

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20231221010

单丛茶多糖的表征及其体外降糖降脂活性研究

彭紫君, 林 润, 李泓杭, 吴小勇*

(广东药科大学食品科学学院, 中山 528453)

摘 要: **目的** 探究单丛茶多糖的理化性质及其体外降糖降脂活性。**方法** 以制得的单丛茶多糖为原料, 采用苯酚-硫酸法、咔唑-硫酸法检测其糖占比情况, 采用 DEAE-52 色谱柱分析其多糖组成情况, 通过紫外光谱、傅里叶变换红外光谱、热重-差热分析对其进行初步表征, 通过扫描电镜观测其表面形貌, 再通过测定其对 α -葡萄糖苷酶、胰脂肪酶抑制率及体外胆酸盐结合能力, 评价其体外降糖、降脂活性。**结果** 该茶多糖的中性糖占比为 $(33.51\pm0.29)\%$, 酸性糖占比为 $(47.39\pm0.47)\%$, DEAE-52 色谱分离在洗脱剂 NaCl 溶液浓度 0.9 mmol/L 时出现一个主要峰, 说明该茶多糖是一种酸性多糖。该多糖是以 α 构型的糖苷键连接的吡喃型糖环, 且其中无核酸类和蛋白类杂质。热重-差热分析表明该多糖热稳定性较好。扫描电镜观测显示其为不规则片状结构, 表面光滑且结构紧密。其与牛磺胆酸盐、甘氨酸胆酸盐和胆酸盐的结合率分别是 $(24.08\pm0.30)\%$ 、 $(8.30\pm0.70)\%$ 和 $(7.66\pm0.60)\%$, 分别相当于阳性对照考来烯胺结合率的 85.71%、31.58%和 25.86%。其对 α -葡萄糖苷酶和胰脂肪酶的抑制作用, 最高分别达到了 81.76%、61.16%, 显示出较好的抑制效果。**结论** 本研究获得的单丛茶多糖是一种酸性多糖, 具有较好的体外降糖、降脂活性, 在功能性食品及医疗保健领域具有良好应用前景。

关键词: 单丛茶; 多糖; 胆酸盐结合能力; 降脂; 降糖

Characterization of Dancong tea polysaccharide and its *in vitro* hypoglycemic and lipid-lowering activity

PENG Zi-Jun, LIN Run, LI Hong-Hang, WU Xiao-Yong*

(School of Food Science, Guangdong Pharmaceutical University, Zhongshan 528453, China)

ABSTRACT: Objective To explore the physical and chemical properties of Dancong tea polysaccharide and its hypoglycemic and lipid-lowering activity *in vitro*. **Methods** Using the prepared Dancong tea polysaccharide as raw material, its sugar content was detected by phenol-sulfuric acid method and carbazole-sulfuric acid method, and the composition of polysaccharide was analysed by a DEAE-52 column, and its preliminarily physical and chemical properties were characterized by ultraviolet spectra, Fourier transform infrared spectroscopy, thermo gravimetric-differential thermal analysis, and the surface morphology was observed by scanning electron microscopy. And the *in vitro* hypoglycemic and hypolipidemic activities of Dancong tea polysaccharides were evaluated by determining the inhibition rate of α -glucosidase, pancreatic lipase and the *in vitro* bile-acid binding capacity. **Results** The neutral sugar content of Dancong tea polysaccharide was $(33.51\pm0.29)\%$, the acidic acid content was $(47.39\pm0.47)\%$. DEAE-52

基金项目: 广东省教育厅项目(2023KTSCX055)

Fund: Supported by the Educational Commission of Guangdong Province (2023KTSCX055)

*通信作者: 吴小勇, 博士, 副教授, 主要研究方向为功能性食品的研究与开发。E-mail: perryfe@163.com

*Corresponding author: WU Xiao-Yong, Ph.D, Associate Professor, School of Food Science, Guangdong Pharmaceutical University, Zhongshan, 528453, China. E-mail: perryfe@163.com

chromatographic separation showed a major peak when the concentration of NaCl solution was 0.9 mmol/L, indicating that the tea polysaccharide was an acidic polysaccharide. The polysaccharide was a pyranoid sugar ring connected by α -configuration glucoside bond, and there were no nucleic acid and protein impurities in it. Thermogravimetric differential thermal analysis showed that the polysaccharide had good thermal stability. Scanning electron microscopy observation results showed that it had an irregular flake structure, a smooth surface and a compact structure. Its binding rates with taurocholate, glycocholate and cholate were $(24.08 \pm 0.30)\%$, $(8.30 \pm 0.70)\%$ and $(7.66 \pm 0.60)\%$, respectively. Their respectively equivalent to 85.71%, 31.58% and 25.86% of the cholestyramine resin binding rate. The had inhibitory effects on both α -glucosidase and pancreatic lipase, with the highest levels reaching 81.76% and 61.16% respectively, which showing good inhibitory effects. **Conclusion** The Dancong tea polysaccharide obtained in this study is an acidic polysaccharide with good *in vitro* hypoglycemic and lipid-lowering activities, and has good application prospects in the fields of functional food and healthcare.

