

基于抗氧化和 α -葡萄糖苷酶抑制活性导向下 三叶五加根的化学成分研究

姜美玲¹, 蒋诗琴^{1,2}, 陈 杨¹, 戴 玲³, 谭 浩^{4*}, 刘向前^{1*}

¹湖南中医药大学药学院, 长沙 410208; ²永州市中医医院, 永州 425799;

³湖南科技职业学院药学院, 长沙 410200; ⁴湖南省人民医院(湖南师范大学附属第一医院), 长沙 410016

摘要: 研究三叶五加(*Acanthopanax trifoliatum* (Linn.) Merr) 根中的化学成分。采用甲醇提取三叶五加根, 经石油醚、乙酸乙酯分步萃取得到甲醇提取物及石油醚、乙酸乙酯萃取部位, 通过 MTT 法检测各部位细胞毒性后, 再进行 α -葡萄糖苷酶抑制活性及抗氧化活性筛选, 明确乙酸乙酯部位为活性最佳组分。针对该部位, 综合运用大孔吸附树脂、正反相硅胶柱层析、Sephadex LH-20、半制备高效液相等色谱技术进行成分分离纯化, 结合波谱解析与理化性质鉴定化合物结构, 并通过分子对接、 α -葡萄糖苷酶抑制实验及 DPPH 与 ABTS 自由基清除实验对部分单体化合物进行活性评价。从乙酸乙酯部位分离得到 14 个化合物, 分别鉴定为绿原酸(1)、咖啡酸(2)、槲皮素(3)、柚皮苷(4)、icariside E4(5)、原儿茶酸(6)、开环异落叶松脂醇(7)、原儿茶酸甲酯(8)、(±)-松脂素(9)、piperitol(10)、 β -谷甾醇(11)、(+)-芝麻素(12)、15 α -hydroxy-ent-kaur-16-en-19-oic acid(13)、苜蓿基-O- β -D-吡喃葡萄糖苷(14)。其中化合物 5、13、14 为首次从五加科植物中分离得到, 化合物 2、4~10、12~14 为首次从三叶五加植物中分离得到, 且具 α -葡萄糖苷酶抑制作用的化合物 1~3、7 同时具备抗氧化活性。

关键词: 三叶五加; 化学成分; 分子对接; α -葡萄糖苷酶; 抗氧化

中图分类号: R932

文献标志码: A

文章编号: 1001-6880(2026)8-1687-12

DOI: 10.16333/j.1001-6880.2026.8.007

CSTR: 32307.14.1001-6880.2026.8.007

Chemical constituents of *Acanthopanax trifoliatum* roots guided by antioxidant and α -glucosidase inhibitory activities

JIANG Mei-ling¹, JIANG Shi-qin^{1,2}, CHEN Yang¹, DAI Ling³, TAN Hao^{4*}, LIU Xiang-qian^{1*}

¹School of Pharmacy, Hunan University of Chinese Medicine,

Changsha 410208, China; ²Hunan Yongzhou Traditional Chinese Medicine Hospital,

Yongzhou 425799, China; ³Hunan Vocational college of Science and Technology, Changsha 410200, China;

⁴Hunan Provincial People's Hospital (The First Affiliated Hospital of Hunan Normal University), Changsha 410016, China

Abstract: Investigation on the Chemical Constituents in the Roots of *Acanthopanax trifoliatum* (Linn.) Merr., with methanol used for extraction, followed by sequential partitioning with petroleum ether and ethyl acetate to obtain the methanol extract, petroleum ether fraction, and ethyl acetate fraction. After evaluating the cytotoxicity of these fractions via the MTT assay, α -glucosidase inhibitory and antioxidant activities were screened, identifying the ethyl acetate fraction as the most bioactive component. Targeting this fraction, a combination of chromatographic techniques including macroporous resin chromatography, normal-phase and reversed-phase silica gel column chromatography, Sephadex LH-20 gel filtration, and semi-preparative high-performance liquid chromatography (HPLC) was employed for the isolation and purification of chemical constituents. The structures of the isolated compounds were elucidated by spectroscopic analysis combined with physicochemical properties. Additionally, molecular docking, α -glucosidase inhibitory assay, and DPPH/ABTS free radical scavenging assays were performed to evaluate the bioactivities of selected monomeric compounds. Fourteen compounds were isolated from the ethyl acetate frac-

收稿日期: 2025-08-13 接受日期: 2026-01-19

基金项目: 湖南省自然科学基金(2024JJ7357); 湖南中医药大学“十四五”重点学科-生物工程学科(校行发规字[2023]2号); 湖南省自然科学基金科教联合项目(2023JJ60213)

* 通信作者 Tel: 86-013308439949; E-mail: lxq0001cn@163.com, waitz120@163.com

tion and identified as chlorogenic acid (1), caffeic acid (2), quercetin (3), naringin (4), icaraside E4 (5), protocatechuic acid (6), (-) (2R,3R)-secoisolariciresinol (7), protocatechuic acid methyl ester (8), ($\pm$)-pinoresinol (9), piperitol (10), β -sitosterol (11), (+)-sesamin (12), 15 α -hydroxy-ent-kaur-16-en-19-oic acid (13), and benzyl-*O*- β -D-glucopyranoside (14). Among these, compounds 5, 13, and 14 were isolated from the family Araliaceae for the first time, while compounds 2, 4–10, and 12–14 were isolated from *A. trifoliatum* for the first time. Notably, compounds 1–3 and 7, which exhibited α -glucosidase inhibitory activity, also possessed antioxidant activity.

Key words: *Acanthopanax trifoliatum*; chemical constituents; molecular docking; α -glucosidase; antioxidant

三叶五加 (*Acanthopanax trifoliatum* (Linn.) Merr.) 为五加科五加属植物, 又称三加皮、白筋、刺三加等, 主要分布于我国华南、西南、华中等地区, 具有清热解毒、祛风利湿、活血舒筋之效, 临床用于风湿疼痛、咳嗽胸闷等症^[1]; 从三叶五加不同部位的研究现状来看, 叶部研究多集中于抗炎、抗菌活性^[2], 在降糖领域则较少报道; 花部研究则局限于挥发性成分分析^[3], 且因样本量小、重复性差, 采集困难等因素难以支撑其药用开发; 茎部研究相对深入, 前期课题组从三叶五加茎中分离得到多种木脂素类化合物, 证实其对 α -葡萄糖苷酶具有一定抑制作用^[4], 但茎部提取物对大鼠胰岛 β 细胞瘤细胞 (RIN-m5F 细胞) 存在明显毒性, 限制了进一步应用。而根部作为五加属植物的传统药用部位, 在糖尿病中的活性及物质基础研究仍处于空白状态。这种叶、花研究碎片化, 茎部毒性受限, 根部研究缺失的现状, 不仅制约了三叶五加的综合开发, 也导致五加属植物药用资源的不完整。

α -葡萄糖苷酶抑制剂是治疗 2 型糖尿病的一类药物, 在糖尿病中由于葡萄糖的自动氧化, 体内自由基增加导致负责胰岛素合成的 β 细胞损伤, 从而减少胰岛素合成^[5]。自由基产生与抗氧化系统的失衡会导致外周胰岛素敏感性降低, 诱导炎症因子产生, 进而促进糖尿病及其并发症的发生发展^[6]。因此, 糖尿病患者治疗中除了要控制血糖的升高, 还需控制氧自由基的增加。基于课题组在前期的研究中发现吴茱萸五加叶^[7]、细柱五加叶^[8] 及三叶五加茎^[9] 对 α -葡萄糖苷酶都具有显著的抑制作用和较好的抗氧化活性, 本研究对三叶五加根甲醇提取物和其萃取的石油醚部位、乙酸乙酯部位进行细胞毒性、 α -葡萄糖苷酶的抑制活性及抗氧化活性筛选, 对活性较好的乙酸乙酯部位进行成分分离和纯化, 并结合理化性质与波谱手段对化合物进行鉴定, 再通过分子对接、 α -葡萄糖苷酶抑制实验及 DPPH、ABTS 自由基清除实验, 评价部分单体化合物的活性, 旨在为寻找新型降糖活性成分, 完善三叶五加药用价值

研究提供科学依据, 也为其后续降糖功能食品与新药开发奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 药材与细胞

