

肉桂多酚清除自由基及抑制 α -葡萄糖苷酶活性的能力

龙晓珊^{1,2}, 廖森泰^{1,3}, 刘书成², 刘凡^{1,3}, 黎尔纳¹, 庞道睿^{1,3}, 穆利霞¹, 王卫飞¹, 邹宇晓^{1,3}

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610) (2. 广东海洋大学食品科技学院, 广东省水产品加工与安全重点实验室, 广东省海洋食品工程技术研发中心, 广东省海洋生物制品工程重点实验室, 广东湛江 524088)

(3. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室茂名分中心, 广东茂名 525000)

摘要: 本研究主旨是探讨肉桂多酚的体外抗氧化和 α -葡萄糖苷酶抑制能力, 为肉桂多酚的开发利用提供理论基础。通过福林酚法测定肉桂多酚的总酚含量, 采用试剂盒以及有机试剂检测肉桂多酚清除 ABTS⁺、Fe³⁺、DPPH、OH⁻等自由基的能力以及对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制效果。结果表明, 肉桂多酚的含量为 64.43 mg/g (干重), 对 ABTS⁺、Fe³⁺、DPPH、OH⁻等自由基具有明显的清除能力, 其 IC₅₀ 值 (半抑制率浓度) 分别为 0.71、0.27、0.18、0.97 mg/mL, 对以上四种自由基的清除能力由强到弱依次为 DPPH>Fe³⁺>ABTS⁺>OH⁻, 且存在剂量依赖性, 自由基的清除能力随着样品质量浓度的增加而提高。肉桂多酚对 α -葡萄糖苷酶具有显著的抑制能力, 其 IC₅₀ 值为 0.048 mg/mL, 同样存在剂量依赖性, 且抑制效果显著高于阿卡波糖对照。因此, 肉桂多酚对 ABTS⁺、Fe³⁺、DPPH、OH⁻等自由基具有明显的清除能力, 对 α -葡萄糖苷酶具有显著的抑制能力。

关键词: 肉桂; 多酚; 自由基; α -葡萄糖苷酶; 抗氧化

文章编号: 1673-9078(2021)08-119-126

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.8.1159

The Abilities of Cinnamon Polyphenols to Scavenge Free Radicals and Inhibit α -Glucosidase

LONG Xiao-shan^{1,2}, LIAO Sen-tai^{1,3}, LIU Shu-cheng², LIU Fan^{1,3}, LI Er-na¹, PANG Dao-rui^{1,3}, MU Li-xia¹, WANG Wei-fei¹, ZOU Yu-xiao^{1,3}

(1. Sericultural & Agri-Food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China) (2. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Products Processing and Safety, Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of Marine Food, Guangdong Province Engineering Laboratory for Marine Biological Products, Zhanjiang 524088, China)

(3. Maoming Branch, Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Maoming 525000, China)

Abstract: The main aim of this study to investigate the *in vitro* antioxidant activity and ability to inhibit α -glucosidase of the cinnamon polyphenols, to provide theoretical basis for their development and applications. The total phenolic contents of the cinnamon
引文格式:

龙晓珊, 廖森泰, 刘书成, 等. 肉桂多酚清除自由基及抑制 α -葡萄糖苷酶活性的能力[J]. 现代食品科技, 2021, 37(8): 119-126

LONG Xiao-shan, LIAO Sen-tai, LIU Shu-cheng, et al. The abilities of cinnamon polyphenols to scavenge free radicals and inhibit α -glucosidase [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(8): 119-126

收稿日期: 2020-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(31801525); 高水平农科院建设科学创新战略专项基金(R2018QD-082; R2018PY-JG001); 广东省农业科学院院长基金(201805B); 南药专家工作站(2020 工作站 20-14)

作者简介: 龙晓珊(1992-), 女, 博士研究生, 研究方向: 功能性食品

通讯作者: 邹宇晓(1973-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 蚕桑与药食资源综合利用

polyphenols were determined by the folin-phenol method. The ABTS⁺, Fe³⁺, DPPH· and OH⁻ scavenging abilities and the inhibition of α -glucosidase activity of the cinnamon polyphenols were detected using the kits and organic reagents. The results showed that the content of cinnamon polyphenols was 64.43 mg/g (dry weight), and significant scavenging abilities towards ABTS⁺, Fe³⁺, DPPH· and OH⁻ were detected with the IC₅₀ values (half inhibitory concentration) being 0.71, 0.27, 0.18 and 0.97 mg/mL, respectively). The scavenging abilities of the cinnamon polyphenols towards the above-mentioned free radicals were in the order of DPPH· > Fe³⁺ > ABTS⁺ > OH⁻, and exhibited in a dose-dependent manner (scavenging ability increased with an elevated mass concentration). The cinnamon polyphenols had a significant inhibitory effect on α -glucosidase in a dose-dependent manner, with an IC₅₀ value as 0.048 mg/mL, and such inhibition was significantly greater than that of acarbose. Therefore, the cinnamon polyphenols possess significant abilities to scavenge ABTS⁺, Fe³⁺, DPPH·, OH⁻ radicals, and inhibit the activity of α -glucosidase.

