

## 麻叶荨麻化学成分及体外降血糖活性研究

徐明婷<sup>1,2</sup>, 贾雯靖<sup>1,2</sup>, 刘莉莹<sup>1,2</sup>, 王路雅<sup>1,2</sup>, 乐敏<sup>1</sup>, 罗慧琴<sup>1</sup>, 岳会兰<sup>1</sup>, 赵晓辉<sup>1\*</sup>

1. 中国科学院西北高原生物研究所 青海省藏药研究重点实验室, 青海 西宁 810008

2. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 目的 研究麻叶荨麻 *Urtica cannabina* 的化学成分及其体外降糖活性。方法 综合运用 HPD-600 大孔吸附树脂柱色谱、硅胶柱色谱、制备薄层色谱及半制备高效液相色谱进行分离纯化, 根据化合物的理化性质和核磁共振波谱数据进行结构鉴定; 并运用体外  $\alpha$ -葡萄糖苷酶、蔗糖酶及麦芽糖酶抑制实验评价化合物的降糖活性。结果 从麻叶荨麻 70%乙醇提取物中分离得到 20 个化合物, 分别鉴定为顺式对羟基肉桂酸 (1)、反式对羟基肉桂酸 (2)、二甲基癸酸酯 (3)、山柰酚-3-O- $\beta$ -D-吡喃葡萄糖苷 (4)、咖啡酸 (5)、绿原酸甲酯 (6)、4-O-阿魏酰奎宁酸甲酯 (7)、4-羟基肉桂酸甲酯 (8)、(E)-对香豆酰二甲基苹果酸酯 (9)、秦皮素啞 (10)、反式咖啡酸甲酯 (11)、反式咖啡酸乙酯 (12)、3,4-二羟基苯乙酮 (13)、4-咖啡酰奎宁酸 (14)、3-O-对香豆酰奎宁酸甲酯 (15)、3-O-阿魏酰奎宁酸甲酯 (16)、水杨酸 (17)、菜豆酸 (18)、5-O-对香豆酰奎宁酸甲酯 (19)、5-O-阿魏酰奎宁酸甲酯 (20)。体外活性筛选显示, 化合物 5、7 对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶具有较好的抑制活性; 化合物 5、6、11、12 和 14 对蔗糖酶和麦芽糖酶均表现出较强抑制作用。结论 化合物 1、2 和 5~12、14~20 均为酚酸类, 4 为黄酮类, 13 为酮酚类化合物。其中, 化合物 3、7、9、10、13、15、16、18~20 均为首次从麻叶荨麻中分离得到。化合物 5 对 3 种酶均呈现显著抑制, 可能为麻叶荨麻中发挥降糖作用的核心药效团结构。构效分析揭示, 邻苯二酚结构和咖啡酸酯化结构共同构成了酚酸类成分抑制糖苷酶活性的关键结构基础。

**关键词:** 荨麻科; 麻叶荨麻; 2 型糖尿病; 体外降糖活性; 二甲基癸酸酯; 4-O-阿魏酰奎宁酸甲酯; 秦皮素啞; 菜豆酸

中图分类号: R284.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-2670(2026)05-1610-12

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.05.003

## Chemical constituents and *in vitro* hypoglycemic activity of *Urtica cannabina*

XU Mingting<sup>1,2</sup>, JIA Wenjing<sup>1,2</sup>, LIU Liying<sup>1,2</sup>, WANG Luya<sup>1,2</sup>, YUE Min<sup>1</sup>, LUO Huiqin<sup>1</sup>, YUE Huilan<sup>1</sup>, ZHAO Xiaohui<sup>1</sup>

1. Qinghai Provincial Key Laboratory of Tibetan Medicine Research, Northwest Institute of Plateau Biology, Xinning Road 23, Xining 810008, China

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

**Abstract: Objective** To investigate the chemical constituents of *Urtica cannabina* and their hypoglycemic activity *in vitro*. **Methods** The compounds were isolated and purified by column chromatography of HPD-600 macroporous resin, silica gel, preparative TLC, and semi-preparative HPLC. Their structures were elucidated by physicochemical properties and spectral analyses. The hypoglycemic activity was evaluated *in vitro* through their inhibitory effects on  $\alpha$ -glucosidase, sucrase, and maltase. **Results** Twenty compounds were isolated and identified from the 70% ethanol extract of *U. cannabina*, including *cis-p*-hydroxycinnamic acid (1), *trans-p*-hydroxycinnamic acid (2), dimethyl glansreginate (3), kaempferol 3-O- $\beta$ -D-glucopyranoside (4), caffeic acid (5), chlorogenic acid methyl ester (6), 4-O-feruloylquinic methyl ester (7), hydroxycinnamic acid methyl ester (8), (E)-*p*-coumaroyl dimethyl malate (9), fraxidin (10), *trans*-caffeic acid methyl ester (11), *trans*-caffeic acid ethyl ester (12), 3,4-dihydroxy-acetophenone (13), 4-caffeoylquinic acid (14), 3-O-*p*-coumaroyl quinic acid methyl ester (15), 3-O-feruloylquinic methyl ester (16), hydroxybenzoic acid (17), phaseic acid (18), 5-O-*p*-coumaroylquinic methyl ester (19), 5-O-feruloylquinic methyl ester (20). The *in vitro* activity screening revealed that compounds 5 and 7 exhibited significant inhibitory activity against  $\alpha$ -glucosidase, while compounds 5, 6, 11, 12 and 14

收稿日期: 2025-11-19

基金项目: 青海省中央引导地方科技发展资金 (2025ZY008)

作者简介: 徐明婷 (2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为天然药物化学。E-mail: 3452869152@qq.com

\*通信作者: 赵晓辉 (1979—), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为天然药物化学及药理学。E-mail: xhzhao@nwpb.cas.cn

displayed considerable inhibitory effects on both sucrase and maltase. **Conclusion** Compounds **1**, **2**, **5—12**, and **14—20** are phenolic acids, compound **4** is a flavonoid, and compound **13** is a ketophenol. Among these, compounds **3**, **7**, **9**, **10**, **13**, **15**, **16**, and **18—20** were isolated from *U. cannabina* for the first time. Compound **5** demonstrated notable inhibitory activity against all three enzymes, suggesting that it may serve as the core pharmacophoric structure for the hypoglycemic effect. Structure-activity relationship analysis indicated that the catechol structure and the caffeic acid esterification motif collectively constitute the key structural basis for the glycosidase inhibitory activity of these phenolic acids.

**Key words:** Urticaceae; *Urtica cannabina* L.; type 2 diabetes mellitus; hypoglycemic activity *in vitro*; dimethyl glansreginate; 4-*O*-feruloylquinic methyl ester; fraxidin; phaseic acid

2型糖尿病 (type 2 diabetes mellitus, T2DM) 是一类由于胰岛素分泌相对不足或胰岛素抵抗引起, 并以持续性高血糖、糖脂代谢紊乱为特征的慢性代谢性疾病<sup>[1]</sup>, 其发病率正随着环境、生活方式、饮食习惯的改变而呈持续攀升态势, 并且呈现年轻化的趋势, 已成为非常严重的公共卫生挑战。长期的高血糖状态会引发多种并发症, 如心血管疾病、高血压、脑卒中、视力丧失和肾功能障碍<sup>[2-3]</sup>。其中餐后血糖 (postprandial blood glucose) 的剧烈波动是 2 型糖尿病发展和并发症的重要诱因<sup>[4-5]</sup>, 而  $\alpha$ -葡萄糖苷酶在此过程中扮演关键角色。该酶是分布于小肠刷状缘的一类关键碳水化合物水解酶, 负责将膳食中的双糖 (蔗糖、麦芽糖) 及寡糖水解为可被吸收的单糖, 从而引起餐后血糖的急剧升高。因此, 抑制  $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性可有效延缓碳水化合物的消化和葡萄糖的吸收, 进而达到有效控制餐后血糖升高的目的<sup>[6-7]</sup>。目前临床常用的  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制剂有阿卡波糖、米格列醇、伏格列波糖等<sup>[8]</sup>。然而长期使用这些药物可能引发低血糖、胃肠道紊乱及营养物质吸收障碍等不良反应<sup>[9-10]</sup>。基于此, 从天然药用植物中探寻高效、安全的新型  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制剂仍是当前亟待解决的重要课题。

麻叶荨麻 *Urtica cannabina* L. 为荨麻科 (Urticaceae) 荨麻属 *Urtica* L. 多年生草本植物, 广泛分布于我国西北地区海拔 800~2 800 m 的丘陵性草原、河滩、溪旁、干燥山坡等处, 表现出较强的生态适应性<sup>[11]</sup>。该植物在民间亦称火麻草、哈拉海等, 药用历史悠久, 始载于《本草图经》, 全草或根可入药, 味苦、辛, 性温, 具有祛风除湿、活血解痉、抗炎消肿、利尿等功效, 传统主治风湿关节痛、产后抽风、小儿惊风、荨麻疹、毒蛇咬伤、小便不利等症<sup>[12]</sup>。目前, 诸多学者已针对荨麻属植物中的化学物质进行了大量研究, 已探明荨麻属中主要活性成分包括黄酮类、酚酸类、萜类、生物碱类、多糖等<sup>[13-16]</sup>; 现代药理学研究表明, 其具有良好的

抑制良性前列腺增生、抗风湿、降血糖、镇痛、抗炎、抗菌、抗氧化等药理活性<sup>[17-20]</sup>。近年来, 针对同属植物裂叶荨麻的研究已较为深入, 其提取物及活性部位在体外表现出明确的  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制活性, 并在 2 型糖尿病小鼠模型中被证实具有调节血糖、改善糖脂代谢紊乱的作用, 活性化学成分也得到了初步阐明<sup>[21-23]</sup>。然而, 荨麻属内物种繁多, 不同物种间的研究深度存在严重的不均衡性。相较于同属其他物种, 麻叶荨麻作为我国西北地区特色药用资源, 虽然化学研究表明其富含酚酸等潜在活性成分<sup>[24]</sup>, 且体内实验提示其提取物具有降糖效应<sup>[25-26]</sup>, 但其系统性化学与药理研究尚不充分。目前有关麻叶荨麻的研究多聚焦于其农艺学性状<sup>[27-31]</sup>或作为饲用资源<sup>[31-36]</sup>的宏观营养成分分析, 而对其特征性化学成分的分离、结构鉴定及相应的药理活性探索方面尚不充分, 尤其是在降血糖活性方面, 缺乏针对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶、蔗糖酶和麦芽糖酶等关键靶点的活性筛选与构效关系研究, 这种研究现状极大地限制了麻叶荨麻资源价值的科学认知与综合开发利用。

