

# 桑黄提取物的体外抗氧化、降血糖及降尿酸活性

李雨鸿<sup>1</sup>, 殷朝敏<sup>2</sup>, 范秀芝<sup>2</sup>, 史德芳<sup>2</sup>, 姚芬<sup>2</sup>, 李晨<sup>2</sup>, 刘颖<sup>2</sup>, 程雅清<sup>2</sup>, 高虹<sup>2,3\*</sup>

(1. 华中农业大学食品科学技术学院, 湖北武汉 430070) (2. 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430064) (3. 湖北省林下经济工程研究中心, 湖北武汉 430064)

**摘要:** 为了解杨树桑黄不同提取物的生物活性, 采用超声辅助法制备了杨树桑黄粗多糖和醇提取物, 分析了二者主要成分及其含量, 比较了二者体外抗氧化、降血糖及降尿酸活性。研究发现桑黄粗多糖中总糖含量为 74.87%, 蛋白质含量为 6.61%, 糖醛酸含量为 4.84%, 硫酸基含量为 2.59%; 桑黄醇提取物中总酚含量为 35.72%, 总黄酮含量为 8.98%, 总三萜含量为 5.82%, 总甾醇含量为 7.36%。此外, 桑黄粗多糖和醇提取物具有较强的 DPPH 自由基、ABTS 自由基、羟自由基清除能力和一定的还原力。体外降血糖及降尿酸实验表明桑黄多糖和醇提取物对  $\alpha$ -淀粉酶、 $\alpha$ -葡萄糖苷酶与黄嘌呤氧化酶均有一定抑制作用, 但桑黄醇提取物降血糖和降尿酸活性明显优于桑黄多糖; 另外桑黄醇提取物对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制作用  $IC_{50}$  值为 0.43 mg/mL, 远低于阿卡波糖  $IC_{50}$  值 (0.87 mg/mL)。与桑黄多糖相比, 桑黄醇提取物具有较强的体外抗氧化、降血糖及降尿酸活性, 这为充分利用桑黄资源、开发桑黄功能性食品或医药保健品提供了理论依据。

**关键词:** 桑黄; 抗氧化; 降血糖; 降尿酸

文章编号: 1673-9078(2022)05-71-80

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.5.0956

## *In Vitro* Anti-oxidant, Hypoglycemic, and Hypouricemic Activities of *Sanghuangporus vaninii* Extracts

LI Yuhong<sup>1</sup>, YIN Chaomin<sup>2</sup>, FAN Xiuzhi<sup>2</sup>, SHI Defang<sup>2</sup>, YAO Fen<sup>2</sup>, LI Chen<sup>2</sup>, LIU Ying<sup>2</sup>, CHENG Yaqing<sup>2</sup>, GAO Hong<sup>2,3\*</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

(2. Institute of Agro-Products Processing and Nuclear-Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China) (3. Research Center of Under-forest Economy in Hubei Province, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** To understand the biological activities of different extracts from *Sanghuangporus vaninii*, crude polysaccharides and ethanol extracts were prepared by ultrasound-assisted methods, and their main components, as well as the contents of various components, were analyzed. In addition, the *in vitro* antioxidant, hypoglycemic, and hypouricemic activities of the extracts were compared. The results showed that total sugar, protein, uronic acid, and sulfate group contents in the crude polysaccharides were 74.87%, 6.61%, 4.84%, and 2.59%, respectively. Furthermore, total phenol, flavonoid, triterpene, and sterol contents in ethanol extracts were 35.72%, 8.98%, 5.82%, and 7.36%, respectively. In addition, the crude polysaccharides and ethanol extracts exhibited strong scavenging activity and reasonable reducing power against DPPH, ABTS, and hydroxyl free radicals. The hypoglycemic and hypouricemic *in vitro* assays revealed that crude polysaccharides and ethanol extracts have some inhibitory effect on  $\alpha$ -amylase,  $\alpha$ -glucosidase, and xanthine oxidase, while the ethanol extracts exhibited significantly better hypoglycemic and hypouricemic activities than those of the crude polysaccharides. Moreover, the  $IC_{50}$  of ethanol extracts for  $\alpha$ -glucosidase inhibition was 0.43 mg/mL, which was much lower than that of acarbose (0.87 mg/mL). Compared to crude polysaccharides, ethanol extracts exhibited stronger antioxidant, hypoglycemic, and hypouricemic effects *in vitro*. Thus,

引文格式:

李雨鸿, 殷朝敏, 范秀芝, 等. 桑黄提取物的体外抗氧化、降血糖及降尿酸活性[J]. 现代食品科技, 2022, 38(5): 71-80

LI Yuhong, YIN Chaomin, FAN Xiuzhi, et al. *In vitro* anti-oxidant, hypoglycemic, and hypouricemic activities of *Sanghuangporus vaninii* extracts [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(5): 71-80

收稿日期: 2021-08-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31801921; 32072229); 湖北省食用菌产业技术体系项目 (HBHZDZB-2021-023)

作者简介: 李雨鸿 (1998-), 女, 在读硕士研究生, 研究方向: 食用菌功能成分分析, E-mail: 1780746321@qq.com; 共同第一作者: 殷朝敏 (1987-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 食用菌生物活性高效利用, E-mail: yinchaomin@163.com

通讯作者: 高虹 (1971-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食用菌生物活性物质高效利用, E-mail: highong@163.com

our findings provide a theoretical basis for the extensive use of *S. vaninii* and the development of functional foods or health products from this fungus.

**Key words:** *Sanghuangporus vaninii*; antioxidant; hypoglycemic effect; hypouricemic effect

桑黄, 又称桑耳、桑臣和胡孙眼, 在分类学上隶属于担子菌门 Basidiomycota、伞菌纲 Agaricomycetes、锈革菌目 Hymenochaetales、锈革菌科 Hymenochaetaceae、桑黄属 *Sanghuangporus*, 是一类珍贵的药用真菌<sup>[1]</sup>。现代研究发现, 桑黄中含有多糖、黄酮、三萜、多酚类、吡喃酮类和呋喃类等多种活性物质, 因此具有抗氧化、免疫调节、降血糖、抗肿瘤和抗癌等多种功效<sup>[2,3]</sup>。吕国英等<sup>[4]</sup>与 Zheng 等<sup>[5]</sup>研究表明桑黄醇提物中的黄酮与酚类化合物可能对抗氧化性起着主要作用, 胡晓彤等<sup>[6]</sup>发现纯化后的桑黄多糖具有一定的抗氧化活性; Feng 等<sup>[7]</sup>发现桑黄多糖能够有效改善小鼠胰岛素抗性, 从而降低小鼠的血糖浓度, 而 Wang 等<sup>[8]</sup>的研究同时也验证了桑黄醇提物能显著改善糖尿病状况。最近, 还有学者发现桑黄提取物可能具有一定的降尿酸活性并具有抑制痛风性关节炎功效<sup>[9]</sup>, 而关于桑黄多糖的降尿酸活性研究鲜有报道。

近年来, 随着桑黄药理作用研究的不断深入及其天然抗癌产品属性的深入人心, 桑黄已经为国内外医药制剂和保健品行业研究开发的热点。目前, 杨树桑黄 (*Sanghuangporus vaninii*) 人工驯化栽培已经获得成功<sup>[10]</sup>, 因此可以从杨树桑黄子实体中大量提取生物活性物质。本研究制备了杨树桑黄子实体醇提物和粗多糖, 比较分析了二者体外抗氧化、降血糖及降尿酸等功效, 为充分利用桑黄资源、开发桑黄功能性食品或医药保健品提供了理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料、试剂与设备

桑黄子实体 (*S. vaninii*) 购自吉林省长白县林丰菌业有限公司; 果胶酶、纤维素酶、木瓜蛋白酶和 Bradford 蛋白浓度测定试剂盒购自 Solarbio 公司;  $\alpha$ -淀粉酶、 $\alpha$ -葡萄糖苷酶购自 Sigma 公司; 黄嘌呤氧化酶购自 Roche 公司; 其余试剂均购自于国药集团化学试剂有限公司。

SPARK 多功能酶标仪, 日本岛津有限公司; UV-1800 紫外可见分光光度计, 日本岛津有限公司; KS-300VDE/3 超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司; RE-5205 旋转蒸发器, 上海亚荣生化仪器厂。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 样品制备

桑黄子实体经 50 °C 烘干、粉碎、过筛 (40 目) 后获得桑黄子实体干粉, 于 4 °C 保藏备用。桑黄子实体粉以 1:40 (*m/V*) 的料液比加入 95%乙醇, 在功率为 300 W 的条件下超声 20 min, 然后离心 (8000 r/min, 20 min) 收集上清液, 残渣继续用 95%乙醇提取 3 次, 合并上清液, 旋蒸浓缩至一定体积后, 冻干得到桑黄醇提物。