Key words: cinnamon; polyphenol; free radical; α -glucosidase; antioxidant

肉桂,最早作为中药材记载于《神农本草经》,其又名玉桂、牡桂、玉树、大桂、辣桂、平安树、中国桂皮,为樟科樟属植物,广泛种植于广东、广西、云南、福建、贵州等地,肉桂的干燥树皮,是著名的药食两用植物,具有抗氧化、抗炎症、免疫调节、抑制肿瘤、降低血糖、以及神经保护等药理作用^[1-6]。

肉桂富含多糖、多酚、挥发油等活性物质,其中,肉桂多酚是肉桂的重要组成成分,主要由类黄酮类、类黄酮多聚体化合物组成,包括儿茶素,表儿茶素,甲基羟基查耳酮,表没食子儿茶素没食子酸酯等单体酚^[7,8]。现代研究表明,肉桂多酚具有较强的还原性,酚羟基与氧结合,并清除生物体内的自由基,抑制脂质过氧化而保护机体的肝肾,具有明显的抗氧化活性^[9-12]。Tulini 等表明肉桂酚类物质对活性氧簇和活性氮簇自由基具有较强的清除能力,显示出明显的抗氧化活性,可以用于开发新的功能性食品和保健品^[13]。而且,肉桂多酚还可以通过干扰多种氧化应激和促炎途径,从而达到抗氧化的作用^[14]。Qin 等研究肉桂多酚能够抑制 TNF- α 等促炎因子的表达,增强脱乙酰酶的蛋白质水平,提高大鼠 C6 胶质瘤细胞的抗氧化能力^[15]。Li 等发现肉桂多酚通过抑制 iNOS 和 NF- κ B 等促炎因子的活化来减轻细胞毒性,提高其抗氧化和降血糖活性^[16]。另外,肉桂多酚已被证实具有显著的降血糖作用,其作用机制可能是肉桂多酚可以减轻机体氧化应激和炎症反应,对胰腺 β 细胞起到保护作用,也有可能是其对 α -葡萄糖苷酶具有抑制作用,调节机体对葡萄糖的吸收代谢,从而达到降血糖的目的^[17-20]。Panickar 等研究发现肉桂多酚具有抗氧化和胰岛素增强作用,缓解细胞肿胀和炎症,具有显著的降血糖作用^[21]。Cheng 等研究肉桂多酚的降血糖活性,结果表明肉桂多酚明显抑制磷酸烯醇丙酮酸羧激酶和葡萄糖-6-磷酸酶的基因表达,减少肝葡萄糖生成,抑制 α -葡萄糖苷酶活性,降低空腹血糖值,同时改善胰岛素的敏感性,从而改善糖尿病^[22]。

本研究以肉桂多酚为研究对象,通过测定肉桂多酚对 ABTS⁺、Fe³⁺、DPPH·、OH⁻等自由基的清除能力以及对 α -葡萄糖苷酶的抑制能力,研究肉桂多酚的体外抗氧化和降血糖作用,为肉桂多酚的开发利用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

肉桂产自广东省肇庆市高要区,选取无污染、无病虫害、外表平整的干燥肉桂,将其粉碎后,过 40 目筛,得到颗粒均一的肉桂粉末。

硫酸亚铁、过氧化氢、水杨酸(分析纯)购自天津市福晨化学试剂厂;维生素 C (Vc, 分析纯)购自天津市大茂化学试剂厂;无水乙醇(分析纯)购自南昌市蓝翔化工有限公司;甲醇、乙腈(色谱纯)购自赛默飞世尔科技(中国)有限公司;福林酚试剂(Folin-Ciocalteu)购自上海荔达生物科技有限公司;DPPH 购自齐云生物技术有限公司;2,2'-联氨-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(2,2'-azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS)二铵盐、铁离子还原力(ferric ionreducing antioxidant power, FRAP)试剂盒购自碧云天生物技术公司。

1.2 仪器与设备

1200 series 高效液相色谱仪,美国 Agilent 公司;Sorvall Stratos 高速冷冻离心机,美国 Thermo Scientific 公司;UV-1800 紫外分光光度计,日本岛津公司;万能粉碎机,天津市泰斯特仪器有限公司;Infinite M200PRO 酶标仪,瑞士 Tecan 公司。

1.3 样品的制备

精确称取一定质量的肉桂粉,以 0.05 g/mL 的料液质量浓度加入 60%乙醇,超声辅助提取 60 min,

10000 r/min 离心 10 min 后取上清液, 滤渣用同样的方法再次提取, 重复提取 3 次, 合并上清液, 将上清液浓缩后冻干成粉末, 备用。

1.4 测定方法

1.4.1 肉桂多酚含量的测定

焦性没食子酸标准品的配制: 精确称量 10 mg 焦性没食子酸, 用体积分数 60% 乙醇溶解后定容至 100 mL, 得到 0.1 mg/mL 的标准溶液, 再稀释成浓度为 4、8、12、16、20、24 $\mu\text{g/mL}$ 的标准溶液^[23]。

测定: 采用福林酚比色法, 取 1 mL 标准品 (或样品提取物) 于 10 mL 试管中, 先加入 1 mL Folin-Ciocalteu 试剂, 混合均匀后加入 2 mL 10% 碳酸钠溶液, 混匀, 于 25 $^{\circ}\text{C}$ 下避光反应 60 min 后, 测定吸光度值 (765 nm)。以焦性没食子酸质量浓度为横坐标, 吸光度值为纵坐标绘制标准曲线, 采用外标法测定多酚含量。

1.4.2 ABTS⁺ 自由基清除能力的测定

采用 ABTS 试剂盒进行测定, 于 96 孔板所有检测孔中加入 200 μL ABTS 工作液, 空白对照孔中加入 10 μL 蒸馏水, 对照检测孔加入 10 μL 梯度浓度的 Vc 标准溶液 (浓度分别为 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8 mg/mL), 样品检测孔加入 10 μL 样品 (质量浓度分别为 0.5、1、2、3、4、5 mg/mL), 轻轻混匀; 室温孵育 2~6 min 后在 734 nm 波长处测定其 OD 值。ABTS⁺ 自由基清除率计算如公式 (1) 所示

$$\text{ABTS}^+\text{清除率}/\% = \frac{OD_{\text{空白}} - OD_{\text{样品}}}{OD_{\text{空白}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $OD_{\text{样品}}$ 为肉桂多酚或 Vc 吸光度值; $OD_{\text{空白}}$ 为空白对照孔吸光度值。