基于天然产物是发现新型  $\alpha$ -糖苷酶抑制剂的重要来源<sup>[37-38]</sup>, 以及体外酶抑制模型在药物筛选中的有效性<sup>[39]</sup>, 本研究以麻叶荨麻为对象, 系统开展其化学成分及体外降糖活性研究。采用系统分离纯化技术, 综合运用多种色谱技术与波谱分析方法, 分离得到 20 个化合物 (结构见图 1), 分别鉴定为顺式对羟基肉桂酸 (*cis-p*-hydroxycinnamic acid, **1**)、反式对羟基肉桂酸 (*trans-p*-hydroxycinnamic acid, **2**)、二甲基葵酸酯 (dimethyl glansreginate, **3**)、山柰酚-3-*O*- $\beta$ -*D*-吡喃葡萄糖苷 (kaempferol 3-*O*- $\beta$ -*D*-glucopyranoside, **4**)、咖啡酸 (caffeic acid, **5**)、绿原酸甲酯 (chlorogenic acid methyl ester, **6**)、4-*O*-阿魏酰奎宁酸甲酯 (4-*O*-feruloylquinic methyl ester, **7**)、4-羟基肉桂酸甲酯 (hydroxycinnamic acid methyl ester, **8**)、(*E*)-对香豆酰二甲基苹果酸酯 [(*E*)-*p*-

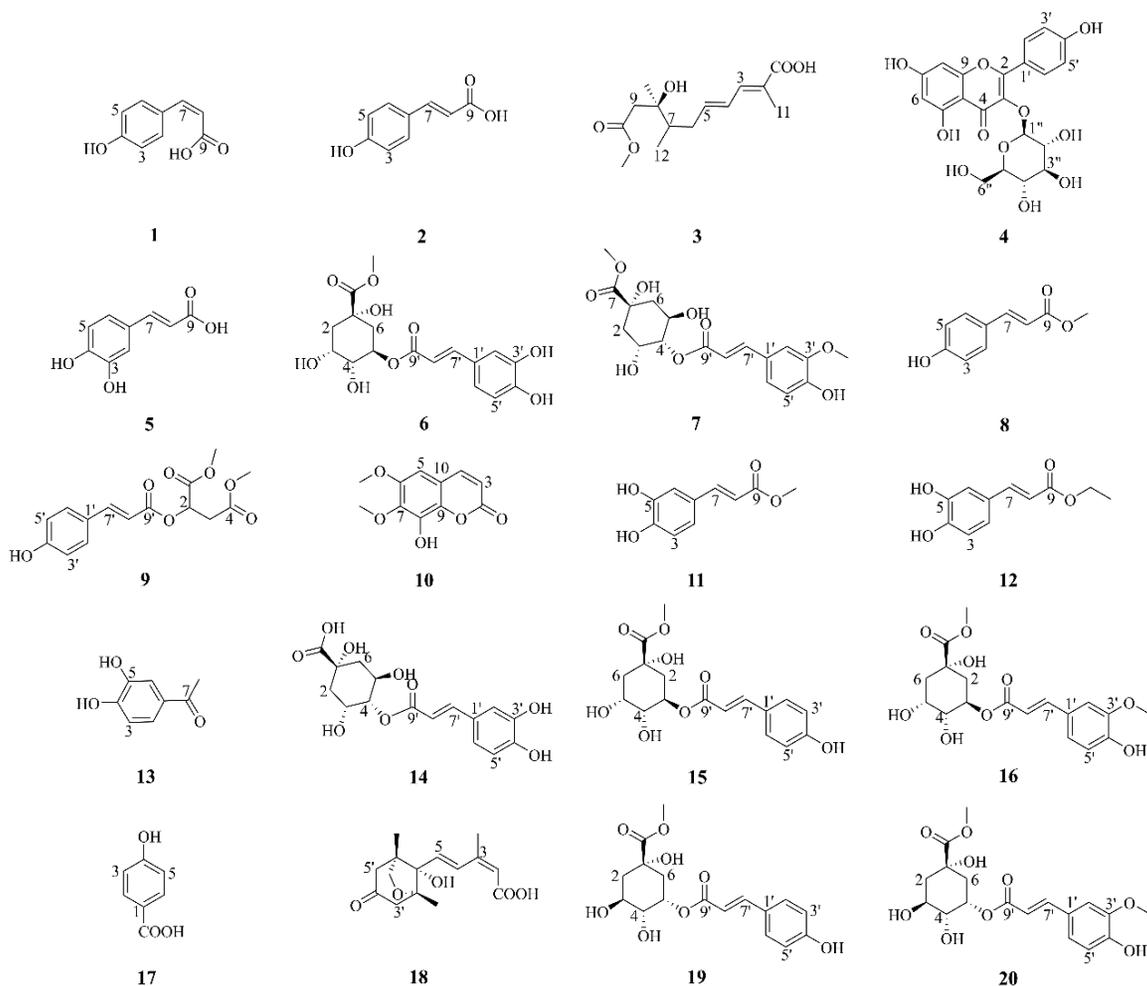


图1 化合物1~20的化学结构

Fig. 1 Chemical structures of compounds 1—20

coumaroyl dimethyl malate, 9]、秦皮素啉 (fraxidin, 10)、反式咖啡酸甲酯 (*trans*-caffeic acid methyl ester, 11)、反式咖啡酸乙酯 (*trans*-caffeic acid ethyl ester, 12)、3,4-二羟基苯乙酮 (3,4-dihydroxyacetophenone, 13)、4-咖啡酰奎宁酸 (4-caffeoylquinic acid, 14)、3-*O*-对香豆酰奎宁酸甲酯 (3-*O*-*p*-coumaroyl quinic acid methyl ester, 15)、3-*O*-阿魏酰奎宁酸甲酯 (3-*O*-feruloylquinic methyl ester, 16)、水杨酸 (hydroxybenzoic acid, 17)、菜豆酸 (phaseic acid, 18)、5-*O*-对香豆酰奎宁酸甲酯 (5-*O*-*p*-coumaroylquinic methyl ester, 19)、5-*O*-阿魏酰奎宁酸甲酯 (5-*O*-feruloylquinic methyl ester, 20)。其中, 化合物 3、7、9、10、13、15、16、18~20 均为首次从麻叶荨麻中分离得到。再通过体外酶抑制活性实验, 重点评估所得单体化合物在  $\alpha$ -葡萄糖苷酶、蔗糖酶及麦芽糖酶中的抑制活性, 筛选具有降糖潜力的活性单体, 并初步探讨其构效关系。结果表明,

化合物 5、7 对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶具有较好的抑制活性; 化合物 5、6、11、12 和 14 对蔗糖酶和麦芽糖酶均表现出较强抑制作用。本研究旨在阐明麻叶荨麻中降糖作用的关键物质基础, 也为其后续开发为天然来源的降糖药物或功能食品提供科学依据。

## 1 仪器与材料

### 1.1 药材与耗材

麻叶荨麻样品于 2024 年 7 月采自青海省西宁市湟中区多巴镇, 经中国科学院大学西北高原生物研究所梅丽娟研究员鉴定为荨麻科荨麻属植物麻叶荨麻 *U. cannabina* L.

柱色谱硅胶 (100~200、200~300 目, 青岛邦凯高新技术材料有限公司); 大孔吸附树脂 HPD-600 (上海依莱思新材料有限公司); 二氯甲烷、甲醇、乙醇等分析级试剂 (成都市科隆化学有限公司); 色谱试剂 (甲醇、乙醇、甲酸和乙腈, 天津市凯通化学试剂有限公司);  $\alpha$ -葡萄糖苷酶 (酵母菌来

源,上海源叶生物科技有限公司); 4-硝基酚- $\alpha$ -D-吡喃葡萄糖苷(4-nitrophenyl  $\alpha$ -D-glucopyranoside, *p*-NPG, 美国 Sigma 公司); 碳酸钠(国药集团化学试剂有限公司); 阿卡波糖(上海源叶生物科技有限公司, 批号 S11190); 蔗糖酶、麦芽糖酶(实验室大鼠小肠中提取); 蔗糖、麦芽糖(北京索莱宝科技有限公司); PBS 缓冲液(上海吉至生化科技有限公司); 葡萄糖检测液(中国上海荣盛生物制药有限公司)。

## 1.2 仪器

Agilent 12060 型高效液相色谱仪(HPLC, 安捷伦科技有限公司); NP7005C 型半制备高效液相色谱仪(反相)(江苏汉邦科技有限公司); N-1210BV-WB 旋转蒸发仪(日本 EYELA 公司); ZF-20D 型暗箱紫外分析仪(上海骥辉分析仪器有限公司); UPT-11-100L 型超纯水仪(四川优普超纯科技有限公司); BE9010 型恒温振荡器(海门市其林贝尔仪器制造有限公司); 低温离心机(湖南湘仪离心机仪器有限公司); Epoch2 酶标仪(美国 Bio Tek 公司); HPLC 分析柱为 Megres C<sub>18</sub> 色谱柱(250×20 mm, 10  $\mu$ m, 北京华谱新创科技有限公司)、Dubhe C<sub>18</sub> 色谱柱(250 mm×20 mm, 10  $\mu$ m, 北京华谱新创科技有限公司); Nucifera C<sub>18</sub>A 色谱柱(250 mm×20 mm, 5  $\mu$ m, 江苏汉邦科技有限公司)。

## 2 方法

### 2.1 提取与分离

干燥麻叶荨麻 8 kg 经粉碎后,以 6 倍量 70% 乙醇于 50 °C 加热浸泡提取 4 次,每次 4 h,合并提取液,减压浓缩烘干后得总浸膏。将该浸膏溶于 6 L 纯水中,经超声辅助溶解后,加入等体积石油醚进行脱脂脱色素处理,快速搅拌静置分层后,分离石油醚相,反复萃取至石油醚相无色后,浓缩石油醚相,浓缩液离心 10 min,加 5% 浓 HCl 调节 pH 值至 3 左右,上样至 HPD-600 大孔吸附树脂柱,依次采用调节 pH 值的水及 5%、15%、20%、40%、60%、95% 乙醇溶液进行洗脱,共得到 7 个部位。

20%乙醇洗脱部位(Fr. 4)采用硅胶柱(100~200 目)分离,以二氯甲烷-甲醇(50:1~1:1)梯度洗脱,薄层色谱法(TLC)检识后合并相同组分,得到 4 个组分 Fr. 4-1~4-4。Fr. 4-1 经正相硅胶柱色谱洗脱得到 4 个混合物组分 Fr. 4-1-1~4-1-4。Fr. 4-1-2 经 Dubhe C<sub>18</sub> 色谱柱 [20%~30%乙腈-0.2%甲酸水, 10.0 mL/min] 分离得到化合物 10 (8 mg,  $t_R$ =9.5 min)、11 (100 mg,  $t_R$ =15 min)、12 (14 mg,