残渣挥干乙醇后, 按 1:40 的料液比加入热水 (80 °C) 浸泡 1 h, 冷却后加入混合酶液 (果胶酶、纤维素酶和木瓜蛋白酶), 使其终浓度达到 200 U/mL 并在 37 °C 水浴 1 h; 随后在功率为 300 W 的条件下超声 20 min, 离心 (8000 r/min, 20 min) 并收集上清液; 残渣继续用水提取 3 次, 合并上清液, 旋蒸浓缩至一定体积, 加入 4 倍无水乙醇并于 4 °C 过夜; 离心后将沉淀低温烘干得到桑黄粗多糖。

#### 1.2.2 多糖化学组成分析

以葡萄糖为标准品, 采用苯酚-硫酸法测定多糖含量<sup>[11]</sup>; 以 BSA 为标准品, 采用 Bradford 试剂盒测定桑黄粗多糖的蛋白质含量<sup>[12]</sup>; 以半乳糖醛酸为标准品, 采用硫酸-间羟联苯法测定桑黄粗多糖的糖醛酸含量<sup>[13]</sup>; 以硫酸钾为标准品, 采用氯化钡-明胶比浊法测定桑黄粗多糖的硫酸基含量<sup>[14]</sup>。

#### 1.2.3 醇提物活性成分分析

以没食子酸为标准品, 采用福林-酚法<sup>[15]</sup>测定桑黄醇提物的总酚含量; 以芦丁为标准品, 采用亚硝酸钠-硝酸铝法<sup>[16]</sup>测定桑黄醇提物的黄酮含量; 以熊果酸为标准品, 采用香草醛-高氯酸比色法<sup>[17]</sup>测定桑黄醇提物总三萜含量; 以麦角甾醇为标准品, 采用香草醛-高氯酸比色法<sup>[18]</sup>测定桑黄醇提物总甾醇含量。

#### 1.2.4 抗氧化活性测定

以 Vc 作为阳性对照, 按照 Chen 等<sup>[19]</sup>的方法测定 DPPH 自由基清除活性、还原能力以及羟基自由基清除活性, 按照 Shang 等<sup>[20]</sup>的方法测定 ABTS 自由基清除活性。

#### 1.2.5 降血糖活性测定

##### 1.2.5.1 $\alpha$ -淀粉酶抑制活性测定

$\alpha$ -淀粉酶抑制率的测定根据王静等<sup>[21]</sup>的方法稍作修改。取不同浓度的样液 20.00  $\mu$ L 和  $\alpha$ -淀粉酶溶液 (5.00 U/mL) 20.00  $\mu$ L 于 1.50 mL 离心管中涡旋混匀, 在 37 °C 条件下水浴 10 min; 完成后加入 1.00% 淀粉溶液 40.00  $\mu$ L, 37 °C 条件下继续反应 10 min; 最后加入 80.00  $\mu$ L DNS 试剂终止反应, 在沸水浴中加热 5 min

后取出,于冰水浴中迅速冷却,最后加入 1.00 mL 水稀释。以阿卡波糖作为阳性对照,在波长 540 nm 处测定吸光值。 $\alpha$ -淀粉酶抑制率的计算公式如下:

$$\text{抑制率}/\% = \frac{[(A-B)-(C-D)]}{(A-B)} \times 100\%$$

式中:

A——加酶不加样品管吸光值;

B——不加酶不加样品管吸光值;

C——加酶加样品管吸光值;

D——不加酶加样品管吸光值。

### 1.2.5.2 $\alpha$ -淀粉酶的抑制作用类型分析

固定淀粉酶浓度 (5.00 U/mL), 分别加入不同浓度 (0.00、1.00 和 3.00 mg/mL) 的多糖和醇提物溶液, 测定可溶性淀粉溶液浓度分别为 0.50、0.75、1.00、2.50、5.00 和 10.00 mg/mL 时的初速率, 按 Lineweaver-Burks 双倒数作图法, 以初速率 (V) 的倒数对底物浓度 [S] 的倒数作图, 判断多糖和醇提物对  $\alpha$ -淀粉酶的抑制类型。