1.4.3 亚铁离子螯合能力的测定

亚铁离子螯合能力采用 FRAP 试剂盒测定, 于 96 孔板所有检测孔中加入 180 μL FRAP 工作液, 空白对照孔中加入 5 μL 蒸馏水, 样品检测孔内加入 5 μL 梯度浓度的样品 (质量浓度分别为 0.5、1、2、3、4、5 mg/mL), 以 5 μL 梯度浓度的 Vc 标准溶液 (浓度分别为 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8 mg/mL) 作为阳性对照, 轻轻混匀; 37 $^{\circ}\text{C}$ 孵育 3~5 min 后在 539 nm 波长处测定 OD 值。亚铁离子螯合率计算如式 (2) 所示。

$$\text{亚铁离子螯合率}/\% = \frac{OD_{\text{空白}} - OD_{\text{样品}}}{OD_{\text{空白}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $OD_{\text{样品}}$ 为肉桂多酚或 Vc 吸光度值; $OD_{\text{空白}}$ 为空白对照孔吸光度值。

1.4.4 DPPH 自由基清除能力的测定

DPPH 自由基清除能力参考^[24]的方法并加以适当

改进, 精确称取 0.004 g DPPH, 溶解于无水乙醇后定容至 100 mL, 保存于棕色瓶中避光保存。配制肉桂多酚样品, 于测定孔加入 20 μL 样品和 180 μL DPPH; 对照孔加入 20 μL 无水乙醇和 180 μL DPPH; 空白孔加入 200 μL 无水乙醇。

测定方法: ①检测组: 20 μL 梯度浓度肉桂多酚/Vc+180 μL DPPH; ②对照组: 20 μL 无水乙醇+180 μL DPPH; ③空白组: 200 μL 无水乙醇。

将反应液加入酶标板中, 避光反应 30 min, 在酶标仪中测定 517 nm 波长处的 OD 值, 按式 (3) 计算 DPPH 自由基清除率,

$$\text{DPPH自由基清除率}/\% = \frac{OD_{\text{对照}} - OD_{\text{样品}}}{OD_{\text{对照}} - OD_{\text{空白}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $OD_{\text{样品}}$ 为肉桂多酚或 Vc 吸光度值; $OD_{\text{空白}}$ 为空白对照孔吸光度值; $OD_{\text{对照}}$ 为对照孔吸光度值。

1.4.5 羟自由基清除率的测定

羟自由基清除率采用 Fenton 体系测定。分别取 6 mmol/L 硫酸亚铁和 6 mmol/L 过氧化氢各 2.5 mL 于试管中混匀, 加入 6 mmol/L 水杨酸 7.5 mL, 充分混匀后将体系放置在 37 $^{\circ}\text{C}$ 水浴中反应 15 min, 于 510 nm 波长处测定吸光度 A_0 , 向体系中加入 1 mL 样品, 37 $^{\circ}\text{C}$ 水浴反应 15 min, 于 510 nm 波长处测定吸光度 A_x ; 用蒸馏水作空白对照, Vc 作阳性对照。羟自由基清除率按式 (4) 计算

$$\text{羟基自由基清除率}/\% = \frac{A_0 - A_x}{A_0} \times 100\% \quad (4)$$

1.4.6 α -葡萄糖苷酶抑制能力的测定

参照^[25]并加以改进, 向 96 孔板中加入 50 μL 样品和 25 μL 1 U/mL α -葡萄糖苷酶溶液 (用 0.1 mol/L pH 6.9 磷酸盐缓冲液配制), 充分混匀后于 37 $^{\circ}\text{C}$ 反应 10 min, 加入 25 μL 1.5 mol/L 对硝基苯酚 α -D-吡喃葡萄糖苷 (用 0.1 mol/L pH 6.9 磷酸盐缓冲液配制), 充分混匀后于 37 $^{\circ}\text{C}$ 反应 30 min, 加入 0.2 mol/L 碳酸钠溶液 100 μL 终止反应, 于 405 nm 波长处测定 OD 值, 同时设定相同体系下的样品背景对照组 (不加酶)、空白对照组 (不加样品)。 α -葡萄糖苷酶抑制率按式 (5) 计算, 并计算 IC_{50}

$$\alpha\text{-葡萄糖苷酶抑制率}/\% = \frac{OD_{\text{空白}} - (OD_{\text{样品}} - OD_{\text{背景}})}{OD_{\text{空白}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $OD_{\text{空白}}$ 为空白对照组吸光度值; $OD_{\text{样品}}$ 为肉桂多酚或阿卡波糖吸光度值; $OD_{\text{背景}}$ 为样品背景对照组吸光度值。

1.5 数据统计与分析

实验数据表示为 $\bar{x} \pm s$, 采用 Origin 8.0 软件作图。单因素方差分析采用 SPSS 19.0 软件, 组间差异比较

采用 Duncan 检验, $p < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与讨论

2.1 肉桂多酚含量

肉桂多酚由有机溶剂-水复合溶剂提取, 超声辅助提取得到, 通过福林酚法测定得到肉桂总多酚的含量为 64.43 mg/g (干重)。Helal 等用福林酚测得肉桂的总酚含量 76.6 mg/g (干重)^[26], Helal 等用福林酚法测得肉桂多酚的含量为 43.8 mg/g (干重)^[1]。本文的总酚含量与文献的数据有一定的差距, 但总体是一致的, 可能是因为肉桂多酚的含量与肉桂的品种、产地、提取方法、测定方法等都有一定的关系。杨立锋等^[27]研究不同水果的多酚含量, 结果显示葡萄、石榴、蓝莓、杨梅、李子、桑椹、黑加仑、山楂的多酚含量分别为 7.1、4.8、8.2、14.8、2.7、19.3、7.9、2.4 mg/g (干重), 肉桂的多酚含量显著高于这些水果的多酚含量。

