

罗汉果皂甙粗提物的 α -葡萄糖苷酶体外抑制活性研究

杨文康,李 超,喻柯柯,刘合生,戚向阳*
(浙江万里学院生物与环境学院,浙江宁波 315100)

摘要:目的:研究罗汉果皂甙粗提物对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制作用。方法:通过利用荧光光谱法和分光光度法探讨罗汉果皂甙粗提物体外抑制 α -葡萄糖苷酶的效果。结果:罗汉果皂甙粗提物对 α -葡萄糖苷酶具有一定的抑制作用,其 IC_{50} 值为9.125 mg/mL。动力学分析及荧光光谱法分析表明,罗汉果皂甙粗提物对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用为混合型抑制,对 α -葡萄糖苷酶内源性荧光产生强烈的静态猝灭作用。结论:罗汉果皂甙粗提物对 α -葡萄糖苷酶具有抑制作用,提示罗汉果在降血糖产品开发方面具有较好的应用前景。
关键词:罗汉果皂甙, α -葡萄糖苷酶抑制活性,荧光猝灭,抑制动力学

Inhibitory effect of mogrosides crude extract on α -glucosidase *in vitro*

YANG Wen-kang, LI Chao, YU Ke-ke, LIU He-sheng, QI Xiang-yang*
(College of Biological and Environmental Sciences, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100, China)

Abstract: Objective: The inhibitory effect of mogrosides crude extract on the activity of α -glucosidase was studied. Methods: The fluorescence spectroscopy methods and spectrophotometry were used for analysis the inhibitory activity of mogrosides crude extract on α -glucosidase. Results: The mogrosides crude extract had inhibitory effect on α -glucosidase with 9.125 mg/mL IC_{50} value. The kinetic and fluorescence spectroscopy analysis showed that the inhibition effect of mogrosides crude extract on α -glucosidase belonged to mixed inhibition, which had strong static quenching effect on the intrinsic fluorescence of α -glucosidase. Conclusion: The mogrosides crude extract had inhibitory effect on the α -glucosidase activity, which indicated that mogrosides crude had good application prospects in antidiabetic product development.
Key words: mogrosides; α -glucosidase inhibitory activity; fluorescence quenching; inhibitory kinetics
中图分类号: TS255.1 文献标识码: A 文章编号: 1002-0306(2016)24-0111-05
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2016.24.013

糖尿病是以持续高血糖为基本生化特征的一种综合病症。临床上将糖尿病分为两种类型:Ⅰ型糖尿病和Ⅱ型糖尿病,多数患者属于Ⅱ型糖尿病,其主要是由于体内胰岛素分泌相对或绝对不足所致或外周组织对葡萄糖利用减少的一种综合病症^[1],糖尿病患者长期高血糖的情况下可产生多种并发症^[2]。现今所报道的各类降糖物质的机制有所差异,常为多靶点、多效应、多途径的协同作用,目前 α -葡萄糖苷酶抑制剂类药物已被广泛应用于临床,被公认为是控制Ⅱ型糖尿病的理想途径。 α -葡萄糖苷酶抑制剂的作用原理: α -葡萄糖苷酶抑制剂是通过可逆占据 α -葡萄糖苷酶与糖结合位点,抑制 α -葡萄糖苷酶活性,从而降低多糖降解,延缓肠道对碳水化合物吸收,达到降血糖及减少其并发症的目的。现今临床上应用的 α -葡萄糖苷酶抑制类药物主要有:伏格列

波糖、阿卡波糖和米格列醇等^[3]。但由于阿卡波糖等 α -葡萄糖苷酶抑制类药物为合成药物,服用后部分人群会出现恶心、呕吐等不良反应^[4],因此,研究者开始着手于从天然药用植物中探索筛选出 α -葡萄糖苷酶抑制剂,以期研制安全、有效、无毒副作用的药物^[5]。
罗汉果(*Siraitia grosvenorii* (swingle) C. Jeffrey)为广西特色中药,性凉,味甘,有止咳祛痰、抗氧化、保肝、增强免疫、调节血脂、抑菌、解痉、泻下及降血糖等作用^[6]。研究表明,强甜味的非糖物质三帖类成分罗汉果皂甙(mogroside)是其主要的有效成分,具有多种生物活性^[7]。近年来,关于皂甙类降血糖作用已有较多的研究报道^[8],安家伟^[9]研究发现美国豆芽花部位中含有较高含量皂苷类化合物,对 α -葡萄糖苷酶活性具有较强的抑制作用;全吉淑等^[10]研究发现

