

槟榔提取物对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用研究

宋菲, 张玉锋, 郭玉如, 李瑞, 陈华, 唐敏敏

(中国热带农业科学院椰子研究所, 海南 文昌 571339)

摘要: 研究槟榔提取物对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用, 并采用 Lineweaver-Burk 双倒数法分析其动力学性质。结果表明, 槟榔壳、槟榔籽和槟榔花提取物对 α -葡萄糖苷酶活性均具有一定的抑制作用, 其半数抑制浓度 IC_{50} 分别为 (2.87 ± 0.48) mg/mL、 (1.50 ± 0.31) μ g/mL 和 (4.00 ± 0.53) mg/mL, 其中槟榔籽提取物的抑制作用明显高于阳性对照阿卡波糖 [IC_{50} 为 (0.71 ± 0.09) mg/mL]。对提取物中多酚、多糖等成分进行分析, 发现槟榔籽提取物中具有较高含量的多酚及多糖, 含量分别为 (441.73 ± 4.79) mg/g 和 (411.47 ± 6.01) mg/g。动力学试验结果表明, 槟榔壳及槟榔籽提取物对酶活性的抑制作用类型为竞争与非竞争的混合型抑制, 而槟榔花提取物对酶活性的抑制作用类型为竞争与反竞争的混合型抑制。试验结果表明槟榔籽提取物对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制效果显著, 具有很好的开发利用价值。

关键词: 槟榔; α -葡萄糖苷酶; 抑制活性; 动力学; 多酚多糖含量

Inhibitory Effects of Areca Nut Extract on the Activity of α -Glucosidase

SONG Fei, ZHANG Yu-feng, GUO Yu-ru, LI Rui, CHEN Hua, TANG Min-min

(Coconut Research Institute of Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Wenchang 571339, Hainan, China)

Abstract: The inhibitory effects of areca nut extracts on α -glucosidase were studied, and the dynamic properties were analyzed by lineweaver-burk double reciprocal method. Results indicated that the areca husk, seed and flower extracts were all had certain inhibitory effect on α -glycosidase, IC_{50} were (2.87 ± 0.48) mg/mL, (1.50 ± 0.31) μ g/mL and (4.00 ± 0.53) mg/mL, respectively. Inhibitory effect of areca seed extract was obviously higher than that of positive control acarbose [IC_{50} was (0.71 ± 0.09) mg/mL]. By analyzing the polyphenols and polysaccharides in the extracts, it was found that the content of polyphenols and polysaccharides in the areca seed extract was higher, which was (441.73 ± 4.79) mg/g and (411.47 ± 6.01) mg/g, respectively. The kinetic

基金项目: 中国热带农业科学院基本科研业务费(1630152017017)

作者简介: 宋菲(1986—), 女(汉), 助理研究员, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学。

[10] Lourdin Denis, Colonna Paul, Brownsey Geoffrey J, et al. Structural relaxation and physical ageing of starchy materials [J]. Carbohydrate research, 2002, 337(9): 827-833

[11] 黄倩, 高金梅, 郭洪梅, 等. 3种杂豆淀粉回生过程的理化特性研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(10): 22-27

[12] 曹立松, 刘亚伟, 刘洁. 淀粉老化测定技术研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2014(3): 30-34

[13] Li W, Guo H, Wang P, et al. Physicochemical characteristics of high pressure gelatinized mung bean starch during recrystallization [J]. Carbohydr Polym, 2015, 131: 432-438

[14] 马文睿. 微波加热对马铃薯淀粉糊化过程中晶体及分子结构的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2013

[15] 高群玉, 李佳佳, 李云南. 糊化和凝沉玉米淀粉的消化性能[J]. 华

南理工大学学报: 自然科学版, 2012, 40(5): 121-126

[16] 吕豪, 韩清华, 吕为乔, 等. 果蔬微波干燥与低频超声波协同干燥应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(11): 180-185

[17] 朱德泉, 王继先, 钱良存, 等. 猕猴桃切片微波真空干燥工艺参数的优化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 248-252

