

引用格式: 付正建, 董仕豪, 徐柠檬, 等. 慈竹竹叶黄酮成分鉴定及对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制作用[J]. 浙江农林大学学报, 2026, 43(2): 293–302. FU Zhengjian, DONG Shihao, XU Ningmeng, et al. Identification of flavonoid constituents and inhibitory effects on α -amylase and α -glucosidase in the leaves of *Neosinocalamus affinis*[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2026, 43(2): 293–302.

慈竹竹叶黄酮成分鉴定及对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制作用

付正建¹, 董仕豪¹, 徐柠檬¹, 王曙光², 范方宇¹, 郭磊^{1,2}

(1. 西南林业大学生物与食品工程学院, 云南昆明 650224; 2. 西南林业大学 云南省竹资源生物学研究与利用兴滇创新团队, 云南昆明 650224)

摘要: 【目的】通过对慈竹 *Neosinocalamus affinis* 竹叶中的黄酮类化合物进行组分鉴定, 并探究竹叶黄酮对 α -葡萄糖苷酶以及 α -淀粉酶的抑制作用, 为慈竹竹叶资源的深度利用和开发提供理论依据。【方法】以慈竹竹叶为原料, 通过大孔树脂纯化得到纯化竹叶黄酮, 使用超高效液相色谱-质谱技术对纯化竹叶黄酮的化学成分进行了鉴定, 并通过体外试验探究了纯化竹叶黄酮对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶活性的抑制作用, 以及纯化竹叶黄酮降血糖的作用机制。【结果】慈竹竹叶提取物中共鉴定出 18 种黄酮类化合物, 包括甘草黄酮醇、表紫草黄酮 II、宝藜苷 I 等黄酮类化合物; 体外试验结果显示: 纯化竹叶黄酮对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶都存在抑制作用, 当纯化竹叶黄酮质量浓度为 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时, 对 α -淀粉酶的抑制率为 $79.71\%\pm 5.02\%$, 半抑制质量浓度 (IC_{50}) 为 $(0.057\pm 0.005) \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$; 对 α -葡萄糖苷酶的抑制率为 $74.17\%\pm 6.17\%$, IC_{50} 为 $(0.071\pm 0.004) \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$, 纯化竹叶黄酮对这 2 种酶的抑制类型都呈现出竞争性-非竞争性混合抑制。【结论】根据酶活性抑制动力学试验结果表明: 慈竹竹叶中的黄酮类化合物可能是降血糖的活性成分之一。图 3 表 4 参 34

关键词: 慈竹; 黄酮; 成分鉴定; α -淀粉酶; α -葡萄糖苷酶; 抑制作用

中图分类号: S718.43 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2026)02-0293-10

Identification of flavonoid constituents and inhibitory effects on α -amylase and α -glucosidase in the leaves of *Neosinocalamus affinis*

FU Zhengjian¹, DONG Shihao¹, XU Ningmeng¹, WANG Shuguang², FAN Fangyu¹, GUO Lei^{1,2}

(1. College of Biological Science and Food Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Biological Research and Utilization Innovation Team in Bamboo Resources of Yunnan Province, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to identify the flavonoid components in the leaves of *Neosinocalamus affinis* and to investigate their inhibitory effects on α -glucosidase and α -amylase, so as to provide a theoretical basis for the deep utilization and development of *N. affinis* leaf resources. [Method] Using *N. affinis* leaves as raw material, purified bamboo leaf flavonoids (PBLF) were obtained by macroporous resin purification. The chemical components of PBLF were identified by ultra-performance liquid chromatography-mass spectrometry (UPLC-MS). The inhibitory effects of PBLF on α -amylase and α -glucosidase activities, as well as the hypoglycemic mechanism of PBLF, were investigated through in vitro experiments. [Result] 18 flavonoid

收稿日期: 2025-04-21; 修回日期: 2025-12-18

基金项目: 兴滇创新团队与林学一流学科联合资助开放课题 (202405AS350029); 云南省科技厅基础研究专项 (202101AT070042)

作者简介: 付正建 (ORCID: 0009-0005-0117-6977), 从事竹资源开发与利用研究。E-mail: 2562097943@qq.com。通信作者: 郭磊 (ORCID: 0000-0003-3587-742X), 副教授, 博士, 从事食品资源开发与利用研究。E-mail: guoleigift.student@sina.com

compounds were identified in the *N. affinis* leaf extract, including glycyrrhizol, epimedium cyanidin II, and baohuoside I. Furthermore, the in vitro results demonstrated that PBLF significantly inhibited both α -amylase and α -glucosidase activities. At a concentration of $0.5 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$, PBLF inhibited α -amylase by $79.71\% \pm 5.02\%$ with a half-maximal inhibitory concentration (IC_{50}) of $(0.057 \pm 0.005) \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$, and inhibited α -glucosidase by $74.17\% \pm 6.17\%$ with an IC_{50} of $(0.071 \pm 0.004) \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$, and both types of enzyme inhibition showed competitive-noncompetitive mixed inhibition. [Conclusion] Enzyme inhibition kinetic studies indicated that the flavonoids present in *N. affinis* leaves likely function as active hypoglycemic components, potentially through a non-competitive inhibition mechanism. [Ch, 3 fig. 4 tab. 34 ref.]

Key words: *Neosinocalamus affinis*; flavonoids; component identification; α -amylase; α -glucosidase; inhibition

慈竹 *Neosinocalamus affinis* 属禾本科 Poaceae 竹亚科 Bambusoideae 植物, 别称大叶慈竹、绵竹等, 主要分布在中国西南部地区, 包括四川、贵州、云南、陕西南部及甘肃南部等地^[1-2]。慈竹有着适应性强、生长快、竹笋产量高等特点, 栽植 3~5 a 后即可成林, 可持续利用百年, 是优良的笋竹两用品种^[3]。慈竹竹叶在中医中被广泛使用, 主要用于清热利尿、除烦止渴、小便短赤和口舌生疮等症, 此外慈竹竹叶中含有的黄酮类化合物(槲皮素、芦丁等)、多糖等物质具有显著抗氧化、降血糖以及抗炎等活性^[4-5]。中国作为全球竹资源最丰富的国家之一, 竹产业整体开发水平仍显不足, 占竹体总量约 35% 的竹叶资源长期被视作生产废弃物, 若将其充分利用, 可提升慈竹的资源利用率^[6-7]。

黄酮类化合物(flavonoids)是一种广泛存在于植物体内的天然产物, 是多种药用植物的有效成分^[8-9]。竹叶黄酮(BLF)作为多效生物活性物质, 其功能特性涵盖抗氧化、抗炎及增强免疫力等方面^[10-11]。YANG 等^[12]通过高脂血症大鼠模型发现: 竹叶黄酮能随剂量升高而降低血清总胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)和低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)水平, 其作用机制与调节 AMPK/SREBP-2 信号通路相关。区少碧等^[13]研究表明: 竹叶黄酮能降低活性氧(ROS)水平, 并通过增加超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)和过氧化氢酶(CAT)等相关酶活性来抑制氧化应激。黄酮类化合物有着调节血糖水平的功效, 可以通过选择性抑制 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶来减缓肠道黏膜对葡萄糖的摄取速率, 从而有效控制餐后血糖波动, 达到平稳降糖的治疗效果^[14-15]。然而, 关于慈竹竹叶黄酮类化合物降血糖的物质基础及作用机制还未见报道。