2.2 肉桂多酚的抗氧化能力

自由基是生物体在新陈代谢过程中产生的、对生物体危害较大、毒性较强的一种自由基, 会使机体发生氧化应激, 产生大量的活性氧簇和活性氮簇自由基, 诱发炎症的发生, 扰乱机体的新陈代谢, 加速机体的氧化和衰老^[28-30]。肉桂多酚对自由基的清除能力反应了其抗氧化能力, 清除自由基能力越强, 则抗氧化性越强。

2.2.1 ABTS⁺自由基的清除能力

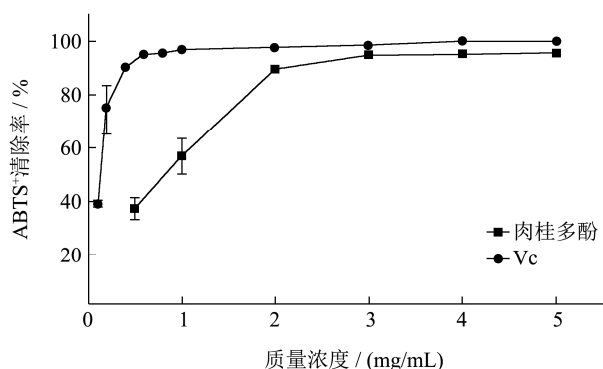


图1 肉桂多酚对 ABTS⁺自由基的清除能力

Fig.1 The scavenging effect of cinnamon polyphenols on ABTS⁺ free radical

由图1可知, 随着肉桂多酚质量浓度的增加, 其对 ABTS⁺自由基的清除能力越强, 质量浓度上升到一定程度时, ABTS⁺自由基的抑制率达到饱和状态。当肉桂多酚质量浓度为 0.5 mg/mL 时, 对 ABTS⁺自由基的抑制率只有 37.09%, 质量浓度增加至 3 mg/mL

时, 对 ABTS⁺自由基的抑制率高达 95.12%, 质量浓度继续增加后, ABTS⁺自由基的清除率基本上没有变化。由 SPSS 软件计算得到肉桂多酚和 Vc 的 IC₅₀ 值分别为 0.71、0.12 mg/mL, 对照组 Vc 对 ABTS⁺自由基的清除能力强于肉桂多酚 ($p < 0.05$)。肉桂多酚呈现出较好的抗氧化性, 其可能的原因是肉桂多酚是由原花青素、芦丁、儿茶素、表儿茶素等单体酚组成, 这些单体酚具有较强的清除自由基能力。Tulini 等^[31]发现肉桂原花青素具有显著的体外抗氧化和降血糖活性, 能有效地清除自由基, 降低机体氧化应激反应。据报道, 儿茶素和原花青素等单体酚与 ABTS⁺自由基反应, 产生共价化合物, 主要是机制是 ABTS⁺自由基的一个分子从多酚中提取一个电子(或氢原子), 形成半醌自由基, 再生母体底物 ABTS。随后, 半醌自由基与 ABTS⁺自由基的另一分子反应, 形成第一个多酚衍生加合物, 从而清除生物体内的 ABTS⁺自由基^[32]。

2.2.2 亚铁离子的螯合能力

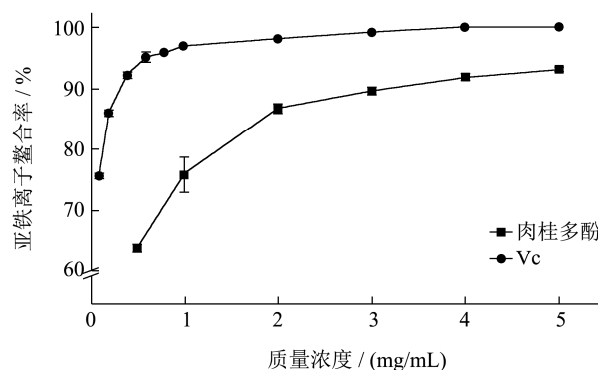


图2 肉桂多酚的亚铁离子螯合能力

Fig.2 The binding ability of cinnamon polyphenols on ferrous ion

亚铁离子螯合能力是指将铁离子与其他基团发生反应生成螯合物, 将铁离子还原成亚铁离子, 图2表明, 肉桂多酚对亚铁离子具有较强的螯合能力, 质量浓度为 0.5 mg/mL 时, 亚铁离子螯合能力已经达到 63.77%。CDRAMA 等研究肉桂酚类物质添加入白巧克力, 使白巧克力的亚铁离子螯合能力由 47.6 μg EE/g 增加到 1060.6 μg EE/g (干重), 表现出显著的抗氧化性^[33], 与本文研究结果一致。同样地, 肉桂多酚对亚铁离子的螯合能力也存在剂量依赖性, 样品质量浓度越大, 其亚铁离子螯合能力越强。由 SPSS 软件计算得到肉桂多酚和 Vc 的 IC₅₀ 值分别为 0.27、0.03 mg/mL, 对照组 Vc 对亚铁离子的螯合能力强于肉桂多酚 ($p < 0.05$)。Muhammad 等研究肉桂与可可粉混合物的亚铁离子螯合能力, 结果表明, 随着肉桂比例的增加, 其亚铁离子螯合能力也逐渐增强, 当肉