[18] 韩清华, 谢时军, 李树君, 等. 多馈源热风微波流态化干燥试验台[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 210-214

[19] Mothibe KJ, Wang C-Y, Mujumdar AS, et al. Microwave-Assisted Pulse-Spouted Vacuum Drying of Apple Cubes[J]. Drying Technol, 2014, 32(15): 1762-1768

[20] 李明菲. 不同热处理方式对小麦粉特性影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2016

收稿日期: 2019-02-28

results showed that the inhibitory effect of areca husk and areca seed extracts on α -glucosidase was a mixture of competitive inhibition and non-competitive inhibition. While the inhibitory effect of areca flower extract on α -glucosidase was a mixture of competitive and anti-competitive inhibition. The results indicated that the extracts of areca nut had significant inhibitory effect on α -glucosidase, which had good value of development and utilization.

Key words: areca nut; α -glucosidase; inhibiting activity; kinetics; polyphenols and polysaccharides contents

引文格式:

宋菲,张玉锋,郭玉如,等. 槟榔提取物对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用研究[J].食品研究与开发,2019,40(13):78-83

SONG Fei, ZHANG Yufeng, GUO Yuru, et al. Inhibitory Effect of Areca Nut Extract on the Activity of α -Glucosidase[J]. Food Research and Development, 2019, 40(13): 78-83

糖尿病是危害人类健康的主要疾病之一,且近年来发病率呈逐年上升的趋势,其中 90 %左右的糖尿病患者类型都为 II 型糖尿病(非胰岛素依赖型)。餐后高血糖是 II 型糖尿病发病的主要风险因素^[1]。 α -葡萄糖苷酶属于低聚糖水解酶类,是一类能够从 α -葡萄糖苷键底物的非还原端催化水解 α -葡萄糖基的酶的总称,能够在人体内水解多糖释放出葡萄糖,导致餐后高血糖的发生。 α -葡萄糖苷酶抑制剂通过竞争性地抑制小肠刷状缘上皮细胞的 α -葡萄糖苷酶,阻碍直链或支链低聚糖单元如糊精、麦芽糖、麦芽三糖分解产生葡萄糖的过程,从而延缓葡萄糖的吸收,降低餐后血糖的升高幅度^[2-3]。因此控制 α -葡萄糖苷酶活性是治疗前期糖尿病患者和缓解糖尿病症状的有效方法。目前一些人工合成的 α -葡萄糖苷酶抑制剂,如阿卡波糖等已用于临床治疗,但长期服用会引发消化系统紊乱等副作用^[4]。因此,众多研究者把目光集中在了天然产物上,期望得到一种活性高且安全无毒的新型天然抑制剂成分。

槟榔是海南省第一大特色经济作物,种植面积达 15.58 万 hm^2 。槟榔富含多酚、多糖、生物碱等成分,具有多种功能活性,是我国四大南药之首,有着悠久的药用历史^[5]。然而长期以来,槟榔药用价值的研究和开发利用严重不足。目前槟榔主要用于加工成槟榔干果,作为咀嚼嗜好品供消费者食用,既没有最大化发挥其价值,还经常受到食用安全负面报道的影响,严重制约了槟榔产业的健康可持续发展。

目前对槟榔功能性物质的研究主要集中在槟榔碱及槟榔多酚,包括提取工艺优化及抗氧化、抗衰老等活性方面的研究^[6-8]。但国内外尚未见槟榔对 α -葡萄糖苷酶抑制作用的相关报道。鉴于此,本文研究槟榔提取物对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用,并通过抑制动力

学试验明确酶活性抑制类型。一方面,为新一代天然、高效降糖药物及保健品的开发提供理论支撑,为糖尿病的治疗和控制提供解决方案;另一方面,还可增加槟榔产品附加值,延长槟榔产业链,对促进槟榔产业健康可持续发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