三叶五加于 2021 年 10 月采自广东江门, 经湖南中医药大学刘向前教授鉴定为五加科五加属植物三叶五加 (*Acanthopanax trifoliatum* (Linn.) Merr.) 的根。

大鼠胰岛 β 细胞瘤细胞 (RIN-m5F 细胞) 来源于美国模式培养物集存库 (Rockville, MD, USA)。

1.2 试剂与仪器

α -葡萄糖苷酶 (α -glucosidase) (纯度: 50U/mg, 批号: 9001-42-7, 北京普瑞因生物); 二甲基亚砜 (DMSO) (纯度: 99.0%, 批号: 847778-77-2, 上海源叶生物科技有限公司); 胎牛血清 (fetal bovine serum, FBS) (批号: 04-001-1A, 以色列 BI 公司); 阿卡波糖 (纯度 $\geq 95\%$, 批号: RT20U1210, 上海瑞永生物科技有限公司); 对硝基苯- α -D-吡喃葡萄糖苷 (p-nitrophenyl α -D-glucopyranoside, PNPG) (纯度 $> 99.0\%$, 批号: C14448631, 上海麦克林生化科技有限公司); 抗坏血酸 (纯度 $\geq 99.7\%$, 批号: A800296, 上海麦克林生化科技有限公司); DPPH (纯度: 98%, 批号: 464RB-GE, 上海化成工业发展有限公司); ABTS (纯度: 98%, 批号: M0403A, 泽浩公司); 硅胶/硅胶 H、薄层层析硅胶 G/G₂₅₄ (山东西亚有限公司); D-101 大孔吸附树脂 (天津允开树脂科技); Sephadex LH-20 葡聚糖凝胶 (上海卡迈舒生物科技有限公司); 羧甲基纤维素钠 (上海山浦化工有限公司)。

Bruker AVANCE III 600 MHz 超导核磁共振仪 (德国 Bruker 公司); Agilent P/N G1969-90010 质谱仪 (美国安捷伦科技有限公司); 1260 Infinity II 半制备液相 (安捷伦科技有限公司); Cosmosil 38020-41 5C₁₈-MS-II (10 mm $\times$ 250 mm, 5 μ m; 日本 Cosmosil 公司); J-HH-2A 暗箱三用紫外分析仪 (上海嘉鹏科技有限公司)。

1.3 方法

1.3.1 样品处理

将干燥的三叶五加根(10.5 kg)打粉,用甲醇多次冷浸,合并冷提液浓缩至无溶剂残留得甲醇提取物(585.8 g),其中(580.0 g)分别用石油醚、乙酸乙酯萃取,浓缩至无溶剂残留得到石油醚部位(ATR-PE)、乙酸乙酯部位(ATR-EA)和剩余的甲醇提取物(ATR-ME)进行细胞毒性和体外活性研究。

1.3.2 细胞毒性检测

以含有10%牛血清白蛋白和1%抗生素的 RPMI 1640 和 DMEM 1:1 混合物为培养基培养大鼠胰岛 β 细胞瘤细胞(RIN-m5F 细胞),细胞毒性测定采用 MTT 法^[9],简而言之,将处在对数生长期的 RIN-m5F 细胞,调节其细胞密度为 2×10^5 个/孔,接种于96孔板中,经过指定处理后,每孔加入300 μ L MTT 溶液(0.5 mg/mL),继续培养4 h,随后每孔加入200 μ L DMSO,在570 nm处测定其吸光度值,以吸光度值反映细胞活力水平。

1.3.3 α -葡萄糖苷酶抑制活性

采用 Huang^[10] 的方法进行 α -葡萄糖苷酶抑制实验。本试验共设置4个组,在96孔板上进行反应,阳性对照为阿卡波糖。样品组为20 μ L 不同浓度样品 + 100 μ L PBS + 20 μ L α -葡萄糖苷酶溶液(37 $^{\circ}$ C下恒温孵育10 min) + 浓度2.5 mmol/L 的 PNPG 溶液20 μ L(37 $^{\circ}$ C下恒温孵育20 min),孵育完成后加入0.2 mol/L Na_2CO_3 100 μ L 停止反应后置于酶标仪下测定405 nm处吸光度值;空白组为100 μ L PBS + 20 μ L DMSO + 20 μ L α -葡萄糖苷酶 + 20 μ L PNPG + 100 μ L Na_2CO_3 ;空白背景组为120 μ L PBS + 20 μ L DMSO + 20 μ L PNPG + 100 μ L Na_2CO_3 ;样品背景组为120 μ L PBS + 20 μ L PNPG + 100 μ L Na_2CO_3 。抑制率(I)通过公式(1)计算。

$$I = [(A_k - A_{kb}) - (A_s - A_{sb})] / (A_k - A_{kb}) \times 100\% \quad (1)$$

式中, A_k :空白组吸光度; A_{kb} :空白背景组吸光度; A_s :实验组吸光度; A_{sb} :实验背景组吸光度。

1.3.4 DPPH 自由基清除活性

采用 Hu 等^[11] 的方法进行 DPPH 自由基清除实验。将180 μ L DPPH 溶液(0.1 mol/L 溶解于80%甲醇中)与20 μ L 不同浓度样品溶液(溶于甲醇)混合,在室温黑暗条件下孵育,30 min 后在517 nm处测定吸光度值。以抗坏血酸为阳性对照,通过公式(2)计算样品的 DPPH 自由基清除率(S)。

$$S = (1 - A_1/A_2) \times 100\% \quad (2)$$

式中, A_1 为样品组吸光度值, A_2 为空白组吸光度值。

1.3.5 ABTS 自由基清除活性

采用 Hu 等^[11] 的方法进行 ABTS 自由基清除实验。将 ABTS 和过硫酸钾溶液按等比例混合于室温下避光反应16 h 得到 ABTS 自由基原液,用 PBS 缓冲溶液稀释原液,现配现用。然后将170 μ L ABTS 溶液与10 μ L 不同浓度的样品溶液和抗坏血酸对照样品溶液充分混匀,室温避光静置6 min,测定405 nm处的吸光度值,通过公式(2)计算样品的 ABTS 自由基清除率。

1.3.6 分子对接

通过 AutoDockTools 对酶和化合物配体中的可旋转键进行配位;使用 AutoDock lamarkian 遗传算法(LGA)进行配体对接^[12]。根据 α -葡萄糖苷酶与三叶五加各单体化合物的最低结合能选择对接结果得到最优的结合方式。

1.3.7 提取与分离

选用 ATR-EA 部位上大孔树脂柱,用30%、50%、70%、100% 甲醇-水梯度洗脱,回收试剂,浓缩得到30% 甲醇洗脱部分(20.2 g),50% 甲醇洗脱部分(18.3 g),70% 甲醇洗脱部分(18.2 g),100% 甲醇洗脱部分(16.2 g)。

30% 部分用硅胶柱色谱以乙酸乙酯-甲醇(100:1 $\rightarrow$ 1:1)为流动相对样品进行梯度洗脱,得到18个组分(Fr1.1~Fr1.18)。50% 部分用硅胶柱色谱以乙酸乙酯-甲醇(200:1 $\rightarrow$ 1:1)为流动相对样品进行梯度洗脱,得到20个组分(Fr2.1~Fr2.20)。70%、100% 部分用硅胶柱色谱以石油醚-乙酸乙酯(2:1 $\rightarrow$ 0:1)、乙酸乙酯-甲醇(100:1 $\rightarrow$ 1:1)为流动相对样品进行梯度洗脱,70% 甲醇洗脱部分得到23个组分(Fr3.1~Fr3.23),100% 甲醇洗脱部分得到15个组分(Fr4.1~Fr4.15)。Fr1.4、Fr1.5、Fr1.7 经反复 ODS 柱色谱及半制备液相分离纯化分别得到化合物 **1**(2.9 mg, t_R = 15 min)、**2**(3 mg, t_R = 18 min)、**3**(2.8 mg, t_R = 6 min)。Fr2.3 经反复 ODS 柱色谱及重结晶得到化合物 **4**(3.1 mg, t_R = 24 min);Fr2.4、Fr2.7、Fr2.9、Fr2.11 经反复 ODS 柱色谱及半制备液相分离纯化分别得到化合物 **5**(24.9 mg, t_R = 21 min)、**6**(1.7 mg, t_R = 28 min)、**7**(2.0 mg, t_R = 19 min)、**8**(1.7 mg, t_R = 33 min)。Fr3.2、Fr3.7 反复 ODS 柱色谱及半制备液相分离纯化分别得到化合