$t_R$ =29 min)。Fr. 4-1-3 经 Megres C<sub>18</sub> 色谱柱 [13%乙腈-0.2%甲酸水, 10.0 mL/min] 分离得到化合物 5 (11 mg,  $t_R$ =9 min)、6 (882.6 mg,  $t_R$ =15 min)、7 (30 mg,  $t_R$ =18 min)、13 (2 mg,  $t_R$ =10 min) 与组分 Fr. 4-1-3-5~Fr. 4-1-3-7。Fr. 4-1-3-5 再经 Megres C<sub>18</sub> 色谱柱 [10%乙腈-0.2%甲酸水, 10.0 mL/min] 纯化得到化合物 14 (76.4 mg,  $t_R$ =16 min)、15 (4.5 mg,  $t_R$ =33 min)、16 (10 mg,  $t_R$ =45 min)。

40%乙醇洗脱部位(Fr. 5)经正相硅胶柱色谱,以二氯甲烷-甲醇(30:1~3:1)梯度洗脱,薄层色谱检识后合并相同组分,得到 6 个组分 Fr. 5-1~5-6。Fr. 5-1 经正相硅胶柱色谱洗脱得到 3 个混合物组分 Fr. 5-1-1~5-1-3。Fr. 5-1-1 经半制备型高效液相色谱 [25%~40%乙腈-0.2%甲酸水, 10.0 mL/min] 洗脱得到 6 个混合物组分 Fr. 5-1-1-1~5-1-1-6。Fr. 5-1-1-3 与 Fr. 5-1-1-5 经 Dubhe C<sub>18</sub> 色谱柱 [25%乙腈-0.2%甲酸水, 10.0 mL/min] 纯化得到化合物 8 (88 mg,  $t_R$ =23 min) 和 9 (424.3 mg,  $t_R$ =25 min)。Fr. 5-1-2 经 Nucifera C<sub>18</sub>A 色谱柱 [22%乙腈-0.2%甲酸水, 10.0 mL/min] 分离得到化合物 1 (5 mg,  $t_R$ =20 min)、2 (39.4 mg,  $t_R$ =18 min)、3 (163.5 mg,  $t_R$ =21 min)、4 (160 mg,  $t_R$ =19 min)。Fr. 5-1-3 经 Nucifera C<sub>18</sub>A 色谱柱 [20%~40%乙腈-0.2%甲酸水, 10.0 mL/min] 洗脱得到 9 个组分 Fr. 5-1-3-1~5-1-3-9。其中 Fr. 5-1-3-2 与 Fr. 5-1-3-4 经 Megres C<sub>18</sub> 色谱柱 [17%乙腈-0.2%甲酸水, 10.0 mL/min] 分离得到化合物 17 (5 mg,  $t_R$ =8 min)、18 (11 mg,  $t_R$ =19 min)、19 (160 mg,  $t_R$ =14 min)、20 (160 mg,  $t_R$ =16 min)。

### 2.2 体外降糖活性研究

**2.2.1  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制活性实验**  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制实验参照本课题组已建立的方法,并根据实际情况进行修改<sup>[40]</sup>。酵母来源的  $\alpha$ -葡萄糖苷酶(G5003-100 UN)中加入 2 mL PBS 制成 50 U/mL 母液,取 0.1 mL 母液加 0.4 mL PBS 溶液,配制成 10 U/mL 储备液,并稀释至 0.4 U/mL 溶液备用。称取底物 2 mg,加入 7 mL PBS 溶液,配制成 1 mmol/L 的母液,取母液 5 mL 加入 5 mL PBS 溶液稀释得到 0.5 mmol/L 的底物溶液。称取阿卡波糖及 19 种化合物,用 PBS 溶液配制成浓度均为 1 mmol/L 的溶液。向 96 孔板中加入 50  $\mu$ L 药液,50  $\mu$ L 0.5 mmol/L 底物,放入 37 °C 恒温振荡器孵育(转速为 600 r/min) 10 min。冰浴冷却放置 2~3 min 后,加入 50  $\mu$ L 酶液或 PBS 溶液。酶促反应体系的终体积为 150

$\mu\text{L}$ , 其中样品、底物 (pNPG) 及  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的终浓度分别为 0.333、0.167 mmol/L 和 3.33 U/mL。同样条件下孵育 20 min, 立即冰浴放置 5 min, 降低酶活性, 再加入 50  $\mu\text{L}$  0.1 mol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液终止反应。待稳定后使用酶标仪检测 405 nm 波长处的吸光度 ( $A$ ) 值, 记录数据。每个样品设置 3 个平行复孔。使用 Prism 软件对数据进行处理, 并根据相应的公式计算各化合物的抑制率。

$$\text{抑制率} = 1 - (A_{\text{实验}} - A_{\text{本底}}) / (A_{\text{对照}} - A_{\text{空白}})$$

$A_{\text{实验}}$  为含有样品、酶液和底物溶液孔的  $A$  值;  $A_{\text{本底}}$  为含有样品和底物溶液, 酶液用等体积 PBS 代替孔的  $A$  值;  $A_{\text{对照}}$  为含有酶液和底物溶液, 样品用等体积 PBS 代替孔的  $A$  值;  $A_{\text{空白}}$  为只含有 PBS 孔的  $A$  值

**2.2.2 大鼠小肠糖苷酶的活力测定** 参照文献方法<sup>[41]</sup>, 取葡萄糖检测试剂盒中的葡萄糖校准液 (5.55 mmol/L) 1 mL, 稀释成 7 个浓度的溶液 (1、0.5、0.25、0.125、0.062 5、0.031 25、0.015 625 mmol/L), 分别与葡萄糖检测液反应后在 505 nm 波长下测定  $A$  值, 绘制浓度与  $A$  值标准曲线。取 50  $\mu\text{L}$  的酶提取液和 50  $\mu\text{L}$  0.25 mol/L 的蔗糖/麦芽糖 (终浓度为 0.125 mol/L) 溶液加入到 48 孔板中, 在 37  $^{\circ}\text{C}$ 、600 r/min 的条件下孵育 20 min 后, 100  $^{\circ}\text{C}$  条件下煮沸 20 min 使蛋白变性, 置于冰上待冷却后加入葡萄糖检测液反应 15 min, 用酶标仪在 505 nm 波长下检测分光光度值。计算葡萄糖浓度、蔗糖酶和麦芽糖酶的活力 (1 L 溶液中每分钟产生 1  $\mu\text{mol}$  的葡萄糖为 1 U 酶活力)。标准曲线为  $y = 0.247 5x + 0.041 8$ ,  $R^2 = 0.999 2$ 。提取液中的蔗糖酶和麦芽糖酶的活力分别为 77.38、55.12 U/mL。每组设 3 个平行复孔。

**2.2.3 蔗糖酶和麦芽糖酶抑制活性实验** 参照文献方法<sup>[42]</sup>, 测定麻叶荨麻中化合物对蔗糖酶和麦芽糖酶的抑制活性。制备 50 mmol/L 蔗糖溶液、1 mmol/L 麦芽糖溶液、17.5 U/mL 蔗糖酶溶液、11.56 U/mL 麦芽糖酶溶液、1 mmol/L 化合物溶液 (均用 PBS 配制)。将 50  $\mu\text{L}$  含有 1 mmol/L 样品和 50  $\mu\text{L}$  含有比例为 1 : 9 (蔗糖) / 1 : 5 (麦芽糖) 的酶液加入 48 孔板, 放在 37  $^{\circ}\text{C}$  恒温器上孵育 10 min。在冰上冷却放置 2~3 min 后, 加入 50  $\mu\text{L}$  50 mmol/L 蔗糖溶液或 1 mmol/L 麦芽糖溶液至上述混合物, 同样条件下孵育 20 min。蔗糖酶反应体系终体积为 150  $\mu\text{L}$ , 其中样品、蔗糖及蔗糖酶的终浓度分别为 0.333、16.67 mmol/L 和 5.83 U/mL; 麦芽糖酶反应体系终体积为 150  $\mu\text{L}$ , 其中样品、麦芽糖及麦芽糖

酶的终浓度分别为 0.333、0.330 mmol/L 和 3.850 U/mL。在 100  $^{\circ}\text{C}$  下煮沸 20 min, 放置冰上冷却待稳定, 加入葡萄糖测定液反应 15 min, 反应结束后用酶标仪在 505 nm 波长下检测  $A$  值。每组设置 3 个平行复孔。使用 Prism 软件对数据进行处理, 并根据相应的公式计算各化合物的抑制率。

### 3 结果

#### 3.1 结构鉴定

**化合物 1:** 褐色粉末, 分子式为  $\text{C}_9\text{H}_8\text{O}_3$ 。 $^1\text{H-NMR}$  (600 MHz, MeOD)  $\delta$ : 7.57 (2H, d,  $J = 8.4$  Hz, H-2, 6), 6.74 (1H, d,  $J = 12.7$  Hz, H-7), 6.72 (2H, d,  $J = 8.4$  Hz, H-3, 5), 5.77 (1H, d,  $J = 12.7$  Hz, H-8);  $^{13}\text{C-NMR}$  (150 MHz, MeOD)  $\delta$ : 171.2 (C-9), 159.6 (C-4), 142.3 (C-7), 133.1 (C-2, 6), 127.9 (C-1), 118.4 (C-8), 115.7 (C-3, 5)。以上波谱数据经与文献报道基本一致<sup>[43]</sup>, 故鉴定化合物 1 为顺式对羟基肉桂酸。

**化合物 2:** 褐色粉末, 分子式为  $\text{C}_9\text{H}_8\text{O}_3$ 。 $^1\text{H-NMR}$  (600 MHz, MeOD)  $\delta$ : 7.55 (1H, d,  $J = 15.9$  Hz, H-8), 7.40 (2H, d,  $J = 8.3$  Hz, H-2, 6), 6.76 (2H, d,  $J = 8.3$  Hz, H-3, 5), 6.24 (1H, d,  $J = 15.9$  Hz, H-7);  $^{13}\text{C-NMR}$  (150 MHz, MeOD)  $\delta$ : 171.1 (C-9), 161.1 (C-4), 146.5 (C-1), 131.0 (C-2, 6), 127.2 (C-7), 116.7 (C-3, 5), 115.6 (C-8)。以上波谱数据经与文献报道基本一致<sup>[44]</sup>, 故鉴定化合物 2 为反式对羟基肉桂酸。

**化合物 3:** 黄色油状物, 分子式为  $\text{C}_{13}\text{H}_{22}\text{O}_5$ 。 $^1\text{H-NMR}$  (600 MHz, MeOD)  $\delta$ : 7.18 (1H, d,  $J = 11.3$  Hz, H-3), 6.46 (1H, dd,  $J = 14.8, 11.5$  Hz, H-4), 6.10 (1H, dt,  $J = 14.9, 7.4$  Hz, H-5), 3.99 (1H, dt,  $J = 8.5, 4.0$  Hz, H-8), 3.68 (3H, s,  $-\text{OCH}_3$ ), 2.51 (1H, dd,  $J = 15.1, 4.1$  Hz, H-9a), 2.46 (1H, m, H-6a), 2.39 (1H, dd,  $J = 13.8, 6.8$  Hz, H-9b), 2.08 (1H, dt,  $J = 14.8, 7.9$  Hz, H-6b), 1.90 (3H, s, H-11), 1.67 (1H, m, H-7), 0.92 (3H, d,  $J = 6.9$  Hz, H-12);  $^{13}\text{C-NMR}$  (150 MHz, MeOD)  $\delta$ : 174.3 (C-10), 172.1 (C-1), 142.5 (C-5), 140.0 (C-3), 128.7 (C-4), 126.5 (C-2), 71.7 (C-8), 52.1 ( $-\text{OCH}_3$ ), 40.5 (C-9), 39.7 (C-7), 38.0 (C-6), 14.1 (C-12), 12.6 (C-11)。以上波谱数据经与文献报道基本一致<sup>[45]</sup>, 故鉴定化合物 3 为二甲基葵酸酯。