槟榔果、槟榔花均采自中国热带农业科学院椰子研究所科研实验基地; α -葡萄糖苷酶(来源于酿酒酵母,14.5 U/mL)、葡萄糖、儿茶素:美国 Sigma 公司;对硝基苯基- α -D-吡喃葡萄糖苷(P-nitrophenyl- α -D-glucopyranoside,PNPG):上海源叶生物科技有限公司;阿卡波糖:北京索莱宝科技有限公司;其他所用的化学试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器

PS-40 超声波清洗机:深圳市超艺达科技有限公司;AL204-IC 电子天平:梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;DK-98-11A 电热恒温水浴锅:天津市泰斯特仪器有限公司;Varioskan Flash 全波长多功能酶标仪:美国 Thermo 公司;PHS-3C pH 计:上海仪电科学仪器股份有限公司;DP-406DG 真空冷冻干燥机:无锡德普仪器制造有限公司。

1.3 方法

1.3.1 槟榔提取物的制备

采收 5 个~6 个月果龄的槟榔鲜果,对半切开,60 $^{\circ}\text{C}$ 烘干,将槟榔壳及槟榔籽分别粉碎后备用。槟榔花采收后 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘干,备用。粉碎后的样品以水作为提取溶剂,超声波辅助法提取。取样品 10 g,料液比 1:10(g/mL),超声波频率 40 kHz,超声提取时间 30 min/次,提取后 400 目纱布过滤,提取 3 次,合并滤液,15 000 r/min 离

心 30 min, 收集上清, 冷冻干燥后, 得到提取物粉末, 称重后计算提取物得率。

提取物得率/%=冷冻干燥后各样品粗提物的重量(g)/样品的质量(g) $\times 100$

1.3.2 提取物中多酚及多糖含量的测定

各样品提取物中多酚含量的测定采用福林酚法, 参照文献[9]中的方法进行, 多酚含量以儿茶素当量计算。多糖含量的测定采用苯酚-硫酸法, 参照文献[10]中的方法进行, 其中以葡萄糖作为对照标准品。

1.3.3 α -葡萄糖苷酶活性抑制试验

槟榔提取物对 α -葡萄糖苷酶活性抑制试验方法参考 Xu 等^[14]的方法, 并稍作改动。采用 0.1 mol/L 的磷酸盐缓冲液 (phosphate buffered saline, PBS, pH6.8) 配制 α -葡萄糖苷酶液 (0.04 U/mL) 及底物 PNPG 溶液 (0.5 mmol/L)。取 40 μ L 酶液和 40 μ L 样品于试管中, 37 $^{\circ}$ C 水浴 5 min, 加入 20 μ L PNPG 底物溶液, 将反应体系置于 37 $^{\circ}$ C 水浴 30 min 后加入 50 μ L Na_2CO_3 溶液 (0.2 mol/L) 终止反应, 室温 (25 $^{\circ}$ C) 5 min 后采用酶标仪于 405 nm 处测定吸光值 A。同时设置空白组、空白对照组、样品背景对照组。阿卡波糖作为阳性对照。根据上述反应程序及表 1 中不同组别的反应体系, 分别加入相应试剂进行反应。每个样品设置 3 个重复, 计算抑制率。

$$\text{抑制率}/\%=[1-(A_1-A_2)/(A_3-A_0)]\times 100$$

式中: A_3 为空白组吸光值; A_0 为空白对照组吸光值; A_1 为样品作用组吸光值; A_2 为背景对照组吸光值。

表 1 α -葡萄糖苷酶活性抑制试验反应体系

Table 1 Reaction system of inhibition activity against α -glucosidase

组别	酶液	抑制剂	PBS	PNPG	Na_2CO_3
样品作用组	40	40	0	20	50
背景对照组	0	40	40	20	50
空白组	40	0	40	20	50
空白对照组	0	0	80	20	50