为分析慈竹竹叶黄酮的化学组成, 并探究其在降血糖活性方面的作用, 本研究采用超高效液相色谱-四极杆-飞行时间串联质谱(UPLC-QTOF-MS/MS)技术对纯化竹叶黄酮(PBLF)进行鉴定, 并探究其对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制作用。同时, 通过 Lineweaver-Burk 和 Dixon 方程构建酶动力学模型, 解析慈竹竹叶黄酮降血糖活性的抑制类型及其协同作用机制, 以期慈竹资源的开发利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

慈竹竹叶于 2024 年 11 月采自西南林业大学树木园, 样本保存于西南林业大学生物与食品工程学院。

所用试剂包括: α -葡萄糖苷酶 ($7 \times 10^5 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{mL}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, 江苏伊势久生物有限公司); 阿卡波糖及对硝基苯- α -D-葡萄糖苷(PNPG)(合肥千盛生物科技有限公司); α -淀粉酶 ($4 \times 10^3 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)、淀粉显色反应配置 DNS 溶液(上海源叶生物技术有限公司)与配套磷酸盐缓冲体系($\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{KH}_2\text{PO}_4$, 天津科密欧化学试剂有限公司); 可溶性淀粉及碳酸钠(郑州津北化工); 色谱级乙腈/甲酸(安捷伦科技)。其余化学试剂均为分析纯。

1.2 慈竹竹叶黄酮的提取与纯化

慈竹鲜叶经清洗后放入烘箱中, 在 $60.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 下干燥 18 h, 烘干后粉碎过筛制得慈竹竹叶粉末。取定量样品按料液比 1:20 加入体积分数为 80% 的乙醇, 在 $50.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、309 kW 下超声 62 min 辅助浸提。提取液经真空抽滤及旋蒸脱醇得粗提液, $-18.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 预冻后在 $-65.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 下冷冻干燥(2 Pa)获得粗黄酮。经 AB-8

型大孔树脂层析(体积分数为 70% 的乙醇梯度洗脱), 洗脱液 2 次脱醇冻干后得纯化竹叶黄酮粉末。

1.3 纯化竹叶黄酮成分鉴定

1.3.1 竹叶黄酮样品前处理 精确称取纯化样品 125 mg, 经 1 mL 预冷甲醇涡旋震荡溶解, $12\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 20 min 后, 上清液通过 $0.22\ \mu\text{m}$ 有机滤膜完成无菌化处理, 制得液相色谱-质谱 (LC-MS) 进样溶液。

1.3.2 色谱分析系统 配置 Waters BEH C18 色谱柱 ($2.1\ \text{mm}\times 100.0\ \text{mm}\times 1.7\ \mu\text{m}$), 流动相为质量分数 0.1% 的甲酸水溶液 (A)-乙腈 (B) 体系, 流速为 $0.3\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, 柱温箱设定为 $40\ ^\circ\text{C}$ 。采用梯度洗脱模式(程序见表 1), 自动进样器定量注入 $5\ \mu\text{L}$ 待测样品。

1.3.3 高分辨质谱 (HRMS) 条件 采用电喷雾电离 (ESI) 进行正离子和负离子模式检测。使用加热电喷雾离子 (HESI) 源进行离子化, 电离参数设定: 喷雾电压 ($+4\ \text{kV}/-3.2\ \text{kV}$); 毛细管温度为 $350\ ^\circ\text{C}$; 鞘气/辅助气流速为 $40/5\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, 扫描范围为 $50\sim 1\ 200\ m/z$ 。

应用 UPLC-QTOF-MS/MS 技术获取相应色谱质谱数据。黄酮类化合物的鉴定采用多反应监测 (MRM) 模式检测待测离子对。对数据中缺失值超过 50% 的代谢物离子峰进行去除; 采用 MultiQuant 软件提取色谱峰面积及保留时间。利用混标、保留时间、Q1/Q3 离子对、二级质谱等相关条件进行纯化竹叶黄酮成分鉴定。

1.3.4 高效液相色谱-质谱联用技术 (HPLC-MS) 分析 基于 mzCloud、mzVault 及 PubChem 多数据库联用技术, 并参考王倩等^[16]的方法完成黄酮类化合物的结构解析。

1.4 体外降血糖试验

1.4.1 α -葡萄糖苷酶活性抑制率测定 参照俞逸等^[17]的方法对 α -葡萄糖苷酶进行测定, 实验流程如下: 用磷酸盐缓冲液 (PBS, $0.1\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 6.8) 配制不同浓度梯度的待测样品溶液。取 $25\ \mu\text{L}$ α -葡萄糖苷酶溶液 ($2\ \mu\text{mol}\cdot\text{mL}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) 与 $120\ \mu\text{L}$ PBS 于反应体系中, 混合均匀后在 $37\ ^\circ\text{C}$ 恒温水浴 15 min。随后加入 $25\ \mu\text{L}$ PNPG 溶液 ($2.5\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, PBS 配制), 继续在 $37\ ^\circ\text{C}$ 条件下反应 25 min。终止反应时加入 $100\ \mu\text{L}$ 碳酸钠溶液 ($0.2\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), 再使用酶标仪检测波长 $405\ \text{nm}$ 下的吸光值 (A_1)。设置 2 组对照: 空白组以等体积 PBS 替代酶液, 对照组以 PBS 代替样品溶液, 分别测得吸光值 A_2 和 A_0 。按公式 (1) 计算样品对酶活性的抑制率 (H)。

$$H = [A_0 - (A_1 - A_2)] / A_0 \times 100\% \quad (1)$$

式 (1) 中: A_0 为 pH=6.8 时的磷酸盐缓冲液吸光值; A_1 为所加入样品的吸光值; A_2 为用磷酸盐缓冲液代替 α -葡萄糖苷酶溶液的吸光值。

1.4.2 α -葡萄糖苷酶活性抑制动力学实验 参照潘玥等^[18]的方法进行实验。步骤如下: 固定纯化竹叶黄酮溶液质量浓度梯度 ($0.02\sim 0.10\ \text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$, PBS 配制), 底物 PNPG 浓度梯度 ($0.5\sim 2.5\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)。参照 1.4.1 方法测定不同底物浓度下的酶促反应速率, 其中酶促反应速率以单位时间的吸光度变化值表示。通过比较不同抑制剂浓度下斜率与纵截距的变化规律, 结合米氏方程动力学参数分析, 判定纯化竹叶黄酮对 α -葡萄糖苷酶的抑制模式。

$$\frac{1}{V} = \frac{K_m}{V_{\max} \times S} + \frac{1}{V_{\max}} \quad (2)$$

式 (2) 中: V 为酶促反应速率; V_{\max} 为最大反应速率; S 为底物质量浓度 ($\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$); K_m 为米氏常数 ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)。

混合型抑制类型 Dixon 方程可进一步验证抑制类型并确定相关抑制常数。

$$V = \frac{V_{\max} \times S}{S(1 + \frac{I}{K_{IS}}) + K_m(1 + \frac{I}{K_I})} \quad (3)$$