物 **9** (1.9 mg, t_R = 27 min)、**10** (1.8 mg, t_R = 19 min)。Fr4.3、Fr4.5 经反复重结晶得到化合物 **11** (2 mg, t_R = 9 min)、**12** (1.6 mg, t_R = 24 min); Fr4.7 经正向硅胶 H 柱色谱、反相 ODS 柱色谱及半制备液相分离纯化得到化合物 **13** (4.2 mg, t_R = 33 min)、**14** (22 mg, t_R = 16 min)。

1.3.8 统计学分析

通过 GraphPad Prism 8.3.0 软件进行处理,数据以平均值 $\pm$ 标准差 ($\bar{x} \pm s$) 表示,多组间比较采用 ANOVA 单因素方差分析, $P < 0.05$ 表示差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 三叶五加根 ATR-ME、ATR-PE、ATR-EA 体外活性筛选

2.1.1 三叶五加根 ATR-ME、ATR-PE、ATR-EA 的细胞毒性

在研究细胞毒性实验中, ATR-ME、ATR-PE、ATR-EA 的浓度设置主要依据各部位溶解性、预实验结果及后续活性筛选需求确定: ATR-ME 作为粗提物,水溶性成分占比高且预实验显示浓度 $> 250.00 \mu\text{g/mL}$ 时细胞死亡率显著升高,故设置 31.25 ~

250.00 $\mu\text{g/mL}$ 浓度梯度; ATR-PE 为脂溶性部位,受限于与培养基相容性及 DMSO 助溶浓度,预实验显示浓度 $> 7.81 \mu\text{g/mL}$ 时易析出沉淀干扰细胞检测,故设置 0.98 ~ 7.81 $\mu\text{g/mL}$ 浓度梯度; ATR-EA 为中等极性成分,在培养基中溶解度良好,预实验显示浓度 $\leq 62.50 \mu\text{g/mL}$ 时无沉淀且细胞活性稳定,故设置 0.98 ~ 62.50 $\mu\text{g/mL}$ 浓度梯度以匹配后续活性实验浓度范围。

通过 MTT 法测定不同浓度的三叶五加根的 ATR-ME、ATR-PE、ATR-EA 部位对 RIN-m5F 细胞的影响。由图 1 可知, ATR-ME 在 4 个不同浓度下的细胞活性均低于对照组,其中在 31.25 $\mu\text{g/mL}$ 浓度下,细胞活性显著低于对照组 ($P < 0.01$); 62.50 $\mu\text{g/mL}$ 浓度下,细胞活性极显著低于对照组 ($P < 0.001$); 250.00 $\mu\text{g/mL}$ 浓度下,细胞活性显著低于对照组 ($P < 0.05$)。ATR-PE 只有在 0.98 $\mu\text{g/mL}$ 浓度下的细胞活性比对照组低,其他 3 个浓度下的细胞活性均高于对照组,而 ATR-EA 在 4 个不同浓度下的细胞活性均高于对照组,这表明 ATR-EA 部位无明显细胞毒性。

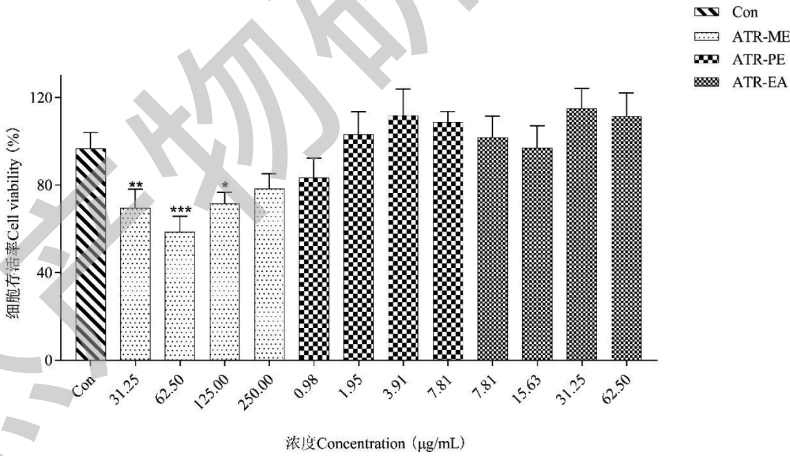


图 1 ATR-ME、ATR-PE、ATR-EA 细胞毒性 ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Fig. 1 Cytotoxicity of ATR-ME, ATR-PE, and ATR-EA ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

注:与对照组 (Con) 相比, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$ 。Note: Compared with control (Con) group, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$.

2.1.2 三叶五加根 ATR-ME、ATR-PE、ATR-EA 对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用

由图 2 可知, ATR-ME 在 31.25、62.50、125.00、250.00 $\mu\text{g/mL}$ 浓度下对 α -葡萄糖苷酶抑制率均低于阳性对照阿卡波糖 600.00 $\mu\text{g/mL}$ 时的 74.9%,其中前三个浓度下的抑制率极显著低于阿卡波糖

($P < 0.001$); ATR-PE 在 62.50 $\mu\text{g/mL}$ 时抑制率达 84.90%,虽显著高于阿卡波糖 ($P < 0.01$),但此浓度已接近其溶解度上限,且在 7.81、15.63、31.25 $\mu\text{g/mL}$ 时抑制率均极显著低于阿卡波糖 ($P < 0.001$); ATR-EA 则呈现出低浓度强效的特征,虽在 0.98、1.95、31.25 $\mu\text{g/mL}$ 时抑制率极显著低于阿卡

波糖($P < 0.001$),但浓度升至 $7.81 \mu\text{g/mL}$ 时,抑制率达到 77.90%,超过阿卡波糖的抑制效果。综合

来看,ATR-EA 部位对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用优于 ATR-ME、ATR-PE 部位。

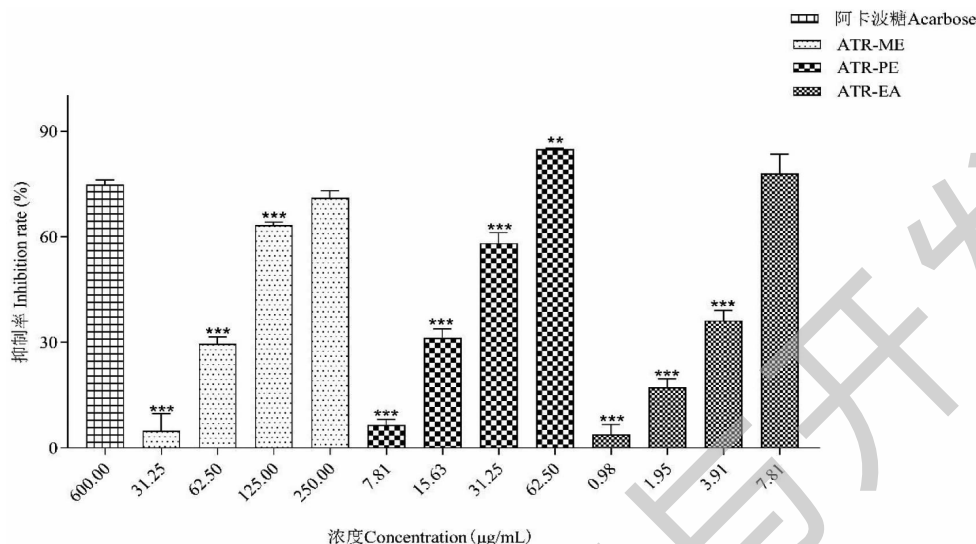


图2 ATR-ME、ATR-PE、ATR-EA 对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用($\bar{x} \pm s, n=3$)

Fig. 2 Inhibitory effects of ATR-ME, ATR-PE, and ATR-EA on α -glucosidase($\bar{x} \pm s, n=3$)

注:与阳性对照阿卡波糖相比, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$,下同。Note: Compared with acarbose, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$, the same below.

