

超声耦合亚临界水提取香菇多酚 及对 α -葡萄糖苷酶的抑制

彭汝月¹, 梁淑惠¹, 龚玉石¹, 胡勇¹, 李冬梅¹, 李彦力¹, 严文静², 郭娟^{1*}

(1. 广东药科大学食品学院, 广东中山 528400) (2. 广东东升林药业有限公司, 广东云浮 527300)

摘要: 该文采用超声耦合亚临界水法提取香菇多酚, 考察香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制效果, 并结合荧光光谱法分析香菇多酚体外降糖的抑制作用。结果表明, 香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶的半抑制浓度 IC_{50} 值为 0.41 mg/mL, 在 0.1~1.5 mg/mL 的质量浓度范围内, 香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用呈现剂量依赖性, 并且在香菇多酚质量浓度达 1.5 mg/mL 时, 抑制活性达到 79.22%, 具有与阿卡波糖相近的降糖效果。荧光光谱结果显示, 香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制类型为竞争型抑制, 抑制活性随温度 (298、303、310 K) 的升高而降低, 对 α -葡萄糖苷酶内源性荧光具有静态猝灭作用, 与 α -葡萄糖苷酶的结合位点数为 0.35。综上所述, 香菇多酚能够与 α -葡萄糖苷酶结合从而产生体外降糖活性, 具有开发降糖的香菇类功能性产品的潜力。

关键词: 香菇多酚; α -葡萄糖苷酶; 抑制作用; 动力学分析; 荧光猝灭

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.1.1591

Ultrasonic Coupled Subcritical Water Extration of *Lentinus Edodes* Polyphenol and Inhibition of α -Glucosidase

PENG Ruyue¹, LIANG Shuhui¹, GONG Yushi¹, HU Yong¹, LI Dongmei¹, LI Yanli, YAN Wenjing², GUO Juan^{1*}

(1.College of Food Science, Guangdong Pharmaceutical University, Zhongshan 528400, China)

(2.Guangdong Dongshenglin Pharmaceutical Co., Ltd, Yunfu 527300, China)

Abstract: In this paper, the inhibition effect of *Lentinus edodes* polyphenol on α -glucosidase is investigated by ultrasonic coupled subcritical water method, and the inhibitory effect of *Lentinus edodes* polyphenol hypoglycemia in vitro was analyzed by fluorescence spectrometry. The results showed that the semi-inhibitory concentration IC_{50} value of *Lentinus edodes* polyphenolon α -glucosidase was 0.41 mg/mL, and the inhibitory effect of *Lentinus edodes* polyphenol on α -glucosidase was dose-dependent in the mass concentration range of 0.1~1.5 mg/mL. In addition, when the mass concentration of *Lentinus edodes* polyphenol reached 1.5 mg/mL, the inhibitory activity reached 79.22%, so that the hypoglycemic effect was similar to acarbose. The results of fluorescence spectrum showed that the inhibition type of *Lentinus edodes* polyphenol was competitive inhibition, and the inhibitory activity decreased with the increase of temperature (298, 303, 310 K). The endogenous fluorescence of α -glucosidase had a static quenching effect, and the number of binding sites to α -glucosidase was 0.35. In summary, *Lentinus edodes* polyphenol can bind to α -glucosidase to produce in vitro hypoglycemic activity, which has the potential to develop functional *Lentinus edodes* products with hypoglycemic properties.

Key words: *Lentinus edodes* polyphenol; α -glucosidase; inhibition effect; kinetic analysis; fluorescence quenching

糖尿病是一种常见的代谢性疾病, 由胰岛素分泌不足引起, 对人们的身体健康有巨大的危害, 其中以II型糖尿病最为常见。有诸多研究表明^[1], 通过抑制 α -葡萄糖苷酶降低餐后高血糖可作为治疗II型糖尿病的有效策略, 但 α -葡萄糖苷酶抑制剂药物包括常见的二甲双胍和阿卡波糖长期使用后可能会对人体产生严重的毒副作用。因此, 从植物中寻找天然、安全的 α -葡萄糖苷酶抑制剂用于预防和治疗糖尿病已成为近年来研究的热点^[11]。有学者研究发现, 香菇作为一种容易获得的天然功能食品, 它具有预防和控制糖尿病的治疗潜力, 可以被用于探索开发