**化合物 4:** 黄色粉末, 分子式为  $\text{C}_{21}\text{H}_{20}\text{O}_{11}$ 。 $^1\text{H-NMR}$  (600 MHz, MeOD)  $\delta$ : 8.06 (2H, d,  $J = 8.4$  Hz, H-2', 6'), 6.89 (2H, d,  $J = 8.4$  Hz, H-3', 5'), 6.40 (1H, s, H-8), 6.21 (1H, s, H-6), 5.26 (1H, d,  $J = 7.2$  Hz, H-1'), 3.69 (1H, d,  $J = 11.8$  Hz, H-6''b), 3.53 (1H, dd,  $J = 11.8,$

5.3 Hz, H-6''a), 3.43 (2H, m, H-2'', 5''), 3.21 (1H, m, H-4'');  $^{13}\text{C-NMR}$  (150 MHz, MeOD)  $\delta$ : 179.5 (C-4), 166.1 (C-7), 163.1 (C-5), 161.5 (C-4'), 159.0 (C-9), 158.5 (C-2), 135.4 (C-3), 132.2 (C-2', 6'), 122.8 (C-1'), 116.0 (C-3', 5'), 105.7 (C-10), 104.0 (C-1''), 99.9 (C-6), 94.7 (C-8), 78.4 (C-5''), 78.0 (C-3''), 75.7 (C-2''), 71.3 (C-4''), 62.6 (C-6''). 以上波谱数据经与文献报道基本一致<sup>[46]</sup>, 故鉴定化合物 **4** 为山柰酚-3-*O*- $\beta$ -*D*-吡喃葡萄糖苷。

化合物 **5**: 黑色粉末, 分子式为  $\text{C}_9\text{H}_8\text{O}_4$ 。 $^1\text{H-NMR}$  (600 MHz, MeOD)  $\delta$ : 7.48 (1H, d,  $J = 15.8$  Hz, H-7), 7.00 (1H, s, H-2), 6.89 (1H, d,  $J = 8.0$  Hz, H-6), 6.74 (1H, d,  $J = 8.1$  Hz, H-5), 6.19 (1H, d,  $J = 15.7$  Hz, H-8);  $^{13}\text{C-NMR}$  (150 MHz, MeOD)  $\delta$ : 171.1 (C-9), 149.3 (C-4), 146.7 (C-7), 146.7 (C-3), 127.8 (C-1), 122.7 (C-6), 116.4 (C-5), 115.7 (C-2), 115.0 (C-8)。以上波谱数据经与文献报道基本一致<sup>[47]</sup>, 故鉴定化合物 **5** 为咖啡酸。

化合物 **6**: 黄色油状物, 分子式为  $\text{C}_{17}\text{H}_{20}\text{O}_9$ 。 $^1\text{H-NMR}$  (600 MHz, MeOD)  $\delta$ : 7.54 (1H, d,  $J = 15.9$  Hz, H-7'), 7.06 (1H, d,  $J = 1.9$  Hz, H-2'), 6.96 (1H, d,  $J = 8.2$  Hz, H-6'), 6.80 (1H, d,  $J = 8.2$  Hz, H-5'), 6.23 (1H, d,  $J = 15.9$  Hz, H-8'), 5.30 (1H, d,  $J = 4.2$  Hz, H-5), 4.15 (1H, m, H-3), 3.75 (1H, dd,  $J = 7.5, 2.9$  Hz, H-4), 3.70 (3H, s, 7-OCH<sub>3</sub>), 2.22 (1H, dd,  $J = 13.0, 8.4$  Hz, H-6b), 2.14 (2H, m, H-2), 2.03 (1H, dd,  $J = 13.6, 6.7$  Hz, H-6a);  $^{13}\text{C-NMR}$  (150 MHz, MeOD)  $\delta$ : 175.3 (C-7), 168.2 (C-9'), 149.6 (C-4'), 147.1 (C-7'), 146.7 (C-3'), 127.6 (C-1'), 122.9 (C-6'), 116.5 (C-5'), 115.1 (C-2'), 115.0 (C-8'), 75.8 (C-1), 72.5 (C-4), 72.0 (C-3), 70.3 (C-5), 52.9 (7-OCH<sub>3</sub>), 37.9 (C-6), 37.8 (C-2)。以上波谱数据经与文献报道基本一致<sup>[48]</sup>, 故鉴定化合物 **6** 为绿原酸甲酯。

化合物 **7**: 褐色油状物, 分子式为  $\text{C}_{18}\text{H}_{22}\text{O}_9$ 。 $^1\text{H-NMR}$  (600 MHz, MeOD)  $\delta$ : 7.70 (1H, d,  $J = 15.9$  Hz, H-3'), 7.21 (1H, s, H-5'), 7.10 (1H, d,  $J = 8.0$  Hz, H-9'), 6.82 (1H, d,  $J = 8.0$  Hz, H-8'), 6.46 (1H, d,  $J = 15.9$  Hz, H-2'), 4.83 (1H, d,  $J = 9.5$  Hz, H-4), 4.27 (1H, s, H-5), 4.30 (1H, m, H-3), 3.90 (3H, s, 6'-OCH<sub>3</sub>), 3.75 (3H, s, 7-OCH<sub>3</sub>), 2.19 (2H, m, H-2), 2.04 (2H, m, H-2-6);  $^{13}\text{C-NMR}$  (150 MHz, MeOD)  $\delta$ : 175.6 (C-7), 168.8 (C-1'), 150.6 (C-7'), 149.3 (C-6'), 147.0 (C-3'), 127.8 (C-4'), 124.0 (C-9'), 116.4 (C-8'), 115.7 (C-2'), 111.7

(C-5'), 78.5 (C-1), 76.4 (C-4), 68.9 (C-5), 65.7 (C-3), 56.4 (6'-OCH<sub>3</sub>), 52.9 (7-OCH<sub>3</sub>), 42.1 (C-6), 38.4 (C-2)。以上波谱数据经与文献报道基本一致<sup>[49]</sup>, 故鉴定化合物 **7** 为 4-*O*-阿魏酰奎宁酸甲酯。

化合物 **8**: 黄色粉末, 分子式为  $\text{C}_{10}\text{H}_{10}\text{O}_3$ 。 $^1\text{H-NMR}$  (600 MHz, MeOD)  $\delta$ : 7.62 (1H, d,  $J = 15.9$  Hz, H-8), 7.46 (2H, d,  $J = 8.2$  Hz, H-2, 6), 6.81 (2H, d,  $J = 8.2$  Hz, H-3, 5), 6.34 (1H, m, H-7), 3.76 (3H, d,  $J = 1.0$  Hz, -OCH<sub>3</sub>);  $^{13}\text{C-NMR}$  (150 MHz, MeOD)  $\delta$ : 169.7 (C-9), 161.2 (C-4), 146.5 (C-7), 131.1 (C-2, 6), 127.1 (C-1), 116.8 (C-3, 5), 114.9 (C-8), 51.9 (-OCH<sub>3</sub>)。以上波谱数据经与文献报道基本一致<sup>[50]</sup>, 故鉴定化合物 **8** 为 4-羟基肉桂酸甲酯。

化合物 **9**: 黄色油状物, 分子式为  $\text{C}_{15}\text{H}_{16}\text{O}_7$ 。 $^1\text{H-NMR}$  (600 MHz, MeOD)  $\delta$ : 7.66 (1H, d,  $J = 15.8$  Hz, H-7'), 7.48 (2H, d,  $J = 8.3$  Hz, H-2', 6'), 6.81 (2H, d,  $J = 8.3$  Hz, H-3', 5'), 6.36 (1H, d,  $J = 15.9$  Hz, H-8'), 5.52 (1H, dd,  $J = 7.0, 5.3$  Hz, H-2), 3.76 (3H, s, 3-COOMe), 3.71 (3H, s, 2-COOMe), 2.97 (2H, m, H-3);  $^{13}\text{C-NMR}$  (150 MHz, MeOD)  $\delta$ : 171.5 (C-1), 171.1 (C-4), 167.8 (C-9'), 161.5 (C-4'), 147.8 (C-7'), 131.4 (C-2', 6'), 126.9 (C-1'), 116.8 (C-3', 5'), 113.9 (C-8'), 69.6 (C-2), 53.1 (3-COOMe), 52.6 (2-COOMe), 36.8 (C-3)。以上波谱数据经与文献报道基本一致<sup>[51]</sup>, 鉴定化合物 **9** 为 (*E*)-对香豆酰二甲基苹果酸酯。

化合物 **10**: 褐色粉末, 分子式为  $\text{C}_{11}\text{H}_{10}\text{O}_5$ 。 $^1\text{H-NMR}$  (600 MHz, MeOD)  $\delta$ : 7.86 (1H, d,  $J = 9.5$  Hz, H-4), 6.73 (1H, s, H-5), 6.33 (1H, d,  $J = 9.5$  Hz, H-3), 4.29 (3H, s, 6-OMe), 4.29 (3H, s, 7-OMe);  $^{13}\text{C-NMR}$  (150 MHz, MeOD)  $\delta$ : 163.1 (C-2), 151.7 (C-6), 146.2 (C-4), 141.7 (C-7), 139.9 (C-9), 139.8 (C-8), 116.0 (C-3), 115.3 (C-10), 101.1 (C-5), 61.4 (7-OMe), 56.6 (6-OMe)。以上波谱数据经与文献报道基本一致<sup>[52]</sup>, 鉴定化合物 **10** 为秦皮素啉。

化合物 **11**: 褐色粉末, 分子式为  $\text{C}_{10}\text{H}_{10}\text{O}_4$ 。 $^1\text{H-NMR}$  (600 MHz, MeOD)  $\delta$ : 7.55 (1H, d,  $J = 15.9$  Hz, H-7), 7.04 (1H, d,  $J = 2.1$  Hz, H-2), 6.94 (1H, dd,  $J = 8.2, 2.1$  Hz, H-5), 6.78 (1H, d,  $J = 8.1$  Hz, H-6), 6.26 (1H, d,  $J = 15.9$  Hz, H-8), 4.42 (3H, s, -OCH<sub>3</sub>);  $^{13}\text{C-NMR}$  (150 MHz, MeOD)  $\delta$ : 169.7 (C-9), 149.5 (C-7), 146.9 (C-4), 146.8 (C-3), 127.6 (C-1), 122.9 (C-6), 116.4 (C-5), 115.1 (C-2), 114.8 (C-8), 51.9 (-OCH<sub>3</sub>)。以上波谱数据经与文献报道基本一致<sup>[53]</sup>, 鉴定化合物