### 1.2.5.3 $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制率的测定

$\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制率的测定根据刘合生等<sup>[22]</sup>的方法稍作修改。取磷酸缓冲液 (0.10 mol/L, pH=6.80) 0.70 mL, 不同浓度的样液 0.10 mL 和  $\alpha$ -葡萄糖苷酶溶液 (0.24 U/mL) 0.10 mL 于 1.50 mL 离心管中涡旋混匀, 在 37 °C 条件下水浴 10 min; 然后加入 0.10 mL pNPG 溶液 (2.50 mmol/L), 37 °C 下继续反应 20 min; 最后加入 0.40 mL Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液 (0.20 mol/L) 终止反应。以阿卡波糖作为阳性对照, 在波长 405 nm 处测定吸光值。 $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制率的计算公式如下:

$$\text{抑制率}/\% = \frac{[(A-B)-(C-D)]}{(A-B)} \times 100\%$$

式中:

A——加酶不加样品管吸光值;

B——不加酶不加样品管吸光值;

C——加酶加样品管吸光值;

D——不加酶加样品管吸光值。

### 1.2.5.4 $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制作用类型分析

固定  $\alpha$ -葡萄糖苷酶浓度 (0.24 U/mL), 分别加入不同浓度的多糖 (0.00、1.00 和 3.00 mg/mL) 和醇提物溶液 (0.00、50.00 和 100.00  $\mu$ g/mL), 测定 pNPG 浓度分别为 0.50、1.00、1.50、2.00、2.50 和 3.00 mmol/L 时的初速率, 按 Lineweaver-Burks 双倒数作图法, 以初速率 (V) 的倒数对底物浓度 [S] 的倒数作图, 判断多糖和醇提物对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制类型。

## 1.2.6 降尿酸活性测定

### 1.2.6.1 黄嘌呤氧化酶抑制活性

黄嘌呤氧化酶抑制率的测定根据万茵等<sup>[23]</sup>的方法略作改动。取磷酸缓冲液 (0.10 mol/L, pH=8.50) 0.60 mL, 黄嘌呤溶液 (2.00 mmol/L) 0.20 mL 以及不同浓度的样液 0.10 mL 于 1.50 mL 离心管中涡旋混匀; 然后加入 0.20 mL 黄嘌呤氧化酶液 (0.10 U/mL) 并在 25 °C 水浴反应 30 min; 完成后加入 0.20 mL 的 HCl 溶液 (1.00 mol/L) 终止反应。以别嘌呤醇作为阳性对照, 于波长 290 nm 处测定吸光值。黄嘌呤氧化酶抑制率的计算公式如下:

$$\text{抑制率}/\% = \frac{[(A-B)-(C-D)]}{(A-B)} \times 100\%$$

式中:

A——加酶不加样品管吸光值;

B——不加酶不加样品管吸光值;

C——加酶加样品管吸光值;

D——不加酶加样品管吸光值。

### 1.2.6.2 黄嘌呤氧化酶的抑制作用类型分析

固定黄嘌呤氧化酶浓度 (0.10 U/mL), 分别加入不同浓度 (0.00、1.00 和 3.00 mg/mL) 的多糖和醇提物溶液, 测定黄嘌呤溶液浓度分别为 0.25、0.50、1.00、1.50、2.00 和 2.50 mmol/L 时的初速率, 按 Lineweaver-Burks 双倒数作图法, 以初速率 (V) 的倒数对底物浓度 [S] 的倒数作图, 判断多糖和醇提物对黄嘌呤氧化酶的抑制类型。

## 1.2.7 数据分析

所有实验均重复 3 次。实验数据以 Excel 2010 进行数据整理, 采用 Origin 2021 软件进行绘图与方程拟合。

# 2 结果与分析

## 2.1 粗多糖与醇提物的成分及含量分析

桑黄粗多糖中总多糖、糖醛酸、蛋白质和硫酸根的含量如表 1 所示。桑黄与一般食用菌不同, 子实体木质化比较严重, 其多糖含量较低, 实验中桑黄多糖提取率仅有 2.57%。此外, 本实验中桑黄粗多糖的总糖含量为 74.87%, 显著高于王钦博等<sup>[24]</sup>采用热水浸提法得到的桑黄水溶性多糖 (56.70%)。桑黄粗多糖中蛋白质含量为 6.61%, 与 Yang 等<sup>[25]</sup>的研究结果类似 (5.60%)。糖醛酸和硫酸根含量较少, 分别为 4.84% 和 2.59%。

在桑黄醇提物中, 黄酮、三萜和酚类物质为其主要的活性成分。相较于粗多糖, 醇提物的得率较高, 为 6.22%。桑黄醇提物的酚类物质含量较多, 含量为 35.72%, 黄酮含量为 8.98%, 总三萜和总甾醇的含量