2.1.3 三叶五加根 ATR-ME、ATR-PE、ATR-EA 对 DPPH、ABTS 自由基的清除作用

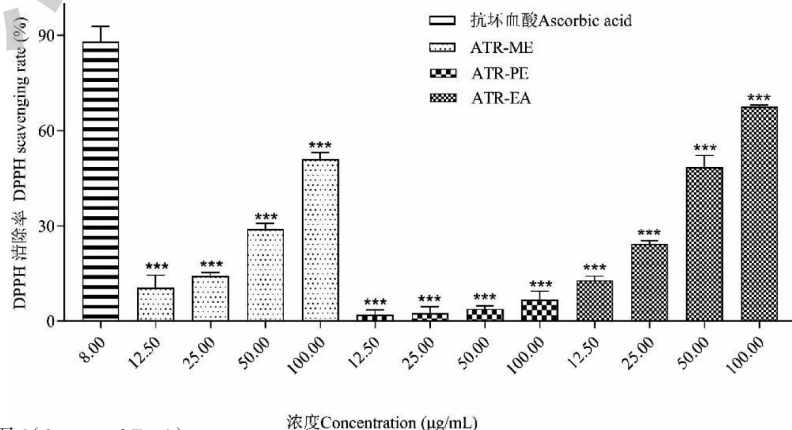
由图3所示,在 DPPH 与 ABTS 自由基清除实验中,ATR-ME、ATR-PE、ATR-EA 3 个部位清除率显著低于抗坏血酸($P < 0.001, P < 0.01$);但在相同浓度下,ATR-EA 部位清除活性均高于 ATR-ME 及 ATR-PE,展现出更优的抗氧化潜力。

根据以上实验结果可知,三叶五加根 ATR-EA 部位无明显细胞毒性,且相较于 ATR-ME、ATR-PE 部位,其在较低浓度下即展现出更优异的 α -葡萄糖苷酶抑制活性,同时对 DPPH、ABTS 自由基也具备突出的清除能力,是兼具降糖潜力与抗氧化活性的

优势活性部位。而活性的物质基础往往由其所含的特征化学成分决定,为明确该部位发挥降糖及抗氧化活性的核心物质,阐明其药效作用的物质基础,因此,本研究进一步对 ATR-EA 萃取部位开展系统的化学成分分离、纯化与结构鉴定工作,并结合活性实验探究单体化合物的生物活性,以期挖掘出具有开发价值的活性成分。

2.2 结构鉴定

化合物 1 白色粉末;HR-ESI-MS: m/z 355.103 4 $[M + H]^+$, 分子式为 $C_{16}H_{18}O_9$ 。 ^1H NMR (600 MHz, CD_3OD) δ : 7.56 (1H, d, $J = 15.9$ Hz, H-7), 7.05 (1H, d, $J = 2.1$ Hz, H-2), 6.95 (1H, dd, $J = 8.2$,



续图 3 (Continued Fig. 3)

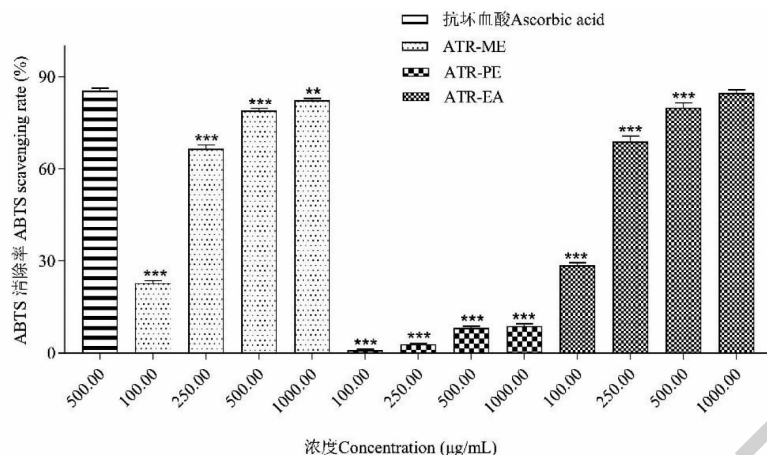


图3 ATR-ME、ATR-PE、ATR-EA对DPPH与ABTS自由基清除作用($\bar{x} \pm s, n=3$)

Fig. 3 DPPH and ABTS free radical scavenging effects of ATR-ME, ATR-PE and ATR-EA ($\bar{x} \pm s, n=3$)

2.1 Hz, H-6), 6.78 (1H, d, $J=8.1$ Hz, H-5), 6.26 (1H, d, $J=15.9$ Hz, H-8), 5.34 (1H, dt, $J=9.1, 4.6$ Hz, H-1'), 4.17 (1H, q, $J=3.4$ Hz, H-5'), 3.72 (1H, dd, $J=8.6, 3.1$ Hz, H-6'), 2.20 (2H, m, H-2'), 2.06 (2H, m, H-4'); ^{13}C NMR (150 MHz, CD_3OD) δ : 127.8 (C-1), 115.3 (C-2), 147.1 (C-3), 149.6 (C-4), 116.5 (C-5), 123.0 (C-6), 146.8 (C-7), 115.2 (C-8), 168.7 (C-9), 71.4 (C-1'), 38.9 (C-2'), 76.2 (C-3'), 38.3 (C-4'), 72.0 (C-5'), 73.5 (C-6'), 177.2 (C-7')。与文献^[13]数据对比,该化合物鉴定为绿原酸。

化合物2 无色针晶(甲醇); HR-ESI-MS: m/z 181.0438 $[\text{M} + \text{H}]^+$, 分子式为 $\text{C}_9\text{H}_8\text{O}_4$ 。 ^1H NMR (600 MHz, CD_3OD) δ : 7.53 (1H, d, $J=15.9$ Hz, H-7), 7.03 (1H, d, $J=2.0$ Hz, H-2), 6.93 (1H, dd, $J=8.2, 2.1$ Hz, H-6), 6.78 (1H, d, $J=8.2$ Hz, H-5), 6.22 (1H, d, $J=15.8$ Hz, H-8); ^{13}C NMR (150 MHz, CD_3OD) δ : 126.4 (C-1), 114.2 (C-2), 145.4 (C-3), 148.1 (C-4), 115.1 (C-5), 121.4 (C-6), 145.6 (C-7), 113.7 (C-8), 169.7 (C-9)。与文献^[14]数据对比,该化合物鉴定为咖啡酸。

化合物3 黄色粉末; HR-ESI-MS: m/z 303.0471 $[\text{M} + \text{H}]^+$, 分子式为 $\text{C}_{15}\text{H}_{10}\text{O}_7$ 。 ^1H NMR (600 MHz, CD_3OD) δ : 7.63 (1H, d, $J=2.2$ Hz, H-2'), 7.53 (1H, dd, $J=8.5, 2.2$ Hz, H-6'), 6.78 (1H, d, $J=8.5$ Hz, H-5'), 6.28 (1H, d, $J=2.1$ Hz, H-8), 6.08 (1H, d, $J=2.1$ Hz, H-6); ^{13}C NMR (150 MHz, CD_3OD) δ : 147.4 (C-2), 135.8 (C-3), 175.9 (C-4), 161.1 (C-5), 97.9 (C-6), 164.4 (C-7), 93.1 (C-8), 156.9 (C-

9), 103.1 (C-10), 122.8 (C-1'), 114.6 (C-2'), 146.6 (C-3'), 144.8 (C-4'), 114.8 (C-5'), 120.3 (C-6')。与文献^[15]数据对比,该化合物鉴定为槲皮素。