式 (3) 中: I 为抑制剂质量浓度 ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$); K_I 为抑制剂对酶的抑制常数; K_{IS} 为抑制剂对酶-底物复合物的

抑制常数。

1.4.3 α -淀粉酶活性抑制率测定 参照温柔等^[19]的方法,采用3,5-二硝基水杨酸(DNS)显色法进行实验。

1.4.4 α -淀粉酶活性抑制动力学实验 参照刘承毅等^[20]的方法。 α -淀粉酶抑制动力学机制研究采用Lineweaver-Burk双倒数法。试验设计:设置纯化竹叶黄酮溶液质量浓度梯度(0.1~0.5 mg·mL⁻¹, PBS配制),底物可溶性淀粉质量浓度梯度(2.0~10.0 g·L⁻¹)。参照1.4.2方法流程,测定不同底物质量浓度下的酶促反应速率,其中酶促反应速率以单位时间的吸光度变化值表示。

1.5 数据处理

采用SPSS 21.0进行数据处理,Origin 2021进行绘图,每组实验平行测定3次,所得结果以平均值±标准差表示。

2 结果与讨论

2.1 纯化竹叶黄酮成分鉴定结果分析

通过PubChem、ChemSpider等数据库,查阅相关文献,对比图1相关化合物的采集时间和离子丰度,共鉴别出18种黄酮类化合物(表2)。将这些化合物的峰面积对比得知:黄酮含量较高的化合物主要包括甘草黄酮醇、异鼠李素-7-芸香糖苷、宝藜苷I、穿心莲素F、表紫草甙II、矢车菊素3-O- β -D-半乳糖苷、5,7,2',4',6'-五甲氧基黄酮,5-羟基-6,7,3-三甲氧基黄酮-8-O- β -D-葡萄糖苷等。其中已有研究表明:部分化合物有着抗氧化、降血糖等功效,如甘草黄酮醇可抑制餐后血糖,在2型糖尿病模型中,可有效降低模型的空腹血糖值、糖化血红蛋白(HbA1c)及尿糖水平,同时升高高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)^[21]。此外,体外试验表明:甘草黄酮醇可显著抑制 α -葡萄糖苷酶活性,延缓碳水化合物的水解与吸收,降低餐后血糖峰值^[22]。甘草黄酮醇还可通过清除自由基、提升超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)活性,以及增加还原型谷胱甘肽(GSH)含量,显著改善尿酸诱导的氧化应激损伤^[23]。同时,甘草黄酮醇能降低丙二醛(MDA)和过氧化氢(H₂O₂)水平,减轻细胞氧化损伤。曹文洁等^[24]对异鼠李素-7-芸

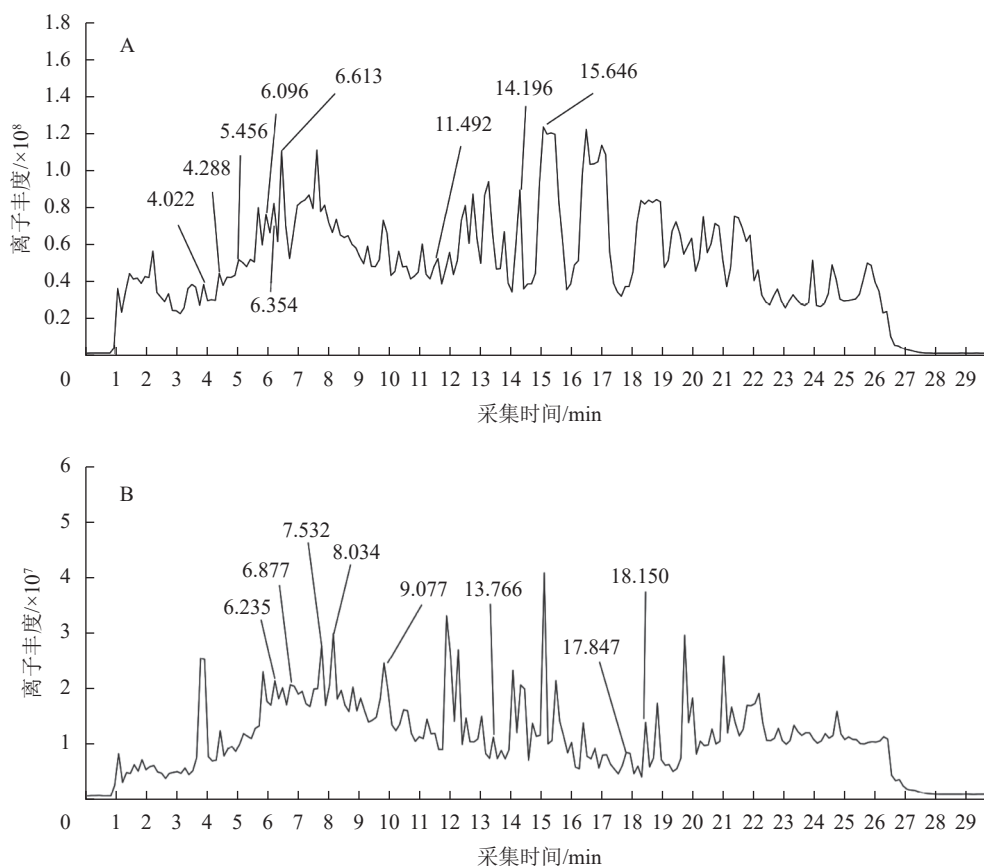


图1 正离子模式(A)和负离子模式(B)下的纯化竹叶黄酮总离子流图

Figure 1 Total ion flow diagrams of purified bamboo leaf flavonoids in positive ion mode (A) and negative ion mode (B)