分别为 5.82%和 7.36%，均高于叶玉洁等<sup>[26]</sup>所测定桑黄醇提物的黄酮类和总三萜含量（5.94%和 2.20%）。除此之外，醇提物成分复杂，还含有其他化学成分，如香豆素类、生物碱以及有机酸等<sup>[27]</sup>，这对醇提物的生物活性具有一定影响。

表 1 桑黄两种提取物成分

Table 1 Two extracts of *S. vaninii* ( $\bar{x} \pm SD, n=3$ )

指标	粗多糖	指标	醇提物
得率	2.57±0.17	得率	6.22±0.66
总糖	74.87±4.86	总酚	35.72±0.65
蛋白质	6.61±0.24	总黄酮	8.98±0.14
糖醛酸	4.84±0.61	总三萜	5.82±0.18
硫酸根	2.59±0.48	总甾醇	7.36±0.26

## 2.2 桑黄粗多糖与醇提物的抗氧化性

### 2.2.1 DPPH 自由基清除能力

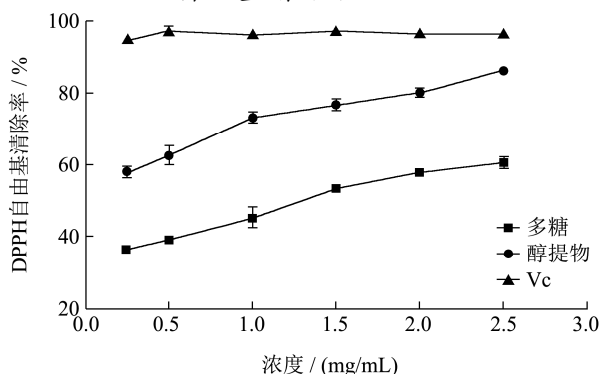


图 1 桑黄多糖和醇提物对 DPPH 自由基清除能力

Fig.1 The scavenging ability of *S. vaninii* polysaccharides and ethanol extracts to DPPH free radicals

DPPH·常被用于检测样品抗氧化能力，其测定原理是基于 DPPH·被抗氧化剂还原，导致溶液颜色从紫色变为黄色<sup>[28]</sup>。桑黄粗多糖与醇提物 DPPH 自由基清除能力如图 1 所示。结果显示：在 0.25~2.50 mg/mL 的浓度范围内，桑黄两种提取物的 DPPH 自由基清除率均随着质量浓度的增加而增大，且有一定的剂量依赖效应，但都低于 Vc 的清除效果。在浓度为 2.50 mg/mL 时，醇提物 DPPH 自由基清除率达到了 86.26%，而粗多糖则具有 61.20%。Shen 等<sup>[29]</sup>研究发现桑黄醇提物中的主要抗氧化物质为黄酮和多酚化合物。本实验桑黄醇提物 DPPH 自由基清除能力高于桑黄多糖，这可能与醇提物中含有较高的黄酮、三萜和酚类物质有关。但醇提物中含有的化合物种类较多，还有部分物质未能测定，醇提物较强的抗氧化作用也可能是多类化合物共同作用的结果。梁丽等<sup>[30]</sup>证实了 6,7-二羟基香豆素与龙胆酸之间的协同作用提高了混合物的 DPPH 自由基清除效果。

### 2.2.2 ABTS 自由基清除能力

如图 2 所示，桑黄的两种提取物对 ABTS 自由基的清除能力都很强。在 0.25~2.50 mg/mL 范围内，桑黄粗多糖的浓度与 ABTS 自由基清除率呈正相关，具有一定的剂量依赖效应，在质量浓度为 2.50 mg/mL 时达到最高，其 ABTS 自由基清除率为 96.00%。应瑞峰等<sup>[31]</sup>研究发现，桑黄子实体多糖浓度在 8.00 mg/mL 时，ABTS 自由基清除率达到了 92.19%，且清除效果优于桑黄菌丝体多糖。而在相同的浓度范围内，醇提物的清除率稳定在 98.00%~99.00%左右，与 Vc 清除能力相当，表现出优异的 ABTS 自由基的清除能力。与脂溶性的 DPPH 自由基不同，ABTS 自由基具有亲脂性和亲水性，因而更易于同各种生物活性物质反应<sup>[32]</sup>。