1.3.4 对 α -葡萄糖苷酶抑制作用的动力学试验

动力学试验参照文献[12]中的方法进行, 并稍作修改。固定底物 PNPG 的浓度 (0.5 mmol/L), 改变 α -葡萄糖苷酶的浓度 (0、0.04、0.08、0.12、0.16、0.20 U/mL), 添加不同浓度的槟榔提取物, 其中槟榔壳及槟榔花提取物的作用浓度为 0、2、4、6 mg/mL, 槟榔籽提取物的作用浓度为 0、1、2、3 μ g/mL, 采用酶标仪 405 nm 处测定反应体系的吸光值, 并计算酶反应速率 $V(\Delta A/\text{min})$ 。根据酶反应速率与酶浓度之间的变化关系作图, 判断其

抑制类型是否可逆。

固定 α -葡萄糖苷酶浓度 (0.04 U/mL), 改变抑制剂浓度 (槟榔壳提取物浓度 0、2、4 mg/mL, 槟榔籽提取物的作用浓度为 0、2、3 μ g/mL, 槟榔花提取物浓度为 0、4、6 mg/mL), 改变底物 PNPG 的浓度 (0.5、1、1.5、2、2.5、3、5 mmol/L), 测定其反应体系的反应速率 V , 以 $(1/V)$ 为纵坐标, 以反应时间的倒数 $(1/[S])$ 为横坐标, 绘制 Lineweaver-Burk 双倒数曲线, 确定不同槟榔提取物对 α -葡萄糖苷酶活性的可逆抑制类型。

1.3.5 数据分析

所有试验数据均为 3 次平行试验, 测试结果以均值 $\pm$ 标准差来表示。采用 SPSS 17.0 软件进行 IC_{50} 的计算及统计分析, $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 槟榔提取物中多酚及多糖含量分析

槟榔提取物中多酚、多糖的含量见表 2。

表 2 槟榔提取物中多酚、多糖的含量

Table 2 Content of polyphenols and polysaccharides in areca nut extracts

样品	提取物得率/%	多酚含量/ (mg/g 提取物)	多糖含量/ (mg/g 提取物)
槟榔壳提取物	15.98 $\pm$ 0.75 ^c	26.48 $\pm$ 1.47 ^c	221.91 $\pm$ 5.15 ^b
槟榔籽提取物	46.75 $\pm$ 1.06 ^a	441.73 $\pm$ 4.79 ^a	411.47 $\pm$ 6.01 ^a
槟榔花提取物	22.10 $\pm$ 0.74 ^b	31.95 $\pm$ 1.54 ^b	141.55 $\pm$ 4.07 ^c

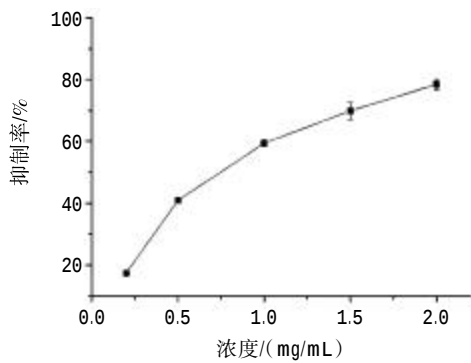
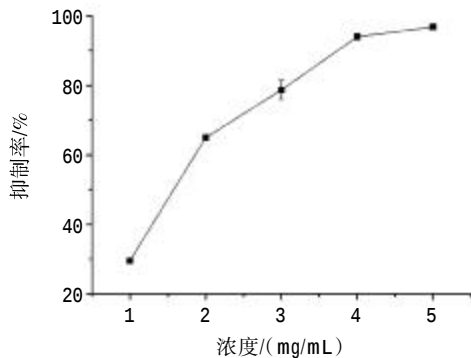
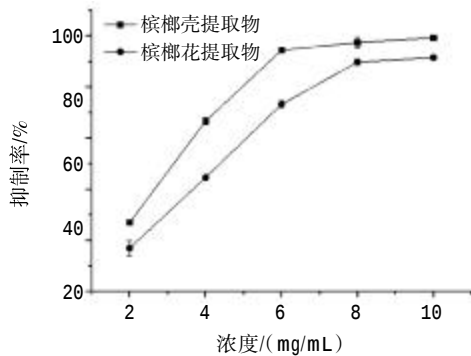
注: 同列字母不同表示差异显著, $P<0.05$ 。