表 2 纯化竹叶黄酮成分信息

Table 2 Compositional information of purified bamboo leaf flavonoids

序号	化合物名称	离子模式	保留时间/ min	分子式	分子 m/z	碎片 m/z
1	5,7,4'-三羟基-6-C-阿拉伯糖苷-8-C-葡萄糖苷黄酮 trihydroxy-6-C-arabinoside-8-C-glucoside flavone	[M-H] ⁻	6.235	C ₂₆ H ₂₈ O ₁₄	563.139 7	561.162 1
2	3,4',5,7-四羟基黄酮-3-L-鼠李糖苷 3,4',5,7-tetrahydroxyflavone-3-L-rhamnoside	[M-H] ⁻	6.877	C ₂₁ H ₂₀ O ₁₀	431.098 7	533.261 6
3	3,6,8,3',4'-五甲氧基-5,7-二羟基黄酮 3,6,8,3',4'-pentamethoxy-5,7-dihydroxyflavone	[M-H] ⁻	7.137	C ₂₀ H ₂₀ O ₉	403.104 1	769.219 7
4	5,7,2',4',6'-五甲氧基黄酮 5,7,2',4',6'-pentamethoxyflavone	[M-H] ⁻	7.532	C ₂₀ H ₂₀ O ₇	371.114 6	93.035 0
5	5-羟基-6,7,3-三甲氧基黄酮-8-O- β -D-葡萄糖苷 5-hydroxy-6,7,3-trimethoxyflavone-8-O- β -D-glucoside	[M-H] ⁻	8.034	C ₂₄ H ₂₆ O ₁₂	505.136 3	517.266 4
6	甘草黄酮醇 A glycyrrhiza-flavonol A	[M-H] ⁻	9.077	C ₂₀ H ₁₈ O ₇	369.097 7	115.320 4
7	5,7,2',3'-四羟基黄酮 5,7,2',3'-tetrahydroxyflavone	[M-H] ⁻	13.766	C ₁₅ H ₁₀ O ₆	285.041 3	165.019 5
8	5,7,2',3'-四羟基黄酮 5,7,2',3'-tetrahydroxyflavone	[M-H] ⁻	17.847	C ₁₅ H ₁₀ O ₆	285.041 2	373.075 7
9	5,7,2',3'-四羟基黄酮 5,7,2',3'-tetrahydroxyflavone	[M-H] ⁻	18.150	C ₁₅ H ₁₀ O ₆	285.041 9	323.132 9
10	异鼠李素-7-芸香糖苷 isosakuranetin-7-rutinoside	[M+H] ⁺	4.022	C ₂₈ H ₃₄ O ₁₄	595.202 1	277.217 8
11	异鼠李素-7-芸香糖苷 isosakuranetin-7-rutinoside	[M+H] ⁺	4.288	C ₂₈ H ₃₄ O ₁₄	595.202 5	275.202 6
12	1-O-龙胆二糖基-3,7-二甲氧基-8-羟基黄酮 1-O-gentiobiosyl-3,7-dimethoxy-8-hydroxyxanthone	[M+H] ⁺	5.456	C ₂₇ H ₃₂ O ₁₆	612.167 9	331.251 2
13	1-O-龙胆二糖基-3,7-二甲氧基-8-羟基黄酮 1-O-gentiobiosyl-3,7-dimethoxy-8-hydroxyxanthone	[M+H] ⁺	6.096	C ₂₇ H ₃₂ O ₁₆	612.168 6	371.248 1
14	2,3,4,7-四甲氧基黄酮-1-O- β -D-吡喃木糖-(1-6)- β -D-吡喃葡萄糖苷 2,3,4,7-tetramethoxyxanthone-1-O- β -D-xylopyranosyl-(1-6)- β -D-glucopyranoside	[M+H] ⁺	6.354	C ₂₈ H ₃₄ O ₁₆	626.183 7	277.182 2
15	穿心莲素 F andrographin F	[M+H] ⁺	6.613	C ₂₅ H ₂₈ O ₁₃	536.151 6	539.214 2
16	宝藜苷 I baohuoside I	[M+H] ⁺	11.492	C ₂₇ H ₃₀ O ₁₀	515.192 0	328.251 0
17	表紫草甙 II epimedokoreanoside II	[M+H] ⁺	14.196	C ₃₆ H ₄₄ O ₁₆	733.268 9	279.233 8
18	矢车菊素 3-O- β -D-半乳糖苷 cyanidin 3-O- β -D-galactoside	[M+H] ⁺	15.646	C ₂₁ H ₂₁ O ₁₁	449.109 6	291.179 5

香糖苷的抗炎、抗氧化、抗肿瘤、调节血糖等作用进行过介绍, 异鼠李素-7-芸香糖苷是一种广泛存在于药用植物的黄酮醇类化合物, 核心机制是改善胰岛素敏感性, 能激活 AMPK 信号通路, 促进骨骼肌和脂肪组织的葡萄糖摄取与利用; 同时通过激活 PPAR- γ 受体, 增强胰岛素信号传导, 改善胰岛素抵抗, 从而抑制血糖水平。此外还有研究表明: 异鼠李素-7-芸香糖苷在糖尿病模型中可显著降低空腹血糖、糖化血红蛋白 (HbA1c) 及血脂紊乱指标^[25]。体外实验进一步证实: 主要活性成分异鼠李素-7-芸香糖苷可显著抑制 α -葡萄糖苷酶活性, 这些结果都表明: 纯化竹叶黄酮具有潜在的降糖生物活性^[26]。宝藜苷 I 是一种多羟基黄酮苷类化合物, 蔡钊萌等^[27] 研究发现: 宝藜苷 I 具有降血糖、心血管保护、抗肿瘤、免疫调节等作用。宝藜苷 I 作为雌激素受体激动剂, 在雌性糖尿病模型中效果更显著, 试验表明其在卵巢切除的糖尿病小鼠中, 降糖效果减弱, 补充雌激素后恢复^[28]。宝藜苷 I 还通过 PPAR γ /AMPK 双路径激活、 β 细胞保护及 G 蛋白偶联雌激素受体 (GPER) 介导的雌激素作用多靶点调控糖代谢, 在动物模型中表现出显著的降糖功效。

穿心莲素 F 在动物模型中显示出降血糖和调脂作用, 通过激活 AMPK 信号通路改善胰岛素抵抗, 或通过抑制脂肪生成酶 (如 FAS) 调节脂代谢, 常用于糖尿病或非酒精性脂肪肝的辅助治疗^[29]。表紫草甙 II 能激活脑内胰岛素通路, 通过 AMPK/PGC-1 α 介导的线粒体修复、胰岛 β 细胞保护及肝肾并发症干预发挥多维度降糖作用, 这对糖尿病神经病变具有重要意义^[30]。同时, 本研究的竹叶经纯化后, 竹叶中黄酮类化合物纯度明显提升, 可使这 18 种竹叶黄酮化合物在降血糖方面的协同作用增加, 其协同性体现在 3 个维度: 第一是作用靶点互补。例如甘草黄酮醇和异鼠李素-7-芸香糖苷侧重肠道 α -葡萄糖苷酶抑制 (控制餐后血糖), 宝藜苷 I 和紫草甙 II 强化 AMPK 通路 (改善胰岛素敏感性), 穿心莲素 F 则激活 μ 受体 (肠促胰岛素效应)。这种靶点分布覆盖了糖代谢全过程。第二是器官保护协同。矢车菊素 3-O-