桂的比例分别为 0%、25%、50%、75%时, 亚铁离子的螯合能力分别为 555、878、1131、1323、2389 mmol/L AAE/g DW^[34], 这与我们的研究结果具有相同的趋势, 肉桂多酚对亚铁离子的螯合能力具有剂量依赖性。文献报道, 酚酸或羧酸基团的共轭碱基本身的负电荷能够通过电子转移反应还原络合物中的铁离子, 在酚酸中, 咖啡酸、原儿茶酸和没食子酸是最有效的自氧化促进剂, 在适宜的 pH 下, 会与铁形成热力学稳定的螯合物^[35]。

2.2.3 DPPH 自由基的清除能力

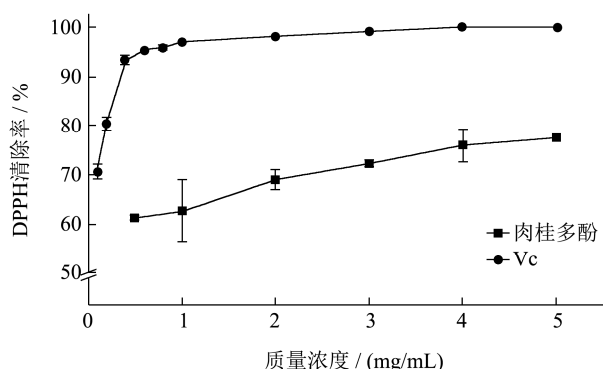


图3 肉桂多酚对 DPPH 自由基的清除能力

Fig.3 The scavenging effect of cinnamon polyphenols on DPPH free radicals

图3结果显示, 肉桂多酚对 DPPH 具有一定的清除能力, 同样存在剂量依赖性, 但是与 ABTS⁺清除率和亚铁离子螯合率相比, 肉桂多酚对 DPPH 的清除能力增长比较缓慢。当肉桂多酚质量浓度为 1 mg/mL 时, DPPH 清除率达到 62.64%, 质量浓度增加为 5 mg/mL 时, DPPH 清除率仅增加至 77.56%, 但总体而言, 肉桂多酚对 DPPH 具有良好的清除能力。由 SPSS 软件计算得到肉桂多酚和 Vc 的 IC₅₀ 值分别为 0.18、0.04 mg/mL, 对照组 Vc 对 DPPH 自由基的清除能力强于肉桂多酚。这与文献的结果一致, A G S 等研究得到肉桂皮清除 DPPH 的能力随着样品浓度的增加而增强, 肉桂皮的剂量分别为 5、10、15、20、25 μL 时, DPPH 清除率分别为 71.1%、73.5%、76.2%、82.1%、83.6%^[36]。Lin 等的研究也表明肉桂清除 DPPH 的能力随着肉桂提取物质量浓度的增加而增强^[37]。李月等^[38]发现红毛藻多酚对 DPPH 自由基有一定清除能力, 其 IC₅₀ 值为 0.313 mg/mL, 清除能力略低于肉桂多酚。万红霞等^[39]研究广东东药食两用植物的抗氧化作用, 结果显示高良姜清除 DPPH 自由基的 IC₅₀ 值为 0.058 mg/mL, 清除效果强于肉桂多酚, 布渣叶清除 DPPH 自由基的 IC₅₀ 为 0.164 mg/mL, 其清除效果和肉桂多酚相当, 橘红 (0.525 mg/mL)、佛手 (0.759 mg/mL)、藿香 (0.793 mg/mL)、肉豆蔻 (0.964 mg/mL)、陈皮

(1.001 mg/mL)、益智仁 (1.467 mg/mL) 等的清除效果均弱于肉桂多酚 (0.18 mg/mL)。

2.2.4 OH 自由基的清除能力

OH 自由基是最强大的活性氧物种 (ROS), 可氧化蛋白质、脂类、DNA 和糖类, 肉桂多酚含有的酚羟基, 可与羟自由基发生氧化还原反应, 从而将其清除, 达到清除羟基自由基的效果, 减少机体营养成分的损失^[40]。如图4所示, 肉桂多酚的供氢能力较强, 有效抑制活性氧簇和活性氮簇的活性, 对 OH 呈现出良好的清除能力, 且随着样品浓度的增大, 肉桂多酚的清除能力先逐渐增强后趋于平稳, 存在剂量依赖性。当肉桂多酚质量浓度为 1 mg/mL 时, 对 OH 自由基的抑制率只有 48.43%, 质量浓度增加至 5 mg/mL 时, 对羟基自由基的抑制率为 78.23%, 当质量浓度继续增加, 羟基自由基的清除率基本上没有变化。由 SPSS 软件计算得到肉桂多酚和 Vc 的 IC₅₀ 值分别为 0.97、0.045 mg/mL, 对照组 Vc 对 OH 自由基的清除能力强于肉桂多酚 ($p < 0.05$)。文献报道, 桑椹清除 OH 自由基的 IC₅₀ 为 8.13 mg/mL^[41], 抑制效果明显小于肉桂多酚, 有可能是桑椹活性成分中巯基、酚羟基的给电能力与肉桂多酚酚羟基相比较弱。

