发现：红花中的芳香族类、苯丙素类成分具有抗炎活性，与文献报道一致[23-25]。值得注意的是，化合物 **5**（苯丙素二聚体）在 50 μmol/L 浓度下表现出一定的细胞毒性。本研究丰富了红花化学成分库，为后续深入开展红花活性物质筛选及机制研究奠定了工作基础。

利益冲突　所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] 杨宇, 黄兴琳, 江忠敏, 等. 中药红花化学成分与药理作用研究新进展 [J]. 中华中医药学刊, 2023, 41(10): 119-126.

[2] Cheng H, Yang C L, Ge P L, *et al*. Genetic diversity, clinical uses, and phytochemical and pharmacological properties of safflower (*Carthamus tinctorius* L.): An important medicinal plant [J]. *Front Pharmacol*, 2024, 15:

1374680.

[3] 中国药典 [S]. 一部. 2025.

[4] Bai Y H, Lu P, Han C H, *et al*. Hydroxysafflor yellow a (HSYA) from flowers of *Carthamus tinctorius* L. and its vasodilatation effects on pulmonary artery [J]. *Molecules*, 2012, 17(12): 14918-14927.

[5] Yu S Y, Lee Y J, Kim J D, *et al*. Phenolic composition, antioxidant activity and anti-adipogenic effect of hot water extract from safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seed [J]. *Nutrients*, 2013, 5(12): 4894-4907.

[6] Ren F J, Tan Z, Hu S, *et al*. Pharmacological actions and applications of safflower flavonoids [J]. *Front Nutr*, 2025, 12: 1637053.

[7] Chang Y L, Hou N C, Fei J L, *et al*. Uncovering phenolic profiles of different forms in safflower seeds and their antioxidant capacity, and biological activity [J]. *J Food Sci*, 2025, 90(3): e70025.

[8] Wang L, Chen Z, Han B, *et al*. Comprehensive analysis of volatile compounds in cold-pressed safflower seed oil from Xinjiang, China [J]. *Food Sci Nutr*, 2019, 8(2): 903-914.

[9] Wang Z L, Wang H T, Chang G W, *et al*. Elucidation of the biosynthetic pathway of hydroxysafflor yellow A [J]. *Nat Commun*, 2025, 16(1): 4489.

[10] Wang W X, Liu M, Fu X L, *et al*. Hydroxysafflor yellow A ameliorates alcohol-induced liver injury through PI3K/Akt and STAT3/NF-κB signaling pathways [J]. *Phytomedicine*, 2024, 132: 155814.

[11] Bai H T, Yang J, Wang R. *Carthamus tinctorius* L.: A comprehensive review of its ethnomedicine, phytochemistry, pharmacology, and clinical applications [J]. *Front Pharmacol*, 2025, 16: 1609299.

[12] Li X R, Liu J, Peng C, *et al*. Polyacetylene glucosides from the florets of *Carthamus tinctorius* and their anti-inflammatory activity [J]. *Phytochemistry*, 2021, 187: 112770.

[13] Li L, Liu J, Li X R, *et al*. Sesquiterpenoids from the florets of *Carthamus tinctorius* (safflower) and their anti-atherosclerotic activity [J]. *Nutrients*, 2022, 14(24): 5348.

[14] 方文, 安学瑞, 赵志强, 等. 薰鲁香中 2 个新的齐墩果烷型三萜 [J]. 中草药, 2025, 56(20): 7273-7280.

[15] 王洁雪, 彭思蓉, 李月, 等. 女娄菜黄酮类成分及抗炎活性研究 [J]. 中草药, 2025, 56(16): 5731-5738.

[16] Xin X L, Shao B, Li Y, *et al*. New chemical constituents from the fruits of *Tetradium ruticarpum* [J]. *Nat Prod Res*, 2022, 36(7): 1673-1678.

[17] Bayoumi S A L, Rowan M G, Beeching J R, *et al*. Constituents and secondary metabolite natural products in fresh and deteriorated cassava roots [J]. *Phytochemistry*, 2010, 71(5/6): 598-604.

[18] 姚晓长, 蒋梅香, 刘阳, 等. 藤石松乙酸乙酯部位的化学成分研究 [J]. 中南药学, 2021, 19(12): 2536-2540.

[19] 朱鸿, 张再, 黄文忠, 等. 光叶决明中 1 个新的二聚苯丙素类化合物 [J]. 中草药, 2020, 51(11): 2871-2877.

[20] Tortajada P J, Kärnman T, Martínez-Pardo P, *et al*. Electrochemical hydrogenation of alkenes over a nickel foam guided by life cycle, safety and toxicological assessments [J]. *Green Chem*, 2024, 27(1): 227-239.

[21] Feng H, Wang F L, Kong Q H, *et al*. Chemical constituents from the stems of *Melia azedarach* [J]. *Chem Nat Compd*, 2025, 61(5): 984-988.

[22] 陆彩侠, 孔垂皓, 唐旭, 等. 牡丹皮正丁醇部位化学成分研究 [J]. 天然产物研究与开发, 2024, 36(10): 1714-1720.

[23] 陈帅, 陈邦, 陈宇凡, 等. 白背叶楸木芽苞乙酸乙酯部位中芳香族化合物及其体外抗炎活性 [J]. 中南药学, 2024, 22(10): 2596-2601.

[24] 张民达, 李海申, 孙健, 等. 玄参中 6 种环烯醚萜和苯丙素类化合物含量检测及抗炎活性研究 [J]. 浙江农业科学, 2025, 66(10): 2455-2461.

[25] Mufidah S, Miyamae Y, Fuchino H, *et al*. Kaemphenolide: A cyclobutane-bearing phenylpropanoid from *Kaempferia galanga* L. with nitric oxide inhibitory activity [J]. *Nat Prod Bioprospect*, 2025, 15(1): 68.

[责任编辑 王文倩]