KEY WORDS: Dancong tea; polysaccharide; bile acids binding ability; lipid-lowering; hypoglycemic

0 引言

随着经济社会的发展,生活水平的提高,人们的生活方式及膳食结构也发生了一些改变,膳食脂肪的摄入量呈现逐步增加的趋势。长期高脂饮食会导致肥胖、血脂异常、代谢紊乱等,进而诱发慢性代谢性疾病,如糖尿病、非酒精性脂肪肝(non-alcoholic steatohepatitis, NASH)、动脉粥样硬化等^[1]。但现有的降糖、降脂药物都有不同程度的毒副作用,因此高效低毒且具有降糖降脂活性的天然物质,如多糖、多酚、黄酮类化合物具体良好的应用前景^[2]。近年来,关于多糖降血糖、降血脂作用的研究取得了巨大进展,已经从基本药理活性的研究发展到其作用机制的研究^[3-4]。据报道,天然多糖能与胆酸盐结合,一方面影响脂质的消化和吸收,另一方面影响胆汁酸的肠肝循环,促进胆固醇转化为胆汁酸,通过粪便排出体外,从而降低体内胆固醇含量,发挥降脂作用^[5]。胰脂肪酶是脂肪代谢关键酶,可将脂肪水解成甘油和脂肪酸从而进一步被机体吸收,通过抑制胰脂肪酶也可以发挥降脂作用。因此,通过评价物质与胆酸盐的结合能力及其对胰脂肪酶抑制能力,可反映物质的降脂活性。此外,市场上用于降糖的药物主要是通过增加葡萄糖的储存或抑制糖苷酶的活性来发挥作用^[6]。相关研究表明,测定样品对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用可用于评价其降糖活性^[7]。

乌龙茶是一类半发酵茶,是我国特有茶叶品类。单丛茶是乌龙茶的一种,是广东乌龙的代表茶。目前已有研究表明,茶多糖是茶叶中含量较高的活性成分之一,具有一定的抗氧化、降血糖、降血脂、免疫调节、辐射保护等功能,已成为继茶多酚后极具开发利用价值的一类生物活性物质^[8-10]。近年来,有关茶多糖的研究集中在黑茶和绿茶多糖,而有关乌龙茶多糖的研究主要为乌龙茶多糖的理化特性^[11],提取分离工艺^[12-13]及抗氧化能力方面^[14];而关于单丛茶多糖的结构性质和降糖、降脂活性方面的研究,目

前尚未见报道。

本研究以产自广东潮州的单丛茶为原料,采用水提醇沉法提取分离,采用 NKA-9 大孔树脂除杂,制得一种茶叶多糖,并对其进行了初步表征,同时,通过胆酸盐结合能力实验及 α -葡萄糖苷酶、胰脂肪酶活性抑制实验,研究了该多糖的体外降糖、降脂活性,为单丛茶多糖的开发利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

单丛茶成品(蜜兰香型,产地为广东潮州产);牛磺胆酸钠、甘氨酸胆酸钠、胆酸钠、胰酶、猪脂肪酶、 α -葡萄糖苷酶、4-硝基苯基- β -D-吡喃葡萄糖苷、月桂酸-4-硝基苯酯标准品(纯度 $\geq 98\%$,美国 Sigma 公司);牛血清蛋白标准品(纯度 $\geq 98\%$,上海伯奥生物科技有限公司);考来烯胺标准品(纯度 $\geq 98\%$,上海源叶生物科技有限公司);NKA-9 大孔树脂(天津浩聚树脂科技有限公司);二乙氨基乙基纤维素 DE52(美国 Pharmacia 公司);氯化钠(分析纯,天津市永大化学试剂有限公司);浓硫酸、溴化钾(分析纯,广州化学试剂厂)。

1.2 仪器与设备

Nicolet iS50 实时在线原位红外检测、varioskan LUX 型多功能微孔板读数仪(美国赛默飞世尔科技公司);JSM-7610FPlus 超高分辨热场发射扫描电子显微镜(日本电子株式会社);TA-SDT 650 热重-差热同步测试系统(美国 TA 沃特世科技有限公司);721n 型紫外-可见分光光度计(上海仪电分析仪器有限公司);BSA224S-CW 型电子分析天平[精度 0.0001 g,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司];PHS-3C 型 pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司);SBS-160 型自动部分收集器(上海嘉鹏科技有限公司);玻璃柱(Φ 26 mm $\times$ 900 mm,上海厦美生化科技发展有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 单丛茶多糖的制备