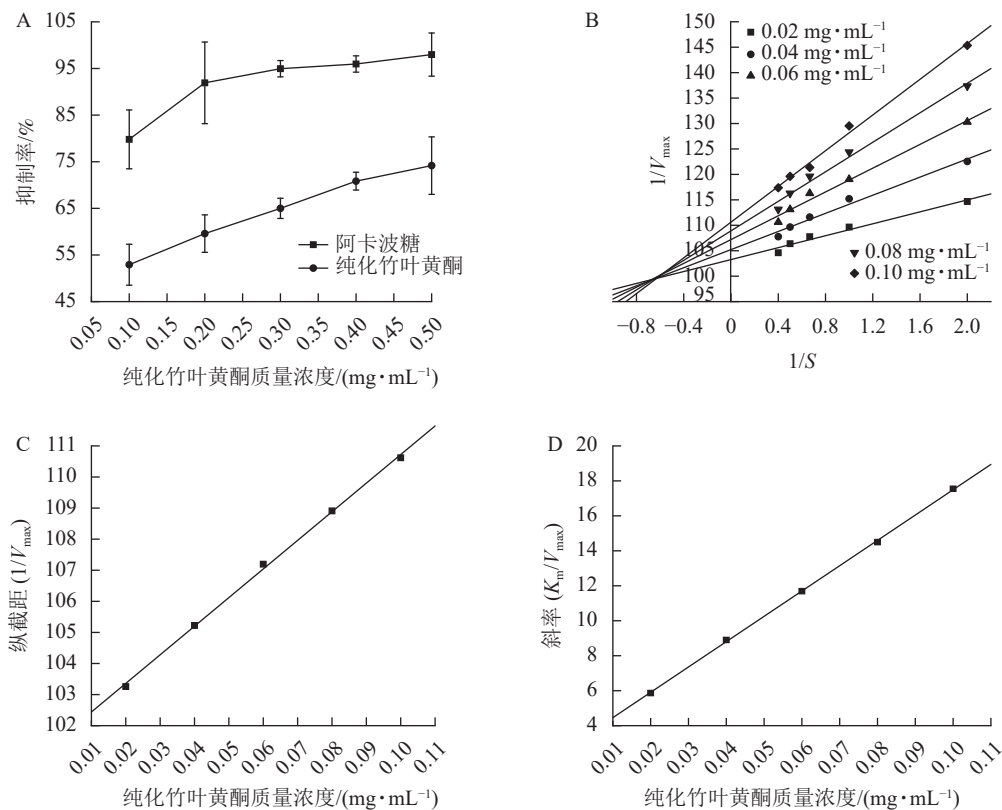
β -D-半乳糖苷的肾脏保护与5,7,2',4',6'-五甲氧基黄酮的 β 细胞抗氧化形成并发症防御网,而宝藜苷I的神经保护与其他成分的肝糖调控共同维护多器官功能。第三是药代动力学增效。比如宝藜苷I的自组装胶束技术可迁移应用于其他成分,甘草黄酮醇的分散片工艺也能提升整体生物利用度^[31]。因此慈竹竹叶黄酮是一种具有降血糖潜力的活性成分。

2.2 竹叶黄酮生物活性测试结果分析

2.2.1 抑制 α -葡萄糖苷酶活性 α -葡萄糖苷酶抑制剂作为口服型抗高血糖药物,其作用机制是通过选择性抑制小肠上皮细胞的多种 α -葡萄糖苷酶,延缓食物中碳水化合物分解为单糖的生化过程,同时减缓肠道黏膜对葡萄糖的摄取速率,从而有效控制餐后血糖波动,达到平稳降糖的治疗效果^[32]。

图2A所示:纯化竹叶黄酮对 α -葡萄糖苷酶的抑制活性呈现剂量依赖性增强趋势,其抑制率随质量浓度的升高而明显提升。当与阳性对照药物阿卡波糖进行相同质量浓度比较时,阿卡波糖表现出更强的酶抑制效应。同时,随着纯化竹叶黄酮质量浓度的梯度增加,两者间的抑制活性差异趋于缩小。酶抑制活性评价结果表明:纯化竹叶黄酮对 α -葡萄糖苷酶的半抑制质量浓度(IC_{50})为 $(0.071\pm 0.004) \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$,阿卡波糖的 IC_{50} 为 $(0.034\pm 0.002) \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$,虽然纯化竹叶黄酮高于阿卡波糖,但在 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 质量浓度下,阿卡波糖与纯化竹叶黄酮对 α -葡萄糖苷酶的抑制率分别为 $97.97\%\pm 4.62\%$ 和 $74.17\%\pm 6.17\%$,表明纯化竹叶黄酮在此浓度阈值下已具备作为 α -葡萄糖苷酶抑制剂的潜力。李翱翔等^[33]研究显示:流苏香竹 *Chimonocalamus fimbriatus* 叶黄酮在 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 质量浓度下,对 α -葡萄糖苷酶的抑制率只有30%,而本研究表明:纯化竹叶黄酮在相同质量浓度下对 α -葡萄糖苷酶的抑制率达74.17%(图2A),表明慈竹相比于其他常见竹种,在降血糖方面有着更明显的优势。

双倒数动力学分析结果(图2B)表明:纯化竹叶黄酮对 α -葡萄糖苷酶抑制动力学特征呈现明显剂量依赖性。随着纯化竹叶黄酮质量浓度梯度的升高,Lineweaver-Burk曲线的斜率呈现规律性递增,而x轴截距则随质量浓度上升逐步向原点偏移。分析表明:米氏常数(K_m)随着抑制剂质量浓度的增加呈线性升高趋势,而最大反应速率(V_{max})则随着质量浓度的增加而下降。此外,不同质量浓度拟合直线在第二



V_{max} 为最大反应速率; S 为底物质量浓度($\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$); K_m 为米氏常数($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)。

图2 纯化竹叶黄酮对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用

Figure 2 Inhibition effect of purified bamboo leaf flavonoids on α -glucosidase

象限形成交点，呈现出竞争性-非竞争性混合抑制的特点。综合上述特征，可判定纯化竹叶黄酮对 α -葡萄糖苷酶的抑制属于混合型抑制机制，其同时具备竞争性和非竞争性抑制的动力学特征。

根据纯化竹叶黄酮抑制 α -葡萄糖苷酶的动力学参数分析 (表 3)，其作用机制通过双倒数作图法计算，通过构建不同抑制剂质量浓度下的纵截距 ($1/V_{max}$) 和斜率 (K_m/V_{max}) 以及作用质量浓度的二次线性回归模型 (图 2C、D)，计算获得酶抑制常数 ($K_I=0.020\ 7\ \text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$) 及酶-底物复合物抑制常数 ($K_{IS}=1.103\ 1\ \text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$)。动力学特征显示： K_I 低于 K_{IS} ，表明纯化竹叶黄酮更倾向于与游离态 α -葡萄糖苷酶发生高亲和力结合，这种选择性结合优势通过竞争性占据酶活性中心，从而降低底物催化转化效率，实现有效的降血糖作用。

2.2.2 抑制 α -淀粉酶的活性 通过抑制 α -淀粉酶的催化活性，可有效阻断食物中淀粉类碳水化合物的酶解进程，使其裂解为可被肠道直接吸收的双糖 (如麦芽糖、异麦芽糖等)。这种酶活性调控能够延长碳水化合物的消化时间，降低葡萄糖的吸收，从而实现餐后血糖波动的干预。该作用机制从源头上控制葡萄糖的生成与吸收速率，为 2 型糖尿病患者提供了基于碳水化合物代谢调控的新型治疗路径^[34]。