化合物4 淡黄色针晶(甲醇); HR-ESI-MS: m/z 581.1857 $[\text{M} + \text{H}]^+$, 分子式为 $\text{C}_{27}\text{H}_{32}\text{O}_{14}$ 。 ^1H NMR (600 MHz, CD_3OD) δ : 7.34 (2H, d, $J=8.1$ Hz, H-2', 6'), 6.84 (2H, d, $J=8.2$ Hz, H-3', 5'), 6.20 (1H, s, H-6), 6.18 (1H, s, H-8), 5.41 (1H, dd, $J=12.7, 2.8$ Hz, H-2), 5.26 (1H, d, $J=6.4$ Hz, H-1''), 5.12 (1H, dd, $J=10.5, 7.6$ Hz, H-1'''), 3.95 (1H, t, $J=1.9$ Hz, H-2'''), 3.91 - 3.85 (2H, m, H-2'', 3''), 3.73 - 3.64 (2H, m, H-3''', 4'''), 3.60 (2H, m, H-6a'', 4''), 3.47 (1H, t, $J=7.5$ Hz, H-5''), 3.40 (2H, m, H-6b'', 5'''), 3.19 (1H, ddd, $J=16.3, 12.9, 2.9$ Hz, H-3a), 2.77 (1H, d, $J=16.3$ Hz, H-3b), 1.30 (3H, d, $J=6.2$ Hz, H-6'''); ^{13}C NMR (150 MHz, CD_3OD) δ : 129.4 (C-1), 42.8 (C-3), 197.1 (C-4), 163.6 (C-5), 96.5 (C-6), 165.2 (C-7), 95.4 (C-8), 163.3 (C-9), 103.5 (C-10), 127.8 (C-2'), 114.9 (C-3', 5'), 157.7 (C-4'), 127.7 (C-6'), 101.2 (C-1''), 79.3 (C-2''), 77.6 (C-3''), 69.8 (C-4''), 76.7 (C-5''), 60.9 (C-6''), 98.0 (C-1'''), 70.8 (C-2''', 3'''), 72.5 (C-4'''), 68.6 (C-5'''), 16.8 (C-6''')。与文献^[16]报道一致,该化合物鉴定为柚皮苷。

化合物5 白色粉末; HR-ESI-MS: m/z 507.2198 $[\text{M} + \text{H}]^+$, 分子式为 $\text{C}_{26}\text{H}_{34}\text{O}_{10}$ 。 ^1H NMR (600 MHz, CD_3OD) δ : 7.16 (1H, d, $J=8.3$ Hz, H-5'), 7.05 (1H, s, H-2'), 6.95 (1H, d, $J=8.3$ Hz, H-6'), 6.76 (1H, s, H-2), 6.74 (1H, s, H-6), 5.57 (1H, s, H-7'), 4.91

(1H, d, $J = 7.3$ Hz, H-1''), 3.88 (3H, s, OCH₃), 3.86 (1H, d, $J = 6.7$ Hz, H-8'), 3.85 (3H, s, OCH₃), 3.77 (1H, dd, $J = 11.0, 7.5$ Hz, H-6''a), 3.70 (1H, dd, $J = 12.4, 3.7$ Hz, H-6''b), 3.58 (2H, t, $J = 6.5$ Hz, H-9), 3.53 ~ 3.44 (3H, m, H-2''/3''/4''), 3.41 (2H, d, $J = 5.1$ Hz, H-9'), 3.37 (1H, m, H-5''), 2.64 (2H, t, $J = 7.7$ Hz, H-7), 1.83 (2H, p, $J = 6.9$ Hz, H-8); ¹³C NMR (150 MHz, CD₃OD) δ : 129.6 (C-1), 114.2 (C-2), 145.2 (C-3), 147.5 (C-4), 137.1 (C-5), 118.0 (C-6), 32.9 (C-7), 35.8 (C-8), 62.2 (C-9), 138.3 (C-1'), 111.2 (C-2'), 150.9 (C-3'), 147.6 (C-4'), 119.4 (C-5'), 118.1 (C-6'), 88.5 (C-7'), 55.6 (C-8'), 65.1 (C-9'), 102.8 (C-1''), 74.9 (C-2''), 78.2 (C-3''), 71.3 (C-4''), 77.8 (C-5''), 62.5 (C-6''), 56.8 (OCH₃), 56.7 (OCH₃)。与文献^[17]数据对比,该化合物鉴定为 icariside E4。

化合物 6 褐色粉末;HR-ESI-MS: m/z 155.029 0 [M + H]⁺, 分子式为 C₇H₆O₄。¹H NMR (600 MHz, (CD₃)₂CO) δ : 7.53 (1H, s, H-2), 7.48 (1H, d, $J = 8.2$ Hz, H-6), 6.90 (1H, d, $J = 8.2$ Hz, H-5); ¹³C NMR (150 MHz, (CD₃)₂CO) δ : 123.1 (C-1), 117.5 (C-2), 145.5 (C-3), 150.7 (C-4), 115.7 (C-5), 123.7 (C-6), 167.8 (7-COOH)。与文献^[18]数据对比,该化合物鉴定为原儿茶酸。

化合物 7 浅褐色油状物;HR-ESI-MS: m/z 363.177 3 [M + H]⁺, 分子式为 C₂₀H₂₆O₆。¹H NMR (600 MHz, CD₃OD) δ : 6.65 (2H, d, $J = 8.0$ Hz, H-5', H-5''), 6.59 (2H, d, $J = 2.2$ Hz, H-2', H-2''), 6.53 (2H, dd, $J = 2.5$ Hz, 1.5 Hz, H-6', H-6''), 3.72 (6H, s, -OCH₃), 3.62 (4H, m, H-1, H-4), 2.64 (2H, dd, $J = 11.5$ Hz, 6.0 Hz, H_a-7', H_a-7''), 2.54 (2H, dd, $J = 14$ Hz, 6.0 Hz, H_b-7', H_b-7''), 1.93 (2H, m, H-3, H-4); ¹³C NMR (150 MHz, CD₃OD) δ : 62.1 (C-1, C-4), 44.1 (C-2, C-3), 133.8 (C-1', C-1''), 113.4 (C-2', C-2''), 148.7 (C-3', C-3''), 145.4 (C-4', C-4''), 115.6 (C-5', C-5''), 122.8 (C-6', C-6''), 36.0 (C-7', C-7'')。与文献^[19]数据对比,该化合物鉴定为开环异落叶松脂醇。

化合物 8 白色粉末;HR-ESI-MS: m/z 201.035 0 [M + H]⁺, 分子式为 C₈H₈O₄。¹H NMR (600 MHz, CD₃OD) δ : 7.43 (1H, d, $J = 1.6$ Hz, H-2), 6.88 (1H, d, $J = 7.5$ Hz, H-5), 7.45 (1H, d, $J = 8.0$ Hz, H-6), 3.81 (3H, s, 7-OCH₃); ¹³C NMR (150 MHz, CD₃OD)

δ : 122.4 (C-1), 118.6 (C-2), 146.5 (C-3), 151.7 (C-4), 116.2 (C-5), 123.6 (C-6), 168.8 (C-7), 52.3 (7-OCH₃)。与文献^[20]基本一致,故鉴定化合物 8 为原儿茶酸甲酯。

化合物 9 白色粉末;HR-ESI-MS: m/z 359.144 6 [M + H]⁺, 分子式为 C₂₀H₂₂O₆。¹H NMR (500 MHz, CD₃OD) δ : 6.90 (2H, d, $J = 1.5$ Hz, H-5, 5'), 6.84 (2H, d, $J = 8.5$ Hz, H-2, 2'), 6.77 (2H, dd, $J = 8.5, 1.5$ Hz, H-6, 6'), 4.67 (2H, d, $J = 4.0$ Hz, H-7, 7'), 4.19 (2H, dd, $J = 9.0, 7.0$ Hz, H-9a, 9'a), 3.82 (6H, s, 2 × OCH₃), 3.79 (2H, dd, $J = 9.0, 3.5$ Hz, H-9b, 9'b), 3.05 (2H, br s, H-8, 8'); ¹³C NMR (125 MHz, CD₃OD) δ : 134.2 (C-1, 1'), 110.6 (C-2, 2'), 148.3 (C-3, 3'), 146.9 (C-4, 4'), 115.5 (C-5, 5'), 119.6 (C-6, 6'), 86.6 (C-7, 7'), 55.7 (C-8, 8'), 72.2 (C-9, 9'), 56.3 (3, 3'-OCH₃)。与文献^[21]数据对比,该化合物鉴定为(±)-松脂素。