参考 LI 等^[15]的方法,按照图 1 所示流程进行多糖的提取和精制。每次取 100 g 茶叶,先用 20 倍 80% (m/m) 的乙醇溶液,在 75℃ 保温 60 min,对茶叶进行浸提,以除去茶叶中的小分子物质,然后再用 20 倍去离子水在 95℃ 保温提取 2 次,每次 55 min,合并 2 次水提液,过滤、离心(3000 r/min, 10 min)除去不溶物后再浓缩 10 倍,浓缩液在 40% (m/m) 乙醇浓度下醇沉 2 次,多糖沉淀用 300 mL 去离子水溶解,得到的多糖溶液过 NKA-9 大孔树脂柱(自装,规格为 Φ 26 mm×900 mm)吸附除杂,除杂后的多糖溶液冷冻干燥,即得精制后的多糖冻干粉,多糖得率(以原料计)为 1.9%。



图1 单丛茶多糖制备流程图

Fig.1 Preparing flow chart of Dancong tea polysaccharide

1.3.2 多糖含量测定

参照文献^[16-17]方法,以葡萄糖为对照,采用苯酚-硫酸法测定中性糖含量;以半乳糖醛酸为对照,采用咔唑-硫酸法测定糖醛酸含量。

1.3.3 多糖的离子交换色谱分析

参考黄秀红等^[12]的方法,采用 DEAE-52 阴离子交换柱对单丛茶粗多糖进行纯化。选取 DEAE-52 色谱柱(自装,规格为 Φ 26 mm×900 mm)上样质量浓度为 3 mg/mL 的多糖溶液 10 mL,依次采用 0、0.5、0.9、1.3、1.7、2.1、2.5、2.9 mol/L NaCl 溶液进行梯度洗脱,自动部分收集器每 6 min 收集一管,然后采用苯酚-硫酸法每隔 2 管跟踪检测 1 管的吸光值,绘制洗脱曲线。

1.3.4 多糖的红外光谱分析

取少量多糖冻干粉,以 1:100 质量比与已恒重的溴化钾混合,研磨至极细粉末后压片,使用实时在线原位红外检测系统在 4000~400 cm^{-1} 条件下扫描,进行傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR)分析,扫描次数为 16 次。

1.3.5 多糖的紫外光谱分析

取一定量的多糖冻干粉,以超纯水为溶剂,配制质量浓度为 1 mg/mL 的多糖水溶液,使用紫外分光光度计在 200~400 nm 波长范围内进行扫描。

1.3.6 多糖的扫描电镜观测

将样品干燥至恒重,取适量进行黏台、镀金后,通过扫描电子显微镜观测多糖样品的表面微观形态。

1.3.7 多糖的热稳定性分析

取 10 mg 多糖样品,采用热重-差热同步测试系统,测定多糖的热稳定性;测试条件:温度范围 30~600℃,升温速率(β) 5℃/min,氮气气氛,气体流量 20 mL/min。

1.3.8 多糖的体外结合胆酸盐能力测定

参考 LI 等^[18]的方法,模拟多糖在胃肠道消化,然后采用 SUN 等^[19]的方法,分别测定质量浓度为 3 mg/mL 多糖与牛磺胆酸钠、甘氨酸胆酸钠和胆酸钠的结合能力,并与同浓度的考来烯胺比较。甘氨酸胆酸钠标准曲线方程为: $Y=2.0753X+0.041$ ($r^2=0.9907$);牛磺胆酸钠标准曲线方程为: $Y=2.1991X+0.0248$ ($r^2=0.9901$);胆酸钠标准曲线方程为: $Y=2.1209X+0.0371$ ($r^2=0.9917$)。

1.3.9 多糖的体外降糖降脂活性测定

参考钟丽霞等^[20]的方法,测定不同浓度的多糖溶液对 α -葡萄糖苷酶的抑制率;参考陈永丽等^[21]的方法,测定不同浓度的多糖溶液对胰脂肪酶的抑制率;据此评价多糖的体外降糖降脂活性。

1.4 数据处理

实验测定均重复 3 次,结果用平均值和标准偏差表示;运用 Microsoft Excel 2010 整理数据,Origin Pro 2022 绘图。

2 结果与分析

2.1 单丛茶多糖的糖组成情况

为探究制得的单丛茶多糖的糖组成情况,本研究分别采用苯酚-硫酸法和咔唑-硫酸法测定其中性糖和酸性糖含量,结果表明,该茶多糖中性糖占比为(33.51±0.29)%,酸性糖占比为(47.39±0.47)%,酸性糖占比大于中性糖,说明该多糖是一种酸性多糖。