物 **11** 为反式咖啡酸甲酯。

化合物 **12**: 黑色油状物, 分子式为  $C_{11}H_{12}O_4$ 。<sup>1</sup>H-NMR (600 MHz, MeOD)  $\delta$ : 7.54 (1H, d,  $J = 15.9$  Hz, H-7), 7.04 (1H, s, H-2), 6.94 (1H, d,  $J = 8.3$  Hz, H-6), 6.79 (1H, d,  $J = 8.3$  Hz, H-5), 6.25 (1H, d,  $J = 15.8$  Hz, H-8), 4.22 (2H, q,  $J = 7.1$  Hz,  $-OCH_2CH_3$ ), 1.31 (3H, t,  $J = 7.1$  Hz,  $-OCH_2CH_3$ ); <sup>13</sup>C-NMR (150 MHz, MeOD)  $\delta$ : 169.3 (C-9), 149.5 (C-7), 146.8 (C-3), 146.7 (C-4), 127.7 (C-1), 122.8 (C-6), 116.4 (C-5), 115.2 (C-2), 115.0 (C-8), 61.4 ( $-OCH_2CH_3$ ), 14.6 ( $-OCH_2CH_3$ )。以上波谱数据经与文献报道基本一致<sup>[54]</sup>, 鉴定化合物 **12** 为反式咖啡酸乙酯。

化合物 **13**: 褐色粉末物, 分子式为  $C_8H_8O_3$ 。<sup>1</sup>H-NMR (600 MHz, MeOD)  $\delta$ : 7.44 (1H, dd,  $J = 8.2$ , 2.1 Hz, H-6), 7.41 (1H, d,  $J = 2.1$  Hz, H-2), 6.82 (1H, d,  $J = 8.2$  Hz, H-5), 2.50 (3H, s, H-8); <sup>13</sup>C-NMR (150 MHz, MeOD)  $\delta$ : 199.6 (C-7), 152.3 (C-4), 146.4 (C-3), 130.6 (C-1), 123.5 (C-6), 116.0 (C-5), 115.7 (C-2), 26.2 (C-8)。以上波谱数据经与文献报道基本一致<sup>[55]</sup>, 鉴定化合物 **13** 为 **3, 4-二羟基苯乙酮**。

化合物 **14**: 褐色粉末, 分子式为  $C_{16}H_{18}O_9$ 。<sup>1</sup>H-NMR (600 MHz, MeOD)  $\delta$ : 7.63 (1H, d,  $J = 15.8$  Hz, H-7'), 7.07 (1H, d,  $J = 1.8$  Hz, H-2'), 6.97 (1H, d,  $J = 8.0$  Hz, H-6'), 6.78 (1H, d,  $J = 8.0$  Hz, H-5'), 6.36 (1H, d,  $J = 15.8$  Hz, H-8'), 4.82 (1H, d,  $J = 9.0$  Hz, H-4), 4.31 (1H, dd,  $J = 3.0, 4.0$  Hz, H-3), 4.20 (1H, dd,  $J = 4.0, 9.0$  Hz, H-5), 2.18 (1H, s, H-6eq), 2.11 (1H, s, H-2ax), 2.04 (1H, s, H-2eq), 1.94 (1H, s, H-6ax); <sup>13</sup>C-NMR (150 MHz, MeOD)  $\delta$ : 168.9 (C-9'), 149.5 (C-4'), 147.0 (C-7'), 146.8 (C-3'), 127.8 (C-1'), 122.9 (C-6'), 116.4 (C-5'), 115.4 (C-8'), 115.1 (C-2'), 78.6 (C-4), 72.6 (C-1), 69.2 (C-3), 66.5 (C-5), 41.7 (C-6), 39.2 (C-2)。以上波谱数据经与文献报道基本一致<sup>[56]</sup>, 鉴定化合物 **14** 为 **4-咖啡酰奎宁酸**。

化合物 **15**: 褐色油状物, 分子式为  $C_{17}H_{20}O_8$ 。<sup>1</sup>H-NMR (600 MHz, MeOD)  $\delta$ : 7.65 (1H, d,  $J = 15.9$  Hz, H-7'), 7.46 (2H, d,  $J = 8.4$  Hz, H-2', 6'), 6.81 (2H, d,  $J = 8.4$  Hz, H-3', 5'), 6.36 (1H, d,  $J = 15.9$  Hz, H-8'), 5.36 (1H, dd,  $J = 5.9, 3.1$  Hz, H-5), 4.12 (1H, dq,  $J = 8.1, 3.8$  Hz, H-3), 3.72 (3H, s, H-8), 3.69 (1H, dd,  $J = 7.6, 3.0$  Hz, H-4), 2.22 (1H, dd,  $J = 14.2, 3.8$  Hz, H-6ax), 2.13~2.11 (1H, m, H-6eq), 2.11~2.07 (1H, m, H-2eq), 2.01 (1H, q,  $J = 8.8$  Hz, H-2ax); <sup>13</sup>C-NMR (150

MHz, MeOD)  $\delta$ : 176.4 (C-7), 168.8 (C-9'), 161.1 (C-4'), 146.4 (C-7'), 131.1 (C-2', 6'), 127.3 (C-1'), 116.7 (C-5', 3'), 115.8 (C-8'), 75.3 (C-4), 73.8 (C-1), 72.6 (C-5), 68.6 (C-3), 52.8 (C-8), 40.8 (C-2), 36.3 (C-6)。以上波谱数据经与文献报道基本一致<sup>[57]</sup>, 鉴定化合物 **15** 为 **3-O-对香豆酰奎宁酸甲酯**。

化合物 **16**: 褐色粉末, 分子式为  $C_{18}H_{22}O_9$ 。<sup>1</sup>H-NMR (600 MHz, MeOD)  $\delta$ : 7.66 (1H, d,  $J = 15.9$  Hz, H-3'), 7.20 (1H, d,  $J = 1.8$  Hz, H-5'), 7.08 (1H, dd,  $J = 8.4, 1.8$  Hz, H-9'), 6.81 (1H, d,  $J = 8.4$  Hz, H-8'), 6.41 (1H, d,  $J = 15.9$  Hz, H-2'), 5.37 (1H, m, H-3), 4.13 (1H, d,  $J = 4.4$  Hz, H-5), 3.90 (3H, s, 6'-OCH<sub>3</sub>), 3.74 (3H, s, 7-OCH<sub>3</sub>), 3.70 (1H, d,  $J = 6.6$  Hz, H-4), 2.22 (2H, m, H-2), 2.13 (1H, m, H-6a), 2.02 (1H, m, H-6b); <sup>13</sup>C-NMR (150 MHz, MeOD)  $\delta$ : 176.4 (C-7), 168.8 (C-1'), 150.5 (C-7'), 149.3 (C-6'), 146.7 (C-3'), 127.9 (C-4'), 124.0 (C-9'), 116.4 (C-2'), 116.1 (C-8'), 111.6 (C-5'), 75.3 (C-1), 73.8 (C-4), 72.6 (C-3), 68.6 (C-5), 56.4 (6'-OCH<sub>3</sub>), 52.8 (7-OCH<sub>3</sub>), 40.8 (C-6), 36.3 (C-2)。以上波谱数据经与文献报道基本一致<sup>[49]</sup>, 鉴定化合物 **16** 为 **3-O-阿魏酰奎宁酸甲酯**。

化合物 **17**: 黑色粉末, 分子式为  $C_7H_6O_3$ 。<sup>1</sup>H-NMR (600 MHz, MeOD)  $\delta$ : 7.87 (1H, d,  $J = 8.6$  Hz, H-2), 6.80 (1H, d,  $J = 8.6$  Hz, H-3); <sup>13</sup>C-NMR (150 MHz, MeOD)  $\delta$ : 171.2 (1-COOH), 162.8 (C-4), 132.8 (C-2, 6), 124.2 (C-1), 115.8 (C-3, 5)。以上波谱数据经与文献报道基本一致<sup>[58]</sup>, 鉴定化合物 **17** 为 **水杨酸**。

化合物 **18**: 黑色粉末, 分子式为  $C_{15}H_{20}O_5$ 。<sup>1</sup>H-NMR (600 MHz, MeOD)  $\delta$ : 8.10 (1H, d,  $J = 15.8$  Hz, H-4), 6.46 (1H, d,  $J = 15.9$  Hz, H-5), 5.80 (1H, s, H-2), 3.95 (1H, dd,  $J = 7.6, 2.9$  Hz, H-8'a), 3.67 (1H, d,  $J = 7.6$  Hz, H-8'b), 2.82 (1H, d,  $J = 17.9$  Hz, H-3'a), 2.71 (1H, dd,  $J = 18.0, 2.7$  Hz, H-5'a), 2.47 (1H, dd,  $J = 17.9, 2.6$  Hz, H-3'b), 2.39 (1H, dd,  $J = 18.0, 2.6$  Hz, H-5'b), 2.07 (3H, d,  $J = 1.1$  Hz, 6-CH<sub>3</sub>), 1.22 (3H, s, 7'-CH<sub>3</sub>), 1.01 (3H, s, 9'-CH<sub>3</sub>); <sup>13</sup>C-NMR (150 MHz, MeOD)  $\delta$ : 210.8 (C-4'), 169.7 (C-1), 150.8 (C-3), 133.4 (C-5), 132.9 (C-4), 120.1 (C-2), 87.8 (C-2'), 82.9 (C-1'), 78.5 (C-8'), 54.0 (C-3'), 53.2 (C-5'), 21.1 (6-CH<sub>3</sub>), 19.4 (7'-CH<sub>3</sub>), 15.7 (9'-CH<sub>3</sub>)。以上波谱数据经与文献报道基本一致<sup>[59]</sup>, 鉴定化合物 **18** 为 **菜豆酸**。

化合物 **19**: 黄色粉末, 分子式为  $C_{17}H_{20}O_8$ 。<sup>1</sup>H-NMR (600 MHz, MeOD)  $\delta$ : 7.60 (1H, d,  $J = 15.9$  Hz,