收稿日期:2016-06-13
作者简介:杨文康(1991-),男,硕士研究生,研究方向:天然产物化学与功能食品,E-mail:478945176@qq.com。
*通讯作者:戚向阳(1968-),女,博士,教授,研究方向:天然产物化学,E-mail:qixiangyang85@sina.com。
基金项目:国家自然科学基金项目(31171780);浙江省生物工程重中之重学科学生创新项目(CX2015006)。

大豆皂甙单体对酵母 α -葡萄糖苷酶活性有很强的抑制作用,且呈明显的剂量依赖性关系,属非竞争性抑制;陈丽华等^[11]研究表明虎杖甙对于 α -葡萄糖苷酶的抑制类型为非竞争性抑制,而知母皂甙对于 α -葡萄糖苷酶的抑制类型属竞争性抑制。目前关于罗汉果皂甙降血糖方面,有研究表明^[12]罗汉果皂甙粗提物在高血糖环境中能有效地保护血管的内皮细胞,增强血管自身的舒张因子功能。周英等^[13]发现罗汉果提取物对于在体外培养的胰岛 β 细胞具有刺激其胰岛素分泌的作用。Suzuk 等^[14]认为罗汉果提取物有抑制麦芽糖酶的活性,从而能抑制大鼠进食麦芽糖后的血糖生成。何伟平等^[15]研究发现罗汉果皂甙能降低血清中游离脂肪酸,并减轻糖尿病发展过程中的氧化应激,减轻血管内皮损伤。本实验室的前期研究表明罗汉果皂甙粗提物对于糖尿病小鼠具有降血糖、降血脂、调节免疫及抗氧化功能^[16]。而有关罗汉果粗提物对 α -葡萄糖苷酶抑制作用的相关研究尚未见有关报道。本文探究了罗汉果皂甙提取物对于 α -葡萄糖苷酶抑制作用及其机制,为罗汉果资源的深度开发及其降血糖相关机制研究提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料及仪器

罗汉果皂甙粗提物 实验室自提^[17];4-硝基- α -D-吡喃葡萄糖苷、 α -葡萄糖苷酶 均购于美国 Sigma 公司;阿卡波糖 购于德国拜耳公司;其它试剂 均为国产分析纯。

Synergy™ HT 超级多功能酶标仪 美国 Biotek 公司;Infinite 200 PRO NanoQuant 酶标仪 瑞士 Tecan 集团公司。

1.2 实验方法

1.2.1 罗汉果皂甙粗提物对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用研究 参照文献^[18]描述方法,稍作修改。筛选模型是以 4-硝基- α -D-吡喃葡萄糖苷 (PNPG) 作为底物所建立的反应体系,同时做样品、本底、对照实验,每组设 3 个平行。于 96 孔板中加入 α -葡萄糖苷酶 (0.32 U/mL, 10 μ L)、pH = 6.8 的磷酸盐缓冲溶液 (50 μ L) 与不同浓度样品溶液 (10 μ L) 于 37 $^{\circ}$ C 中恒温箱中孵育 10 min,之后于体系中加入 4-硝基- α -D-吡喃葡萄糖苷 (PNPG) (10 μ L, 2.5 mmol/L),放入 37 $^{\circ}$ C 恒温 Tecan Infinite 200 PRO NanoQuant 酶标仪中反应 15 min,用 NaOH (20 μ L 0.2 mol/mL) 溶液来终止整个反应体系,于 405 nm 波长下测定其吸光值。阿卡波糖为阳性对照。IC₅₀ 是酶活性被抑制 50% 时的抑制剂浓度。