收稿日期: 2024-10-27; 修回日期: 2024-12-26; 接受日期: 2025-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12274096); 广东药科大学重点团队项目 (2024ZZ12); 云浮市科技特派员项目 (2022010)

作者简介: 彭汝月 (2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 营养与食品卫生, E-mail: 1940571518@qq.com

通讯作者: 郭娟 (1978-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 天然植物功效成分的提取、分离纯化及功效研究, E-mail: guojuan110@126.com

α -葡萄糖苷酶抑制剂^[13]。

香菇 (*Lentinus edodes*) 是白蘑科真菌香菇子实体, 是近年来我国发展非常迅速的一种食用兼药用农产品, 现已成为食品行业和制药行业的重要资源。香菇营养丰富, 含有蛋白质、维生素和矿物质等多种营养成分和多酚、多糖、膳食纤维等生物活性物质, 因其高蛋白、低脂肪的特性, 已成为许多人的餐桌首选^[12,13]。香菇多酚作为香菇的主要活性成分之一, 不仅可以作为天然的食品防腐剂, 还具有免疫调节、抗病毒、抗菌、抗氧化、抗肥胖以及降血糖等生物活性^[14-18]。国内外相关学者对香菇的降血糖活性进行了积极的探索研究, 但鲜少见到香菇多酚对其降血糖活性的作用机制的研究^[19,20]。

为此, 本文结合亚临界水提取法这种绿色、无化学溶剂残留的提取方法^[21], 以超声耦合亚临界水提取的香菇多酚为研究对象, 采用体外抑制 α -葡萄糖苷酶活性评价其抗糖作用, 并结合动力学实验和荧光光谱法分析香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制类型及与酶的结合特点, 初步判断其抗糖作用机制, 为香菇在降糖食品或药品领域的开发运用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

香菇干, 购于庆元高山农产品批发部, 经粉碎后, 过 100 目筛, 备用。

α -葡萄糖苷酶, 上海玻尔化学试剂有限公司; 福林酚试剂, 上海易恩化学技术有限公司; 阿卡波糖糖片, 德国拜耳公司, 4-硝基苯 α -D-吡喃葡萄糖苷 (4-Nitrophenyl α -D- Glucopyranoside, pNPG), 上海麦克林生化科技有限公司。

1.2 仪器与设备

Bio-tek SynergyTM HT 多功能酶标仪, 美国 Biotek 公司; UV-1900I 荧光分光光度计, 日本岛津制作株式会社; 721N 可见分光光度计, 上海仪电分析仪器有限公司; RE-52AA 旋转蒸发仪, 上海亚荣仪器有限公司; BSA224S 电子分析天平, 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司; HH-zk8 恒温水浴锅, 巩义市予华仪器有限责任公司; ZX-150 多功能粉碎机, 永康市展帆工贸有限公司; LC-10N-50A 真空冷冻干燥机, 上海辰邦西仪科技有限公司; 超声耦合亚临界水提取装置, 实验室自制。

1.3 实验方法

1.3.1 超声耦合亚临界水提取香菇多酚

将准确称取的香菇粉 (m_0) 均匀铺开在 6 层支架箍的纱布层中, 置于提取釜中, 在提取温度 160 °C、提取压力 7 MPa、超声功率 200 W 的条件下提取 20 min 后, 待冷却至常温后, 将提取液从提取釜的底部放出进行收集, 对上述收集液用旋转蒸发仪在真空状态下进行浓缩除去多余的水分得到浓缩液^[22,23], 再对其进行冷冻干燥, 得到香菇多酚粉末 m_1 , 根据下式计算香菇多酚得率:

$$D = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

D ——香菇多酚得率, %;

m_0 ——称取的香菇质量, g;

m_1 ——冻干后香菇多酚的总质量, g。

以没食子酸为标准品, 采用福林酚 (FC) 比色法测定香菇多酚含量^[24], 并根据下式计算香菇多酚含量:

$$H = (C \times V \times N) / m \quad (2)$$

式中:

H ——香菇多酚的含量, mg/g;

C ——香菇多酚总酚的质量浓度, mg/mL;

V ——溶液的体积, mL;