由表 2 可知, 槟榔壳、槟榔籽和槟榔花提取物的得率分别为 (15.98 $\pm$ 0.75)%、(46.75 $\pm$ 1.06)% 和 (22.10 $\pm$ 0.74)%, 其中槟榔籽提取物得率最高。槟榔籽提取物中多酚和多糖的含量分别为 (441.73 $\pm$ 4.79) mg/g 和 (411.47 $\pm$ 6.01) mg/g, 也比槟榔花及槟榔壳提取物的含量高。大量文献报道多酚类物质、多糖类物质具有 α -葡萄糖苷酶活性抑制作用^[13-16]。

2.2 槟榔提取物对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制作用

槟榔提取物对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制作用见图 1~图 3。

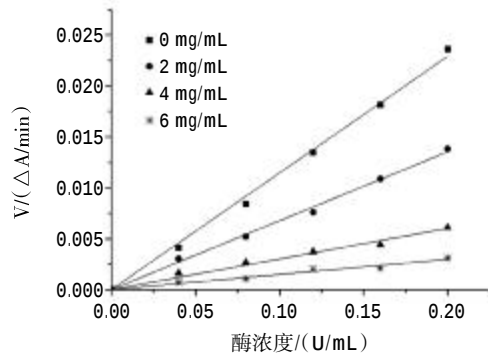
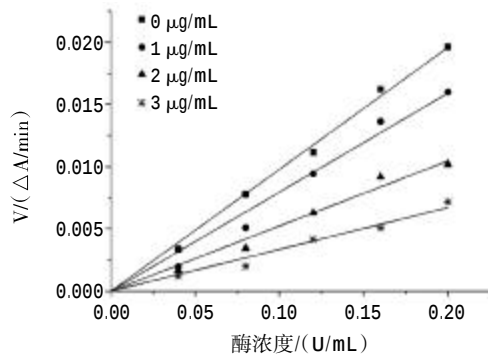
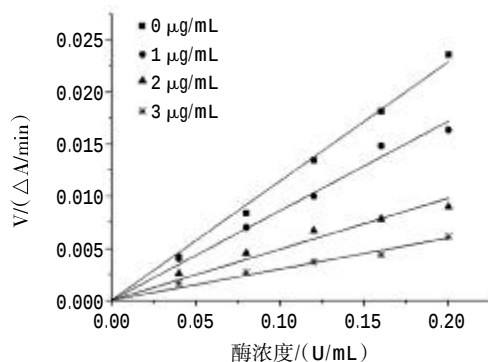
由图 2 和图 3 可知, 槟榔壳、槟榔籽和槟榔花对 α -葡萄糖苷酶的活性均具有抑制作用, 且呈浓度依赖性。槟榔籽提取物对 α -葡萄糖苷酶活性具有较强的抑制作用, 随着槟榔籽提取物质量浓度的增加, 抑制率也逐渐增加, 在试验浓度范围内, 槟榔籽提取物对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制率高达 (96.82 $\pm$ 0.19)%, 远远高于阿卡波糖对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用 (图 1), 两者的

图1 阳性对照阿卡波糖对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制作用Fig.1 Inhibitory effect of acarbose (positive control) on the activity of α -glucosidase图2 槟榔籽提取物对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制作用Fig.2 Inhibitory effect of areca seed extract on the activity of α -glucosidase图3 槟榔壳、槟榔花提取物对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制作用Fig.3 Inhibitory effect of areca husk and areca flower extracts on the activity of α -glucosidase

IC_{50} 值分别为 $(1.50 \pm 0.31) \mu\text{g/mL}$ 和 $(0.71 \pm 0.09) \text{mg/mL}$ 。槟榔壳和槟榔花提取物对 α -葡萄糖苷酶的 IC_{50} 值分别为 $(2.87 \pm 0.48) \text{mg/mL}$ 和 $(4.00 \pm 0.53) \text{mg/mL}$, 效果均弱于阿卡波糖。但比文献报道的黑茶多酚提取物^[17](IC_{50} 为 4.190 mg/mL)、蛹虫草多糖^[18](IC_{50} 为 4.22 mg/mL)等活性要好。