化合物 10 白色粉末;HR-ESI-MS: m/z 357.131 5 [M + H]⁺, 分子式为 C₂₀H₂₀O₆。¹H NMR (600 MHz, (CD₃)₂CO) δ : 6.91 ~ 6.82 (2H, m, H-2, 6'), 6.80 ~ 6.74 (2H, m, H-5, 3'), 6.70 (2H, d, $J = 8.0$ Hz, H-6, 2'), 5.90 (2H, s, OCH₂O), 4.63 (2H, dd, $J = 24.9, 4.7$ Hz, H-7, 7'), 3.81 ~ 3.74 (3H, m, OCH₃); ¹³C NMR (150 MHz, (CD₃)₂CO) δ : 135.5 (C-1), 106.5 (C-2), 145.2 (C-3), 147.5 (C-4), 108.5 (C-5), 120.2 (C-6), 86.1 (C-7), 54.2 (C-8), 72.1 (C-9), 135.0 (C-1'), 118.5 (C-2'), 145.5 (C-3'), 148.8 (C-4'), 114.3 (C-5'), 86.1 (C-7'), 72.0 (C-9'), 55.5 (OCH₃), 102.0 (OCH₂O)。与文献^[22]数据对比,该化合物鉴定为 piperitol。

化合物 11 无色针晶(氯仿);HR-ESI-MS: m/z 415.389 5 [M + H]⁺, 分子式为 C₂₉H₅₀O。¹H NMR (600 MHz, CDCl₃) δ : 5.35 (H, d, $J = 5.2$ Hz, H-6), 3.53 (H, m, H-3), 1.01 (3H, s, H-19), 0.98 (3H, d, $J = 6.5$ Hz, H-21), 0.86 ~ 0.84 (3H, m, H-26), 0.80 (3H, d, $J = 2.3$ Hz, H-29); ¹³C NMR (150 MHz, CDCl₃) δ : 37.4 (C-1), 31.8 (C-2), 71.5 (C-3), 42.3 (C-4), 140.8 (C-5), 121.7 (C-6), 32.1 (C-7), 32.0 (C-8), 50.1 (C-9), 36.7 (C-10), 21.2 (C-11), 39.8 (C-12), 42.5 (C-13), 56.5 (C-14), 24.5 (C-15), 28.4 (C-16), 56.1 (C-17), 12.0 (C-18), 19.6 (C-19), 36.3 (C-20), 19.1 (C-21), 34.1 (C-22), 26.2 (C-23), 46.1 (C-24), 29.3 (C-25), 20.0 (C-26),

18.9 (C-27), 23.2 (C-28), 12.1 (C-29)。与文献^[23]数据对比, 该化合物鉴定为 β -谷甾醇。

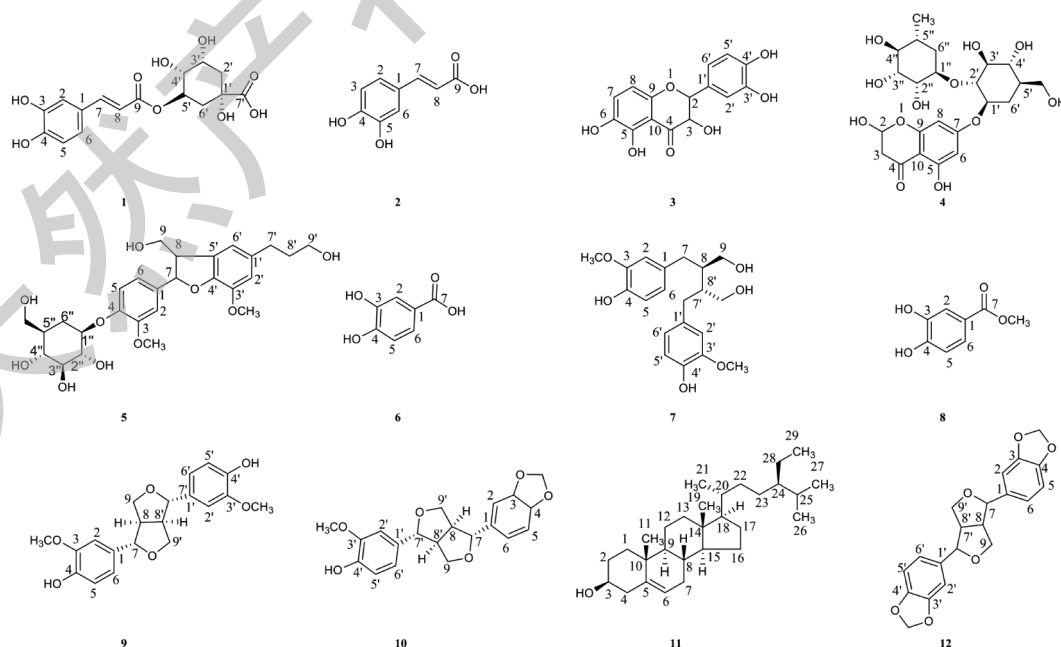
化合物 12 白色针晶(甲醇); HR-ESI-MS: m/z 355.112 6 $[M + H]^+$, 分子式为 $C_{20}H_{18}O_6$ 。 1H NMR (600 MHz, $(CD_3)_2CO$) δ : 6.84 (2H, d, $J = 1.7$ Hz, H-2, 2'), 6.85 (2H, dd, $J = 8.0, 1.7$ Hz, H-6', 6''), 6.80 (2H, d, $J = 7.9$ Hz, H-5', 5''), 5.97 (2H, s, OCH_2O), 4.68 (2H, d, $J = 4.1$ Hz, H-2, 6), 4.20 (2H, dd, $J = 9.1, 7.0$ Hz, H-4, 8), 3.82 (2H, dd, $J = 9.2, 3.8$ Hz, H-4, 8), 3.10 ~ 3.02 (2H, m, H-1, 5); ^{13}C NMR (150 MHz, $(CD_3)_2CO$) δ : 54.6 (C-1, 5), 86.0 (C-2, 6), 71.4 (C-4, 8), 136.8 (C-1', 1''), 106.7 (C-2', 2''), 147.8 (C-3', 3''), 148.8 (C-4', 4''), 119.5 (C-5', 5''), 108.3 (C-6', 6''), 101.3 (OCH_2O)。与文献^[24]数据对比, 该化合物鉴定为 (+)-芝麻素。

化合物 13 白色粉末; HR-ESI-MS: m/z 319.221 9 $[M + H]^+$, 分子式为 $C_{20}H_{30}O_3$ 。 1H NMR (500 MHz, CD_3OD) δ : 5.16 (1H, s, H-17a), 5.06 (1H, s, H-17b), 3.74 (1H, s, H-15), 2.69 (1H, d, $J = 4.6$ Hz, H-13), 2.13 (1H, d, $J = 13.7$ Hz, H-3a), 1.90 (3H, m, H-11a, 11b, 6a, 7a), 1.83 ~ 1.76 (1H, m, H-12a), 1.70 (1H, dt, $J = 13.4, 3.4$ Hz, H-3b), 1.60 (2H, dt, $J = 14.6, 5.2$ Hz, H-2a, 2b), 1.48 ~ 1.42 (2H, m, H-1a), 1.39 (3H, m, H-7b, 14a), 1.34 (1H, dd, $J =$

13.6, 3.7 Hz, H-5), 1.28 (1H, m, H-6b), 1.19 (3H, s, H-18), 1.07 (1H, dd, $J = 12.1, 2.1$ Hz, H-1b), 1.02 (2H, m, H-12b, 14b), 0.98 (3H, s, H-20), 0.87 ~ 0.79 (1H, m, H-9); ^{13}C NMR (125 MHz, CD_3OD) δ : 41.0 (C-1), 20.4 (C-2), 37.2 (C-3), 44.7 (C-4), 58.3 (C-5), 22.3 (C-6), 36.7 (C-7), 49.0 (C-8), 55.1 (C-9), 39.2 (C-10), 19.4 (C-11), 33.8 (C-12), 43.7 (C-13), 42.1 (C-14), 83.6 (C-15), 160.6 (C-16), 108.9 (C-17), 29.5 (C-18), 16.6 (C-20)。与文献^[25]数据对比, 该化合物鉴定为 15 α -hydroxy-ent-kaur-16-en-19-oic acid。