按照下列公式计算 α -葡萄糖苷酶的抑制率:

$$\alpha\text{-葡萄糖苷酶抑制率}(\%) = \frac{A_B - (A_S - A_0)}{A_B}$$

式(1)

式中, A_B - 对照组吸光值; A_S - 样品组吸光值; A_0 - 本底组吸光值。

1.2.2 酶促动力学研究 在不改变 α -葡萄糖苷酶浓度 (0.32 U/mL) 条件下,选取不同浓度 PNPG (0.5、

1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 mmol/L) 为底物,之后加入不同浓度的罗汉果皂甙粗提物 (0、5、10、15、20、25 mg/mL),测定 α -葡萄糖苷酶的酶促反应速率 (V),作 A-t 图,再以 $1/[S]$ 为横坐标, $1/V$ 为纵坐标作图,得到在无添加或添加不同浓度罗汉果皂甙粗提物时, α -葡萄糖苷酶的 Lineweaver-Burk 双倒数图,计算出无添加或添加不同浓度罗汉果皂甙粗提物对 α -葡萄糖苷酶抑制的米氏常数。对罗汉果皂甙粗提物进行抑制类型分析。按公式(2) 计算其最大反应速率 $V_{\max}$ 和米氏常数 K_m 。

$$V = \frac{V_{\max} [S]}{K_m + [S]} \quad \text{式(2)}$$

1.2.3 罗汉果皂甙粗提物对 α -葡萄糖苷酶的荧光猝灭作用 参照文献^[18-20]方法,略作修改。以 287 nm 为激发波长, 335.6 nm 为发射波长,分析光程为 10 mm、激发与发射波长之间狭缝宽度为 5 nm、波长为 250~550 nm 范围中 α -葡萄糖苷酶 (0.5 U/mL) 与不同浓度罗汉果皂甙粗提物 (0、2、4、6、10、14 mg/mL) 混合反应 15 min 后体系荧光发射光谱的强度,并以相应浓度的罗汉果皂甙粗提物溶液为本底组, α -葡萄糖苷酶 (0.5 U/mL) 为对照组。测量 298、303、310 K 三个温度条件下不同浓度罗汉果皂甙粗提物对 α -葡萄糖苷酶活性的影响。

1.2.4 数据分析 所有实验均重复 3 次,各组数据用实验结果的平均值 $\pm$ 标准差表示,使用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析,使用 Origin 8.0 进行作图分析。

2 结果与分析

2.1 罗汉果皂甙粗提物抑制 α -葡萄糖苷酶活性研究

由图 1 可知,在一定实验浓度范围内,阿卡波糖和罗汉果皂甙粗提物对 α -葡萄糖苷酶均有一定的抑制作用,且其抑制效果与质量浓度间呈现正效应关系,阿卡波糖的 IC₅₀ 值为 0.212 mg/mL,罗汉果皂甙粗提物的 IC₅₀ 值为 9.125 mg/mL,实验结果表明罗汉果皂甙粗提物对 α -葡萄糖苷酶有一定的抑制效果。

2.2 罗汉果皂甙粗提物对 α -葡萄糖苷酶活性抑制的动力学分析

据相关文献报道^[21],采用 Lineweaver-Burk 的双倒数作图,若得到一组斜率不同且相交于 Y 轴的直线,其最大的反应速率 $V_{\max}$ 不变,米氏常数 K_m 增大时,便为竞争性抑制;若得到一组斜率不同并且相交于 X 轴的直线,最大反应速率 $V_{\max}$ 减小,米氏常数 K_m 不变,便为非竞争性抑制;若得到一组斜率不同,相交于第二或第三象限的直线,最大反应速率 $V_{\max}$ 减小,米氏常数 K_m 增大或减小,便为混合型抑制;若获得一组平行直线,最大反应速率 $V_{\max}$ 与米氏常数 K_m 均减小,便为反竞争性抑制。由图 2 和表 1 可知,罗汉果皂甙粗提物有明显的 α -葡萄糖苷酶抑制活性,随着罗汉果皂甙粗提物浓度的增加,最大反应速率 $V_{\max}$ 减小,米氏常数 K_m 值增大,由此推断它对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用类型为混合型抑制。