2.3 槟榔提取物对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制作用类型

根据酶与抑制剂结合的特点,抑制类型可分为可逆抑制与不可逆抑制。当反应体系中有可逆抑制剂存在时,得到的直线通过原点,但斜率小于无抑制剂时的直线斜率,当体系中存在不可逆抑制剂时,得到的直线不通过原点^[19]。槟榔提取物对 α -葡萄糖苷酶的抑制动力学曲线见图4~图6。

图4 槟榔壳提取物对 α -葡萄糖苷酶的抑制动力学曲线Fig.4 Kinetics curves of inhibition on α -glucosidase of areca husk extract图5 槟榔籽提取物对 α -葡萄糖苷酶的抑制动力学曲线Fig.5 Kinetics curves of inhibition on α -glucosidase of areca seed extract图6 槟榔花提取物对 α -葡萄糖苷酶的抑制动力学曲线Fig.6 Kinetics curves of inhibition on α -glucosidase of areca flower extract

由图 4、图 5 和图 6 可知,酶浓度与反应速率的直线均通过原点,因此,槟榔壳、槟榔籽和槟榔花提取物对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制作用类型均为可逆抑制。

2.4 槟榔提取物对 α -葡萄糖苷酶活性的可逆抑制作用类型

可逆性抑制类型一般分为 4 种类型^[20],分别为竞争性抑制、非竞争性抑制、反竞争性抑制和混合型抑制。混合型抑制又包括竞争与非竞争的混合型、竞争与反竞争的混合型 2 种。固定 α -葡萄糖苷酶浓度,改变反应体系中提取物和 PNPg 的浓度,测定体系反应速率,绘出 Lineweaver-Burk 双倒数曲线,见图 7、图 8 和图 9。根据双倒数图,可计算有无提取物样品时的反应体系的米氏常数 K_m 和最大反应速率 V_{max} ,通过比较两者的变化,即可推断出可逆抑制类型。槟榔提取物对 α -葡萄糖苷酶的抑制动力学参数见表 3。

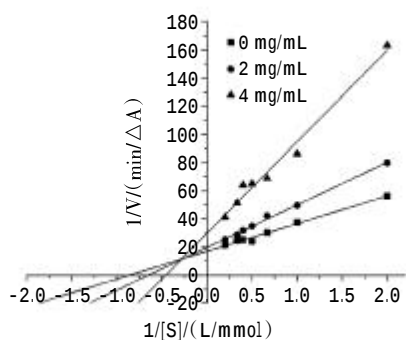


图 7 槟榔壳提取物对 α -葡萄糖苷酶抑制作用的 Lineweaver-Burk 曲线

Fig.7 Lineweaver-burk curve of areca husk extract for inhibiting α -glucosidase

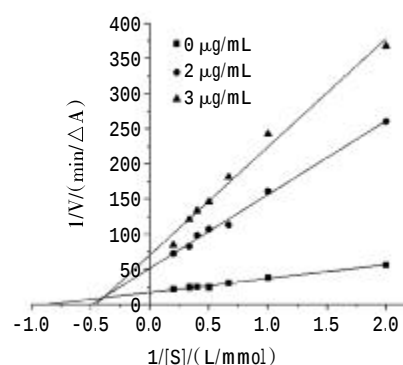


图 8 槟榔籽提取物对 α -葡萄糖苷酶抑制作用的 Lineweaver-Burk 曲线

Fig.8 Lineweaver-burk curve of areca seed extract for inhibiting α -glucosidase

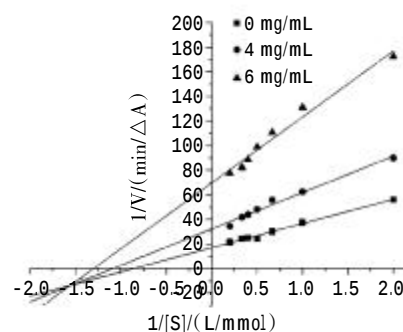


图 9 槟榔花提取物对 α -葡萄糖苷酶抑制作用的 Lineweaver-Burk 曲线

Fig.9 Lineweaver-burk curve of areca flower extract for inhibiting α -glucosidase