为进一步分析多糖的组成情况,本研究以不同浓度的 NaCl 溶液为洗脱剂,采用 DEAE-52 纤维素阴离子交换柱对多糖溶液进行色谱分析,结果(见图 2)表明,该茶多糖在用纯水及浓度为 0.5 mol/L 的 NaCl 溶液洗脱时均没有多糖洗出,在浓度为 0.9 mol/L 的 NaCl 溶液洗脱时出现一个主要多糖峰,说明该多糖的组成较为集中。

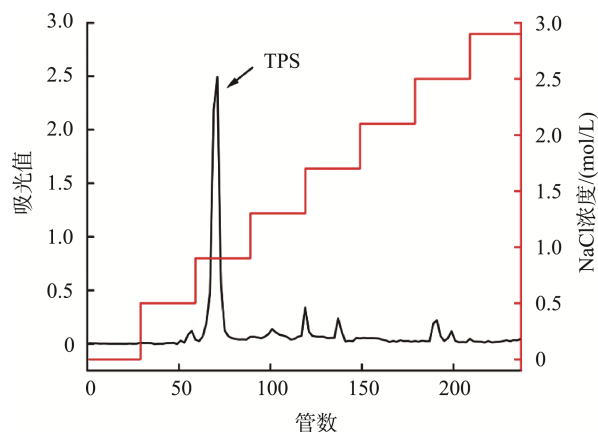


图2 单丛茶多糖的洗脱曲线

Fig.2 Elution curve of Dancong tea polysaccharide

2.2 单丛茶多糖的光谱分析结果

单丛茶多糖红外光谱如图 3A 所示, 在 3300 cm^{-1} 处强而宽的吸收峰为 O-H 伸缩振动峰, 2930 cm^{-1} 处的小吸收峰为甲基或次甲基的 C-H 伸缩振动峰和弯曲振动吸收峰, 1420 cm^{-1} 处的吸收峰是 C-H 的变角振动, 这 3 处吸收峰为经典的多糖特征吸收峰。 1610 cm^{-1} 处强吸收峰证明样品存在羧酸羰基 C=O 伸缩振动, 1330 cm^{-1} 处出现特征吸收峰, 证明样品存在羧酸羰基 C-OH 伸缩振动; 这属于糖醛酸的吸收峰, 说明该多糖为酸性多糖。 1100 cm^{-1} 、 1020 cm^{-1} 处的强吸收峰为 C-O-C、C-O-H 和糖苷键伸缩振动, 对应吡喃糖环的伸缩振动, 说明该多糖由吡喃糖组成; 773 cm^{-1} 处的吸收峰则证明该多糖中存在 α -型糖苷键。因此, 该多糖主要是由吡喃糖通过 α -糖苷键连接而成。

多糖的紫外-可见光谱扫描结果如图 3B 所示, 由图 3B 可以看出, 该多糖在 $260\sim 280\text{ nm}$ 处无明显吸收峰, 表明该多糖中几乎不存在核酸和蛋白类杂质。

2.3 单丛茶多糖的表面形貌

扫描电镜技术可用于观察固态物质的表面形貌^[22]。不同来源的多糖粉末具有不同的表面形貌, 有的为不规则颗粒结构, 有的则为线状、带状、片状或网状结构^[23-24]。本研究制得的单丛茶多糖的扫描电镜结果如图 4 所示, 图示结果表明, 该单丛茶多糖干粉为大小不一的薄片状, 表面较为光滑, 结构较为致密。

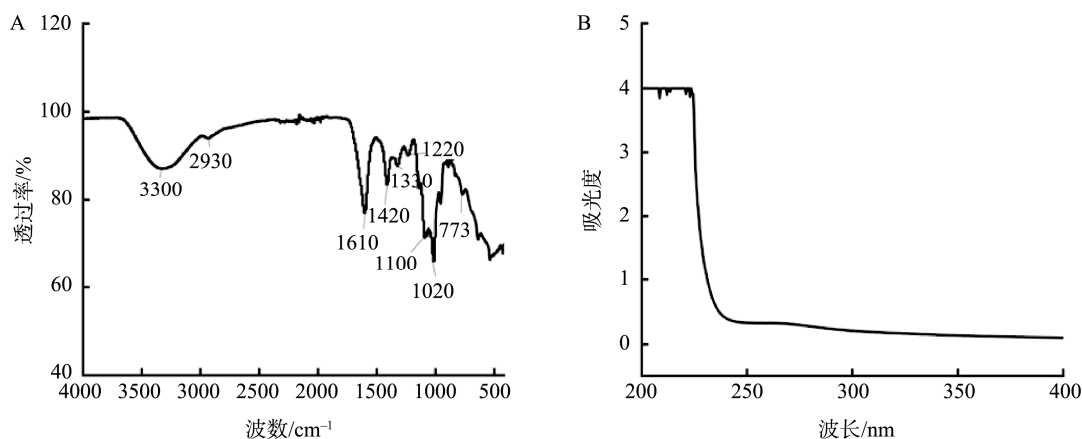


图3 单丛茶多糖的红外光谱曲线(A)和紫外光谱曲线(B)