表1 罗汉果皂甙粗提物对α-葡萄糖苷酶抑制作用的 Lineweaver-Burk 曲线方程
Table 1 Lineweaver-Burk plot equation for inhibition of mogrosides crude extract on α-glucosidase

	浓度 (mg/mL)	线性回归方程		R^2	$V_{\max}$ (OD/min)	K_m (mmol/L)
		斜率	截距			
对照组	0	52.79	57.20463	0.9864	0.0174	0.9228
罗汉果皂甙粗提物	10	68.54513	58.81924	0.96095	0.0170	1.1654
	20	109.69112	61.23456	0.95811	0.0163	1.7913

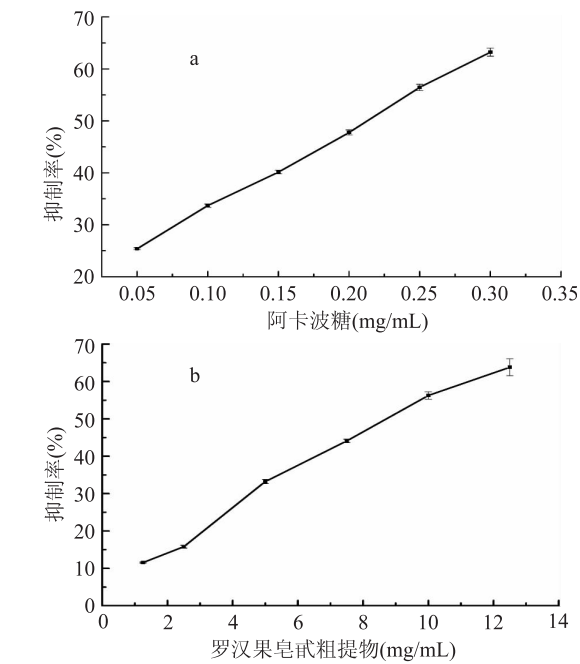


图1 阿卡波糖(a)及罗汉果皂甙粗提物(b)对α-葡萄糖苷酶的抑制效果
Fig.1 Inhibitory effects of acarbose(a) and mogrosides crude extract(b) on α-glucosidase

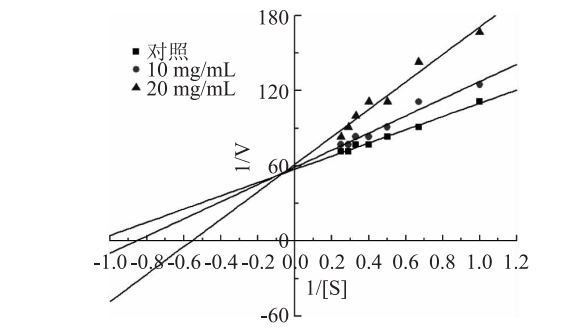


图2 罗汉果皂甙粗提物对α-葡萄糖苷酶抑制作用的 Lineweaver-Burk 曲线
Fig.2 Lineweaver-Burk plot for inhibition of mogrosides crude extract on α-glucosidase

2.3 罗汉果皂甙粗提物对α-葡萄糖苷酶的荧光猝灭作用

蛋白质的内源荧光的产生主要是由色氨酸和酪氨酸的作用^[22]。图3、图4为罗汉果皂甙粗提物对α-葡萄糖苷酶的内源荧光猝灭光谱。激发波长为287 nm时,α-葡萄糖苷酶的荧光峰位于335.6 nm。于荧光光谱扫描图中可以得知小分子物质在α-葡萄糖苷酶荧光峰附近有荧光发射峰,随着罗汉果皂甙粗提物浓度的增大,α-葡萄糖苷酶的荧光发射峰的强度