化合物 14 白色粉末; HR-ESI-MS: m/z 271.109 0 $[M + H]^+$, 分子式为 $C_{13}H_{18}O_6$ 。 1H NMR (600 MHz, CD_3OD) δ : 7.44 (2H, d, $J = 7.5$ Hz, H-2, 6), 7.35 (2H, t, $J = 7.5$ Hz, H-3, 5), 7.29 (1H, t, $J = 7.4$ Hz, H-4), 4.95 (1H, d, $J = 11.8$ Hz, H-7a), 4.69 (1H, d, $J = 11.8$ Hz, H-7b), 4.38 (1H, d, $J = 7.8$ Hz, H-1'), 3.92 (1H, dd, $J = 12.0, 2.2$ Hz, H-6a'), 3.72 (1H, dd, $J = 11.9, 5.7$ Hz, H-6b'), 3.40 ~ 3.26 (4H, m, H-2', 3', 4', 5'); ^{13}C NMR (150 MHz, CD_3OD) δ : 139.1 (C-1), 129.3 (C-2, 6), 129.2 (C-3, 5), 128.7 (C-4), 71.7 (C-7), 103.3 (C-1'), 75.1 (C-2'), 78.0 (C-3'), 71.7 (C-4'), 78.1 (C-5'), 62.8 (C-6')。与文献^[26]数据对比, 该化合物鉴定为 苜蓿-O- β -D-吡喃葡萄糖苷。

化合物 1 ~ 14 的结构见图 4。



续图 4 (Continued Tab. 4)

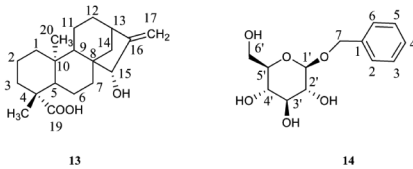


图4 化合物1~14的结构

Fig. 4 Structures of compounds 1-14

2.3 三叶五加根 ATR-EA 部位单体化合物活性考察结果

根据上述各粗提物部位活性初步筛选结果,对活性较好的 ATR-EA 部位进一步分离纯化得到了14个化合物,通过分子对接对各单体化合物进行预测,利用 α -葡萄糖苷酶抑制实验进行验证,最后将具有较好降糖活性的单体化合物进行氧自由基清除实验。

2.3.1 分子对接预测

以各单体化合物小分子为配体, α -葡萄糖苷酶为受体蛋白,对二者进行对接,探究小分子和配体结合能的大小。结合能越小,说明对接的构象越稳定,与蛋白的亲和力越强,筛选结果见表1。

结果如表1所示,化合物1、2、3、7、13、14与 α -葡萄糖苷酶的结合能分别为-31.0、-23.2、-22.8、-19.0、-18.4、-22.5 kcal/mol,均比阳性对照阿卡波糖(-10.4 kcal/mol)低,与 α -葡萄糖苷酶结合更紧密;其余8个化合物(4、5、6、8~12)结合能均为正值或远高于阿卡波糖,提示其与酶的结合能力较弱,暂不具备显著 α -葡萄糖苷酶抑制潜力。这6个活性化合物与 α -葡萄糖苷酶的相互作用均以范德华力为基础,通过氢键与酶活性中心关键氨基酸残基(如 Asp、Thr、Tyr 等)形成稳定结合,部分化合物还借助 Pi-Alkyl、Pi-Anion、Alkyl 等特异性相互作用增强结合亲和力,其分子对接结构视图见图5。

2.3.2 化合物对 α -葡萄糖苷酶抑制活性实验结果

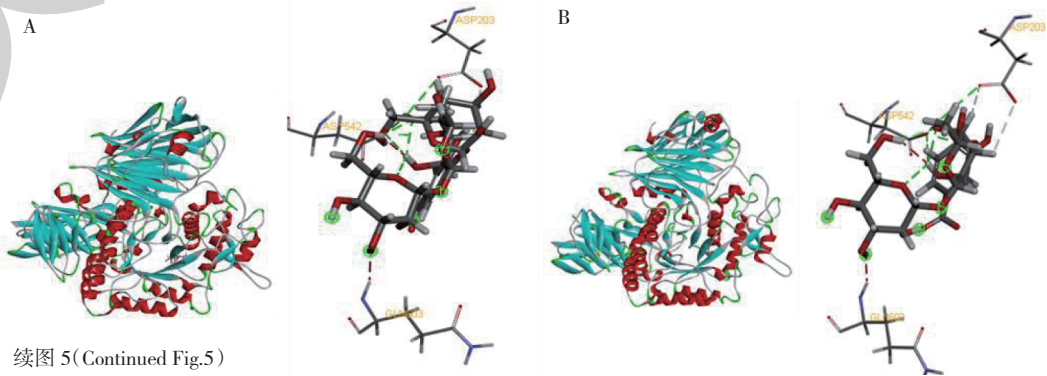
基于分子对接预测,对化合物进行体外 α -葡萄糖苷酶抑制实验,以阿卡波糖为阳性对照,结果与对接预测高度一致:仅化合物1、2、3、7、13、14表现出

表1 化合物及阿卡波糖与 α -葡萄糖苷酶的结合能

Table 1 Binding energies of compounds and acarbose with α -glucosidase

化合物 Compound	结合能 Binding energy (kcal/mol)
1	-31.0
2	-23.2
3	-22.8
4	1.8
5	10.4
6	-2.6
7	-19.0
8	17.9
9	-3.0
10	15.8
11	25.9
12	-1.0
13	-18.4
14	-22.5
阿卡波糖 Acarbose	-10.4

抑制活性,且抑制能力存在显著差异。如表2所示,化合物3(槲皮素)的抑制活性最强,其 IC_{50} 值仅为0.45 μ mol/L,接近阳性对照阿卡波糖(IC_{50} = 0.12 μ mol/L)的活性水平;化合物2(咖啡酸, IC_{50} = 3.70 μ mol/L)、化合物1(绿原酸, IC_{50} = 4.54 μ mol/L)活性次之;化合物7(开环异落叶松脂醇)活性中等, IC_{50} = 13.15 μ mol/L;而化合物14(苄基- O - β -D-吡喃葡萄糖苷)和化合物13(15 α -hydroxy-ent-kaur-16-en-19-oic acid)活性相对较弱,但高浓度下仍有一定抑制率。



续图5(Continued Fig.5)

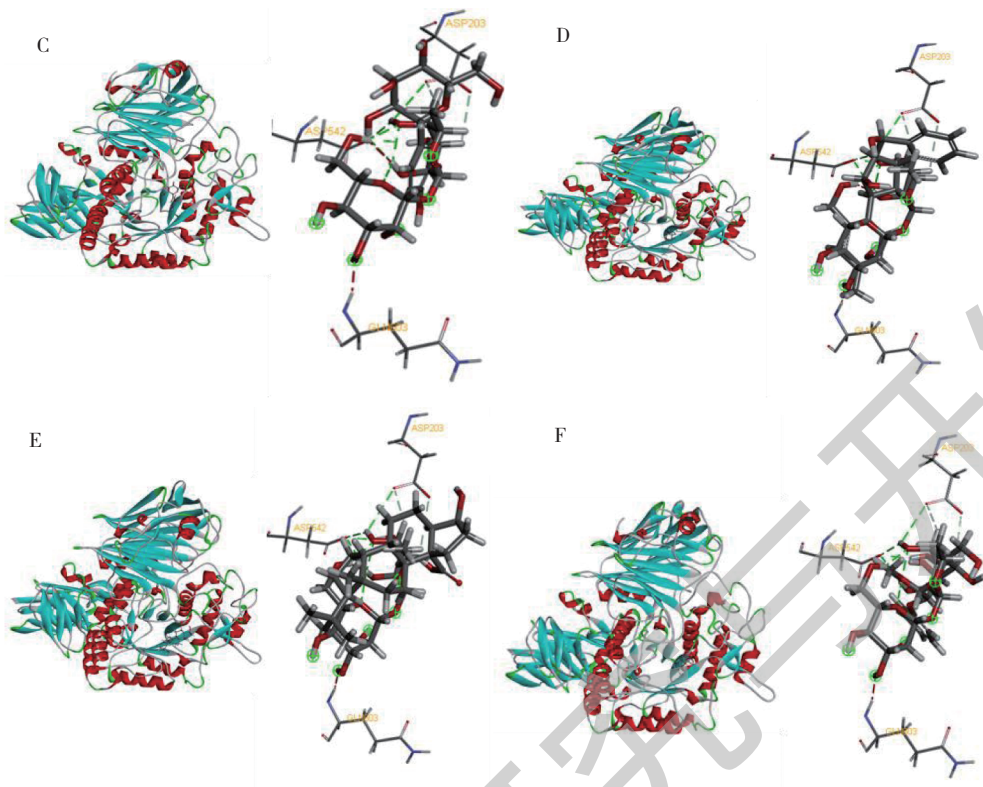


图5 化合物与α-葡萄糖苷酶分子对接结构视图

Fig. 5 Molecular docking structure views of compounds with α-glucosidase
注: A~F 为化合物 1, 2, 3, 7, 13, 14。Note: A-F are compound 1, 2, 3, 7, 13, 14.