Fig.3 Infrared spectral curve (A) and ultraviolet spectral curve (B) of Dancong tea polysaccharide

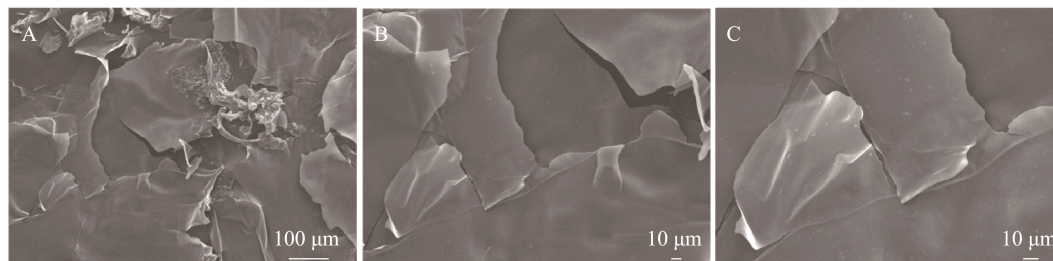


图4 单丛茶多糖扫描电镜图

Fig.4 Scanning electron microscopy of Dancong tea polysaccharide

2.4 单丛茶多糖的热稳定性

热重分析(thermogravimetric analysis, TG)是一种在程序控制温度下, 测量物质的质量与温度或时间关系的技术, 通过热重分析可以了解样品的热稳定性^[25]。本研究所得的单丛茶多糖的热重分析结果, 其中热重曲线是样品质量随温度变化曲线, 微分热重(thermogravimetric differential, DTG)曲线是 TG 曲线的一阶微分曲线, 表示样品失重速率与温度的关系, 图 5 结果表明, 样品第一次失重峰出现在 100°C 左右, 失重率为 15.05% , 这可能是升温导致多糖失去吸附水造成的失重峰。第二个失重峰出现在 244.45°C , 失重率是 50.24% , 此温度区间的失重过程快速, 且失重率比重大, 这可能是高温使多糖分子发生了剧烈的分解反应。在 500°C 以后, 样品质量几乎不变, 这可能是多糖经过高温处理后已被完全分解, 成为碳化结构, 因此曲线趋于平稳, 最后剩余质量为 35% 。上述实验结果表明, 该单丛茶多糖在 200°C 内具有较好的热稳定性。

2.5 单丛茶多糖的胆酸盐结合能力

胆汁酸(bile acids, BAs)是动物胆汁的主要功能成分, 是在肝脏中由胆固醇转化而来的, 具有促进脂质和脂溶性维生素消化和吸收等生理功能^[26]。当 BAs 被其他活性物质结合, 体内胆酸盐含量降低, 将抑制脂类物质的消化吸收, 并可促进胆固醇的转化, 从而发挥降脂作用^[27-28]。因此,

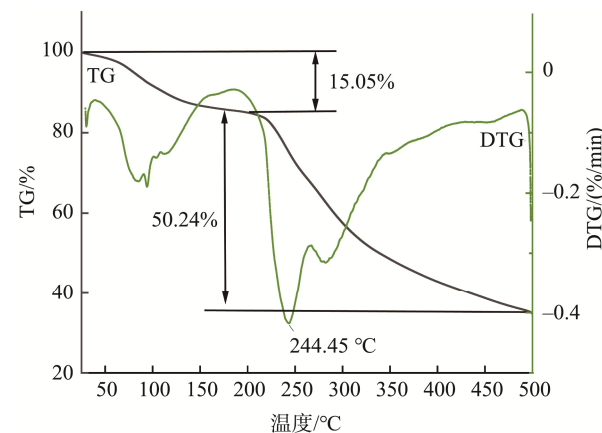


图5 单丛茶多糖的TG曲线和DTG曲线
Fig.5 TG curve and DTG curve of Dancong tea polysaccharide

通过测定物质与 BAs 的结合能力强弱,可反映物质的降脂活性^[29]。由表 1 可知,单丛茶多糖对 3 种胆酸盐都有一定的结合能力,其与牛磺胆酸钠、甘氨酸钠、胆酸钠的结合率分别为(24.08±0.30)%、(8.30±0.70)%、(7.66±0.60)%;与阳性对照药物考来烯胺比较,分别达到考来烯胺与这 3 种胆酸盐结合率的 85.71%、31.58%、25.86%;可见,单丛茶多糖对牛磺胆酸盐具有较强的结合能力,而对其他 2 种胆酸盐的结合能力较弱。

