单丛夏茶提取物优化制备及其抗氧化、α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶抑制关键活性成分分析

连俊辉[1]，张媚[1*]，方宗穆[1]，肖仰青[1]，赵谋明[1,2]，罗东辉[1,3]，罗财光[4]，林恋竹[1,2*]

（1.化学与精细化工广东省实验室潮州分中心，广东潮州 521011）（2.华南理工大学食品科学与工程学院，广东广州 510640）（3.广东海洋大学食品科学与工程学院，广东阳江 529500）

（4.潮州市紫莲生态农业有限公司，广东潮州 521000）

摘要：针对单丛夏茶因口感苦涩致高值化利用不足的问题，本研究以其为原料，旨在建立茶多酚富集技术、明确其生物活性及关键调控成分，为深加工提供支撑。研究通过系统评价提取物的总酚含量与活性，优化出 40%乙醇超声提取耦合乙酸乙酯萃取的富集工艺；采用动力学分析酶抑制类型，借助超高效液相色谱-电喷雾飞行时间串联质谱法解析化合物组成，并通过相关性分析构建活性关联模型。结果显示，最优工艺产物总酚含量达 648.98 mg GAE g^{-1}，较热水浸提法提高 57.48%。其 DPPH、$ABTS^{+}$自由基清除活性 IC_{50}值分别为 6.71 和 27.69 μg·mL^{-1}，均优于 Vc；对 α-葡萄糖苷酶、α-淀粉酶的抑制活性 IC_{50}值分别为 1.65 和 0.40 mg mL^{-1}，均优于阿卡波糖，且两种酶抑制类型均为非竞争性混合抑制。组分定量与相关性分析证实，EGCG、C 与 EGC 等儿茶素类物质是主导其抗氧化与降糖功能的关键活性成分。本研究建立的提取技术高效可行，明确了单丛夏茶的功能优势与核心物质基础，拓展了其在功能食品领域的应用场景，也为其深加工利用开辟了新路径。

关键词：单丛夏茶；多酚；儿茶素；抗氧化活性；降糖活性

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.8.01720

Optimization of the Preparation of Dancong Summer Tea Extracts and Analysis of Key Constituents Responsible for Antioxidant, α-Glucosidase and α-Amylase Inhibitory Activities

LIAN Junhui[1], ZHANG Mei[1*], FANG Zongmu[1], XIAO Yangqing[1], ZHAO Mouming[1,2], LUO Donghui[1,3], LUO Caiguang[4], LIN Lianzhu[1,2*]

(1.Chaozhou Branch of Chemistry and Chemical Engineering Guangdong Laboratory, Chaozhou 521011, China)

(2.School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(3.School of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Yangjiang 529500, China)

(4.Chaozhou Zilian Ecological Agriculture Co. Ltd., Chaozhou 521000, China)

Abstract: To address the limited high-value utilization of Dancong summer tea due to its inherently bitter and astringent taste, this study employed it as a raw material with the aim of establishing a polyphenol-enrichment technology, elucidating its bioactivities and key regulatory components, thereby providing a basis for further processing and value addition. The total phenolic content and bioactivities of the extracts were systematically evaluated, leading to the optimization of an enrichment process combining 40% ethanol ultrasonic-assisted extraction with ethyl acetate partitioning. Enzyme inhibition mechanisms were determined via kinetic analysis, and ultra-high-performance liquid chromatography coupled with electrospray ionization time-of-flight tandem mass spectrometry (UHPLC-ESI-TOF-MS/MS) was used to characterize the chemical composition. In addition, correlation analysis was conducted to construct an activity–compound relationship model. The results showed that the optimized process yielded an extract with a total phenolic content of 648.98 mg GAE g^{-1}, representing a 57.48% increase

收稿日期：2025-12-02；修回日期：2026-09-14；接受日期：2026-09-15

基金项目：广东省省级科技计划项目（2023B0202010001）

作者简介：连俊辉（1995-），男，硕士，研究方向：食品化学营养学，E-mail：Lianjh2025@163.com

通讯作者：张媚（1993-），女，博士，助理研究员，研究方向：食品化学营养学，E-mail：zhangmouc@126.com；共同通讯作者：林恋竹（1985-），女，博士，研究员，研究方向：食品化学营养学，E-mail：felzlin@scut.edu.cn

compared with hot-water extraction. The DPPH and $ABTS^+$ radical scavenging activities exhibited IC_{50} values of 6.71 and 27.69 μg mL^{-1}, respectively, both superior to vitamin C. The inhibitory activities against α-glucosidase and α-amylase showed IC_{50} values of 1.65 and 0.40 mg mL^{-1}, respectively, outperforming acarbose. Both enzyme inhibition modes were identified as non-competitive mixed inhibition. Composition quantification and correlation analysis confirmed that catechins, including epigallocatechin gallate (EGCG), catechin (C) and epigallocatechin (EGC), were the key bioactive constituents responsible for antioxidant and hypoglycaemic activities. Overall, the developed extraction strategy is efficient and feasible, clarifying both the functional advantages and the core bioactive basis of Dancong summer tea. These findings expand its potential applications in functional foods and provide a new pathway for its high-value utilization.

Key words: dancong summer tea; polyphenols; catechins; antioxidant activity; hypoglycemic activity

糖尿病是一类由胰岛素分泌缺陷或功能障碍引发的慢性高血糖代谢性疾病，常伴随肾衰竭、心血管疾病等严重并发症，其中 2 型糖尿病（T2DM）占比约 90%，以糖脂代谢紊乱为核心特征，且与心血管疾病风险升高、氧化损伤及肥胖等问题密切相关[1]。近年来，受人口老龄化、不健康生活方式等因素影响，T2DM 发病率持续上升，中国患者数量已超 1.18 亿（居全球首位），另有 2.74 亿糖尿病前期人群因缺乏及时干预，并发症发生风险显著增加[2]。研究表明，糖尿病的发生与氧化应激密切相关，过量活性氧可损伤蛋白质、核酸、脂质及酶系统，加剧病理进程[3]。此外，α-淀粉酶与 α-葡萄糖苷酶作为碳水化合物消化的关键酶，分别负责将淀粉水解为低聚糖并进一步转化为葡萄糖，直接影响餐后血糖水平。抑制这两种酶的活性能够延缓碳水化合物消化吸收，平稳餐后血糖波动[4]。因此，开发同时具备抗氧化能力与糖消化酶抑制活性的功能因子，将有望为预防与改善糖尿病及其并发症提供新途径。

目前，口服降糖药仍是临床治疗糖尿病的主要手段，但该类药物普遍存在作用靶点单一、副作用及毒性较明显、治疗成本高等问题，其应用受到一定的限制[5]。研究表明，茶叶中富含的茶多酚[6]具有明确的抗肥胖生物活性，这使得饮茶在降低肥胖及糖尿病并发症风险方面展现出积极作用[7]。由于茶叶提取物具备多靶点调节优势，在改善糖脂代谢领域的应用潜力正日益凸显，已成为功能性食品研究的热点之一。