逐渐地降低,并且罗汉果皂甙粗提物使α-葡萄糖苷酶的最大发射波长发生红移,可以推断罗汉果皂甙粗提物与α-葡萄糖苷酶之间发生了相互作用。

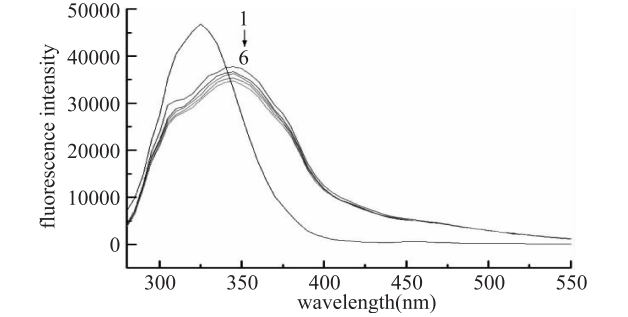


图3 在310 K下罗汉果皂甙粗提物对α-葡萄糖苷酶荧光的猝灭作用
Fig.3 The quenching effects of mogrosides crude extract on the fluorecence of α-glucosidase at 310 K
注:1~6:罗汉果皂甙粗提物浓度分别为0、2、4、6、10、14 mg/mL。

2.4 荧光猝灭机制

荧光猝灭机制^[23]主要有非辐射能量、动态猝灭和静态猝灭转移三种:动态猝灭指激发态荧光分子与猝灭剂之间的相互作用使荧光发生猝灭;基态荧光分子与猝灭剂之间通过弱结合生成复合物,且该复合物使荧光完全猝灭的现象称为静态猝灭,猝灭过程符合 Stern-Volmer 方程^[24]。

$$\frac{F_0}{F} = 1 + K_{sv} [Q] = 1 + K_q \tau_0 [Q]$$

式(3)

其中: F_0 、 F 分别表示α-葡萄糖苷酶与罗汉果皂甙粗提物反应前后的荧光强度; $[Q]$ 为罗汉果皂甙粗提物的浓度; τ_0 为不含猝灭剂时荧光分子的平均寿命;对于生物大分子 $\tau_0 \approx 10^{-8}$ s; K_{sv} 为猝灭常数,动态猝灭常数随着温度的上升而升高,静态猝灭常数随着温度的上升而降低。由图4中 $F_0/F \sim [Q]$ 可计算出罗汉果皂甙粗提物与α-葡萄糖苷酶作用的猝灭常数和相关系数,结果见表2。

表2 罗汉果皂甙粗提物与α-葡萄糖苷酶作用的动态猝灭常数 K_{sv} 和相关系数

Table 2 Stern-Volmer quenching constant and parameters of the interaction between mogrosides crude extract and α-glucosidase				
样品	pH	T(K)	K_{sv} (mL/mg)	R^2
罗汉果皂甙粗提物	6.8	298	0.4984	0.9874
		303	0.4555	0.9927
		310	0.4187	0.9980

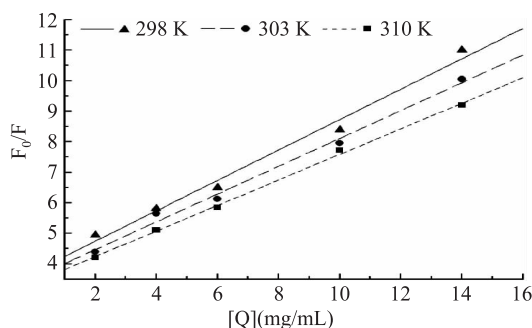


图4 在298,303,310 K下罗汉果皂甙粗提物与 α -葡萄糖苷酶作用的荧光猝灭曲线

Fig.4 Stern-Volmer quenching plot of the interaction between mogrosides crude extract and α -glucosidase at 298 K, 303 K and 310 K