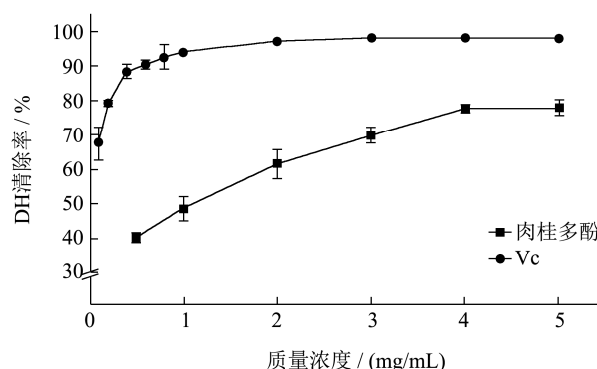


图4 肉桂多酚对 OH 自由基的清除能力

Fig.4 The scavenging effect of cinnamon polyphenols on OH free radicals

2.3 肉桂多酚对 α-葡萄糖苷酶的抑制能力

α-葡萄糖苷酶是碳水化合物代谢的关键酶, 可以将机体摄入的碳水化合物分解成葡萄糖, 而 α-葡萄糖苷酶抑制剂可以通过抑制 α-葡萄糖苷酶的活性, 减少葡萄糖的生成, 减缓葡萄糖进入血液的速度, 从而减少餐后血糖升高, 稳定机体的血糖值^[25,42,43]。另外, 这种抑制会减少消化道以及肠道对碳水化合物的吸收, 刺激胰岛素依赖的葡萄糖摄取, 激活 AMPK, 并改善大肠内的微生物群落, 减少炎症, 从而改善糖尿病的症状^[16,44,45]。

由图5可知, 肉桂多酚对 α-葡萄糖苷酶具有极强

的抑制效果,且随着质量浓度增加而增强。当肉桂多酚质量浓度仅为 0.06 mg/mL 时,抑制率已经达到 77.02%,体现了较好的抑制效果,当质量浓度为 0.12 mg/mL 时,抑制率高达 98.29%,几乎完全能够抑制 α -葡萄糖苷酶的活性。由 SPSS 软件计算得到肉桂多酚和阿卡波糖的 IC_{50} 值分别为 0.048、0.90 mg/mL 肉桂多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制能力明显强于对照品阿卡波糖,具有极好的抑制效果。这与 AME 等^[46]的研究结果相一致,肉桂多酚 α -葡萄糖苷酶的 IC_{50} 值随肉桂多酚含量的增加而减少。乔锦莉等^[47]研究发现蓝果忍冬、杨梅、芒果苷对 α -葡萄糖苷酶抑制活性的 IC_{50} 分别为 0.933、1.562、164.16 mg/mL,其 IC_{50} 值均高于肉桂多酚,说明与蓝果忍冬、杨梅、芒果苷相比,肉桂多酚对 α -葡萄糖苷酶具有更好的抑制效果。

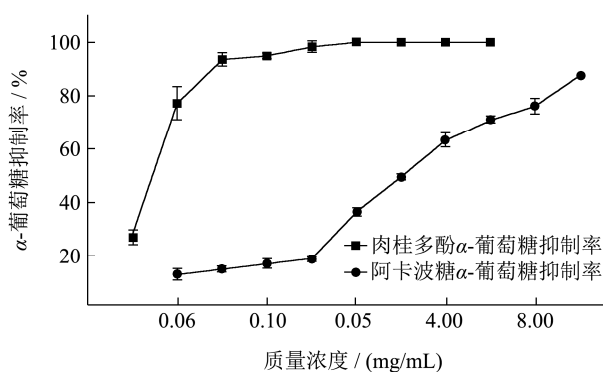


图5 肉桂多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制能力

Fig.5 The inhibition of cinnamoyl polyphenols on α -glucosidase

3 结论

肉桂多酚含量为 64.43 mg/g (干重),对 ABTS⁺、Fe³⁺、DPPH、OH 等自由基具有明显的清除能力,存在剂量依赖性,自由基的清除能力随着样品质量浓度的增加而提高。肉桂多酚对以上四种自由基的清除能力由强到弱依次为 DPPH>Fe³⁺>ABTS⁺>OH。肉桂多酚对 α -葡萄糖苷酶具有显著的抑制能力,同样存在剂量依赖性,且抑制效果显著高于阿卡波糖对照。因此,肉桂多酚具有较强的体外抗氧化性和 α -葡萄糖苷酶抑制能力。

参考文献

[1] Helal A, Tagliazucchi D, Verzelloni E, et al. Bioaccessibility of polyphenols and cinnamaldehyde in cinnamon beverages subjected to *in vitro* gastro-pancreatic digestion [J]. Journal of Functional Foods, 2014, 7: 506-516

[2] Durak A, U Gawlik-Dziki, L Pecio. Coffee with cinnamon - impact of phytochemicals interactions on antioxidant and anti-inflammatory *in vitro* activity [J]. Food Chem, 2014, 162:

81-88

[3] 李艳,苗明三.肉桂的化学、药理及应用特点[J].中医学报, 2015,30(208):1335-1337

LI Yan, MIAO Ming-san. Chemistry, pharmacology and application characteristics of *Cinnamomum cassia* [J]. Acta Sinica Sinica [J]. 2015, 30(208): 1335-1337

[4] Aswar U M, Kandhare A D, Mohan V, et al. Anti-allergic effect of intranasal administration of type-A procyanidin polyphenols based standardized extract of cinnamon bark in ovalbumin sensitized BALB/c mice [J]. Phytother Res, 2015, 29(3): 423-433

[5] Wong S Y, Grant I R, Friedman M, et al. Antibacterial activities of naturally occurring compounds against *Mycobacterium avium* subsp. paratuberculosis [J]. Appl Environ Microbiol, 2008, 74(19): 5986-5990

[6] Abdel-Moneim, Adel A, Hosni, et al. Cinnamaldehyde potentially attenuates gestational hyperglycemia in rats through modulation of ppargamma, proinflammatory cytokines and oxidative stress [J]. Biomed Pharmacother, 2017, 88: 52-60