凤凰单丛茶作为中国特色乌龙茶，以浓郁香气为显著特征[8]。依据采摘季节的不同，单丛茶可分为春茶、夏茶、秋茶及冬茶，四个季节的单丛茶均具有一定的降血糖效果，但夏季采摘制作的单丛夏茶因炎热高温，茶多酚的合成和积累增加，使其酚氨比高，口感苦涩；春茶饮用风味最佳，但存在供过于求问题；夏茶则因口感苦涩导致饮用风味最差，虽产量较高却售价低廉，其高值化利用研究显著不足[9]。已有研究表明，高温会促进茶多酚的合成与积累[10]，这是单丛夏茶口感苦涩的主要原因。目前，关于凤凰单丛茶的研究多集中于风味及挥发性物质解析。本团队前期研究发现，单丛夏茶富含多酚类物质，是潜在的降糖功能因子来源[11,12]，但相关研究仍缺乏系统性。尤其针对单丛夏茶活性物质的提取工艺研究较为匮乏，制约了其在功能食品健康产品领域的深度开发。

因此，本研究以单丛夏茶为原料，通过多维度指标比较分析，筛选出单丛夏茶活性物质的最优制备工艺；并进一步深入分析提取物中调控抗氧化、α-淀粉酶及 α-葡萄糖苷酶抑制活性的关键成分，旨在为单丛夏茶的高值化开发及功能食品应用提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验原料

单丛夏茶，潮州市紫莲生态农业有限公司；1,1-二苯基-2-三硝基苯肼（1,1-Diphenyl-2-Picrylhydrazyl，DPPH），上海源叶生物科技有限公司；α-葡萄糖苷酶（100 U mg^{-1}）、α-淀粉酶（50 U mg^{-1}），Sigma 公司；2,2-联氮-二（3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸）二铵盐（2,2’-azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate)，ABTS）、4-硝基苯基-α-D-吡喃葡萄糖苷（4-nitrophenyl-α-D-glucopyranoside，pNPG），上海麦克林生化科技股份有限公司；3,5-二硝基水杨酸试剂（DNS 试剂），北京索莱宝科技有限公司；乙腈、乙酸和甲醇（均为色谱级），赛默飞世尔科技公司。其余试剂均为标准分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

KQ-500DE 型超声波清洗器，昆山禾创超声有限公司；SpectraMax i3x 型多功能酶标仪，美谷分子仪器（上海）

有限公司；SCIENTZ-50F 型冷冻干燥机，宁波新芝生物股份有限公司；RE-52A 型旋转蒸发仪、壹叶 SHZ-III 循环水真空泵，上海亚荣生化仪器厂；X-30R 冷冻高速离心机，贝克曼库尔特国际贸易（上海）有限公司；ME204E/02 型万分之一电子天平，梅特勒-托利多(上海)有限公司；MILLI-Q IQ7015 超纯和纯水净化系统，德国达姆施塔特默克集团（Merck KGaA）；HPLC-Q Exactive 超高效液相色谱-四极杆质谱仪，美国 Thermo Fisher 公司；UPLC®HSS T3 Column 柱（100×2.1 mm，1.8 μm），沃特世公司（Waters Corporation）；Thermo UItimate 3000 型高效液相色谱仪，赛默飞世尔科技（中国）有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 单丛夏茶提取物的制备

单丛夏茶经粉碎机破碎后过 40 目筛，准确称取 5.00 g 茶粉，分别加入 20%、40%、60%和 80%（*V*/*V*）乙醇溶液，按 1:20（*m*/*V*）的料液比混匀，置于超声波清洗器中提取（功率 500 W，频率 40 Hz，温度 50 ℃，时间 30 min）。提取完毕后，经纱布过滤去除茶渣，滤液于 8 000 r·min^{-1} 离心 15 min，取 1 mL 上清液用对应浓度乙醇定容，用于活性成分含量检测。剩余上清液经旋蒸除尽乙醇后均分两份：一份浓缩后进行冷冻干燥，记为醇提物；另一份加入乙酸乙酯反复萃取至水相近无色，分别收集乙酸乙酯相层和水相层，于 55 ℃减压旋蒸除去有机试剂，浓缩后冷冻干燥，得乙酸乙酯相提取物和水相提取物。以热水提取方法（料液比 1:20（*m*/*V*），温度 95 ℃，时间 30 min）制备单丛夏茶水提物。

1.3.2 提取物中主要活性成分含量测定

1.3.2.1 总酚含量测定

参考陈然等[12]的方法并稍作调整，取 20 μL 适当稀释的样品液加入透明酶标板，依次加入 100 μL 10%（*V*/*V*）福林酚试剂，酶标仪震荡混匀 10 s，反应 5 min；再加入 80 μL 7.5%（*m*/*m*）Na_2CO_3 溶液，震荡混匀 10 s，避光反应 1 h 后，测定 765 nm 处吸光度。以没食子酸为标准品绘制标准曲线（Y=0.006 5X+0.005 39，R^2=0.999），结果以 mg GAE g^{-1} 表示。

1.3.2.2 总黄酮含量测定

参考王丽丽等[13]的方法并稍作修改，取 50 μL 适当稀释的样品加入透明酶标板，加入 80 μL 1.5%（*m*/*m*）$AlCl_3·6H_2O$ 溶液，震荡混匀 10 s；再加入 40 μL 0.1 mol·L^{-1} 乙酸-乙酸钠缓冲液（pH 值 5.5）和 80 μL 50%（*V*/*V*）乙醇，震荡混匀 10 s，避光反应 30 min 后，测定 415 nm 处吸光度。以芦丁为标准品绘制标准曲线（Y=0.002 8X+0.000 9，R^2=0.999），结果以 mg Rutin g^{-1} 表示。

1.3.2.3 多糖含量测定

参考侯粲等[14]的方法并稍作调整，准确称取 10 mg 提取物样品，加 1 mL 蒸馏水超声 30 min 溶解，过滤后向滤液中加入无水乙醇至体系含醇量≥80%（*V*/*V*），涡旋混匀，4 ℃静置 24 h；4 ℃、8 000 r·min^{-1} 离心 10 min，弃上清，沉淀用 2 mL 无水乙醇涡旋洗涤，同条件重复离心后弃上清；沉淀加 1 mL 去离子水超声溶解，得待测液。取 250 μL 待测液于试管中，依次加入 125 μL 5%（*m*/*m*）苯酚溶液混匀，再加入 625 μL H_2SO_4，涡旋混匀后室温静置 10 min，测定 490 nm 处吸光度。以葡萄糖为标准品绘制标准曲线（Y=2.214 9X+0.008 8，R^2=0.999），结果以多糖含量（%）表示。

1.3.3 体外抗氧化活性检测

1.3.3.1 DPPH 自由基清除活性

参照 Gao 等[15]方法稍作调整，样品组加 50 μL 样品液、50 μL 0.2 mmol·L^{-1} DPPH 及 100 μL 超纯水，25 ℃避光震荡孵育 30 min，测 517 nm 吸光度（A_i）；空白组以 50 μL 无水乙醇替代 DPPH，测吸光度（A_j）；对照组以 50 μL 超纯水替代样品液，测吸光度（A_0）；阳性对照组以 Vc 为抗氧化剂，操作同上。按公式（1）计算清除率：

$$I_1 = \left(1 - \frac{A_i - A_j}{A_0}\right) \times 100\% \qquad (1)$$

式中：

I_1——DPPH 自由基清除率，%；

A_i——样品溶液与 DPPH 溶液混合反应的吸光度；

A_j——样品溶液与无水乙醇溶液混合反应的吸光度;