表2 化合物及阿卡波糖对α-葡萄糖苷酶抑制能力的IC₅₀值($\bar{x} \pm s, n=3$)
Table 2 IC₅₀ values of various compounds and acarbose for α-glucosidase inhibitory activity($\bar{x} \pm s, n=3$)

化合物 Compound	IC ₅₀ (μmol/L)
1	4.54
2	3.70
3	0.45
7	13.15
13	387.50
14	267.70
阿卡波糖 Acarbose	0.12

2.3.3 化合物的抗氧化活性结果

选取α-葡萄糖苷酶抑制活性显著的化合物1、2、3、7,以抗坏血酸为阳性对照,结果如表3所示这4个化合物均具备抗氧化能力。其中化合物3(槲皮素)抗氧化活性最优,其DPPH自由基清除IC₅₀为5.23 mmol/L、ABTS自由基清除IC₅₀为0.29 mmol/L,与抗坏血酸活性接近,且4种化合物对ABTS自

由基的清除能力整体优于对DPPH自由基的清除能力。

表3 化合物及抗坏血酸的抗氧化活性IC₅₀值($\bar{x} \pm s, n=3$)
Table 3 IC₅₀ values of antioxidant activities for various compounds and ascorbic acid($\bar{x} \pm s, n=3$)

化合物 Compound	IC ₅₀ (mmol/L)	
	DPPH	ABTS
1	6.25	0.31
2	7.87	0.35
3	5.23	0.29
7	9.50	0.64
抗坏血酸 Ascorbic acid	3.33	0.28

3 结论

三叶五加为药食两用植物,被列入《广东省食品安全地方标准》,且同属植物细柱五加、刺五加、糙叶五加均以根入药。为了寻找五加属植物中的药食资源,本文以三叶五加根为研究对象,从抑制α-葡萄糖苷酶及抗氧化作用最优的三叶五加根乙酸乙

酯萃取部位分离得到 14 个化合物,包括甾体化合物 1 个,苯丙素类化合物 9 个,萜类化合物 1 个,黄酮类化合物 2 个,其他类化合物 1 个。经分子对接与体外实验验证了开环异落叶松脂醇、槲皮素、咖啡酸、绿原酸兼具有较好的降糖与抗氧化活性。

本研究的石油醚部位因萃取出较多脂溶性萜类、甾醇等可能潜在成分叠加产生毒性,易破坏细胞膜结构或干扰细胞代谢;甲醇提取物则因提取出极性较大的生物碱、皂苷等物质叠加,可抑制细胞内酶活性或诱导氧化应激,二者所含毒性成分的协同作用导致细胞活性显著降低,所以没有对这两部分进行成分研究。

此研究完善了三叶五加的化学成分和药理活性,研究结果为利用该植物开发降糖功能食品及降糖新药提供了一定的理论基础研究。

数据可用性声明: 本篇论文的关联数据可在 ScienceDB 数据库 (<https://doi.org/10.57760/sciencedb.nprd.00399>) 中访问获取。

参考文献

- 1 Wang BQ, Guo XL, Liu Y, et al. Research advances in chemical constituents and pharmacological activities of *Acanthopanax trifoliatum* (L.) Merr. [J]. Nor Hortie (北方园艺), 2018, 13: 162-168.
- 2 Muselli A, Hoi TM, Cu LD, et al. Composition of the essential oil of *Acanthopanax trifoliatum* (L.) Merr. (Araliaceae) from Vietnam [J]. Flavour Fragr J, 1999, 14: 41-44.
- 3 Luo JB. Pharmacognosy research on *Acanthopanax trifoliatum* [D]. Guangzhou: Guangdong Pharmaceutical University (广东药科大学), 2016.
- 4 Luo J, Zhang BB, Yang Y, et al. Chemical constituents from the stem of *Acanthopanax trifoliatum* based on the bioactivity guided of α -glucosidase inhibitory activity [J]. J Chin Med Mater (中药材), 2020, 43: 1373-1378.
- 5 Hussain F, Khan Z, Jan MS, et al. Synthesis, *in-vitro* α -glucosidase inhibition, antioxidant, *in-vivo* antidiabetic and molecular docking studies of pyrrolidine-2, 5-dione and thiazolidine-2, 4-dione derivatives [J]. Bioorg Chem, 2019, 91: 103128.
- 6 Shi CY, Huang RY, Huang HC, et al. Study on correlation between oxidative stress, inflammatory factors and diabetic foot ulcers [J]. Acad J Shanghai Univ Tradit Chin Med (上海中医药大学学报), 2022, 36: 45-48.
- 7 Luo J. Study on hypoglycemic active components in the leaves of *Acanthopanax evodiaefolius* Franch. [D]. Changsha:

Hunan University of Chinese Medicine (湖南中医药大学), 2018.

- 8 Lu MX, Chen Y, Li XJ, et al. Hypoglycemic and antioxidant effects of water extract from the leaves of *Acanthopanax gracilistylus* [J]. Lishizhen Med Mater Med Res (时珍国医国药), 2020, 31: 2597-2599.
- 9 Lu MX, Yang Y, Zou QP, et al. Anti-diabetic effects of acan-koreagenin from the leaves of *Acanthopanax gracilistylus* herb in RIN-m5F cells via suppression of NF- κ B activation [J]. Molecules, 2018, 23: 958.
- 10 Huang H. Study on the chemical constituents of Jingdenglong and their biological activity [D]. Yichun: Yichun University (宜春学院), 2023.
- 11 Hu F, Ci AT, Wang H, et al. Identification and hydrolysis kinetic of a novel antioxidant peptide from pecan meal using alcalase [J]. Food Chem, 2018, 261: 301-310.
- 12 Wani TA, Zargar S, Hussain A. Spectroscopic, thermodynamic and molecular docking studies on molecular mechanisms of drug binding to proteins [J]. Molecules, 2022, 27: 8405.
- 13 Xu ZQ, He MZ, Yao M, et al. Study on chemical constituents of *Ainsliaea fragrans* [J]. Chin Tradit Herb Drugs (中草药), 2023, 54: 1728-1735.
- 14 Jiang WQ, Du J, Wu JC. Chemical constituent of *Balanophora harlandii* [J]. J Chin Med Mater (中药材), 2023, 46: 2455-2462.
- 15 Chen Z, Liu YM, Yang S, et al. Studies on the chemical constituents and anticancer activity of *Saxifraga stolonifera* (L.) Meeb [J]. Bioorg Med Chem, 2008, 16: 1337-1344.
- 16 Liu M, Li ZF, Feng Y, et al. Isolation and identification of chemical constituents from seeds of *Litchi chinensis* [J]. Chin Tradit Herb Drugs (中草药), 2019, 50: 3593-3597.
- 17 Xiang Y, Yang SP, Zhan ZJ, et al. Terpenoids and phenols from *Taiwania flousian* [J]. J Integr Plant Biol (植物学报), 2004, 46: 1002-1008.
- 18 Lu HL, Yang M, Lin S, et al. Chemical constituents from acetyl acetate extract fraction of *Incarvillea delavayi* [J]. China J Chin Mater Med (中国中药杂志), 2009, 34: 1799-1801.
- 19 Moon SS, Rahman AA, Kim J Y, et al. Hanultarin, a cytotoxic lignan as an inhibitor of actin cytoskeleton polymerization from the seeds of *Trichosanthes kirilowii* [J]. Bioorg Med Chem, 2008, 16: 7264-7269.
- 20 Zhou XD, Yu SF, Chen M, et al. Chemical constituents from *Tetracera asiatica* (Lour.) Hoogland [J]. J Jinan Univ: Nat Sci Med (暨南大学学报: 自然科学与医学版), 2015, 36: 302-306.