[7] 7.A D P, A R V M P, A L R, et al. Polyphenols of cambuci (*Campomanesia phaea* (O. Berg.)) fruit ameliorate insulin resistance and hepatic steatosis in obese mice [J]. Food Chem, 2021, 340: 128169

[8] Qin B, K S Panickar, R A Anderson, et al. Cinnamon polyphenols regulate S100beta, sirtuins, and neuroactive proteins in rat C6 glioma cells [J]. Nutrition, 2014, 30(2): 210-217

[9] 李诚,周建平,翟清波,等.肉桂多酚的研究进展[J].亚太传统医药,2011,7(9):169-172

LI Cheng, ZHOU Jian-ping, ZHAI Qing-bo, et al. Research progress of cinnamon polyphenols [J]. Asia Pacific Traditional Medicine, 2011, 7(9): 169-172

[10] 廖作庄.肉桂多酚的药理作用及其机制研究进展[J].右江医学,2018,46(3):359-362

LIAO Zuo-zhuang. Pharmacological action and mechanism of cinnamon polyphenols [J]. Youjiang Med, 2018, 46(3): 359-362

[11] Tanaka Y, H Uchi, M Furue, et al. Antioxidant cinnamaldehyde attenuates UVB-induced photoaging [J]. J Dermatol Sci, 2019, 96(3): 151-158

[12] Chollakup R, Pongburoos S, Boonsong W, et al. Antioxidant and antibacterial activities of cassava starch and whey protein blend films containing rambutan peel extract and cinnamon oil for active packaging [J]. LWT, 2020, 130: 109573

- [13] Tulini Fabrício L, Souza V B, Thomazini M, et al. Evaluation of the release profile, stability and antioxidant activity of a proanthocyanidin-rich cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum*) extract co-encapsulated with alpha-tocopherol by spray chilling [J]. Food Res Int, 2017, 95: 117-124
- [14] Momtaz, Saeideh, Hassani, et al. Cinnamon, a promising prospect towards Alzheimer's disease [J]. Pharmacol Res, 2018, 130: 241-258
- [15] Qin B, K S Panickar, R A Anderson, et al. Cinnamon polyphenols attenuate the hydrogen peroxide-induced down regulation of S100beta secretion by regulating sirtuin 1 in C6 rat glioma cells [J]. Life Sci, 2014, 102(1): 72-79
- [16] Li R, Liang T, Xu L, et al. Protective effect of cinnamon polyphenols against STZ-diabetic mice fed high-sugar, high-fat diet and its underlying mechanism [J]. Food Chem Toxicol, 2013, 51: 419-425
- [17] Bolin Qin A B, A H D D, A N W S, et al. Cinnamon polyphenols regulate multiple metabolic pathways involved in insulin signaling and intestinal lipoprotein metabolism of small intestinal enterocytes [J]. Nutrition, 2012, 28(11-12): 1172-1179
- [18] Chen L, Chen L, Wang T, et al. Preparation of methylated products of A-type procyanidin trimers in cinnamon bark and their protective effects on pancreatic beta-cell [J]. J Food Sci, 2016, 81(5): C1062-1069
- [19] Couturier K, Batandier C, Awada M, et al. Cinnamon improves insulin sensitivity and alters the body composition in an animal model of the metabolic syndrome [J]. Arch Biochem Biophys, 2010, 501(1): 158-161
- [20] Zare R, Najarzadeh A, Zarshenas M M, et al. Efficacy of cinnamon in patients with type II diabetes mellitus: a randomized controlled clinical trial [J]. Clin Nutr, 2019, 38(2): 549-556
- [21] Panickar K S, M M Polansky, R A Anderson, et al. Cinnamon polyphenols attenuate cell swelling and mitochondrial dysfunction following oxygen-glucose deprivation in glial cells [J]. Exp Neurol, 2009, 216(2): 420-427
- [22] Cheng D M, Kuhn P, Poulev A, et al. *In vivo* and *in vitro* antidiabetic effects of aqueous cinnamon extract and cinnamon polyphenol-enhanced food matrix [J]. Food Chem, 2012, 135(4): 2994-3002
- [23] 刘丹,陈虎,蒲俊松,等.药桑桑椹总多酚的提取工艺条件优化及抗氧化活性分析[J].蚕业科学,2016,42(6):1068-1076
LIU Dan, CHEN Hu, PU Jun-song, et al. Optimization of extraction conditions and analysis of antioxidant activity of total polyphenols from mulberry [J]. Sericulture Science, 2016, 42(6): 1068-1076
- [24] 孔凡刚,张丽,巩丽丽,等.DPPH 法测定桑椹不同极性部位的抗氧化活性[J].中药园地,2015,34(11):865-868
KONG Fan-gang, ZHANG Li, GONG Li-li, et al. DPPH method was used to determine the antioxidant activity of different polar parts of mulberry [J]. Traditional Chinese medicine garden, 2015, 34(11): 865-868
- [25] Kumar D, R Ghosh, B C Pal, et al. α -Glucosidase inhibitory terpenoids from *Potentilla fulgens* and their quantitative estimation by validated HPLC method [J]. Journal of Functional Foods, 2013, 5(3): 1135-1141
- [26] Helal A, D Tagliazucchi. Impact of *in-vitro* gastro-pancreatic digestion on polyphenols and cinnamaldehyde bioaccessibility and antioxidant activity in stirred cinnamon-fortified yogurt [J]. LWT, 2018, 89: 164-170
- [27] 杨立锋,丁强,杨菊林,等.8 种水果酚类化合物含量与其抗糖基化作用的研究[J].粮食与食品工业,2015,22(4):78-81
YANG Li -feng, DING Qiang, YANG Ju-lin, et al. Contents of phenolic compounds in eight fruits and their anti glycosylation activities were studied [J]. Food and Food Industry, 2015, 22(4): 78-81
- [28] Abdel-Tawwab M, Samir F, Abd El-Naby A S, et al. Antioxidative and immunostimulatory effect of dietary cinnamon nanoparticles on the performance of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.) and its susceptibility to hypoxia stress and *Aeromonas hydrophila* infection [J]. Fish Shellfish Immunol, 2018, 74: 19-25
- [29] Borzoei A, Rafraf M, Niromanesh S, et al. Effects of cinnamon supplementation on antioxidant status and serum lipids in women with polycystic ovary syndrome [J]. J Tradit Complement Med, 2018, 8(1): 128-133
- [30] Yun-Feng Y, Lu-Lu Z, Yu-Xin S, 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
- [31] Tulini F L, Souza V B, Echalar-Barrientos M A, et al. Development of solid lipid microparticles loaded with a proanthocyanidin-rich cinnamon extract (*Cinnamomum zeylanicum*): potential for increasing antioxidant content in functional foods for diabetic population [J]. Food Res Int, 2016, 85: 10-18
- [32] Osman A M, K K Wong, A Fernyhough, et al. ABTS radical-driven oxidation of polyphenols: isolation and