N ——稀释倍数;

m ——香菇样品的质量, g。

1.3.2 香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制作用

取 0.4 mL 0.1 mol/L 的磷酸缓冲液 (Phosphate Buffer Saline, PBS, pH 值为 6.8) 于试管中, 分别加入 0.4 mL 0.1、0.5、1、1.5、2 mg/ml 的香菇多酚和 0.4 mL 0.04 U/mL 的 α -葡萄糖苷酶溶液, 混合均匀后, 在 37 °C 下保温 10 min 后, 加入 0.2 mL 0.5 mmol/L p NPG 溶液, 37 °C 反应 30 min 后, 加入 0.8 mL 0.1 mol/L 的碳酸钠溶液终止反应, 测定其体系在 405 nm 处的吸光度 (A)。阿卡波糖为阳性对照组, 每个样品重复实验三次^[25]。经下列公式计算 α -葡萄糖苷酶抑制率:

$$Y = (1 - \frac{A_y - A_b}{A_m - A_d}) \times 100\% \quad (3)$$

式中:

Y —— α -葡萄糖苷酶抑制率, %;

A_y ——样品组, 加入样品、酶和 p NPG 的吸光度;

A_b ——样品空白组, 只加样品和 p NPG 的吸光度;

A_m ——对照组, 只加入酶和 p NPG 的吸光度;

A_d ——空白组, 只加 p NPG 的吸光度。

1.3.3 香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶活性抑制的动力学实验

分别取 0.1、0.2、0.5 U/mL 的 α -葡萄糖苷酶和 0、0.5、1.5 mg/mL 的香菇多酚, 按照 1.3.2 的方法, 测定并计算 405 nm 处的吸光度变化。绘制以 α -葡萄糖苷酶浓度为横坐标, 反应速率 (V) 为纵坐标的曲线, 并根据曲线确定香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制性是否可逆。为进一步判断香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制类型, 取 0.4 mL 质量浓度为 0.04 U/mL 的 α -葡萄糖苷酶, 在香菇多酚质量浓度分别为 0、0.5、1.5 mg/mL 的条件下, 分别加入 1.0、1.5、2.0 mmol/L 的 p NPG 溶液, 按照 1.3.2 的方法测定并计算 405 nm 处的吸光度变化, 以底物 p NPG 的浓度的倒数 ($1/p$ NPG) 为横坐标, 反应速率的倒数 ($1/V$) 为纵坐标作图, 绘制 Lineweaver-Burk 双倒数曲线, 计算动力学参数, 确定香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制类型^[26,27]。

1.3.4 香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶的荧光猝灭光谱分析

量取 α -葡萄糖苷酶加入香菇多酚溶液中, 使其体系里 α -葡萄糖苷酶的最终质量浓度为 1 U/mL, 香菇多酚的最终质量浓度为 0、0.005、0.015、0.025、0.035 mg/mL, 在室温下充分反应 10 min 后, 记录在不同温度下 (298, 304 和 310 K), 激发波长为 280 nm, 发射波长范围为 300~450 nm, 狭缝宽为 5.0 nm 的荧光光谱变化情况^[27]。

1.3.4.1 光猝灭类型分析

利用 Stern-Volmer 方程分析香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶的荧光猝灭类型^[28], 公式如下:

$$\frac{F_0}{F} = K_q \tau_0 [Q] + 1 = K_{sv} [Q] + 1 \quad (4)$$

式中:

F_0 ——无香菇多酚的荧光强度, au;

F ——存在香菇多酚的荧光强度, au;

K_q ——荧光猝灭速率常数, L/(mol·s);

τ_0 ——无香菇多酚时的荧光平均寿命;

$[Q]$ ——猝灭剂的浓度, mol/L;

K_{sv} ——荧光猝灭常数, L/mol。

1.3.4.2 结合位点及结合常数

利用下列公式求得香菇多酚和 α -葡萄糖苷酶在相互作用过程中的结合位点及结合常数^[29-31]:

$$\lg(F_0 - F)F = \lg K_a + n \lg[Q] \quad (5)$$

式中:

K_a —样品与 α -葡萄糖苷酶的结合常数, L/mol;

n —结合位点数目。

1.3.5 数据分析

实验数据采用 Excel 软件进行统计分析,采用 Origin 9 统计与作图,定量数据采用“平均值±标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 超声耦合亚临界水提取多酚的得率及多酚含量