A_0——超纯水与 DPPH 溶液混合反应的吸光度。

1.3.3.2 $ABTS^+$自由基清除活性

参照 Gao 等[15]方法稍作调整，7 mmol Ł$^{-1}$ ABTS 与 2.45 mmol Ł$^{-1}$ $K_2S_2O_8$ 等体积混匀，室温避光反应 12 h 的储备液；用 10 mmol Ł$^{-1}$ 磷酸缓冲液（pH 值 7.4）稀释储备液至 734 nm 吸光度 0.7±0.02，即为工作液。样品组加 20 μL 样品液及 200 μL 工作液，室温避光反应 6 min，测吸光度（A_i）；空白组以蒸馏水替代样品液，测吸光度（A_0）；对照组以 PBS 替代工作液，测吸光度（A_j）。按公式（2）计算清除率：

$$I_2=\left(1-\frac{A_i-A_j}{A_0}\right)\times 100\% \qquad (2)$$

式中:

I_2——$ABTS^+$自由基清除率，%;

A_i——样品组吸光度;

A_j——样品对照组吸光度;

A_0——空白组吸光度。

1.3.4 降糖活性检测

1.3.4.1 α-淀粉酶抑制活性

参照 Peng 等[11]方法稍作调整，取 50 μL 5 U mL^{-1} α-淀粉酶与 50 μL 样品工作液混匀，37 ℃孵育 5 min 后，加 50 μL 预热 1%（*m/V*）淀粉溶液反应 5 min；加 250 μL DNS 沸水浴 5 min，冷却定容至 2 mL，测 540 nm 吸光度。根据下式（3）计算样品的 α-淀粉酶抑制率，以 IC_{50} 值表示 α-淀粉酶抑制活性。以阿卡波糖为阳性对照。

$$I_3=\left(1-\frac{A-a}{B-b}\right)\times 100\% \qquad (3)$$

式中:

I_3——α-淀粉酶抑制率，%;

A——样品组吸光度;

B——空白组吸光度;

a——样品对照组吸光度;

b——空白对照组吸光度。

1.3.4.2 α-葡萄糖苷酶抑制活性

参照 Peng 等[11]方法稍作调整，96 孔板中加 30 μL 样品与 30 μL 0.2 U mL^{-1} 酶液，37 ℃孵育 15 min 后，加 30 μL 10 mmol Ł$^{-1}$ pNPG 反应 10 min，加 100 μL 0.2 mol Ł$^{-1}$ Na_2CO_3 终止，测 405 nm 吸光度。设样品组、背景组（缓冲液替代酶）、空白组（缓冲液替代样品），按式（4）计算抑制率。

$$I_4=\left(1-\frac{C-c}{D-d}\right)\times 100\% \qquad (4)$$

式中:

I_4——α-葡萄糖苷酶抑制率，%;

C——样品组吸光度;

D——空白组吸光度;

c——样品对照组吸光度;

d——空白对照组吸光度。

1.3.5 酶促反应动力学分析

1.3.5.1 α-葡萄糖苷酶双倒数作图分析

参照宋菲等[16]的方法并稍作调整：固定 α-葡萄糖苷酶浓度为 0.20 U mL^{-1}，分别改变 40%乙醇超声（40%

EtOH-UE）全提物、水相提取物与乙酸乙酯相提取物的质量浓度，其中，提取物质量浓度设置如下：全提物（0、8 和 16 μg·mL^{-1}）、水相提取物（0、12 和 20 μg·mL^{-1}）、乙酸乙酯相提取物（0、4 和 8 μg·mL^{-1}）。同时设置 pNPG 底物浓度梯度（0.25、0.50、1 和 2 mmol·L^{-1}），绘制 Lineweaver-Burk 曲线。

1.3.5.2 *α*-淀粉酶双倒数作图分析

参照宋菲等[16]的方法并稍作调整：固定 *α*-淀粉酶浓度为 0.10 mg·mL^{-1}，分别改变 40% EtOH-UE 全提物、水相提取物与乙酸乙酯相提取物的质量浓度，其中，提取物质量浓度设置如下：40% EtOH-U 全提物（0、2 和 4 mg·mL^{-1}）、水相提取物（0、4 和 5 mg·mL^{-1}）、乙酸乙酯相提取物（0、0.50 和 1 mg·mL^{-1}）。同时设置淀粉底物浓度梯度（1、2、4、6、8 和 10 mg·mL^{-1}），绘制 Lineweaver-Burk 曲线。

1.3.6 提取物的非靶向代谢组学分析

参照 Peng 等[11]方法，样品经甲醇配制成 4 mg·mL^{-1}，超声溶解后稀释至 200 μg·mL^{-1}；4 ℃、11 000 r·min^{-1} 离心 10 min，上清过 0.22 μm 滤膜，供 HPLC-ESI-MS 分析。色谱条件:采用 Thermo fisher U3000 超高效液相色谱仪，色谱柱为 ACQUITY UPLC®HSS T3 Column 柱（100×2.1 mm，1.8 μm），柱温 40 ℃，进样流速为 0.3 μL·min^{-1}，进样体积为 2 μL，流动相 A 为 0.1%（*V/V*）甲酸水溶液、流动相 B 为乙腈溶液；质谱条件：ESI 离子源，正负离子扫描模式；使用 CD 3.1 软件对上述所得检测数据进行鉴定处理。

1.3.7 多酚类化合物含量的测定

HPLC 检测条件参照 Nian 等[17]的方法稍作修改。精确称取 EGCG、CG、C、EGC、GA 及 Isovitexin 标准品，用 70%（*V/V*）甲醇超声溶解并定容，配制系列浓度标准溶液；单丛夏茶提取物样品同样用 70%（*V/V*）甲醇制备成待测溶液。采用 Thermo Vanquish U3000 高效液相色谱仪，色谱柱选用 Hypersil GOLD C18 柱（150 mm×4.6 mm，5 μm）。流动相由溶剂 A（水:乙腈:磷酸（947.5:50:2.5，*V/V/V*））和溶剂 B（80%，*V/V*，甲醇水溶液）组成，流速设定为 1.0 mL·min^{-1}，柱温：30 ℃；进样量：10 μL；线性梯度洗脱如下，0~10 min，90%~55% A；10~22 min，55%~35% A；22~25.9 min，35%~0% A；25.9~29 min，0% A；29~42 min，90% A；0~20 min 检测波长为 280 nm；20~36 min 检测波长为 360 nm。

1.4 数据处理

样品平行测定 3 次，数据表示为平均值±标准差，使用 Origin 2022 软件对数据进行处理。

2 结果与讨论

2.1 单丛夏茶不同提取物的总酚含量比较

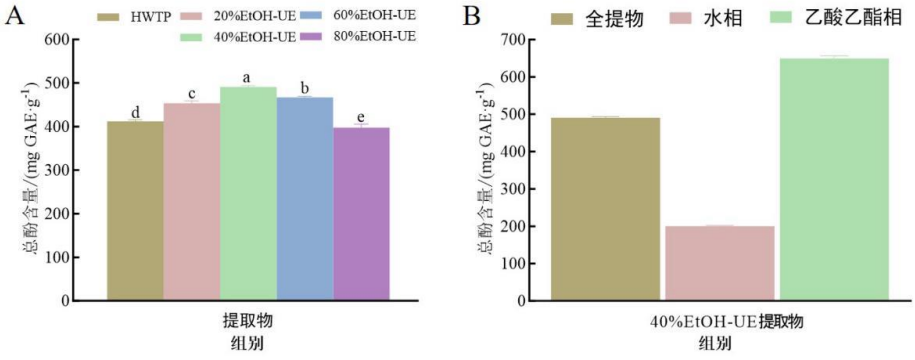


图 1 不同提取物的总酚含量比较

Fig.1 Comparison of total phenol content in different extracts

注：图中不同小写字母表示具有显著性差异（*P*<0.05），下同。

乙醇超声辅助提取可借助超声空化效应破碎植物细胞壁，实现低温短时提取，有效减少热敏性多酚的热降解损失；同时乙醇-水复合溶剂可适配不同极性活性组分的溶出特征，显著提升多酚提取效率与溶出效果[18]。在本研究中，相较于传统热水提取法（HWTP，总酚含量为 412.09 mg GAE·g^{-1}），20%、40%及 60%乙醇超声辅助提取法