表 1 单丛茶多糖的胆酸盐结合能力
Table 1 Bile acids binding capacity of Dancong tea polysaccharide

样品	结合率/%		
	牛磺胆酸钠	甘氨酸钠	胆酸钠
茶多糖	24.08±0.30	8.30±0.70	7.66±0.60
考来烯胺	28.11±0.40	26.28±0.10	29.61±0.40

2.6 单丛茶多糖对 α -葡萄糖苷酶和胰脂肪酶活性的抑制能力

胰脂肪酶能够将脂肪分解为脂肪酸和甘油,脂肪酸和甘油可在体内酯化生成高热量的甘油三酯,从而导致肥胖^[22];因此抑制胰脂肪酶的活性可发挥降脂减肥作用。 α -葡萄糖苷酶是人体糖代谢的关键酶,抑制其活性可以延缓肠道中碳水化合物的吸收,从而发挥降糖作用^[30-31]。

单丛茶多糖对 α -葡萄糖苷酶和胰脂肪酶活性抑制率测定结果见图 6,从图示结果可以看出,在多糖质量浓度为 0.5~3.0 mg/mL 范围内,单丛茶多糖对 α -葡萄糖苷酶和胰脂肪酶活性抑制率随多糖质量浓度的增加逐渐升高,在多糖质量浓度为 3.0 mg/mL 时趋于稳定,此时对 α -葡萄糖苷酶和胰脂肪酶活性抑制率分别为 81.76%和 61.16%,经计算,得出单丛茶多糖抑制 α -葡萄糖苷酶和胰脂肪酶的半抑制浓度分别为 0.079 mg/mL、4.27 mg/mL,可见单丛茶多糖对 α -葡萄糖苷酶和胰脂肪酶活性均具有较好的抑制能力,说明单丛茶多糖具有潜在的降糖降脂活性。

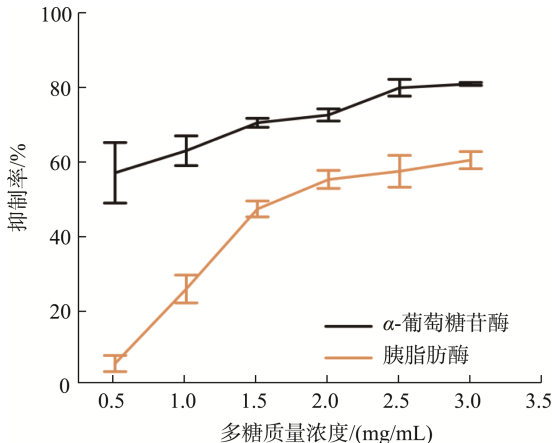


图6 单丛茶多糖对 α -葡萄糖苷酶和胰脂肪酶的抑制作用
Fig.6 α -glucosidase and pancreatic lipase inhibition rates of Dancong tea polysaccharide

3 结 论

本研究通过水提醇沉、大孔吸附树脂除杂等操作,从单丛茶中提取纯化得到的单丛茶多糖是一种酸性多糖,得率为 1.9%。体外实验表明该多糖具有较好胆酸盐结合能力,且对 α -葡萄糖苷酶、胰脂肪酶活性具有较强的抑制作用,说明其具有潜在降糖、降脂活性。本研究结果有助于更好地理解单丛茶多糖的结构和功能特性,也为茶叶多糖的开发利用提供了参考。

参考文献

[1] 周蓝波,周国平. 糖尿病的饮食研究进展[J]. 中国糖尿病杂志, 2017, 25(9): 851-854.
ZHOU LB, ZHOU GP. Research progress in diet of diabetes [J]. Chin J Diab, 2017, 25(9): 851-854.

[2] HE M, ZENG J, ZHAI L, et al. Effect of *in vitro* simulated gastrointestinal digestion on polyphenol and polysaccharide content and their biological activities among 22 fruit juices [J]. Food Res Int, 2017, 102: 156-162.

[3] 邹嘉琪, 彭紫君, 伍芳芳, 等. 诺尼果多糖的提取纯化、结构和生物活性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(2): 279-286.
ZOU JQ, PENG ZJ, WU FF, et al. Progress on extraction, purification, structure and bioactivity of noni fruit polysaccharide [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(2): 279-286.