按 1.3.1 所述的方法采用超声耦合亚临界水提取香菇多酚,经计算,香菇多酚得率为 11.9%,测得香菇多酚的含量为 10.0 mg/g。

2.2 香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制作用

不同浓度的香菇多酚和阿卡波糖对 α -葡萄糖苷酶的抑制活性如图 1 所示。在 0.1~1.5 mg/mL 的质量浓度范围内,香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制率随质量浓度的增加而增加,抑制率最高可达 79.22%,在 1.0~1.5 mg/mL 的质量浓度内抑制率的上升幅度较为显著,当质量浓度超过 1.5 mg/mL 时,香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制效果开始下降,原因可能是由于香菇多酚浓度的增加导致多酚形成聚集体,减少了与酶分子的碰撞,使得抑制率降低。结果表明,在一定质量浓度下,香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶具有良好的抑制效果。经计算,香菇多酚的 IC_{50} 值为 0.41 mg/mL,与桑黄醇提取物 (IC_{50} 为 0.43 mg/mL) 对 α -葡萄糖苷酶的抑制活性相近,且低于红江橙果皮黄酮提取物 (IC_{50} 值为 2.95 mg/mL),但高于阳性对照阿卡波糖 (IC_{50} 值为 0.16 mg/mL) [25],因此与其他具有降糖活性物质相比香菇多酚也具有较好的降糖潜力。

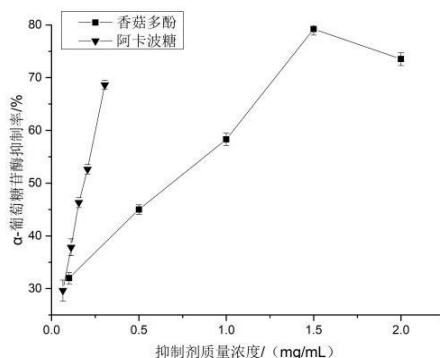


图 1 香菇多酚与阿卡波糖对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用

Fig.1 Inhibition performance of *lentinus edodes* polyphenol and acarbose on α -glucosidase

2.3 香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶抑制作用的动力学实验

通过对香菇多酚进行抑制动力学研究,分析其对 α -葡萄糖苷酶的抑制类型,从而进一步探讨香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用。结果如图 2 所示,当存在不同质量浓度的香菇多酚时,绘制的速率直线经过原点,由此说明香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用主要是可逆抑制。由图 3 可知,香菇多酚的 Lineweaver-Burk 双倒数图呈现出良好的线性关系,不同质量浓度的香菇多酚的拟合曲线相交于 y 轴,随着香菇多酚质量浓度的增加, K_m 值随香菇多酚质量浓度的增大而增大, V_{max} 基本保持不变,进而可以推测出香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶抑制作用类型是竞争性抑制,可与 α -葡萄糖苷酶的活性中心结合,阻碍底物与酶相结合,导致酶催化反应速率降低。

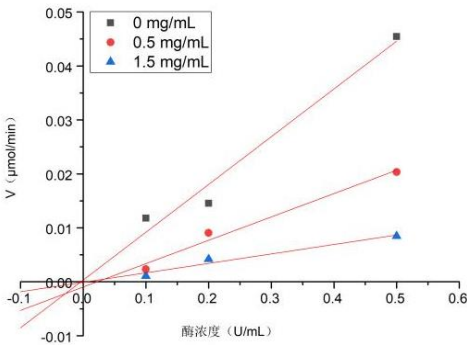


图 2 香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制动力学曲线

Fig.2 Inhibition kinetics of *Lentinus edodes* polyphenol on α -glucosidase activity

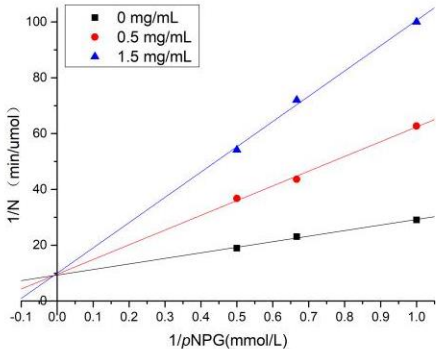


图 3 香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶抑制作用的 Lineweaver-Burk 图

Fig.3 Lineweaver-Burk plot for the inhibition of *Lentinus edodes* polyphenol on α -glucosidase activity