可显著提升提取物总酚含量，其含量范围为 453.66~490.74 mg GAE g^{-1}，较热水提取法分别提升 100.88%、190.86% 和 132.45%；其中以 40%乙醇超声提取组（490.74 mg GAE g^{-1}）效果最优，总酚含量达到最高值（图 1A）。Gao 等[15]在昆仑雪菊多酚提取工艺研究中亦证实，纯水提取易造成部分水不溶性酚类物质流失，而乙醇提取体系可最大程度保留菊花多酚类成分。因此，40% EtOH-UE 提取法能够有效富集单丛夏茶中的多酚类物质，显著提高其提取物总酚含量。随后将 40% EtOH-UE 提取物经乙酸乙酯分级萃取，分别获得水相提取物与乙酸乙酯相提取物，结果表明经乙酸乙酯分级萃取后，水相提取物多酚含量为 200.43 mg GAE g^{-1}，而乙酸乙酯相提取物多酚含量高达 648.98 mg GAE g^{-1}（图 1B），综上，40% EtOH-UE 耦合乙酸乙酯萃取提取法能够有效富集单丛夏茶中的多酚类物质，显著提高其提取物总酚含量。

2.2 体外活性评价

2.2.1 抗氧化活性

以维生素 C（Vc)为阳性对照（IC_{50}=10.14 μg mL^{-1}），考察单丛夏茶全提物、水相提取物及乙酸乙酯相提取物对 DPPH、$ABTS^{+}$自由基的清除能力，结果如图 2A、2B 所示。

由图 2A 可知，乙酸乙酯相提取物的 DPPH 自由基清除活性最优，其 IC_{50} 值为 6.71 μg mL^{-1}，显著低于阳性对照 Vc 及其他提取物（P<0.05）；清除活性依次为乙酸乙酯相提取物＞全提物（9.22 μg mL^{-1}）＞水相提取物（28.43 μg mL^{-1}）。与已有文献报道的天然产物提取物相比，如松茸醇提物（IC_{50}=1.03 mg mL^{-1}）[19]、灰树花醇提水相萃取物（IC_{50}=1.85 mg mL^{-1}）[20]、杨树桑黄醇提物（IC_{50}=480 mg mL^{-1}）[21]，以及甲醇提取-乙酸乙酯分级绿茶、黄茶、红茶提取物（IC_{50} 分别为 15、30 和 50 μg mL^{-1}）[22]，单丛夏茶各提取物的 DPPH 自由基清除能力整体更具优势。

图 2B 为不同提取物的 $ABTS^{+}$自由基清除活性结果，阳性对照 Vc 的 IC_{50} 值为 54.14 μg mL^{-1}。其中，全提物（29.04 μg mL^{-1}）与乙酸乙酯相提取物（27.69 μg mL^{-1}）的 IC_{50} 值均显著低于 Vc 组（P<0.05），表明二者 $ABTS^{+}$自由基清除活性均优于 Vc，且以乙酸乙酯相提取物活性最佳，该变化趋势与 DPPH 自由基清除结果一致；水相提取物清除活性最弱（IC_{50}=85.14 μg mL^{-1}），显著高于 Vc 组（P<0.05）。将其与松茸醇提物（0.87 mg mL^{-1}）[19]、灰树花醇提水相萃取物（3.16 mg mL^{-1}）[20]、杨树桑黄醇提物（340 μg mL^{-1}）[21]及乙酸乙酯分级红茶提取物（90 μg mL^{-1}）[22]对比可见，单丛夏茶提取物的 $ABTS^{+}$自由基清除能力整体最优，进一步证实其具有优异的体外抗氧化活性。

2.2.2 降糖活性

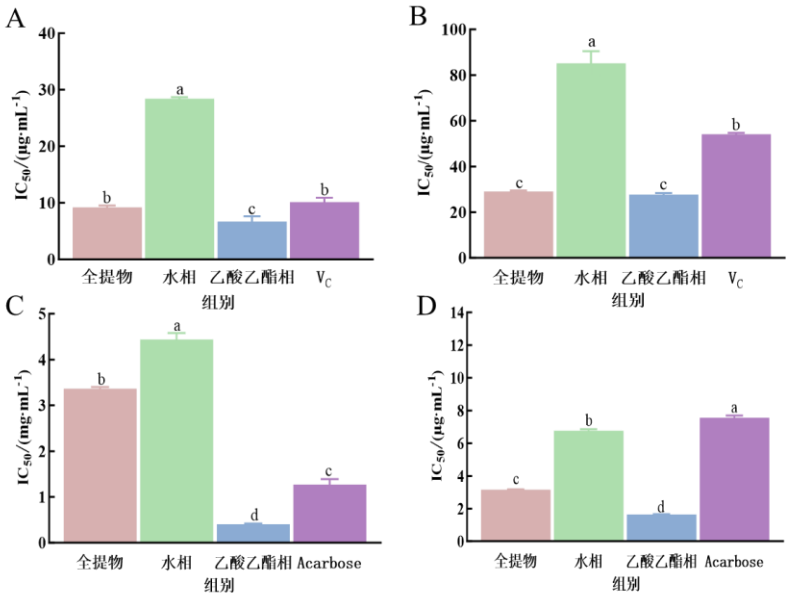


图 2 不同提取物的 DPPH、$ABTS^{+}$自由基清除活性（A，B）与 α-淀粉酶（C）和 α-葡萄糖苷酶（D）抑制活性

Fig.2 Free radical scavenging activities (DPPH and $ABTS^{+}$; A and B) and inhibitory activities against α-amylase (C) and α-glucosidase (D) of different extracts

本研究进一步测定了单丛夏茶不同提取物对 α-淀粉酶与 α-葡萄糖苷酶的抑制活性，结果如图 2C、2D 所示。

由图 2C 可见，以阿卡波糖为阳性对照，其对 *α*-淀粉酶抑制活性的 IC_{50} 为 1.27 mg mL^{-1}。其中，全提物的 *α*-淀粉酶抑制活性弱于阳性对照（IC_{50}=3.36 mg mL^{-1}）；而经乙酸乙酯分级萃取后，乙酸乙酯相提取物的 IC_{50} 值降至 0.43 mg mL^{-1}，显著低于阿卡波糖组（*P*<0.05），表明该组分对 *α*-淀粉酶具有更强的抑制效果，抑制活性显著优于阳性对照。图 2D 为各提取物对 *α*-葡萄糖苷酶的抑制活性结果，阳性对照阿卡波糖的 IC_{50} 为 7.56 μg mL^{-1}。整体而言，单丛夏茶提取物对 *α*-葡萄糖苷酶的抑制效果优于对 *α*-淀粉酶的抑制作用。其中，全提物（3.16 μg mL^{-1}）、水相提取物（6.76 μg mL^{-1}）及乙酸乙酯相提取物（1.65 μg mL^{-1}）对 *α*-葡萄糖苷酶的抑制活性均显著高于阿卡波糖（*P*<0.05），尤以乙酸乙酯相提取物抑制效果最为突出。与已有文献对比，Fabio 等[23]报道绿茶、白茶及乌龙茶提取物对 *α*-葡萄糖苷酶抑制的 IC_{50} 分别为 42、63 和 71 μg mL^{-1}；Wang 等[22]测得黄茶、红茶多酚提取物的 IC_{50} 值分别高达 416 μg mL^{-1} 和 927 μg mL^{-1}，上述茶类提取物的抑制活性均显著低于本研究中单丛夏茶提取物（*P*<0.05）。上述结果充分表明，单丛夏茶具备更为优异的降糖相关酶抑制活性，是一种极具潜力的天然降糖功能原料。