由表2和图4可知,猝灭常数 K_s 随着温度的升高而降低,表明罗汉果皂甙粗提物对 α -葡萄糖苷酶的荧光猝灭作用主要是由于形成了基态复合物而引起的静态猝灭。

3 讨论与结论

α -葡萄糖苷酶在糖类消化以及吸收中发挥着重要的作用^[25],抑制 α -葡萄糖苷酶的活性,可以有效降低餐后血糖浓度,对II型糖尿病的预防及治疗具有积极作用^[26]。近年来通过对酶及抑制剂的结构和它们相互关系的研究认为:这类物质之所以有一定的抑酶活性,其原因可能是酶与底物反应的中间体或碳氧离子过渡态类似物,具有恰当的羟基构象、阳离子、三角形的异头碳中心、并有一个共价连接环所形成的半椅状或椅状构型^[27]。Hwangseo^[28]等采用AutoDock program对虚拟筛选得分较高的188个化合物经体外酵母 α -葡萄糖苷酶抑制酶活性实验,发现抑制剂分子与酶催化活性部位的结合主要通过氢键及疏水作用。Bharatham^[29]等采用计算机辅助药物设计GOLD 3.01提出了 α -葡萄糖苷酶抑制剂药效团模型,认为在化合物与酶活性部位的结合中氢键发挥着十分重要的作用。由罗汉果皂甙的结构可推测,通过氢键及疏水作用与酶催化活性部位的结合可能是罗汉果皂甙粗提物对 α -葡萄糖苷酶产生抑制作用的重要原因。罗汉果中有较高含量的皂苷类化合物,具有 α -葡萄糖苷酶抑制活性作用,为潜在天然降血糖产物。在此研究基础上,采用层析手段,进一步分离及纯化其皂苷类化合物单体,研究其具体化学结构及降血糖作用机理,将是下一步研究的重点。

本实验研究表明罗汉果皂甙粗提物表现出一定的 α -葡萄糖苷酶抑制活性($IC_{50} = 9.125 \text{ mg/mL}$)。此外荧光光谱法及动力学分析表明,罗汉果皂甙粗提物与 α -葡萄糖苷酶的相互作用是通过形成基态复合物而引起的静态猝灭进行,其抑制类型为混合型抑制,因此,罗汉果粗提物有望用于 α -葡萄糖苷酶抑制剂的开发。相关性分析结果显示抑制 α -葡萄糖苷酶活性主要与皂甙含量相关。研究结果为罗汉果资源的深度开发、综合利用及降血糖功能食品或医药中间体的开发提供一定理论依据。