- structural elucidation of covalent adducts [J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 2006, 346(1): 321-329
- [33] C D R A M A, B E T, A G D P, et al. Phytochemical composition and antioxidant activity of *Cinnamomum burmannii* Blume extracts and their potential application in white chocolate [J]. *Food Chemistry*, 2021, 340(15): 127983
- [34] Muhammad D R A, Praseptiangga D, Davy V D W, et al. Interaction between natural antioxidants derived from cinnamon and cocoa in binary and complex mixtures [J]. *Food Chem*, 2017, 231: 356-364
- [35] Chvatalova K, Slaninova I, Brezinova L, et al. Influence of dietary phenolic acids on redox status of iron: ferrous iron autoxidation and ferric iron reduction [J]. *Food Chem*, 2008, 106(2): 650-660
- [36] A G S, A S M, B M P D, et al. A comparison of chemical, antioxidant and antimicrobial studies of cinnamon leaf and bark volatile oils, oleoresins and their constituents [J]. *Food Chem Toxicol*, 2007, 45(9): 1650-1661
- [37] Lin K H, Yeh S Y, Lin M Y, et al. Major chemotypes and antioxidative activity of the leaf essential oils of *Cinnamomum osmophloeum* Kaneh from a clonal orchard [J]. *Food Chem*, 2007, 105(1): 133-139
- [38] 李月,纪乃茹,李健,等.红毛藻多酚提取工艺优化及抗氧化活性 [J/OL]. *食品工业科技*:1-8[2020-12-23]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050337>
- LI Yue, JI Nai-ru, LI Jian, et al. Extraction process optimization and antioxidant activity of polyphenols from *Chaetomium rubrum* [J/OL]. *Food Industry Science and Technology*: 1-8[2020-12-23]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050337>
- [39] 万红霞,胡玉玫,贾强,等.10 种广东药食两用植物的抗氧化和抗增殖活性评价[J/OL].*食品工业科技*:1-9 [2020-12-23]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050135>
- WAN Hong-xia, HU Yu-mei, JIA Qiang, et al. Evaluation of antioxidant and antiproliferative activities of 10 species of medicinal and edible plants in Guangdong [J/OL]. *Food Industry Science and Technology*: 1-9[2020-12-23]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050135>
- [40] Esfandi R, W G Willmore, A Tsopmo, et al. Peptidomic analysis of hydrolyzed oat bran proteins, and their *in vitro* antioxidant and metal chelating properties [J]. *Food Chem*, 2019, 279: 49-57
- [41] 龙晓珊,胡腾根,邹宇晓,等.发酵和加工对桑椹抗氧化和降血糖作用的影响[J].*食品科学*,2019,40(11):116-123
- LONG Xiao-shan, HU Teng-gen, ZOU Yu-xiao, et al. Effects of fermentation and processing on antioxidant and hypoglycemic effects of mulberry [J]. *Food Science*, 2019, 40(11): 116-123
- [42] Padhi S, A K Nayak, A Behera, et al. Type II diabetes mellitus: a review on recent drug based therapeutics [J]. *Biomed Pharmacother*, 2020, 131: 110708
- [43] Qiu C, Chang R, Yang J, et al. Preparation and characterization of essential oil-loaded starch nanoparticles formed by short glucan chains [J]. *Food Chem*, 2017, 221: 1426-1433
- [44] B N J A, C A K, D S C B, et al. The effect of cinnamon supplementation on lipid profiles in patients with type 2 diabetes: a systematic review and meta-analysis of clinical trials [J]. *Complementary Therapies in Medicine*, 2020, 55: 102571
- [45] Wu J, Shi S, Wang H, et al. Mechanisms underlying the effect of polysaccharides in the treatment of type 2 diabetes: a review [J]. *Carbohydr Polym*, 2016, 144: 474-94
- [46] A M E, A H S L, A J D, et al. Optimization of water extract of *Cinnamomum burmannii* bark to ascertain its *in vitro* antidiabetic and antioxidant activities [J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2019, 19: 101152
- [47] 乔锦莉,张妍,刘佩,等.野生蓝果忍冬多酚鉴定及其抗氧化、抗淀粉酶活性 [J/OL]. *食品科学*:1-13[2020-12-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20201120.1645.162.html>
- QIAO Jin-li, ZHANG Yan, LIU Pei, et al. Identification of polyphenols and their antioxidant and anti amylase activities in wild *Lonicera edulis* [J/OL]. *Food Science*: 1-13[2020-12-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20201120.1645.162.html>