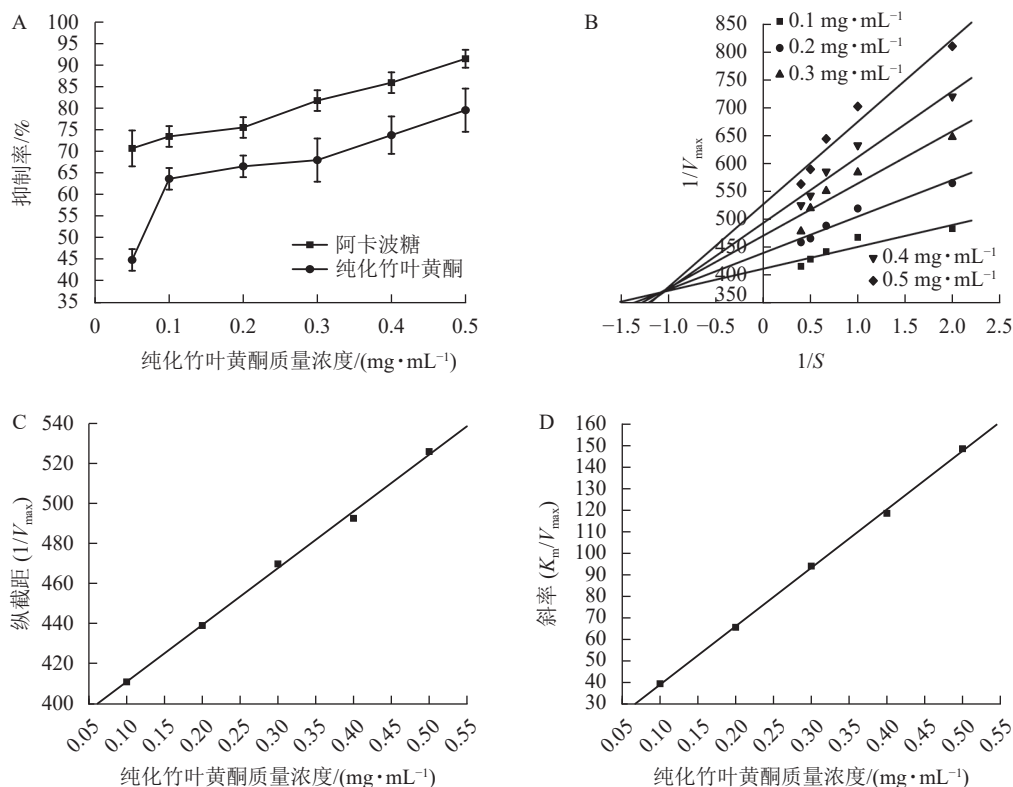
图 3A 所示：纯化竹叶黄酮对 α -淀粉酶的抑制活性呈现剂量依赖效应，其抑制效率与样品质量浓度呈正相关。在 $0.1\sim 0.5\ \text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 质量浓度区间内，阳性对照阿卡波糖的 IC_{50} 为 $(0.011\pm 0.003)\ \text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ，低于纯化竹叶黄酮 [IC_{50} 为 $(0.057\pm 0.005)\ \text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$]，表明阿卡波糖具有更强的酶结合亲和力，然而当质量浓度达 $0.5\ \text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时，阿卡波糖对 α -淀粉酶的抑制率为 $91.67\%\pm 2.08\%$ ，与纯化竹叶黄酮对 α -淀粉酶

表 3 纯化竹叶黄酮对 α -葡萄糖苷酶抑制作用的 Michaelis-Menten 方程

Table 3 Michaelis-Menten equation for inhibition effect of α -glucosidase by purified bamboo leaf flavonoids

纯化竹叶黄酮质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$)	Michaelis-Menten 方程	R^2
0.02	$\frac{1}{V} = \frac{103.258\ 5}{S} + 5.864\ 2$	0.960\ 6
0.04	$\frac{1}{V} = \frac{105.223\ 7}{S} + 8.902\ 0$	0.974\ 0
0.06	$\frac{1}{V} = \frac{107.194\ 5}{S} + 11.692\ 1$	0.980\ 9
0.08	$\frac{1}{V} = \frac{108.909\ 4}{S} + 14.499\ 0$	0.982\ 0
0.10	$\frac{1}{V} = \frac{110.618\ 0}{S} + 17.548\ 9$	0.992\ 2

说明： V 为酶促反应速率； S 为底物质量浓度 ($\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$)。



V_{max} 为最大反应速率； S 为底物质量浓度 ($\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$)； K_m 为米氏常数 ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)。

图 3 纯化竹叶黄酮对 α -淀粉酶的抑制作用

Figure 3 Inhibition effect of α -amylase by purified bamboo leaf flavonoids

的抑制率 (79.71%±5.02%) 差异缩小, 表明纯化竹叶黄酮在此质量浓度下具有与临床药物相近的 α -淀粉酶抑制效率。

根据纯化竹叶黄酮对 α -淀粉酶的双倒数动力学解析 (图 3B), 通过双倒数作图法构建了纵截距 ($1/V_{\max}$) 和斜率 (K_m/V_{\max}) 随着抑制剂质量浓度变化的线性回归模型。由图 3C、D 表明: K_m 随着抑制剂质量浓度的增加呈线性升高趋势, 而 V_{\max} 则随着质量浓度的增加而下降。动力学参数计算显示: 纯化竹叶黄酮抑制动力学呈现出随着样品质量浓度的递增, Lineweaver-Burk 拟合直线在第二象限形成收敛交点, 同时伴随 V_{\max} 的降低以及 K_m 的升高。这种动力学参数的协同变化符合混合型抑制的核心判据, 说明纯化竹叶黄酮可能通过双重作用机制干扰酶催化过程。

根据表 4 所示: 纯化竹叶黄酮对游离酶的抑制常数 ($K_I=0.0436 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$) 低于对酶-底物复合物的抑制常数 ($K_{IS}=1.3469 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$), 其与游离酶的结合效率较 ES 复合物提升约 31 倍。这种选择性结合特性通过优先占据酶活性位点, 有效阻断底物催化进程, 使 K_m 增加 3.2 倍的同时, V_{\max} 下降 58%, 从分子层面揭示了其通过竞争-变构双模调控实现碳水化合物消化延滞的降糖机制。

3 结论

本研究表明: 纯化竹叶黄酮对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶均表现出剂量依赖性混合型抑制特性。通过 Lineweaver-Burk 双倒数作图验证了纯化竹叶黄酮对 2 种酶的抑制机制及竞争性与非竞争性特征, 说明纯化竹叶黄酮在降血糖方面有着良好的表现, 可为慈竹竹叶纯化黄酮在糖尿病临床及日常应用方面提供有益指导。

4 参考文献

- [1] 朱嘉杰, 林捷, 刘军, 等. 慈竹总黄酮提取工艺优化及抗氧化活性分析[J]. *食品科技*, 2024, 49(10): 247–256. ZHU Jiajie, LIN Jie, LIU Jun, *et al.* Optimization of extraction process of total flavonoids from *Neosinocalamus affinis* and analysis of antioxidant activity[J]. *Food Science and Technology*, 2024, 49(10): 247–256. DOI: 10.13684/j.cnki.spkj.2024.10.032.
- [2] 雷福红, 欧阳吾乐, 杨亚晋, 等. 碱处理对慈竹竹叶膳食纤维提取效果的研究[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2021, 41(1): 161–166. LEI Fuhong, OUYANG Wule, YANG Yajin, *et al.* Study on extraction of dietary fiber from *Neosinocalamus affinis* leaves by alkali treatment[J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 2021, 41(1): 161–166. DOI: 10.11929/j.swfu.201911030.
- [3] 陈礼辉, 曹石林, 黄六莲, 等. 竹纤维素的制备及其功能化材料研究进展[J]. *林业工程学报*, 2021, 6(4): 1–13. CHEN Lihui, CAO Shilin, HUANG Liulian, *et al.* Development of bamboo cellulose preparation and its functionalization[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2021, 6(4): 1–13. DOI: 10.13360/j.issn.2096-1359.202104011.
- [4] AYYASH M, JOHNSON S K, LIU Shaoquan, *et al.* *In vitro* investigation of bioactivities of solid-state fermented lupin, quinoa and wheat using *Lactobacillus* spp.[J]. *Food Chemistry*, 2019, 275: 50–58. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.09.031.
- [5] 李晓晓, 吴成斌, 赵港国, 等. 响应面法优化淡竹叶黄酮提取工艺及其在露酒中的应用[J]. *酿酒科技*, 2025(3): 44–51, 59. LI Xiaoxiao, WU Chengbin, ZHAO Gangguo, *et al.* Optimization of extraction technology of flavonoids from *Lophatherum gracile* by response surface method and its application in Lujiu[J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2025(3): 44–51, 59. DOI: 10.13746/j.njkj.2024054.
- [6] KO H C, LEE J Y, JANG M G, *et al.* Seasonal variations in the phenolic compounds and antioxidant activity of *Sasa quelpaertensis*[J]. *Industrial Crops and Products*, 2018, 122: 506–512. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.06.031.
- [7] 郭婕, 王欢, 张祁, 等. 竹柏叶中黄酮类成分的分离与鉴定[J]. *林产化学与工业*, 2021, 41(3): 85–94. GUO Jie, WANG Huan, ZHANG Qi, *et al.* Separation and identification of flavonoids from leaves of *Nageia nagi* (Thunberg) Kuntze[J].