参考文献

- [1]程振田,袁祥萍,张心中.糖尿病药物治疗研究进展[J].医学综述,2003,9(10):627-629.
- [2]许曼音,陆广华,陈名道.糖尿病学[M].上海:上海科学技术出版社,2003:12-15.
- [3]王翼,张旭. α -葡萄糖苷酶抑制剂的研究进展[J].海峡药学,2009,21(9):4-5.
- [4]覃志成,柴可夫.中药治疗糖尿病机制的研究进展[J].浙江中医学院学报,2004,28(1):12-15.
- [5]冯长根,陈凌,刘霞.以中草药为来源的 α -葡萄糖苷酶抑制剂筛选研究进展[J].中国新药杂志,2005,14(6):669-672.
- [6]张静,吴友良,张婵娟,等.罗汉果药理活性研究进展[J].中国药业,2010,19(20):84-86.
- [7]陈迪华,斯建勇,常琪,等.天然甜味剂罗汉果的研究与应用[J].天然产物研究与开发,1992,4(1):72-77.
- [8]尹学哲,全吉淑,金泽武道,等.大豆异黄酮和皂苷对糖尿病大鼠抗动脉粥样硬化活性的研究[J].中国预防医学杂志,2004,38(1):26-28.
- [9]安家伟,张有做,高前欣,等.美国豆芋地上部位有效成分及 α -葡萄糖苷酶抑制活性研究[J].核农学报,2014,28(12):2275-2282.
- [10]全吉淑,尹学哲,金明,等.大豆皂苷对 α -葡萄糖苷酶抑制作用的研究[J].中药材,2003,26(9):654-656.
- [11]陈丽华,马庆一,杨冰. α -葡萄糖苷酶抑制剂研究进展[J].食品科技,2005,28(8):91-94.
- [12]谭玉莲,王一涛,许贝文.罗汉果皂苷对大鼠小肠微血管动脉在高糖环境下内皮完整血管的舒张保护作用[J].中药药理与临床,2014,30(5):97-100.
- [13]周英,郑艳,EBERSOLE Jeff,等.罗汉果提取物和罗汉果苷V对胰岛素分泌的调节作用[J].药学学报,2009,44(11):1252-1257.
- [14]YA Suzuki, M Yuji, I Hiroshi, et al. Triterpene glycosides of siraitia grosvenori Inhibit rat intestinal maltase and suppress the rise in blood glucose level after a single oral administration of maltose in rats [J]. J Agric Food Chem, 2005, 53 (8): 2941-2946.
- [15]何伟平,朱晓韵,何超文.罗汉果的功能作用及食品应用研究进展[J].轻工科技,2012,1(1):1-3.
- [16]张俐勤,戚向阳,陈维军,等.罗汉果皂苷提取物对糖尿病小鼠血糖、血脂及抗氧化作用的影响[J].中国药理学通报,2006,22(2):237-240.
- [17]朱慧玲.罗汉果皂甙类化合物的分离、纯化及其抗氧化活性研究[D].武汉:华中农业大学,2014.
- [18]柳余莉,杨文康,刘合生,等.杨梅多酚粗提物对 α -葡萄糖苷酶体外抑制作用的研究[J].果树学报,2016,33(1):59-65.
- [19]YQ Li, FC Zhou, F Gao. Comparative evaluation of quercetin, isoquercetin and rutin as inhibitors of α -glucosidase [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57 (24): 11463-11467.
- [20]YAN J K, ZHANG G W, PAN J H, et al. α -Glucosidase inhibition by luteolin: Kinetics, interaction and molecular docking [J]. International Journal of Macromolecules, 2014, 64 (12): 213-215.
- [21]杨荣武.生物化学原理[M].北京:高等教育出版社,

2012;132-149.

[22] J Tian, J Liu, X Tian, et al. Study of the interaction of kaempferol with bovine serum albumin[J]. Journal of Molecular Structure, 2004, 691(1-3): 197-202.

[23] M Yang, X Xi, P Yang. Thermodynamic analysis of fluorescence enhancement and quenching theory equations [J]. Frontiers of Chemistry in China, 2008, 3(3): 254-261.

[24] ZHANG Xiaowei, ZHAO Fenglin, LI Kean. Progress in the research of the interaction between drug and serum protein *in vitro* [J]. Chemistry Online, 2001, 64(1): 65.

[25] Bischoff H. The mechanism of alpha-glucosidase inhibition in the management of diabetes [J]. Clinical and Investigative Medicine, 1995, 18(4): 303-311.

(上接第104页)

的关键挥发性成分香茅醛、香叶醛、橙花醛等含量均有所下降,导致鲜姜的特有风味有所下降。喷雾干燥和热风干燥处理对生姜的挥发性香气成分造成的影响,有相同之处,也有不同之处,相同之处在于两种处理方式均为干燥处理方式,均导致了香茅醛、香叶醛、橙花醛等成分含量的下降,鲜姜的特有风味的损失。不同之处在于两种干燥方式处理过程不一样,热风干燥过程长时间高温处理,喷雾干燥属于瞬时高温处理,因此造成不同挥发性成分含量的差异。

主成分分析法分析不同干燥样品的挥发性成分,提取了4个主成分,累计方差贡献率达100%,能反映所有变量的原有信息建立香气质量综合评价模型,通过主成分综合得分评价干燥生姜样品的香气品质,结果表明,鲜姜样品综合得分最高,喷雾干燥全姜粉次之。说明鲜姜样品的香气成分是最好的,喷雾干燥处理比热风干燥处理得分更高,说明喷雾干燥处理生姜风味与鲜姜样品更接近,喷雾干燥比热风干燥更能保持鲜姜的风味。

参考文献

[1] 毕金峰. 国内外果蔬粉加工技术与产业现状及展望[J]. 中国食品学报, 2013, 3(13): 8-14.