2.4 香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶的荧光猝灭光谱

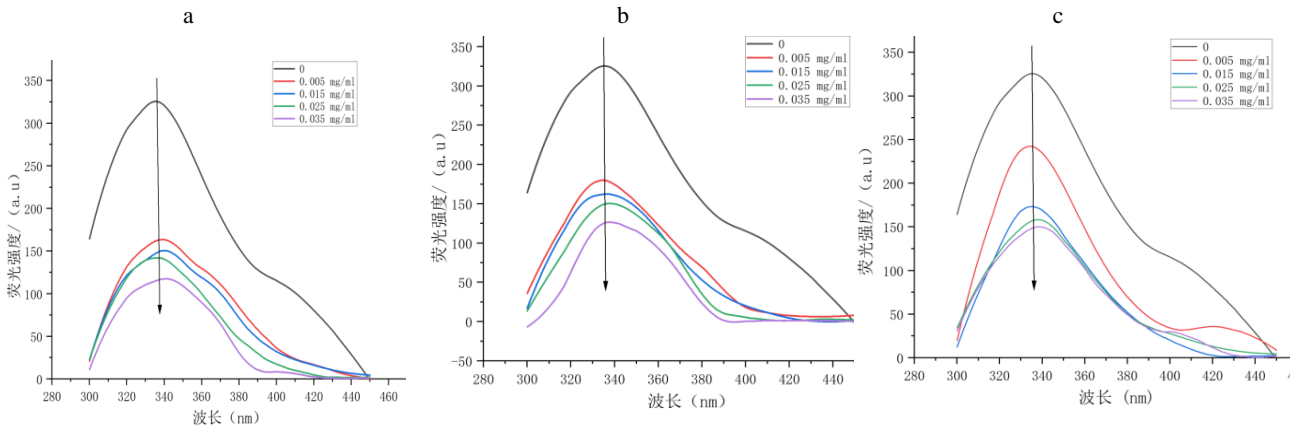


图 4 不同温度下香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶荧光光谱的影响

Fig. 4 Effect of *Lentinus edodes* polyphenol on the fluorescence spectra of α -glucosidase at different temperatures

注：a、b、c 分别为 298、303、310 K。

为研究香菇多酚和 α -葡萄糖苷酶间相互作用的机制，通过荧光光谱检测，以荧光强度反应香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制效果。结果如图 4 所示，不同温度（298、303、310 K）条件下，荧光发射强度随着温度升高而增强，表明升温使得香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶的荧光猝灭效果具有减弱的作用。荧光发射强度随香菇多酚质量浓度的增加而降低，同时，波峰也随香菇多酚的加入而发生位移，结果表明不同温度下的香菇多酚与 α -葡萄糖苷酶相结合，均对酶的荧光产生了猝灭作用，且 298 K 下的香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶的猝灭效果更佳，并对 α -葡萄糖苷酶的结构造成了一定的影响。

根据上述结果，采用香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶的 Stern-Volmer 方程曲线分析两者在 298 K 温度下的相互作用和荧光猝灭类型（图 5）。经计算，在 298 K 下香菇多酚与 α -葡萄糖苷酶结合形成复合物的猝灭速率常数 K_q 为

$3.06 \times 10^{14} \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{s})$, 其显著大于生物大分子最大散射碰撞猝灭速率常数 K_q 值 $2.0 \times 10^{10} \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{s})$ 。由于反应过程中形成的基态复合物会使其吸收光谱发生变化, 而动态猝灭则不影响荧光物质的吸收光谱^[32]。因此, 在 298 K 下由于香菇多酚和 α -葡萄糖苷酶形成了无荧光或荧光信号较弱的复合物, 从而导致酶分子内在荧光的静态猝灭。因此, 香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶的猝灭机制以静态猝灭为主。同样, 宋菲等^[27]发现槟榔多酚提取物对 α -葡萄糖苷酶的猝灭机制也属于静态猝灭。

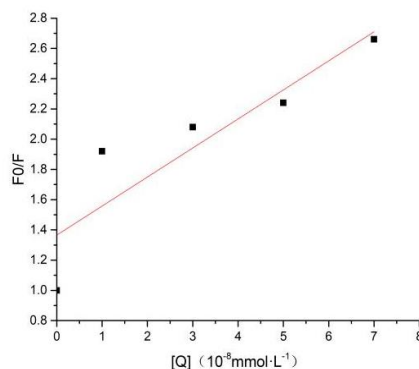


图 5 298 K 下香菇多酚与 α -葡萄糖苷酶相互作用的 Stern-Volmer 方程曲线图

Fig.5 Stern-Volmer diagram of lentinus edodes polyphenol interacting with α -glucosidase at 298 K