H-7'), 7.47 (2H, d,  $J = 8.6$  Hz, H-2', 6'), 6.82 (2H, d,  $J = 8.6$  Hz, H-3', 5'), 6.29 (1H, d,  $J = 15.9$  Hz, H-8'), 5.29 (1H, m, H-5), 4.14 (1H, m, H-3), 3.74 (1H, m, H-4), 3.70 (3H, s, 7-OCH<sub>3</sub>), 2.23~1.99 (4H, m, H-2, 6); <sup>13</sup>C-NMR (150 MHz, MeOD)  $\delta$ : 175.4 (C-7), 168.2 (C-9'), 161.3 (C-4'), 146.8 (C-7'), 131.1 (C-2', 6'), 127.0 (C-1'), 116.8 (C-3', 5'), 115.1 (C-8'), 75.8 (C-1), 72.5 (C-4), 72.1 (C-5), 70.3 (C-3), 52.9 (7-OCH<sub>3</sub>), 38.0 (C-2), 37.7 (C-6)。以上波谱数据经与文献报道基本一致<sup>[60]</sup>, 鉴定化合物 **19** 为 5-*O*-对香豆酰奎宁酸甲酯。

化合物 **20**: 黄色油状物, 分子式为 C<sub>18</sub>H<sub>22</sub>O<sub>9</sub>。<sup>1</sup>H-NMR (600 MHz, MeOD)  $\delta$ : 7.60 (1H, d,  $J = 15.9$  Hz, H-3'), 7.20 (1H, d,  $J = 1.7$  Hz, H-5'), 7.09 (1H, dd,  $J = 8.2, 1.8$  Hz, H-9'), 6.82 (1H, d,  $J = 8.2$  Hz, H-8'), 6.33 (1H, d,  $J = 15.9$  Hz, H-2'), 5.29 (1H, td,  $J = 7.7, 4.4$  Hz, H-5), 4.15 (1H, d,  $J = 3.3$  Hz, H-3), 3.90 (3H, s, 6'-OCH<sub>3</sub>), 3.74 (1H, dd,  $J = 7.6, 2.9$  Hz, H-4), 3.70 (3H, s, 7-OCH<sub>3</sub>), 2.23 (1H, m, H-6a), 2.20 (1H, m, H-2a), 2.15 (1H, dd,  $J = 13.3, 8.3$  Hz, H-2b), 2.02 (1H, dd,  $J = 13.5, 6.7$  Hz, H-6b); <sup>13</sup>C-NMR (150 MHz, MeOD)  $\delta$ : 175.4 (C-7), 168.2 (C-1'), 150.7 (C-7'), 149.4 (C-6'), 147.0 (C-3'), 127.6 (C-4'), 124.1 (C-9'), 116.5 (C-8'), 115.4 (C-2'), 111.6 (C-5'), 75.8 (C-1), 72.6 (C-4), 72.1 (C-3), 70.3 (C-5), 56.4 (6'-OCH<sub>3</sub>), 52.9 (7-OCH<sub>3</sub>), 38.0 (C-2, 6)。以上波谱数据经与文献报道基本一致<sup>[49]</sup>, 鉴定化合物 **20** 为 5-*O*-阿魏酰奎宁酸甲酯。

### 3.2 麻叶荨麻中化合物对 $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制活性

对分离得到的 19 种化合物 (化合物 **17** 分离量不足) 进行  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制活性实验。结果如图 2 所示, 化合物 **5** 和 **7** 的抑制率均在 70% 以上。而其余化合物的抑制率均低于 50%。进一步测定化合物 **5** 和 **7** 的半数抑制浓度 (IC<sub>50</sub>), 发现这 2 种酚酸类化合物对酵母来源的  $\alpha$ -葡萄糖苷酶有较强的抑制活性, 其 IC<sub>50</sub> 分别为 107.8  $\mu\text{mol/L}$  (置信区间为 100.8~113.3  $\mu\text{mol/L}$ ) 和 373.1  $\mu\text{mol/L}$  (置信区间为 354.4~407.3  $\mu\text{mol/L}$ ), 均低于阳性药阿卡波糖 (图 3)。

### 3.3 麻叶荨麻中化合物对蔗糖酶的抑制活性

进一步对上述 19 种化合物进行蔗糖酶抑制活性实验。结果如图 2 所示, 化合物 **5**、**6**、**11**、**12** 和 **14** 对哺乳动物来源的蔗糖酶抑制率均高于 50%。对 5 种化合物进行 IC<sub>50</sub> 值的测定, 分别为 93.04  $\mu\text{mol/L}$  (置信区间为 84.83~101.7  $\mu\text{mol/L}$ )、119.50  $\mu\text{mol/L}$  (置信区间为 109.10~131.10  $\mu\text{mol/L}$ )、69.93  $\mu\text{mol/L}$

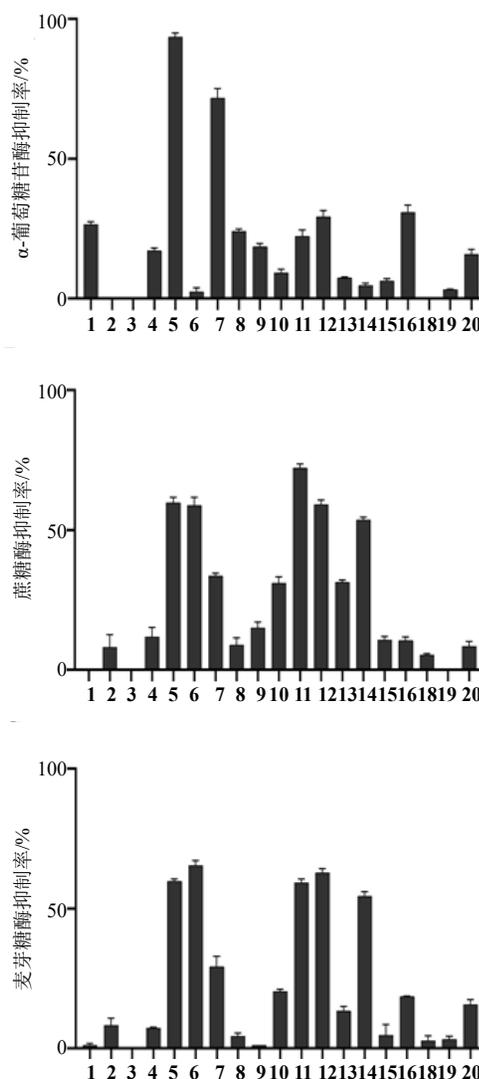


图 2 化合物对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶、蔗糖酶、麦芽糖酶的抑制率  
Fig. 2 Inhibition rates of compounds against  $\alpha$ -glucosidase, sucrase, and maltase

(置信区间为 65.70~74.34  $\mu\text{mol/L}$ )、109.30  $\mu\text{mol/L}$  (置信区间为 102.20~116.40  $\mu\text{mol/L}$ )、52.88  $\mu\text{mol/L}$  (置信区间为 46.77~59.45  $\mu\text{mol/L}$ ) (图 3), 阳性对照阿卡波糖的 IC<sub>50</sub> 值为 0.710  $\mu\text{mol/L}$  (置信区间为 0.652~0.778  $\mu\text{mol/L}$ ) (图 3)。上述结果表明 5 种酚酸类化合物对蔗糖酶有一定的抑制作用。根据 IC<sub>50</sub> 值的排序, 这些化合物的活性顺序为 **14**>**11**>**5**>**12**>**6**。

### 3.4 麻叶荨麻中化合物对麦芽糖酶的抑制活性

在麦芽糖酶抑制活性实验中, 上述 5 种化合物 (**5**、**6**、**11**、**12** 和 **14**) 同样表现出一定的抑制活性, 抑制率均超过 50%。IC<sub>50</sub> 测定结果显示, 其值分别

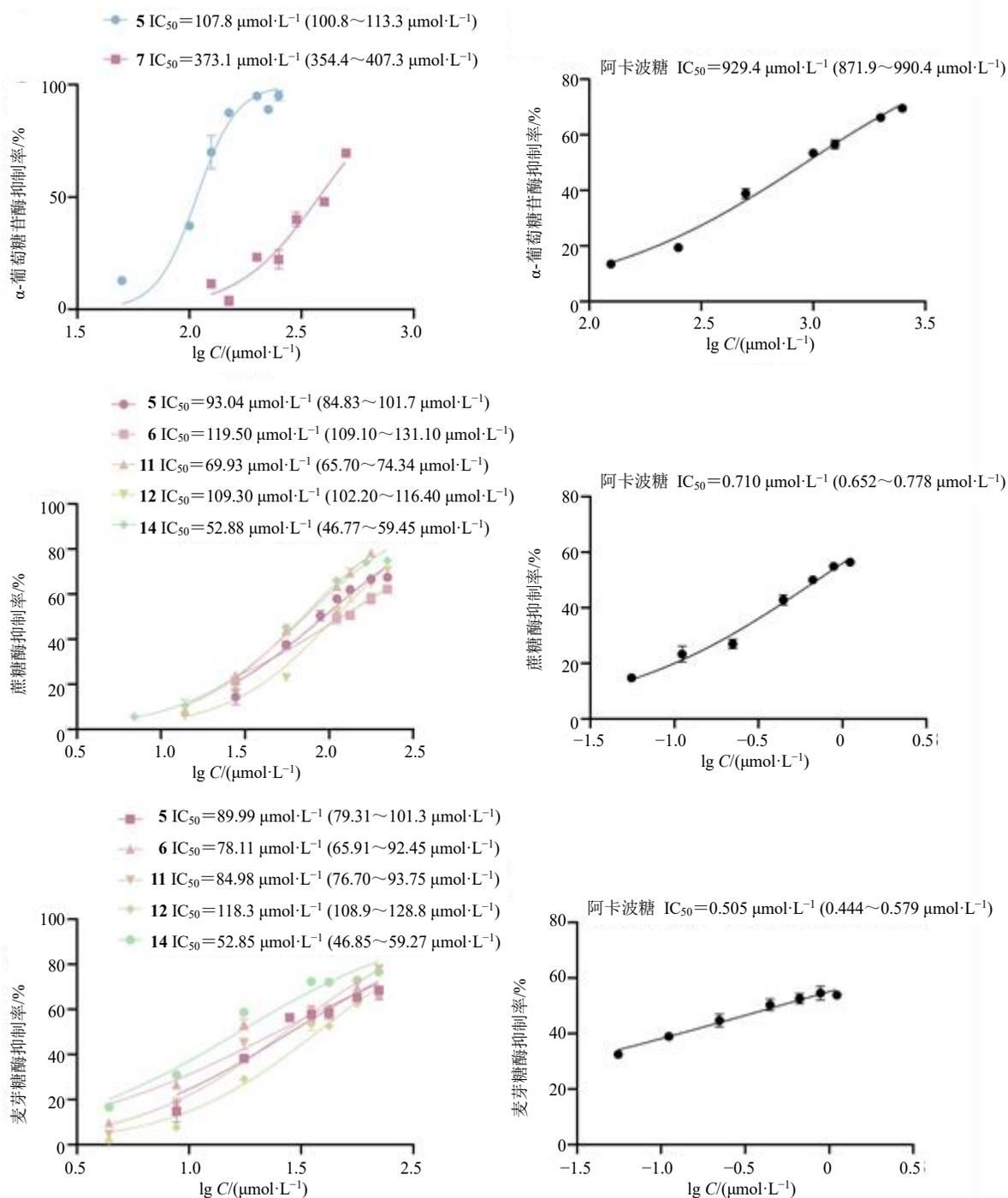


图3 化合物对 $\alpha$ -葡萄糖苷酶、蔗糖酶、麦芽糖酶的 $\text{IC}_{50}$ 值

Fig. 3  $\text{IC}_{50}$  value of  $\alpha$ -glucosidase, sucrase, maltase of compounds