[2] Bailey-Shaw Y A, Williams L, Junor G, et al. Changes in the contents of oleoresin and pungent bioactive principles of Jamaican ginger (*Zingiber officinale* Roscoe.) during maturation [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(14): 5564-5571.

[3] Wohlmuth H, Smith M K, Brooks L O, et al. Essential oil composition of diploid and tetraploid clones of ginger (*Zingiber officinale* roscoe) grown in Australia [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(4): 1414-1419.

[4] Gong F, Fung Y S, Liang Y Z. Determination of volatile components in ginger using gas chromatography - mass spectrometry with resolution improved by data processing techniques [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(21): 6378-6383.

[5] Variyar P S, Gholap A S, Sharma A. Changes in flavor components in irradiated fresh ginger (*Zingiber officinale*)

[26] Casirola D M, Ferraris R P. alpha-glucosidase inhibitors prevent diet-induced increases in intestinal sugar transport in diabetic mice [J]. Metabolism, 2006, 55(6): 832-841.

[27] 陈海敏, 严小军, 林伟. α -葡萄糖苷酶抑制剂的构效关系 [J]. 中国生物化学与分子生物学报, 2003, 19(6): 780-784.

[28] H Park, KY Hwang, KH Oh, et al. Discovery of novel α -glucosidase inhibitors based on the virtual screening with the homology-modeled protein structure [J]. Bioorg Med Chem, 2008, 16(1): 284-292.

[29] K Bharatham, N Bharatham, KH Park, et al. Binding mode analyses and pharmacophore model development for sulfonamide chalcone derivatives, a new class of α -glucosidase inhibitors [J]. J Mol Graph Model, 2008, 26(8): 1202-1212.

rhizomes during storage [J]. Journal of Herbs, Spices and Medicinal Plants, 2006, 12(12): 25-35.

[6] Phoungchandang S, Saentaweek S. Effect of two stage, tray and heat pump assisted - dehumidified drying on drying characteristics and qualities of dried ginger [J]. Food and Bioproducts Processing, 2010, 17: 335-347.

[7] Chen C C, Ho C T. Volatile compounds in ginger oil generated by thermal treatment [J]. ACS Symposium Series, 1989, 409: 366-375.

[8] 毕金峰, 陈瑞娟. 不同干燥方式对胡萝卜粉微粉品质的影响 [J]. 中国食品学报, 2015, 15(1): 136-141.

[9] 庞雪莉. FD-GC-O 和 OAV 方法鉴定哈密瓜香气活性成分研究 [J]. 中国食品报, 2012, 1(6): 174-181.

[10] John P B, Amanda L J. Effects of drying on flavour compounds in Australian-grown ginger (*Zingiber officinale*) [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2000, 80: 209-215.

[11] 崔俭杰, 李琼. 中国不同产地姜油挥发性成分的对比分析 [J]. 香料香精化妆品, 2011(1): 1-5.

[12] 薛毅, 陈立萍. 统计建模与 R 软件 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

[13] 余锦华, 杨维权. 多元统计分析与应用 [M]. 广州: 中山大学出版社, 2005.

[14] 袁志发, 周静芋. 多元统计分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[15] Ngozichukwuka P Igoli, Zak Obanu. The volatile components of wild ginger (*Siphonochilus aethiopicus* (Schweinf) B. I. Burtt) [J]. African Journal of Food Science, 2011, 5(9): 541-549.

[16] 葛毅强, 倪元颖. 生姜精油的研究新进展 [J]. 中国调味品, 2004(9): 3-9.

[17] S H Ding, K J An. Effect of drying methods on volatiles of Chinese ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) [J]. Food and Bioproducts Processing, 2012, 90: 515-524.

[18] Keiko Yamaguchi, Tatsuo Kato. The effects of high hydrostatic pressure treatment on the flavor and color of grated ginger [J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2010, 74(10): 1981-1986.