2.5 香菇多酚与 α -葡萄糖苷酶的结合常数与结合位点数

基于静态猝灭机理, 以 $\lg[(F_0-F)/F]$ 对 $\lg[Q]$ 作图, 结果如图 6 所示, 经计算, K_a 的数量级为 10^3 , 表明香菇多酚与 α -葡萄糖苷酶有较为良好的亲和力, 根据 n 值为 0.35 附近可知香菇多酚与 α -葡萄糖苷酶两者结合产生的复合物约为 1:3 型, 由此推测香菇多酚与 α -葡萄糖苷酶之间存在 3 种或 3 类结合位点, 即两者所形成的复合物以接近 1:3 的比例进行结合。

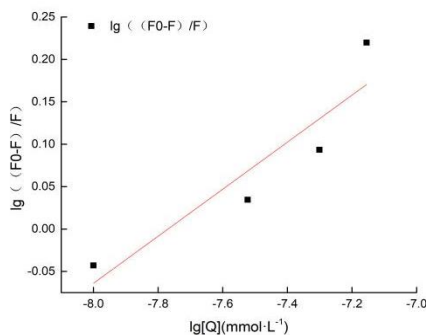


图 6 298 K 下香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶相互作用的双对数曲线

Fig.6 Double logarithmic plots of the interaction of lentinus edodes polyphenol with α -glucosidase at 298K

3 结论

本研究探讨了超声耦合亚临界水提取的香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用, 并结合体外酶动力学抑制实验和荧光光谱法分析香菇多酚抑制 α -葡萄糖苷酶的作用机制, 结果表明香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶抑制类型为可逆的竞争型抑制, 香菇多酚与 α -葡萄糖苷酶能相互结合发生静态猝灭, 在不同温度下以 298 K 的香菇多酚对 α -葡萄糖苷酶的猝灭效果最佳, 且猝灭效果随香菇多酚质量浓度的增加而增加, 两者之间存在三种或三类结合位点。综上所述, 可为香菇类功能性食品的加工以及降糖类药物的生产提供一定的参考以及依据。但考虑到香菇多酚的成分复杂性, 对香菇多酚的降糖作用机制仍需进一步探讨。