[4] TANG C, WANG Y, CHEN D, et al. Natural polysaccharides protect against diet-induced obesity by improving lipid metabolism and regulating the immune system [J]. Food Res Int, 2023, 172: 113192.

[5] ZHU Z, XU Y, XIA Y, et al. Review on chronic metabolic diseases surrounding bile acids and gut microbiota: What we have explored so far [J]. Life Sci, 2024, 336: 122304.

[6] MUSHTAQ A, AZAM U, MEHREEN S, et al. Synthetic α -glucosidase inhibitors as promising anti-diabetic agents: Recent developments and future challenges [J]. Eur J Med Chem, 2023, 249: 115119.

[7] GUO D, YIN X, WU D, et al. Natural polysaccharides from *Glycyrrhiza uralensis* residues with typical glucan structure showing inhibition on α -glucosidase activities [J]. Int J Biol Macromol, 2023, 224: 776-785.

[8] HU T, WU P, ZHAN J, et al. Structure variety and its potential effects on biological activity of tea polysaccharides [J]. Food Sci Hum Well, 2022,

- 11(3): 587–597.
- [9] ZHANG Z, SUN L, CHEN R, *et al.* Recent insights into the physicochemical properties, bioactivities and their relationship of tea polysaccharides [J]. Food Chem, 2024, 432: 137223.
- [10] XU A, LAI W, CHEN P, *et al.* A comprehensive review on polysaccharide conjugates derived from tea leaves: Composition, structure, function and application [J]. Trends Food Sci Technol, 2021, 114: 83–99.
- [11] 黄秀红, 刘丽辰, 阮怿航, 等. 响应面优化低共熔溶剂提取乌龙茶多糖的研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(11): 96–103.
HUANG XH, LIU LC, RUAN YH, *et al.* Study on response surface optimization of low melt solvent extraction of Oolong tea polysaccharides [J]. Food Res Dev, 2020, 41(11): 96–103.
- [12] 黄秀红, 刘丽辰, 阮怿航, 等. 乌龙茶多糖脱色和脱蛋白工艺研究[J]. 广东茶业, 2020, (2): 15–20.
HUANG XH, LIU LC, RUAN YH, *et al.* Study on the decolorization and deproteinization process of oolong tea polysaccharides [J]. Guangdong Tea Ind, 2020, (2): 15–20.
- [13] 吴存兵, 吴君艳, 李家春, 等. 黑乌龙茶茶多糖提取工艺的优化及其抗氧化与抑菌性分析[J]. 安徽农业大学学报, 2021, 48(6): 1005–1012.
WU CB, WU JY, LI JC, *et al.* Optimization of the extraction process of polysaccharides from black oolong tea and analysis of their antioxidant and antibacterial properties [J]. J Anhui Agric Univ, 2021, 48(6): 1005–1012.
- [14] LIN J, LIN Q, ZHU L, *et al.* Structural properties of *Phoenix oolong* tea polysaccharide conjugates and the interfacial stability in nanoemulsions [J]. J Sci Food Agric, 2023, 15, 103(10): 5145–5155.
- [15] LI Q, ZHAO T, SHI J, *et al.* Physicochemical characterization, emulsifying and antioxidant properties of the polysaccharide conjugates from Chin brick tea (*Camellia sinensis*) [J]. Food Chem, 2022, 395: 133625.
- [16] JULAKANTI S, CHARLES APR, SYED R, *et al.* Hempseed polysaccharide (*Cannabis sativa* L.): Physicochemical characterization and comparison with flaxseed polysaccharide [J]. Food Hydrocolloid, 2023, 143: 108900.
- [17] LI C, ZHANG Y, ZHAO C, *et al.* Physicochemical characterization, antioxidative and immunoregulatory activity of polysaccharides from the flower of *Hylocereus undatus* (Haw.) Britton et Rose [J]. Int J Biol Macromol, 2023, 251: 126408.
- [18] LI Q, DOU Z, DUAN Q, *et al.* A comparison study on structure-function relationship of polysaccharides obtained from sea buckthorn berries using different methods: Antioxidant and bile acid-binding capacity [J]. Food Sci Hum Well, 2024, 13(1): 494–505.
- [19] SUN Y, YANG K, ZHANG X, *et al.* *In vitro* binding capacities, physicochemical properties and structural characteristics of polysaccharides fractionated from *Passiflora edulis* peel [J]. Food Biosci, 2022, 50: 102016.