综合上述研究结果表明，采用 40%乙醇超声提取耦合乙酸乙酯萃取的富集纯化工艺，是单丛夏茶功能活性提取物的最优制备工艺。该工艺可显著提升提取物中总酚类活性成分的富集效率，使其总酚含量维持在较高水平；同时，所得提取物表现出优异的 DPPH、$ABTS^{+}$自由基清除活性，并对碳水化合物消化关键调控酶——*α*-淀粉酶与 *α*-葡萄糖苷酶均具有较强的抑制作用。

2.3 抑制类型

2.3.1 *α*-淀粉酶抑制类型

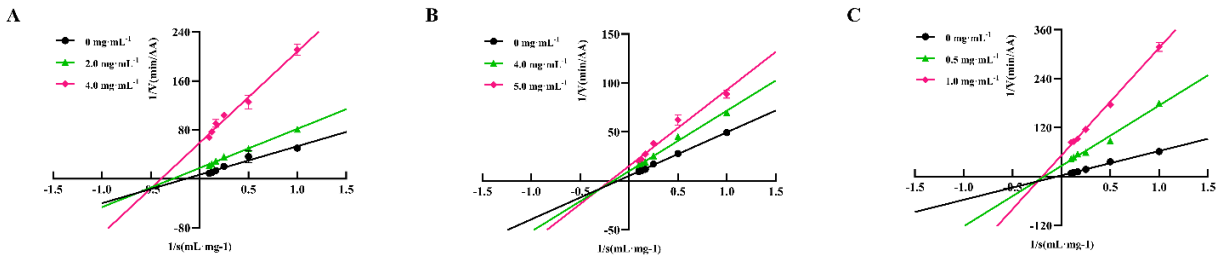


图 3 40% EtOH-UE 全提物（A）、水相（B）和乙酸乙酯相提取物（C）对 *α*-淀粉酶的 Lineweaver-Burk 双倒数图

Fig.3 Lineweaver-Burk double-reciprocal plots of 40% EtOH-UE total extract (A), aqueous phase (B) and ethyl acetate phase (C) against *α*-amylase

表 1 40% EtOH-UE 全提物、水相和乙酸乙酯相提取物对 *α*-淀粉酶的抑制动力学参数

Table 1 Inhibitory kinetic parameters of 40% EtOH-UE total extract, aqueous phase and ethyl acetate phase against *α*-amylase

样品	浓度/(mg mL^{-1})	V_{max}/(ΔA min^{-1})	*Km*/(mg mL^{-1})	*Ki*/(mg mL^{-1})	*Kis*/(mg mL^{-1})	*Ki*/*Kis*	抑制类型
全提物	0	0.176 4	7.743 9	1.26	0.06	20.80	非竞争性混合抑制型
	2	0.057 0	3.650 5				
	4	0.017 1	2.544 8				
水相提取物	0	0.193 4	8.596 0	7.24	2.70	2.68	非竞争性混合抑制型
	4	0.100 3	6.185 3				
	5	0.065 9	5.119 2				
乙酸乙酯相提取物	0	0.357 5	21.39	0.27	0.05	5.55	非竞争性混合抑制型
	0.5	0.038 4	5.684 7				
	1	0.019 3	5.092 7				

采用 Lineweaver-Burk 双倒数作图法，分析全提物（图 3A）、水相提取物（图 3B）与乙酸乙酯相提取物（图 3C）对 *α*-淀粉酶的抑制动力学类型。各组提取物与空白体系拟合直线均交汇于第三象限；随抑制剂添加浓度升高，体系最大反应速率 *Vmax* 与米氏常数 *Km* 同步下降，呈现非竞争性混合抑制动力学特征[24]。由表 1 动力学参数可见，乙酸乙酯相提取物作用下 *Km* 降幅最为显著，由 21.39 mg mL^{-1} 降至 5.09 m mL^{-1}，*Vmax* 同步明显下降，说明该组分与酶-底物复合物（ES）结合能力（抑制常数 *Ki*）强于游离酶结合能力（竞争抑制常数 *Kis*），抑制作用以

非竞争性途径为主，其 *Ki*/*Kis* 为 5.55。Yang 等[24]研究指出，非竞争性混合抑制活性物质可通过氢键、疏水相互作用结合酶蛋白非催化位点，改变酶空间构象，最终削弱酶催化能力；Li 等[25]亦证实，该类抑制剂可与阿卡波糖等竞争性降糖药物产生协同抑制效果。由此推测，单丛夏茶提取物作为混合型非竞争抑制剂，与阿卡波糖复配使用有望进一步提升体外降糖活性。

2.3.2 *α*-葡萄糖苷酶抑制类型

如图 4 所示，单丛夏茶 40% EtOH-UE 全提物、水相及乙酸乙酯相提取物对 *α*-葡萄糖苷酶均表现浓度依赖性抑制效果。Lineweaver-Burk 拟合曲线相交于第三象限，结合表 2 参数分析可知，提升提取物浓度后三组样品 *Km*、*Vmax* 同步降低，同样符合非竞争性混合抑制型特征。活性强弱排序为乙酸乙酯相＞全提物＞水相，三者 *Ki*、*Kis* 分别为 2.36、1.83 μg·mL^{-1}；12.50、2.88 μg·mL^{-1}；34.22、9.09 μg·mL^{-1}。三组样品 *Ki*/*Kis* 均大于 1，证明抑制效应以非竞争性为主，与宋菲等[16]关于槟榔籽多酚抑制 *α*-葡萄糖苷酶的结论一致。现有研究表明，多酚类物质可分别结合游离酶 E、酶-底物复合物 ES，生成 EI、ESI 复合产物，从两条途径共同抑制酶催化效率[22]。本研究中乙酸乙酯相富集大量多酚活性组分，是其 *α*-葡萄糖苷酶抑制活性显著优于其余两种提取物的核心原因。

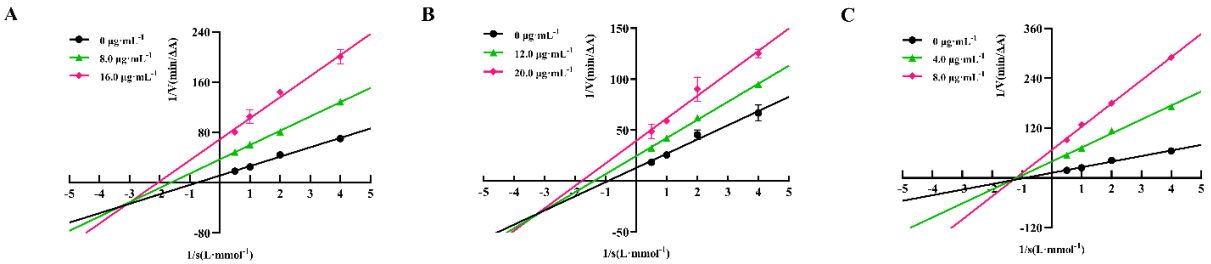


图 4 40% EtOH-UE 全提物（A）、水相（B）和乙酸乙酯相提取物（C）对 *α*-葡萄糖苷酶的 Lineweaver-Burk 双倒数图

Fig.4 Lineweaver–Burk double-reciprocal plots of 40% EtOH-UE total extract (A), aqueous phase (B) and ethyl acetate phase (C) against *α*-glucosidase