参考文献

- [1] YOU Z L, LI Y L, ZHANG K, et al. Inhibitory effect of plant essential oils on α -glucosidase [J]. Food Science and Biotechnology, 2022, 31(12): 1593-1602.
- [2] 张正宽,杨斐玉,刘怀琴,等.八月瓜种子的化学成分及其 α -葡萄糖苷酶抑制活性[J].现代食品科技,2024,40(11):157-165.
- [3] 郭庆丰,周敬文,卢文芳,等.红小豆提取物对 α -葡萄糖苷酶和胰脂肪酶的抑制作用[J].粮食与油脂,2024,37(9):147-151+157.
- [4] 屠洁,陈钧,刘冠卉.芹菜素抑制 α -葡萄糖苷酶的分子机制研究[J].生物技术,2015,25(4):369-374.
- [5] 徐柠檬,资璐熙,李为兰,等.龙竹竹叶不同极性溶剂萃取物的抗氧化及体外降血糖和降血脂活性研究[J].林产化学与工业,2024,44(4):70-78.
- [6] GU Y P, YANG X M, SHANG C J, et al. Inhibitory properties of saponin from *Eleocharis dulcis* peel against α -glucosidase [J]. Rsc Advances, 2021, 11(25): 15400-15409.
- [7] TAKAYUKI H, CHISATO M, HITOSHI A, et al. Antihyperglycemic effect of polyphenols from acerola (*Malpighia emarginata* DC.) fruit [J]. Bioscience Biotechnology and Biochemistry, 2006, 70(8): 1813-1820.
- [8] KUNIHISA I, MI-YEON K, AKIO O, et al. α -Glucosidase inhibitory and antihyperglycemic effects of polyphenols in the fruit of *Viburnum dilatatum* Thunb [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(13): 4588-4592.
- [9] BOATH A S, DEREK S, MCDUGALL G J. Berry components inhibit α -glucosidase in vitro: synergies between acarbose and polyphenols from black currant and rowanberry [J]. Food Chemistry, 2012, 135(3): 929-936.
- [10] NOBUTOMO I, RUMI T, KIYOMI I, et al. The inhibition of lipase and glucosidase activities by Acacia polyphenol [J]. Evidence-based Complementary and Alternative Medicine, 2011, 2011(1): 1-8.
- [11] GAO J J, XU P, WANG X F, et al. Combined effects of green tea extracts, green tea polyphenols or epigallocatechin gallate with acarbose on inhibition against α -amylase and α -glucosidase in vitro [J]. Molecules, 2013, 18(9): 11614-11623.
- [12] 何皎,孙晓菲,潘琳,等.五种香菇营养成分及其香菇多糖的抗氧化性评价[J].农产品加工,2023,8:56-60+65.
- [13] ZHANG Y, CHEN Y, LIU X, et al. Preparation and identification of peptides with α -glucosidase inhibitory activity from shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) protein [J]. Foods, 2023, 12(13): 2534.
- [14] SUN S Q, LIU Z Y, LIN M X, et al. Polyphenols in health and food processing: antibacterial, anti-inflammatory, and antioxidant insights [J]. Frontiers in Nutrition, 2024, 11: 1456730.
- [15] ISHTIAQ A, MARYYUM A, XU M M, et al. Therapeutic values and nutraceutical properties of shiitake mushroom (*Lentinula edodes*): A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 134: 123-135.
- [16] 刁小琴,关海宁,马松艳.中心组合设计优化酶法辅助提取香菇多酚及其抑菌活性研究[J].食品工业科技,2012,33(21):269-272.
- [17] 刘馥源,黄占旺,沈勇根,等.香菇多酚超声波提取工艺及抗氧化性分析[J].中国调味品,2022,47(3):14-20.
- [18] XIN Y R, FANG F, YUE Q, et al. Microenvironment modulating nanogels by shiitake-derived lentinan and a reactive oxygen species scavenging conjugated polymer for the treatment of Alzheimer's disease [J]. Nano Today, 2024, 55: 102178.
- [19] 王安建,李顺峰,张丽华,等.香菇柄多酚负压提取、纯化及体外活性评价[J].中国食品添加剂,2023,34(12):51-58.
- [20] SARA R V S, BRUNA G C C D O, FERNANDA G L, et al. Effects of *Lentinula edodes* consumption on biochemical, hematologic and oxidative stress parameters in rats receiving high-fat diet [J]. European Journal of Nutrition, 2017, 56(7): 2255-2264.
- [21] 刘莎.亚临界水提取芦苇多酚的工艺优化及抗氧化性能研究[J].中国现代中药,2020,22(5):747-751.
- [22] COURAGE S D, DUAN Y Q, ZHANG H H, et al. Ultrasound-subcritical water and ultrasound assisted subcritical water-derived Tartary buckwheat polyphenols show superior antioxidant activity and cytotoxicity in human liver carcinoma cells [J]. Food Research International, 2020, 137: 109598.
- [23] 胡双飞,张学武,范晓丹.超声耦合亚临界水提取螺旋藻粗蛋白及其抗氧化活性研究[J].现代食品科技,2018,34(9):150-157.
- [24] LI B, SHEN X T, SHEN H F, et al. Effect of optimized germination technology on polyphenol content and hypoglycemic activity of mung bean [J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1138739.
- [25] 林海生,饶梦微,秦小明,等.红江橙果皮黄酮提取物对 α -葡萄糖苷酶和胰脂肪酶的抑制作用[J].现代食品科技,2023,39(10):89-96.
- [26] POPOVIC B M, DEJAN A, RUZICA Z P, et al. α -Glucosidase inhibitory activities of natural deep eutectic systems and their components: Ascorbate is a powerful inhibitor of α -glucosidase [J]. Journal of Molecular Liquids, 2023, 383: 122086.
- [27] 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.
- [28] LI Y B, LIU X L, ZHOU H Y, et al. Inhibitory mechanism of Engeletin against α -glucosidase [J]. Natural Product Communications, 2021,

16(1): 1-5.

- [29] JIANG C Q, WANG T. Study of the interactions between tetracycline analogues and lysozyme [J]. Bioorganic & Medicinal Chemistry, 2004, 12(9): 2043-2047.
- [30] 张冰卫,李博,夏文水,等.用荧光光谱法研究分子间结合常数和结合位点数时的公式选择[J].药学进展,2011,35(7):296-303.
- [31] 孙金婷.油菜籽多酚对 α -葡萄糖苷酶抑制机理的研究[D].郑州:河南大学,2024.
- [32] 倪丹,蒋新元,唐玉莲,等.鞣花酸抑制酪氨酸酶的动力学、荧光光谱分析及分子对接[J].食品科学,2024,45(2):104-112.