由图 7 和图 8 可看出,体系中存在不同浓度槟榔壳及槟榔籽提取物时,各直线与空白组相交于第二象

表 3 槟榔提取物对 α -葡萄糖苷酶的抑制动力学参数

Table 3 Kinetic parameters of inhibition of α -glucosidase by areca nut extract

样品	样品浓度/(mg/mL)	拟合方程	R^2	K_m /(mmol/L)	V_{max} /(ΔA /min)
对照组		$y=19.68x+16.96$	0.990	1.16	0.059
槟榔壳提取物	2	$y=30.25x+19.67$	0.996	1.54	0.051
槟榔壳提取物	4	$y=64.97x+29.84$	0.977	2.18	0.034
槟榔籽提取物	2×10^{-3}	$y=105.00x+51.27$	0.994	2.05	0.020
槟榔籽提取物	3×10^{-3}	$y=154.13x+70.05$	0.983	2.20	0.014
槟榔花提取物	4	$y=29.63x+32.22$	0.980	0.92	0.031
槟榔花提取物	6	$y=53.63x+69.69$	0.972	0.77	0.014

限,随着抑制剂浓度的增大,米氏常数 K_m 逐渐升高,而最大反应速率 V_{max} 逐渐降低(表 3),这种现象属于竞争与非竞争的混合型抑制的特点^[20],因此槟榔壳和槟榔籽提取物对酶活性的抑制作用属于竞争与非竞争的混合型抑制类型。由图 9 可知,体系中存在不同浓度槟榔花提取物时,各直线与空白组相交于第三象

限,随着抑制剂浓度的增大,米氏常数 K_m 逐渐降低,最大反应速率 V_{max} 也逐渐降低(表 3),这种现象属于竞争与反竞争的混合型抑制的特点^[20],因此,槟榔花提取物对酶活性的抑制作用属于竞争与反竞争的混合型抑制类型。槟榔壳、槟榔籽与槟榔花提取物对 α -葡萄糖苷酶的抑制类型不同,说明其与酶的结合位点不同。

试验结果同文献中岩藻黄素^[24]、焦栲酸^[22]、老鹰茶乙醇提取物^[23]等对 α -葡萄糖苷酶的抑制类型一致,均为混合型抑制。与茨种皮多酚^[22](竞争性抑制)、绿茶多酚^[24]和红松球鳞片多酚^[29](非竞争性抑制)抑制类型有所不同。

3 结论

本研究对不同槟榔提取物进行了体外抑制 α -葡萄糖苷酶活性的研究,试验结果证明,槟榔壳、槟榔籽和槟榔花提取物均具有较好的 α -葡萄糖苷酶活性抑制作用,其中槟榔籽提取物对酶活性的抑制作用远远高于阳性对照阿卡波糖。通过动力学试验发现,槟榔壳及槟榔籽提取物对酶活性的抑制作用类型为竞争与非竞争的混合型抑制,而槟榔花提取物对酶活性的抑制作用类型为竞争与反竞争的混合型抑制。

本研究结果表明,槟榔提取物在开发成辅助降血糖的保健食品或药品方面具有良好的潜力,但槟榔提取物中成分复杂,发挥功效作用的主要是多酚还是多糖,主要单体成分是什么,下一步将进行研究,同时对其在体内的作用机制做进一步深入的研究。本研究对于提高槟榔产品的附加值和槟榔资源的高效利用具有重要意义。

参考文献:

- [1] KAKU K. Efficacy of voglibose in type 2 diabetes[J]. Expert Opinion on Pharmacotherapy, 2014,15(8): 1181-1190
- [2] 李志华. 苹果多酚的提取、分离及降血糖活性成分研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014
- [3] 苏尧尧. 垂柳叶葡萄糖苷酶抑制剂的分离及活性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014
- [4] 张丙云, 苏丹, 郭涛, 等. 竹叶乙醇提取物对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用及其机理研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(21): 345-348
- [5] 陈卫军, 黄玉林. 槟榔生物活性研究进展[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014
- [6] CHAVAN Y, SINGHAL RS. Ultrasound-assisted extraction (UAE) of bioactives from arecanut (*Areca catechu* L.) and optimization study using response surface methodology[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 17: 106-113
- [7] 曾义鑫. 槟榔多酚提取、纯化及组分分析[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012
- [8] 祁静. 槟榔酚类化合物的提取、抗氧化及抗疲劳作用研究[D]. 海口: 海南大学, 2010
- [9] 韩林. 槟榔中抗氧化成分的提取及分离研究[D]. 海口: 海南大学, 2010
- [10] 王晶, 王春国, 李冰, 等. 苯酚-硫酸法测定慈姑中多糖的含量[J]. 吉林中医药, 2017, 37(12): 1258-1260
- [11] XU Y, NIU X, LIU N, et al. Characterization, antioxidant and hypoglycemic activities of degraded polysaccharides from blackcurrant (*Ribes nigrum* L.) fruits[J]. Food Chemistry, 2018, 243: 26-35
- [12] 伍城颖, 吴启南, 王红, 等. 茨种皮多酚提取物体外抑制 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶活性研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(16): 91-94
- [13] LIU S, AI Z, QU F, et al. Effect of steeping temperature on antioxidant and inhibitory activities of green tea extracts against α -amylase, α -glucosidase and intestinal glucose uptake[J]. Food Chemistry, 2017, 234: 168-173
- [14] PARK SR, KIM JH, JANG HD, et al. Inhibitory activity of minor phlorotannins from *Ecklonia cava* on α -glucosidase[J]. Food Chemistry, 2018, 257: 128-134
- [15] 黄菲, 张瑞芬, 董丽红, 等. 荔枝果肉多糖级分的抗氧化和 α -葡萄糖苷酶抑制活性研究[J]. 食品科学技术学报, 2016, 34(4): 26-30
- [16] XU Y, GUO Y, GAO Y, et al. Separation, characterization and inhibition on α -glucosidase, α -amylase and glycation of a polysaccharide from blackcurrant fruits[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 93: 16-23
- [17] TONG DP, ZHU KX, GUO XN, et al. The enhanced inhibition of water extract of black tea under baking treatment on α -amylase and α -glucosidase[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 107: 129-136
- [18] 朱振元, 刘晓翠, 郭蓉, 等. 蛹虫草多糖对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制研究[J]. 现代食品科技, 2014, 30(12): 55-60
- [19] 李波, 包怡红, 高峰, 等. 红松球鳞片多酚对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制作用[J]. 食品工业科技, 2015, 36(1): 63-65, 69
- [20] 肖会芝. 天然多酚对胰蛋白酶和 α -葡萄糖苷酶抑制机制的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016
- [21] ZAHARUDIN N, STAERK D, DRAGSTED LO. Inhibition of α -glucosidase activity by selected edible seaweeds and fucoxanthin[J]. Food Chemistry, 2019, 270: 481-486
- [22] ZHENG L, LEE J, YUE LM, et al. Inhibitory effect of pyrogallol on α -glucosidase: Integrating docking simulations with inhibition kinetics[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 112: 686-693
- [23] 苟琳, 钟昱阳, 阳艺, 等. 老鹰茶乙醇提取物对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2016, 55(6): 842-846
- [24] YA S, SHAO H, ZHOU Z, et al. Non-extractable polyphenols of green tea and their antioxidant, anti- α -glucosidase capacity, and release during in vitro digestion[J]. Journal of Functional Foods, 2018, 42: 129-136

收稿日期: 2018-11-02