为  $89.99 \mu\text{mol/L}$  (置信区间为  $79.31 \sim 101.3 \mu\text{mol/L}$ )、 $78.11 \mu\text{mol/L}$  (置信区间为  $65.91 \sim 92.45 \mu\text{mol/L}$ )、 $84.98 \mu\text{mol/L}$  (置信区间为  $76.70 \sim 93.75 \mu\text{mol/L}$ )、 $118.3 \mu\text{mol/L}$  (置信区间为  $108.9 \sim 128.8 \mu\text{mol/L}$ )、 $52.85 \mu\text{mol/L}$  (置信区间为  $46.85 \sim 59.27 \mu\text{mol/L}$ ) (图 3), 阳性药阿卡波糖的  $\text{IC}_{50}$  值为  $0.505 \mu\text{mol/L}$

(置信区间为  $0.444 \sim 0.579 \mu\text{mol/L}$ ) (图 3)。麦芽糖酶抑制活性大小顺序为  $6 > 11 > 5 > 12 > 14$ , 其中化合物 6 ( $\text{IC}_{50} = 78.11 \mu\text{mol/L}$ ) 的抑制活性最强, 提示该类成分对麦芽糖酶亦具有一定的抑制能力。

通过系统评价从麻叶荨麻中分离得到的 19 种化合物对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶、蔗糖酶及麦芽糖酶的抑制

活性,发现化合物**5**(咖啡酸)、**7**(4-*O*-阿魏酰奎宁酸甲酯)对酵母来源的 $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制活性突出;而化合物**5**、**6**(绿原酸甲酯)、**11**(反式咖啡酸甲酯)、**12**(反式咖啡酸乙酯)和**14**(4-咖啡酰奎宁酸)对哺乳动物来源的蔗糖酶和麦芽糖酶均表现出显著抑制活性。构效关系分析揭示,其高效抑制活性化合物具备两个关键结构单元:一是芳环上的3,4-邻二羟基(邻苯二酚)结构。在基本骨架相同的情况下,芳香环上具有邻二羟基的化合物(如**5**、**11**、**12**)的蔗糖酶和麦芽糖酶抑制活性显著高于仅含单羟基取代的化合物(如**1**、**2**、**8**)。同样具有邻二羟基的苯丙烯酸奎宁酸化合物(如**6**和**14**)的蔗糖酶和麦芽糖酶抑制活性明显优于单羟基取代或者邻二羟基被甲基取代的同类型化合物(如**7**、**15**、**16**、**19**、**20**),表明芳香环上的邻二羟基结构是蔗糖酶和麦芽糖酶抑制活性的关键起效基团。芳香环上的邻二羟基结构已被广泛认为是酚酸类化合物抑制 $\alpha$ -糖苷酶的核心药效团,这与本研究中咖啡酸及其衍生物表现出的广谱强效抑制活性相印证<sup>[61-62]</sup>。此外,咖啡酸及其衍生物的作用机制已通过相关研究得到初步阐明<sup>[63]</sup>。二是咖啡酸的酯化基团结构。咖啡酸甲酯的蔗糖酶和麦芽糖酶抑制活性强于咖啡酸和咖啡酸乙酯,表明酯化有利于增加化合物酶抑制活性,然而随着酯化基团的增大,化合物与酶结合的空间位阻变大,抑制活性降低。当咖啡酸与极性基团奎宁酸羟基酯化后,较于简单酯化的化合物**11**和**12**,复杂多羟基化合物**6**和**14**分别表现出更强的麦芽糖酶和蔗糖酶抑制活性,表明末端连接一个复杂、多羟基的极性基团(如奎宁酸)可以保持甚至增强活性。当咖啡酸与奎宁酸酯化后,其衍生物表现出更强的抑制活性,这与文献报道的观点一致,即连接复杂多羟基极性基团(如奎宁酸)可通过提供额外氢键结合位点进一步增强抑制效力<sup>[64]</sup>;也支持了多酚类 $\alpha$ -糖苷酶抑制剂的构效关系,即酚羟基位置与数量对活性的决定性影响<sup>[61]</sup>。综上所述,邻苯二酚结构和咖啡酸酯化结构,共同构成了该类成分抑制糖苷酶活性的关键结构基础。

#### 4 讨论

本研究对麻叶荨麻的化学成分及其体外抑制 $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性进行了系统研究。从中共分离鉴定出20个化合物,结构类型涵盖酚酸类、黄酮类、酮酚类。从化学分布来看,酚酸类化合物是其主要化学成分,共分离得到18个,占总数的90%。根据

其核心骨架与连接方式,可进一步细分为4个亚类:一是肉桂酸衍生物,包括顺/反式对羟基肉桂酸、咖啡酸及其甲酯与乙酯等,具有典型的C<sub>6</sub>-C<sub>3</sub>苯丙烯酸骨架,其酚羟基的数量与取代位置(特别是3,4-邻二羟基)是影响其生物活性的关键结构差异;二是奎宁酸酯类,如绿原酸甲酯、4-*O*-阿魏酰奎宁酸甲酯、4-咖啡酰奎宁酸等,结构特征为咖啡酸或阿魏酸通过酯键与多羟基的奎宁酸相连,形成具有多羟基-多芳环结构的复杂极性分子,该类结构既增强水溶性又可提供多重氢键结合位点;三是苹果酸衍生物如对香豆酰二甲基苹果酸酯,是一种对香豆酸与二甲基苹果酸通过酯键连接的不常见“酚酸-二羧酸”缀合物;四是简单苯甲酸衍生物如水杨酸。其他类型化合物包括黄酮类(山奈酚-3-*O*- $\beta$ -D-吡喃葡萄糖苷,为黄酮母核C<sub>6</sub>-C<sub>3</sub>-C<sub>6</sub>的糖苷)、酮酚类(3,4-二羟基苯乙酮)。整体而言,麻叶荨麻的化学成分以苯丙素类代谢产物为主导,其中奎宁酸酯与肉桂酸衍生物分别占酚酸类的39%与44%,表明该植物富含“酚-酸”缀合结构,且酰基化程度较高。其中,化合物**3**、**7**、**9**、**10**、**13**、**15**、**16**、**18**~**20**均为首次从该植物中分离得到,丰富了麻叶荨麻的化学成分组成,为其药效物质基础的深入研究与资源开发提供了实验依据。

体外活性筛选结果表明,从麻叶荨麻中分离得到的6种酚酸类成分(化合物**5**~**7**、**11**、**12**、**14**)对 $\alpha$ -葡萄糖苷酶、蔗糖酶及麦芽糖酶均表现出一定的抑制活性,初步明确了该药材降糖作用的物质基础,填补了降血糖活性研究方面的空白。活性成分的构效关系分析显示,高活性化合物普遍具备2个关键结构特征:含邻二羟基的芳香环和咖啡酸酯化结构。其中化合物**5**(咖啡酸)对3种酶均表现出广谱强效抑制,提示其可作为麻叶荨麻中发挥降糖作用的核心药效团结构。同时发现部分苯丙素类及奎宁酸酯类衍生物对哺乳动物来源的蔗糖酶和麦芽糖酶具有显著抑制作用。

本研究目前主要集中在体外酶活性筛选层面,虽初步明确了各化合物对3种酶的抑制作用与构效关系,但体外活性结果与体内实际降糖效果之间可能存在差异。化合物在体内的生物利用度、代谢稳定性、组织分布特性及肠道菌群相互作用等因素均可能影响其最终的药效表现。因此,后续研究可聚焦于以下方面:首先应开展动物体内实验验证高活性单体或有效部位的降糖效果及安全性;其次可结

合分子对接、细胞模型及信号通路研究, 阐明其作用靶点与分子机制; 最后, 探索其与现有降糖药物的协同作用及长期用药安全性评价, 为麻叶荨麻的深度开发与临床应用提供更全面的科学依据。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