- [20] 钟丽霞, 江震宇, 汪嘉妮, 等. 山楂多糖提取工艺优化及其降血糖、降血脂活性[J]. 食品工业科技, 2019, 40(13): 119–124, 147.
ZHONG LX, JIANG ZY, WANG JN, *et al.* Optimization of extraction technology of polysaccharide from Hawthorn and its activity of lowering blood glucose and blood lipid [J]. Sci Technol Food Ind, 2019, 40(13): 119–24, 47.
- [21] 陈永丽, 黄俊瑾, 王玲, 等. 桑叶多糖的化学组成及其对胰脂肪酶的抑制作用研究[J]. 食品科技, 2021, 46(3): 162–166.
CHEN YL, HUANG JT, WANG L, *et al.* Study on the chemical composition of mulberry leaf polysaccharide and its inhibitory effect on pancreatic lipase [J]. Food Sci Technol, 2021, 46(3): 162–166.
- [22] 王生琳, 宰清勇, 陈华国, 等. 5 种构杞多糖生物活性的比较研究[J]. 中国中药杂志, 2024, 49(1): 110–122.
WANG SL, ZAI QY, CHEN HG, *et al.* Comparison on biological activities of *Lyciumbarbarum* polysaccharides extracted with five methods [J]. China J Chin Mater Med, 2024, 49(1): 110–122.
- [23] 姜荣华, 蒲铎文, 樊梓鸾, 等. 老山芹多糖的分离纯化、结构表征及体外降糖活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(18): 113–118, 124.
XIAN RH, PU DW, FAN ZY, *et al.* Isolation, purification, structure characterization, and hypoglycemic activity analysis of polysaccharides from *Heracleumdissectum* [J]. Food Ferment Ind, 2023, 49(18): 113–118, 124.
- [24] 王胜男, 曲丹妮, 刘军, 等. 硫酸铵分级大豆种皮多糖组分微观结构及特性研究[J]. 中国食品学报, 2022, 22(5): 27–34.
WANG SN, QU DN, LIU J, *et al.* Study on microstructure and characteristics of ammonium sulfate [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2022, 22(5): 27–34.
- [25] 李亚楠, 郭明珠, 邵娟娟, 等. 泥鳅黏液多糖的化学组成、理化性质及体外降糖活性[J]. 中国食品学报, 2023, 23(10): 51–62.
LI YN, GUO MZ, SHAO JJ, *et al.* Chemical composition, physicochemical properties and *in vitro* hypoglycemic activity of mucosaccharides in loach [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2023, 23(10): 51–62.
- [26] GUAN B, TONG J, HAO H, *et al.* Bile acid coordinates microbiota homeostasis and systemic immunometabolism in cardiometabolic diseases [J]. Acta Pharmaceut Sin B, 2022, 12(5): 2129–2149.
- [27] GAO Y, LIN J, YE C, *et al.* Microbial transformations of bile acids and their receptors in the regulation of metabolic dysfunction-associated steatotic liver disease [J]. Liver Res, 2023, 7(3): 165–176.
- [28] CARRERA-ALVARADO G, TOLDRA F, MORA L. Bile acid-binding capacity of peptide extracts obtained from chicken blood hydrolysates using HPLC [J]. LWT, 2023, 173: 114381.
- [29] LI Q, DOU Z, DUAN Q, *et al.* A comparison study on structure-function relationship of polysaccharides obtained from sea buckthorn berries using different methods: Antioxidant and bile acid-binding capacity [J]. Food Sci Hum Well, 2024, 13(1): 494–505.
- [30] 胡宁, 韩佳欣, 秦梅子, 等. 红豆浆的制备、分离纯化及降糖活性研究[J/OL]. 中国食物与营养, 2024, 1–7. [2024-03-31]. <https://doi.org/10.19870/j.cnki.11-3716/ts.20240029.001>
HU N, HAN JX, QIN MZ, *et al.* Preparation, isolation and purification, and hypoglycemic activity of red bean peptide [J/OL]. Food Nutr Chin, 2024, 1–7. [2024-03-31]. <https://doi.org/10.19870/j.cnki.11-3716/ts.20240029.001>
- [31] 张慧慧, 李灿, 刘会平, 等. 肉桂多糖的提取纯化及体外抗氧化和降血糖活性分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(7): 15–24.
ZHANG HH, LI C, LIU HP, *et al.* Extraction and purification of cinnamomum cassia polysaccharides and its antioxidant and hypoglycemic activities *in vitro* [J]. Sci Technol Food Ind, 2024, 45(7): 15–24.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

作者简介



彭紫君, 硕士研究生, 主要研究方向为功能性食品的研究与开发。
E-mail: ppengzzj@163.com



吴小勇, 博士, 副教授, 主要研究方向为功能性食品的研究与开发。
E-mail: perryfe@163.com