表 2 40% EtOH-UE 醇提物、水相和乙酸乙酯相提取物对 *α*-葡萄糖苷酶的抑制动力学参数

Table 2 Inhibitory kinetic parameters of 40% EtOH-UE total extract, aqueous phase and ethyl acetate phase against *α*-glucosidase

样品	浓度/(μg·mL^{-1})	*Vmax*/(ΔA min^{-1})	*Km*/(mmol L^{-1})	*Ki*/(μg·mL^{-1})	*Kis*/(μg·mL^{-1})	*Ki*/*Kis*	抑制类型
全提物	0	0.088	1.315	12.50	2.88	4.34	非竞争性混合抑制型
	8	0.027	0.613				
	16	0.014	0.486				
水相提取物	0	0.077	1.079	34.22	9.09	3.76	非竞争性混合抑制型
	12	0.041	0.723				
	20	0.025	0.560				
乙酸乙酯相提取物	0	0.083	1.117	2.36	1.83	1.29	非竞争性混合抑制型
	4	0.024	0.768				
	8	0.015	0.830				

2.4 40% EtOH-UE 单丛夏茶提取物的非靶向代谢组学分析

所有样本采用正负离子扫描模式进行非靶向质谱检测，经峰匹配、峰校准、一级与二级质谱定性分析及变异数据过滤后，共鉴定得到 57 种化合物（表 3），其物质组成特征与单丛夏茶提取物的已有研究基本一致[11]。儿茶素类单体（EGC、EGCG、CG、C 等）在乙酸乙酯相提取物中 Z-score 值为 0.60~1.02（图 5），显著高于全提物与水相提取物，表明乙酸乙酯萃取可有效富集儿茶素类活性成分。已有研究证实，低极性儿茶素（EGCG、ECG 等）可通过低共溶溶剂-乙酸乙酯萃取体系实现高效转移，萃取效率可达 95%以上[26]。与之相反，以没食子酸为代表的酚酸类、异牡荆素为代表的黄酮类及氨基酸类成分整体呈现“水相提取物＞全提物＞乙酸乙酯相提取物”的富集规律，在水相中富集效果最优。相关研究表明，酚酸类物质富含酚羟基与羧基，极性较强，更易在含水体系中稳

定富集[27]。

综上，乙酸乙酯相为单丛夏茶中儿茶素类成分的特征富集组分。结合体外活性结果可推断，乙酸乙酯相提取物优异的降糖活性，主要归因于其对 EGCG、ECG 等关键活性儿茶素的高效富集，该类成分可显著增强对 *α*-淀粉酶与 *α*-葡萄糖苷酶的抑制作用，从而发挥良好的碳水化合物水解抑制效果。基于上述组分差异与活性规律，后续对关键差异活性化合物开展定量分析。

表 3 1 40% EtOH–UE 单丛夏茶提取物中的化合物信息

Table 3 Compound information of the 40% EtOH–UE Dancong Summer tea extract

	序号	中文名称	扫描模式	*m/z*						保留时间/min
				MS	二级碎片					
	1	表没食子儿茶素（EGC)	+	306.074 0	139.04	163.04	135.04	111.04	151.04	5.95
儿茶	2	(-)-表没食子儿茶素没食子酸酯（EGCG）	+	458.084 9	153.02	151.04	123.04	163.04	111.04	7.41
素类	3	儿茶素没食子酸酯（CG）	+	442.090 0	139.04	123.04	153.02	111.04	147.04	8.69
	4	儿茶素（C）	−	290.079 0	109.03	125.02	137.02	289.07		7.31
	5	原儿茶醛	+	138.031 7	139.04	111.04				5.95
	6	没食子酸	−	170.021 5	124.02	125.02	169.01			1.82
酚	7	(1,6-双-*O*-没食子酰基葡萄糖)	−	484.085 3	125.02	169.01	211.02	271.05		6.15
酸	8	绿原酸	−	354.095 1	135.04	93.03	191.06	173.04		6.6
类	9	3-*O*-对香豆酰基奎宁酸	−	338.100 2	119.05	163.04	191.06	120.05		6.09
	10	丁香酸	−	198.052 8	182.02	67.02				8.62
	11	3-羟基肉桂酸	−	164.047 3	119.05					9.57
	12	槲皮素	+	302.042 7	153.02	229.05	137.02	201.05	165.02	10.45
	13	二氢槲皮素	+	304.058 3	151.04	109.03	127.04	123.04		7
	14	杨梅素	+	318.037 6	319.04	153.02				8.03
	15	7-羟基香豆素	+	162.031 7	121.03	135.04	79.05	145.03		7.41
	16	山柰酚	+	286.047 7	241.05	213.05	269.04			7.39
	17	木犀草素	−	286.047 7	285.04					7.35
	18	荭草苷	+	448.100 6	299.06	329.07	353.07	183.03		7.9
	19	刺槐素	+	740.216 4	433.11	85.03	153.02	121.03		8.6
	20	山柰酚-3-鼠李糖-(6"-对羟基反式桂皮酰)葡萄糖甙	+	740.195 3	147.04	119.05	91.05	127.04		9.91
	21	槲皮苷	+	448.100 6	303.05	229.05	153.02	137.02		9.81
	22	牡荆素-2"-*O*-鼠李糖苷	+	578.163 6	313.07	433.11	295.06			8.43
	23	芦丁	+	610.153 4	303.05	85.03	71.05	137.02		8.48
	24	金丝桃甙	+	464.095 5	303.05	229.05	153.02	85.03	69.03	8.76
	25	山柰酚-7-*O*-葡萄糖苷	+	448.100 6	287.06	153.02	121.03	165.02	213.05	9.3
	26	山柰酚-3-*O*-葡萄糖-鼠李糖-(对-香豆酰基)己糖苷	+	902.248 1	147.04	291.08	85.03	119.05	91.05	9.81
	27	异牡荆素	+	432.105 7	283.06	121.03	415.10	397.09		8.57
	28	山柰酚-3-*O*-芸香糖苷	−	594.158 5	229.05	255.03	284.03			9.02
	29	山柰酚-3-*O*-半乳糖苷	−	448.100 6	255.03	284.03	285.04			9.28
	30	异槲皮苷	−	464.095 5	300.03	151.00				8.74
	31	杨梅素-3-*O*-*β*-D-葡萄糖苷	−	480.090 4	209.05	288.02	271.02	125.02	316.02	8.02
	32	芦丁	−	610.153 4	300.03	301.03	151.00	245.05		8.46
	33	山柰苷	−	578.163 6	293.05	117.03	125.02	146.96	173.02	8.41
	34	芹甙元-7-葡萄糖苷	−	432.105 7	283.06	151.00	268.04	341.06	240.04	9.55
	35	槲皮素-3-鼠李糖-(6"-对羟基反式桂皮酰)葡萄糖甙	−	756.190 2	301.04	151.00	300.03			9.89
	36	山柰酚-3-半乳糖苷-6"-鼠李糖苷-3'"-鼠李糖苷	−	740.216 4	255.03	286.04	593.15	151.00		8.59