表 4 纯化竹叶黄酮对 α -淀粉酶抑制作用的 Michaelis-Menten 方程

Table 4 Michaelis-Menten equation of α -amylase inhibition effect by purified bamboo leaf flavonoids

纯化竹叶黄酮质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$)	Michaelis-Menten 方程	R^2
0.1	$\frac{1}{V} = \frac{411.0625}{S} + 39.4023$	0.7899
0.2	$\frac{1}{V} = \frac{439.2646}{S} + 65.6289$	0.9370
0.3	$\frac{1}{V} = \frac{470.1171}{S} + 94.0768$	0.8622
0.4	$\frac{1}{V} = \frac{492.8986}{S} + 118.5849$	0.9429
0.5	$\frac{1}{V} = \frac{526.3096}{S} + 148.6065$	0.9346

说明: V 为酶促反应速率; S 为底物质量浓度 ($\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$)。

- Chemistry and Industry of Forest Products*, 2021, **41**(3): 85–94. DOI: [10.3969/j.issn.0253-2417.2021.03.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-2417.2021.03.012).
- [8] 周慧. 微波辅助提取毛竹叶黄酮及其在坚果中的应用研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2020. ZHOU Hui. *Microwave-assisted Extraction of Flavonoids from Phyllostachys pubescens Leaves and its Application in Nuts*[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020. DOI: [10.27232/d.cnki.gnchu.2020.003609](https://doi.org/10.27232/d.cnki.gnchu.2020.003609).
- [9] 陈丹丹, 郭雪峰, 赵蕾, 等. HPLC 法同时检测刚竹属竹叶中 4 种黄酮碳苷的含量[J]. *林产化学与工业*, 2019, **39**(5): 108–114. CHEN Dandan, GUO Xuefeng, ZHAO Lei, *et al.* Simultaneous determination of four flavone C-glycosides in bamboo leaves of *Phyllostachys* by HPLC[J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2019, **39**(5): 108–114. DOI: [10.3969/j.issn.0253-2417.2019.05.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-2417.2019.05.015).
- [10] LIU Yang, WANG Jingyu, ZHANG Aiwen, *et al.* Characterization of fish gelatin-*Artemisia sphaerocephala* Krasch gum films prepared by adding bamboo leaf flavonoids as an active substrate: application in chilled pork preservation[J]. *LWT*, 2025, **231**: 118367. DOI: [10.1016/j.lwt.2025.118367](https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.118367).
- [11] KIM N, PARK S, NHIEM N X, *et al.* Cycloartane-type triterpenoid derivatives and a flavonoid glycoside from the burs of *Castanea crenata*[J]. *Phytochemistry*, 2019, **158**: 135–141. DOI: [10.1016/j.phytochem.2018.11.001](https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2018.11.001).
- [12] YANG Yunfeng, ZHAO Lulu, SHAO Yuxin, *et al.* Effects of dietary graded levels of cinnamon essential oil and its combination with bamboo leaf flavonoid on immune function, antioxidative ability and intestinal microbiota of broilers[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, **18**(9): 2123–2132. DOI: [10.1016/S2095-3119\(19\)62566-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62566-9).
- [13] 区少碧, 杨小慧, 陈奕洁, 等. 竹叶黄酮的提取、生理机制与应用研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, **15**(3): 69–79. OU Shaobi, YANG Xiaohui, CHEN Yijie, *et al.* Advancements in the extraction, physiological mechanisms and applications of flavonoids from bamboo leaves: a comprehensive review[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, **15**(3): 69–79. DOI: [10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2024.03.010](https://doi.org/10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2024.03.010).
- [14] 王家彬. 高效 α -葡萄糖苷酶抑制能力益生菌的筛选及其胞外多糖的结构与功能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021. WANG Jiabin. *Screening of Probiotics with Efficient α -glucosidase Inhibitory Ability and Study on the Structure and Function of its Extracellular Polysaccharide*[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021. DOI: [10.27151/d.cnki.gnlu.2021.003829](https://doi.org/10.27151/d.cnki.gnlu.2021.003829).
- [15] TAN T R M, YIP L Y, TAN J G L, *et al.* Maltose metabolism in serum free CHO culture involves lysosomal acid α -glucosidase[J]. *Scientific Reports*, 2025. DOI: [10.1038/s41598-025-30901-w](https://doi.org/10.1038/s41598-025-30901-w).
- [16] 王倩, 王娟, 傅金凤, 等. 青香蕉果肉多酚成分鉴定及其对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制作用[J]. *食品科学*, 2024, **45**(7): 61–68. WANG Qian, WANG Juan, FU Jinfeng, *et al.* Identification of polyphenolic components in unripe banana pulp and their inhibitory effects on α -amylase and α -glucosidase[J]. *Food Science*, 2024, **45**(7): 61–68. DOI: [10.7506/spkx1002-6630-20230801-009](https://doi.org/10.7506/spkx1002-6630-20230801-009).
- [17] 俞遴, 吴继来, 李珍, 等. 油茶多肽稳定性及降血糖作用的研究[J]. *食品科技*, 2024, **49**(11): 241–248. YU Lin, WU Jilai, LI Zhen, *et al.* Stability and hypoglycemic effect of *Camellia* seed cake peptides[J]. *Food Science and Technology*, 2024, **49**(11): 241–248. DOI: [10.13684/j.cnki.spkj.2024.11.029](https://doi.org/10.13684/j.cnki.spkj.2024.11.029).
- [18] 潘玥, 刘小莉, 王英, 等. 蓝莓叶多酚对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的体外抑制活性研究[J]. *天然产物研究与开发*, 2022, **34**(4): 579–587. PAN Yue, LIU Xiaoli, WANG Ying, *et al.* Inhibitory effect of polyphenols from blueberry leaves on the activity of α -amylase and α -glucosidase *in vitro*[J]. *Natural Product Research and Development*, 2022, **34**(4): 579–587. DOI: [10.16333/j.1001-6880.2022.4.005](https://doi.org/10.16333/j.1001-6880.2022.4.005).
- [19] 温柔, 郭蒙蒙, 鲁航, 等. 麦源烷基间苯二酚抑制 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶活性作用及分子机制[J]. *现代食品科技*, 2025, **41**(5): 104–113. WEN Rou, GUO Mengmeng, LU Hang, *et al.* Inhibitory effects and underlying molecular mechanisms of wheat alkylresorcinols on α -glucosidase and α -amylase activities[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2025, **41**(5): 104–113. DOI: [10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.5.0279](https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.5.0279).
- [20] 刘承毅, 吴雪辉. 油茶果壳原花青素的纯化及对 α -淀粉酶活性抑制作用[J]. *食品工业*, 2021, **42**(8): 142–146. LIU Chengyi, WU Xuehui. Purification and inhibitory effect on α -amylase activity of proanthocyanidins from *Camellia oleifera* shell[J]. *The Food Industry*, 2021, **42**(8): 142–146.
- [21] ZHANG Xingjie, PU Yukun, YANG Pengyun, *et al.* Isolicoflavonol ameliorates acute liver injury via inhibiting NLRP3 inflammasome activation through boosting Nrf2 signaling *in vitro* and *in vivo*[J]. *International Immunopharmacology*, 2024, **143**: 113233. DOI: [10.1016/j.intimp.2024.113233](https://doi.org/10.1016/j.intimp.2024.113233).
- [22] XIAO Zhuqian, ZHANG Qiang, DAI Jing, *et al.* Structural characterization, antioxidant and antimicrobial activity of water-soluble polysaccharides from bamboo (*Phyllostachys pubescens* Mazel) leaves[J]. *International Journal of Biological*