#### 参考文献

- [1] Anwar S, Khan S, Almatroudi A, *et al.* A review on mechanism of inhibition of advanced glycation end products formation by plant derived polyphenolic compounds [J]. *Mol Biol Rep*, 2021, 48(1): 787-805.
- [2] Alam S, Hasan M K, Neaz S, *et al.* Diabetes mellitus: Insights from epidemiology, biochemistry, risk factors, diagnosis, complications and comprehensive management [J]. *Diabetology*, 2021, 2(2): 36-50.
- [3] Dilworth L, Facey A, Omoruyi F. Diabetes mellitus and its metabolic complications: The role of adipose tissues [J]. *Int J Mol Sci*, 2021, 22(14): 7644.
- [4] Chen S D, Lin B, Gu J Y, *et al.* Binding interaction of betulinic acid to  $\alpha$ -glucosidase and its alleviation on postprandial hyperglycemia [J]. *Molecules*, 2022, 27(8): 2517.
- [5] 向明丽, 曾亚玲, 姚佳倩, 等. 肉桂酸衍生物的合成及其抑制  $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性研究 [J]. *化学试剂*, 2025, 47(9): 108-113.
- [6] 杨丽珍, 邹波, 徐玉娟, 等. 荔枝壳多酚对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制作用 [J]. *食品科技*, 2017, 42(5): 174-179.
- [7] 廉武星, 林毓清.  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制剂及其临床应用研究进展 [J]. *实用医药杂志*, 2014, 31(6): 556-559.
- [8] 柴铁涛, 胡情, 柳冬梅, 等. 源于中药的  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制剂研究进展 [J]. *中国现代应用药学*, 2025, 42(11): 1967-1984.
- [9] Concepción Zavaleta M J, Gonzáles Yovera J G, Moreno Marreros D M, *et al.* Diabetic gastroenteropathy: An underdiagnosed complication [J]. *World J Diabetes*, 2021, 12(6): 794-809.
- [10] Flatt A J, Peleckis A J, Dalton-Bakes C, *et al.* Automated insulin delivery for hypoglycemia avoidance and glucose counterregulation in long-standing type 1 diabetes with hypoglycemia unawareness [J]. *Diabetes Technol Ther*, 2023, 25(5): 302-314.
- [11] 敖特根白音, 李运起, 韩艳华, 等. 国内外麻叶荨麻的研究进展 [J]. *中国野生植物资源*, 2015, 34(1): 32-36.
- [12] 张嫚丽. 麻叶荨麻化学成分及抗炎药理活性初步研究 [D]. 石家庄: 河北医科大学, 2004.
- [13] 苏日娜, 罗维早, 朱继孝, 等. 荨麻属药用植物研究进展 [J]. *中草药*, 2018, 49(11): 2722-2728.
- [14] 贾舒安, 张凡凡, 柴雨昕, 等. 荨麻属植物及其在畜禽生产中的应用研究进展 [J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2024(6): 20-26.
- [15] Aishan H, Baba M, Iwasaki N, *et al.* The constituents of *Urtica cannabina* used in Uighur medicine [J]. *Pharm Biol*, 2010, 48(5): 577-583.
- [16] Wang M Y, Yang Y, Zhou X Y, *et al.* The chemical constituents from *Urtica fissa* leaves [J]. *J Asian Nat Prod Res*, 2018, 20(8): 709-718.
- [17] 李宁, 张庆林. 荨麻属植物的化学成分和药理作用研究进展 [J]. *中国新药杂志*, 2007, 16(21): 1746-1750.
- [18] 李晓红, 李兵兰, 赵永娜, 等. 荨麻属植物的化学成分及药理作用研究进展 [J]. *中国民族民间医药杂志*, 2007, 16(4): 190-193.
- [19] 赵齐, 卢轩, 冯宝民. 荨麻属植物化学成分和药理活性研究进展 [J]. *沈阳药科大学学报*, 2013, 30(2): 160-164.
- [20] 张嫚丽, 李作平. 荨麻属植物化学成分与药理活性 [J]. *国外医药: 植物药分册*, 2004, 19(1): 12-15.
- [21] 胡媛. 裂叶荨麻降糖活性部位及化学成分研究 [D]. 西安: 陕西科技大学, 2020.
- [22] 何亚娟. 裂叶荨麻提取物对 2 型糖尿病小鼠的保护作用及机制研究 [D]. 西安: 陕西科技大学, 2020.
- [23] 杨文娟, 胡媛, 毛跟年, 等. 裂叶荨麻体外降糖活性化学成分 [J]. *食品工业科技*, 2020, 41(8): 32-36.
- [24] 李亚楠, 马哈亚·艾斯江, 瞿菁晨, 等. 麻叶荨麻化学成分、药理作用及应用研究进展 [J]. *中国野生植物资源*, 2022, 41(10): 54-59.
- [25] 陈铭扬, 马巧莹, 马佳媛, 等. 宁夏野生荨麻水提取物对糖尿病大鼠血糖血脂的调节作用 [J]. *现代农业科技*, 2016(1): 289-290.
- [26] Long W Y, Tang H C, Zhong X, *et al.* Hypoglycemic and lipid-lowering effects of extracted from the aerial part of *Urtica cannabina* L. on alloxan-induced hyperglycemic mice [J]. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, 2020, 512(1): 012097.
- [27] 邢植, 刘思齐, 徐凯琳, 等. 施底肥对越冬后麻叶荨麻形态特征及产量的影响 [J]. *中国草地学报*, 2025, 47(9): 144-150.
- [28] 许照绮, 李肖, 陈永成, 等. 干旱对麻叶荨麻生理与光合特性的影响 [J]. *草地学报*, 2025, 33(10): 3237-3244.
- [29] 刘思齐. 施肥对麻叶荨麻抗寒性和生产性能的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2024.
- [30] 王慧敏, 邱晓, 谢宇, 等. 麻叶荨麻高效栽培技术 [J]. *耕作与栽培*, 2023, 43(6): 124-125.
- [31] 韩润宝, 刘改枝, 张宇, 等. 阴山北麓麻叶荨麻栽培技术及其在畜禽生产中的应用 [J]. *当代畜禽养殖业*, 2024, 44(2): 33-35.
- [32] 邱玮, 李国婧, 徐志伟, 等. 呼和浩特地区农牧交错带野生麻叶荨麻叶片蛋白质组成及其功能特性研究 [J]. *中国饲料*, 2025(5): 155-160.
- [33] 闫民杰, 李钢铁, 商宇, 等. 麻叶荨麻的营养价值及其在动物生产中的应用 [J]. *饲料研究*, 2023, 46(17): 173-176.
- [34] 张晓庆, 李维红, 金艳梅, 等. 麻叶荨麻的养分积累及饲用品质评价 [J]. *中国草地学报*, 2010, 32(1): 116-120.

- [35] 刘乌云, 萨如拉, 齐澈力木格, 等. 麻叶荨麻与尖头叶藜混合干草替代天然牧草干草对蒙古公牛生长性能、体尺指标和养分表观消化率的影响 [J]. 动物营养学报, 2022, 34(5): 3023-3031.
- [36] 张晓庆, 姜超, 渠晖, 等. 麻叶荨麻全混合颗粒饲料对生长育肥羊生产性能与肉品质的影响 [J]. 中国草地学报, 2020, 42(6): 101-107.
- [37] Deng C X, Zhang N, Lin H L, *et al.* Recent progress on natural  $\alpha$ -glucosidase inhibitors derived from the plants and microorganisms [J]. *Curr Med Chem*, 2025, 32(11): 2115-2141.
- [38] Pan G J, Lu Y T, Wei Z Y, *et al.* A review on the *in vitro* and *in vivo* screening of  $\alpha$ -glucosidase inhibitors [J]. *Heliyon*, 2024, 10(18): e37467.
- [39] 范莉, 王业玲, 唐丽. 天然来源 $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制剂筛选方法的研究进展 [J]. 天然产物研究与开发, 2016, 28(2): 313-321.
- [40] Zhao X H, Tao J H, Zhang T, *et al.* Resveratrolsides alleviates postprandial hyperglycemia in diabetic mice by competitively inhibiting  $\alpha$ -glucosidase [J]. *J Agric Food Chem*, 2019, 67(10): 2886-2893.
- [41] Jiang S R, Zhao X H, Liu C, *et al.* Identification of phenolic compounds in fruits of *Ribes stenocarpum* Maxim. by UHPLC-QTOF/MS and their hypoglycemic effects *in vitro* and *in vivo* [J]. *Food Chem*, 2021, 344: 128568.
- [42] Zhang B W, Li X, Sun W L, *et al.* Dietary flavonoids and acarbose synergistically inhibit  $\alpha$ -glucosidase and lower postprandial blood glucose [J]. *J Agric Food Chem*, 2017, 65(38): 8319-8330.
- [43] Liu L Y, Jia W J, Jiang S R, *et al.* Inhibitory activities and rules of plant gallotannins with different numbers of galloyl moieties on sucrase, maltase and  $\alpha$ -amylase *in vitro* and *in vivo* [J]. *Phytomedicine*, 2023, 120: 155063.
- [44] 冯美玲, 王书芳, 张兴贤. 枸杞子的化学成分研究 [J]. 中草药, 2013, 44(3): 265-268.
- [45] 李孟, 张志广, 王梦梦, 等. 光皮木瓜化学成分研究及其神经保护活性 [J]. 中成药, 2020, 42(10): 2635-2639.
- [46] 吕芳, 徐筱杰. 粗糙黄堇化学成分的研究 [J]. 中草药, 2007, 38(7): 990-991.
- [47] Kim H J, Shin K J, Htwe K M, *et al.* A new vomifoliol derivative and flavonoids from the aerial parts of *Orthosiphon aristatus* [J]. *Nps*, 2024, 30(2): 72-79.
- [48] 钱文琪, 吴炜琳, 张勋豪, 等. 满江红全草化学成分研究 [J]. 中草药, 2020, 51(17): 4397-4404.
- [49] 李海波, 石丹枫, 刘苓娟, 等. 青蒿中咖啡酰奎宁酸类成分研究 [J]. 中草药, 2024, 55(16): 5386-5397.
- [50] 左月明, 徐元利, 张忠立, 等. 栀子苯丙素类化学成分研究 [J]. 中药材, 2015, 38(11): 2311-2313.
- [51] Suzuki R, Kan S, Sugita Y, *et al.* *P*-coumaroyl malate derivatives of the *Pandanus amaryllifolius* leaf and their isomerization [J]. *Chem Pharm Bull*, 2017, 65(12): 1191-1194.
- [52] 朱成光, 张卫青, 张丽萍, 等. 多穗金粟兰的化学成分及其抗肿瘤活性 [J]. 天然产物研究与开发, 2023, 35(2): 242-249.
- [53] Lu C L, Zhu W, Wang D M, *et al.* Inhibitory effects of chemical compounds isolated from the rhizome of *Smilax glabra* on nitric oxide and tumor necrosis factor- $\alpha$  production in lipopolysaccharide-induced RAW<sub>264.7</sub> cell [J]. *Evid Based Complement Alternat Med*, 2015, 2015: 602425.
- [54] 刘淑娴, 宋玉洁, 王伟伟, 等. 龙葵酚类成分的研究 [J]. 中成药, 2019, 41(4): 828-831.
- [55] 杨梦, 郝志友, 王小兰, 等. 山茱萸中的一个新联苯类木脂素 [J]. 药学报, 2024, 59(6): 1751-1756.
- [56] Janda B, Stochmal A, Montoro P, *et al.* Phenolics in aerial parts of Persian clover *Trifolium resupinatum* [J]. *Nat Prod Commun*, 2009, 4(12): 1661-1664.
- [57] Sadhu S K, Okuyama E, Fujimoto H, *et al.* Prostaglandin inhibitory and antioxidant components of *Cistus laurifolius*, a Turkish medicinal plant [J]. *J Ethnopharmacol*, 2006, 108(3): 371-378.
- [58] 王春辉, 魏攀蕾, 严诗楷, 等. 滇南羊耳菊乙酸酯部位化学成分研究(英文) [J]. 天然产物研究与开发, 2014, 26(1): 33-37.
- [59] 耿剑亮, 王振中, 王秋红, 等. 红花八角茎叶的化学成分研究 [J]. 中草药, 2021, 52(24): 7407-7412.
- [60] 范雨欣, 徐瑞雯, 张晓祎, 等. 中华枸杞中 1 个新的香豆素葡萄糖苷 [J]. 中草药, 2024, 55(1): 23-29.
- [61] Proença C, Freitas M, Ribeiro D, *et al.*  $\alpha$ -Glucosidase inhibition by flavonoids: An *in vitro* and *in silico* structure-activity relationship study [J]. *J Enzyme Inhib Med Chem*, 2017, 32(1): 1216-1228.
- [62] Li Y Q, Zhou F C, Gao F, *et al.* Comparative evaluation of quercetin, isoquercetin and rutin as inhibitors of  $\alpha$ -glucosidase [J]. *J Agric Food Chem*, 2009, 57(24): 11463-11468.
- [63] Kato M, Ochiai R, Kozuma K, *et al.* Effect of chlorogenic acid intake on cognitive function in the elderly: A pilot study [J]. *Evid Based Complement Alternat Med*, 2018, 2018: 8608497.
- [64] Oboh G, Agunloye O M, Adefegha S A, *et al.* Caffeic and chlorogenic acids inhibit key enzymes linked to type 2 diabetes (*in vitro*): A comparative study [J]. *J Basic Clin Physiol Pharmacol*, 2015, 26(2): 165-170.

[责任编辑 王文倩]