生物碱类	37	乌嘌呤	+	151.049 4		110.04	135.03			1.44
	38	腺苷	+	267.096 8	136.06	268.10	119.04			1.37
	39	可可碱	+	180.064 7	181.07					3.26
	40	咖啡因	+	194.080 4	138.07	110.07	69.05	83.06	111.07	6.57
	41	烟酰胺	+	122.048 0	80.05	96.04				1.25
氨基酸类	42	L-酪氨酸	+	181.073 9	136.08	91.05	123.04	119.05	95.05	1.35
	43	L-正亮氨酸	+	131.094 6	86.10					1.51
	44	L-焦谷氨酸	+	129.042 6	84.04	130.05				1.27
	45	脯氨酰-亮氨酸	+	228.147 4	229.15	70.07				1.54
	46	L-苯丙氨酸	+	165.079 0	103.05	107.05	93.07	131.05	166.09	2.34
	47	色氨酸	+	204.089 9	146.06	118.07	188.07	144.08	132.08	4.9
	48	焦谷氨酸	−	129.042 6	84.04	130.05				1.25
有机酸类	49	壬二酸	−	188.104 9	123.08	125.10	143.11			9.66
	50	*D*-(-)-奎宁酸	−	192.063 4	191.06	87.01				1.74
	51	柠檬酸	−	192.027 0	111.01	87.01	85.03	67.02		1.23
	52	琥珀酸	−	118.026 6	73.03	99.01	59.01	71.01		1.45
	53	(*E*)-3-吲哚丙烯酸	+	187.063 3	146.06	118.07	144.08	170.06	117.07	4.9
脂类	54	芥酸酰胺	+	337.334 5	83.09	69.07	97.10	95.09	81.07	13.74
	55	棕榈酰胺	+	255.256 2	57.07					11.58
	56	油酸酰胺	+	281.271 9	83.09	282.28	97.10	81.07	95.09	13.39
其他类	57	3,5-二叔丁基-4-羟基苯甲醛	+	234.162 0	57.07	179.11	95.05			13.73
	58	间羟基苯甲醛	+	122.036 8	95.05	105.03	77.04	67.05	79.02	8.69

注：“+”代表正离子扫描模式；“−”代表负离子扫描模式。

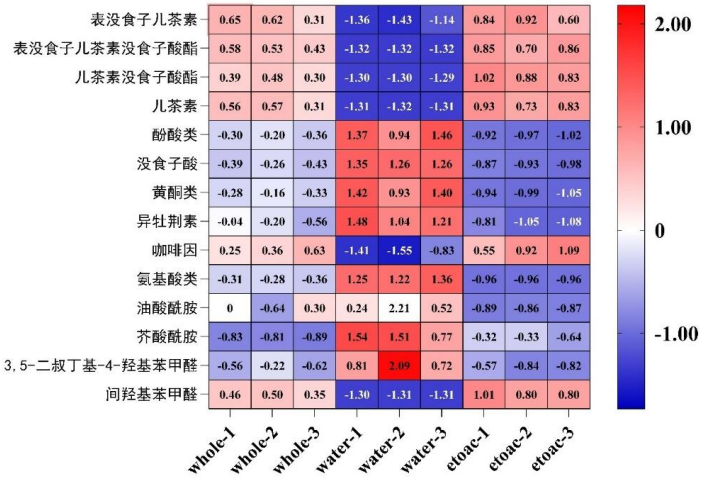


图 5 40%EtOH-UE 提取物中主要化合物的相对丰度图

Fig.5 Relative abundance of major compounds in the 40% EtOH–UE extracts

2.5 40% EtOH-UE 单丛夏茶提取物的多酚类化合物与生物活性的相关性分析

对 40% EtOH-UE 提取单丛夏茶样品中的 EGCG、CG、C、EGC、没食子酸（GA）及异牡荆素（Isovitexin）进行定量检测，结果如表 4 所示。EGCG 与 EGC 为全提物及乙酸乙酯相提取物的主要特征组分，其中乙酸乙酯相提取物 EGCG 含量最高，可达 428.66 μg·mg^{-1}，显著高于全提物（272.99 μg·mg^{-1}）；而全提物中 EGC 含量为 121.33 μg·mg^{-1}，显著优于乙酸乙酯相提取物（79.08 μg·mg^{-1}）。水相提取物的主要多酚组分为 EGC，但其含量仅为 27.29 μg·mg^{-1}，显著低于全提物与乙酸乙酯相提取物，活性组分富集水平相对较弱。

采用 Spearman 相关性分析，系统探究特征多酚组分含量与抗氧化、降糖活性的内在关联。由图 6 可知，EGCG、C、EGC 含量与 DPPH、$ABTS^+$自由基清除能力及 α-葡萄糖苷酶、α-淀粉酶抑制活性 IC_{50} 值均呈显著负相关（r_{EGCG}：-0.97、-0.94、-1.00 和-0.92；r_C：-0.99、-1.00、-0.94 和-0.68；r_{EGC}：-0.84、-0.88、-0.73 和-0.33）。结果表明，EGCG、C、EGC 等儿茶素类成分是决定单丛夏茶提取物抗氧化及降糖活性的核心物质基础。

已有研究与本结论一致，红茶[28]、白茶[29]中的儿茶素组分（EGCG、C、EGC）含量与其体外抗氧化能力显著相关；同时，儿茶素类物质亦被证实是黑茶提取物抑制 α-葡萄糖苷酶、α-淀粉酶、胰脂肪酶及胆固醇酯酶活性的关键功能小分子[11]，进一步佐证了该类儿茶素成分在茶叶糖脂代谢调控与抗氧化体系中的核心作用。

表 4 40% EtOH-UE 单丛夏茶提取物中的多酚类化合物含量

Table 4 40% EtOH-UE main compounds in different extracts

样品	含量/(μg·mg^{-1})					
	EGCG	CG	C	EGC	GA	Isovitexin
全提物	272.99±2.89^b	2.56±0.14^b	5.13±0.11^a	121.33±1.23^a	3.82±0.06^b	2.42±0.26^a
水相提取物	4.33±0.33^c	6.92±0.04^a	-	27.29±0.13^c	7.92±0.03^a	1.89±0.07^b
乙酸乙酯相提取物	428.66±1.16^a	3.14±1.15^b	4.88±0.08^b	79.08±0.62^b	2.21±0.08^c	1.60±0.06^b

注：“-”表示低于检测下限无法检出。

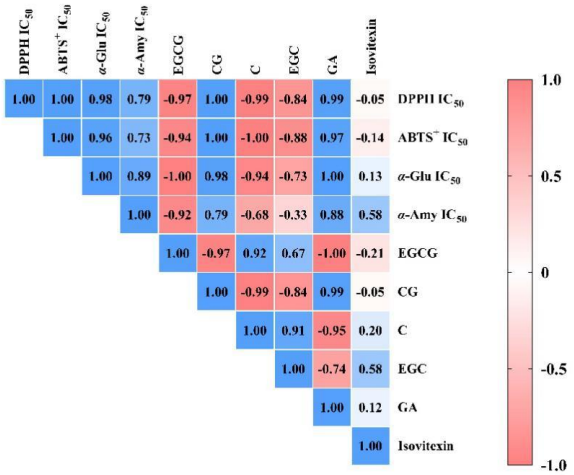


图 6 40% EtOH-UE 单丛夏茶提取物中的多酚类化合物与生物活性之间的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis between polyphenolic compounds and bioactivities in the 40% EtOH–UE extract of Dancong Summer tea