- Macromolecules*, 2020, **142**: 432–442. DOI: [10.1016/j.ijbiomac.2019.09.115](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.09.115).
- [23] YANG Jichen, LI Huan, WANG Xiaoli, *et al.* Inhibition mechanism of α -amylase/ α -glucosidase by silibinin, its synergism with acarbose, and the effect of milk proteins[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, **69**(36): 10515–10526. DOI: [10.1021/acs.jafc.1c01765](https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c01765).
- [24] 曹文洁, 黄林生, 刘丽, 等. 甘草黄酮醇降尿酸及抑制氧化应激作用及其机制研究[J]. *中国现代应用药学*, 2023, **40**(4): 448–454. CAO Wenjie, HUANG Linsheng, LIU Li, *et al.* Study on effect and mechanism of licoflavonol on reducing uric acid and inhibiting oxidative stress[J]. *Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy*, 2023, **40**(4): 448–454. DOI: [10.13748/j.cnki.issn1007-7693.2023.04.003](https://doi.org/10.13748/j.cnki.issn1007-7693.2023.04.003).
- [25] OLENNIKOV D N, KASHCHENKO N I. Flavonoids in Cucurbitaceae herbs: targeted HPLC-PDA-mS profiling of wild and cultivated *Cucumis*, *Echinocystis*, and *Melothria* species and their pancreatic lipase inhibitory potential[J]. *Natural Product Research*, 2025: 1–8. DOI: [10.1080/14786419.2025.2453820](https://doi.org/10.1080/14786419.2025.2453820).
- [26] LA Xiaoqin, ZHANG Zhaoyan, DONG Cunli, *et al.* Isorhamnetin in quinoa whole-grain flavonoids intervenes in non-alcoholic fatty liver disease by modulating bile acid metabolism through regulation of FXR expression[J]. *Foods*, 2024, **13**(19): 3076. DOI: [10.3390/foods13193076](https://doi.org/10.3390/foods13193076).
- [27] 蔡钊萌, 邝枣园. 宝藜苷 I 抑制调节性 T 细胞 FoxP3 表达及其作用机制[J]. *中国临床药理学杂志*, 2024, **40**(24): 3590–3594. CAI Zhaomeng, KUANG Zaoyuan. Inhibitory effects of Baohuoside I on the expression of FoxP3 in regulatory T cells and its mechanism of action[J]. *The Chinese Journal of Clinical Pharmacology*, 2024, **40**(24): 3590–3594. DOI: [10.13699/j.cnki.1001-6821.2024.24.014](https://doi.org/10.13699/j.cnki.1001-6821.2024.24.014).
- [28] PHAM D C, NGUYEN H C, LE NGUYEN T H, *et al.* Optimization of ultrasound-assisted extraction of flavonoids from *Celastrus hindsii* leaves using response surface methodology and evaluation of their antioxidant and antitumor activities[J]. *BioMed Research International*, 2020, **2020**: 3497107. DOI: [10.1155/2020/3497107](https://doi.org/10.1155/2020/3497107).
- [29] GU Yanpei, XUE Fan, XIAO Hongrui, *et al.* Bamboo leaf flavonoids suppress oxidative stress-induced senescence of HaCaT cells and UVB-induced photoaging of mice through p38 MAPK and autophagy signaling[J]. *Nutrients*, 2022, **14**(4): 793. DOI: [10.3390/nu14040793](https://doi.org/10.3390/nu14040793).
- [30] ALEXANDER C, SWANSON K S, FAHEY G C, *et al.* Perspective: physiologic importance of short-chain fatty acids from nondigestible carbohydrate fermentation[J]. *Advances in Nutrition*, 2019, **10**(4): 576–589. DOI: [10.1093/advances/nmz004](https://doi.org/10.1093/advances/nmz004).
- [31] ELASBALI A M, ABU AL-SOUD W, ELFAKI E M, *et al.* Identification of novel c-Kit inhibitors from natural sources using virtual screening and molecular dynamics simulations[J]. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 2024, **42**(11): 5982–5994. DOI: [10.1080/07391102.2023.2231547](https://doi.org/10.1080/07391102.2023.2231547).
- [32] 黄珊, 刘嘉, 李贵华, 等. 方竹叶黄酮提取工艺优化及其抗氧化能力研究[J]. *食品研究与开发*, 2021, **42**(19): 109–117. HUANG Shan, LIU Jia, LI Guihua, *et al.* Optimization of extraction process and antioxidant activity of flavonoids from *Chimonobambusa quadrangularis* (Fenzi) Makino leaves[J]. *Food Research and Development*, 2021, **42**(19): 109–117. DOI: [10.12161/j.issn.1005-6521.2021.19.016](https://doi.org/10.12161/j.issn.1005-6521.2021.19.016).
- [33] 李翱翔, 冯武, 赵一鹤. 响应面法优化流苏香竹叶黄酮提取工艺及其抗糖尿病潜力分析[J]. *中国野生植物资源*, 2024, **43**(8): 1–9. LI Aoxiang, FENG Wu, ZHAO Yihe. Response surface optimization of flavonoids extraction technology and anti-diabetic potential analysis of *Chimonocalamus fimbriatus* leaves[J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2024, **43**(8): 1–9. DOI: [10.3969/j.issn.1006-9690.2024.08.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9690.2024.08.001).
- [34] CHEN Songhua, HUANG Hualiang, HUANG Gangliang. Extraction, derivatization and antioxidant activity of cucumber polysaccharide[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, **140**: 1047–1053. DOI: [10.1016/j.ijbiomac.2019.08.203](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.203).