3 结论

本研究以单丛夏茶为研究对象，通过比较提取物的总酚与体外抗氧化及降糖活性，建立了一种以 40%乙醇为提取溶剂的超声提取耦合乙酸乙酯萃取富集茶多酚技术，该技术所得提取物的总酚含量为 648.98 mg GAE g^{-1}，较热水浸提法提高了 57.48%；其 DPPH、$ABTS^+$自由基清除活性优于 Vc，α-淀粉酶、α-葡萄糖苷酶抑制活性超过临床用药阿卡波糖，且两种酶的抑制类型均为非竞争性混合抑制。随后通过对提取物中多酚类化合物的定量分析，及多酚类化合物与抗氧化和降糖活性的关联性构建，明确儿茶素类化合物（EGCG、C、EGC）是调控单丛夏茶提取物抗氧化及降糖活性的关键活性成分。本研究不仅为植物源天然降糖产品的开发提供了理论基础，为单丛夏茶控糖功能食品开发提供技术支撑，还为其产业链的延伸拓展提供了新方向。本研究尚未验证单丛夏茶提取物的体内抗氧化与降糖活性，其关键活性成分的具体作用机制亦有待进一步阐明。针对上述研究空白，本团队已启动相关实验研究，后续将逐步完善该领域的研究内容，为单丛夏茶活性成分的开发利用提供更全面的理论与实验支撑。

参考文献

[1] LI Z R, JIA R B, LUO D H, et al. The positive effffects and underlying mechanisms of undaria pinnatifiida polysaccharides on type 2 diabetes mellitus in rats [J]. Food & Function, 2021, 12 (23): 11898-11912.

[2] GBD 2021 Diabetes Collaborators. Global, regional, and national burden of diabetes from 1990 to 2021, with projections of prevalence to 2050: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. [J]. The Lancet, 2023, 402 (10397): 203-234.

[3] WANG M C, ZHU P L, ZHAO S, et al. Characterization, antioxidant activity and immunomodulatory of polysaccharides from the swollen culms of Zizania latifolia [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 95: 809-817.

[4] WANG Q R, LI R L, LI N, et al. The antioxidant activities, inhibitory effects, kinetics, and mechanisms of artocarpin and *α*-mangostin on *α*-glucosidase and *α*-amylase [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 213: 880-891.

[5] N G VASILEIOU, S THEODORA, S TSAGARAKIS. Metformin and gut microbiota: their interactions and their impact on diabetes [J]. Hormones (Athens, Greece), 2019, 18 (2): 141-144.

[6] MA H, HU Y Z, ZHANG B W, et al. Tea polyphenol-gut microbiota interactions: hints on improving the metabolic syndrome in a multi-element and multi-target manner [J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 11 (1): 11-21.

[7] XU X Y, ZHAO C N, LI B Y, et al. Effects and mechanisms of tea on obesity. [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 63 (19): 11-18. .

[8] QIN D D, WANG Q S, JIANG X H, et al. Identification of key volatile and odor-active compounds in 10 main fragrance types of Fenghuang Dancong tea using HS-SPME/GC-MS combined with multivariate analysis [J]. Food Research International, 2023, 173 (P1): 113356.

[9] WANG F L, LIU X, CHEN Y R, et al. Elsholtzia ciliata (Thunb.) Hyland: A Review of Phytochemistry and Pharmacology [J]. Molecules, 2022, 27 (19): 6411.

[10] TANG Y M, YU X Y, ZHANG Y, et al. Sensory descriptive analysis of green tea: correlation with chemical components [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 461 (1): 012013.

[11] PENG S Q, LIN L Z, ZHAO M M. A comparative study on the bioactivities and chemical compositions of Dancong summer tea and Anhua dark tea: excavation of glycolipid-lowering functional factors [J]. Food Research International, 2025, 204, 115825.

[12] 陈然,孟庆佳,刘海新,等.不同种类茶叶多酚及生物碱含量特点分析[J].食品科技, 2018,43(5):72-76.

[13] 王丽丽,林清霞,宋振硕,等.分光光度法测定茶叶中总黄酮含量[J].茶叶学报,2021,62(1):1-6.

[14] 侯粲,林佺,郝彬秀,等.不同品种乌龙茶烘焙前后化学成分差异及体外活性[J].现代食品科技,2024,40(5):102-110.

[15] GAO S, LI T T, LI Z R, et al. Gradient ethanol extracts of Coreopsis tinctoria buds: Chemical and in vitro fermentation characteristics [J]. Food Chemistry, 2025, 464(Pt 3): 141894.

[16] 宋菲,陈开健,唐敏敏,等.槟榔多酚提取物对 *α*-葡萄糖苷酶活性的抑制动力学研究[J].热带作物学报,2021,42 (5):1455-1461.

[17] NIAN B, CHEN L J, YI C, et al. A high performance liquid chromatography method for simultaneous detection of 20 bioactive components in tea extracts [J]. Electrophoresis, 2019, 40(21):2837-2844.

[18] 杨新,陈莉,卢红梅,等.茶多酚提取与纯化方法及其功能活性研究进展[J].食品工业科技,2019,40(5):322-328+332.

[19] 和文婧,黄张君,熊燕飞,等.松茸醇提物的抗氧化活性及对 *α*-葡萄糖苷酶的抑制作用[J].现代食品科技,2025,41(8):104-111.

[20] 何君强,熊雯宇,黄莹,等.灰树花醇提物化学成分及其生物活性研究[J].食品与生物技术学报,2024,43(5):54-63.

[21] 范俐红,殷朝敏,张琪,等.杨树桑黄与粗毛纤孔菌醇提物化学组成、体外抗氧化活性与降血糖潜力比较[J].现代食品科技，2025,41(11): 117-126.

[22] WANG Z, CHEN B, ZHAO X Y, et al. Probing the binding mechanism of tea polyphenols from different processing methods to anti-obesity and TMAO production-related enzymes through in silico molecular docking [J]. Food Chemistry: X, 2024, 21: 101053.

[23] F ESPOSITO, N PALA, M CARCELLI, et al. *α*-Glucosidase inhibition by green, white and oolong teas: in vitro activity and computational studies [J]. Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry, 2023, 38(1):2236802.

[24] YANG J C, WANG X L, ZHANG C Y, et al. Comparative study of inhibition mechanisms of structurally different flavonoid compounds on *α*-glucosidase and synergistic effect with acarbose [J]. Food Chemistry, 2021, 347 (prepublish): 129056

[25] LI H, YANG J C, WANG M F, et al. Studies on the inhibition of *α*-glucosidase by biflavonoids and their interaction mechanisms [J]. Food Chemistry, 2023, 420: 136113.

[26] YANG Y B, GUAN M D, FANG M D, et al. Simultaneous extraction and selective separation of catechins, caffeine and theanine from waste tea residue facilitated by citric acid-based deep eutectic solvent [J]. Separation and Purification Technology, 2025, 360(P1): 130918.

[27] CHENG M, LIU M Y, TAN L H, et al. Comparison of phenolic profiles and antioxidant activities in the pulps from 21 different

Artocarpus heterophyllus Lam. cultivars [J]. Food Chemistry: X, 2025, 29: 102735.

[28] WANG W W, LE T, WANG W, et al. Effects of key components on the antioxidant activity of black tea [J]. Foods, 2023, 12(16): 3134.

[29] MA S B, WANG J C, ZHOU B X, et al. Impact of harvest season on bioactive compounds, amino acids and in vitro antioxidant capacity of white tea through multivariate statistical analysis [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 164: 113655.