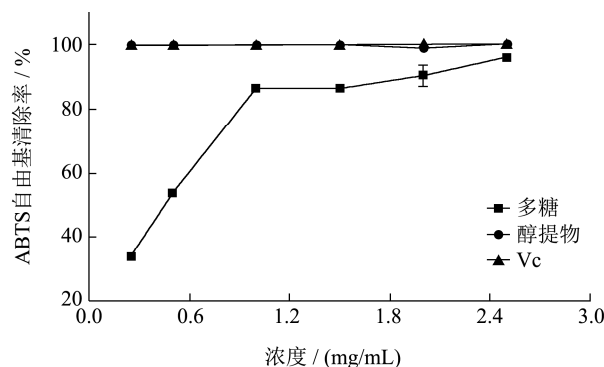


图 2 桑黄粗多糖和醇提物对 ABTS 自由基清除能力

Fig.2 The scavenging ability of *S. vaninii* polysaccharides and ethanol extracts to ABTS free radicals

### 2.2.3 羟基自由基清除能力

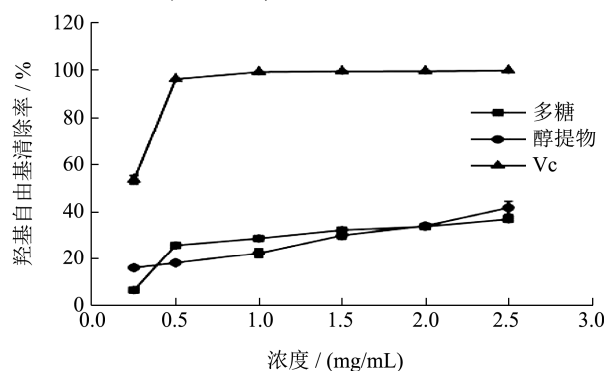


图 3 桑黄粗多糖和醇提物对羟基自由基清除能力

Fig.3 The scavenging ability of *S. vaninii* polysaccharides and ethanol extracts to hydroxyl free radicals

如图 3 所示，桑黄粗多糖和醇提物对羟基自由基均具有一定的清除作用，且随着浓度不断增加，清除率逐渐上升，但是二者对羟基自由基的清除作用远低于 Vc 的效果。在浓度为 2.50 mg/mL 时，醇提物清除率最高可达到 41.75%，而多糖的清除率只有 36.95%，二者相差不大。综合以上三种抗氧化实验，桑黄两种提取物对 DPPH 自由基和 ABTS 自由基都具有较高的

清除率,对羟基自由基清除效果较弱,这可能是由于自由基的抗氧化机制不同,多糖与酚类物质含有较多羟基,可提供质子与 ABTS 自由基和 DPPH 自由基反应,而羟基自由基通常是通过亲电加成反应清除自由基<sup>[33]</sup>。这与李帆等<sup>[34]</sup>的研究结果类似。

### 2.2.4 还原力

物质的抗氧化活性与还原力密切相关,物质的还原力越强,其抗氧化活性越好<sup>[35]</sup>。如图 4 所示,桑黄粗多糖与醇提取物的还原力显著低于 Vc, Vc 在 0.50 mg/mL 时就达到了 3.04。随着浓度的增大,桑黄两种提取物和 Vc 还原能力越强,与 DPPH 自由基清除效果类似,还原能力大小依次为 Vc>醇提取物>多糖。当质量浓度为 2.50 mg/mL 时,桑黄醇提取物的吸光度达到 3.21,为多糖的 3 倍,这表明醇提取物相较于多糖具有更强的还原力。

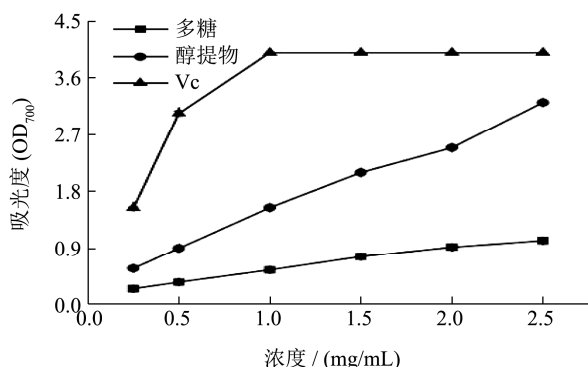


图 4 桑黄多糖和醇提取物的还原能力

Fig.4 The reducing power of *S. vaninii* polysaccharides and ethanol extracts

## 2.3 降血糖活性测定

### 2.3.1 $\alpha$ -淀粉酶抑制活性

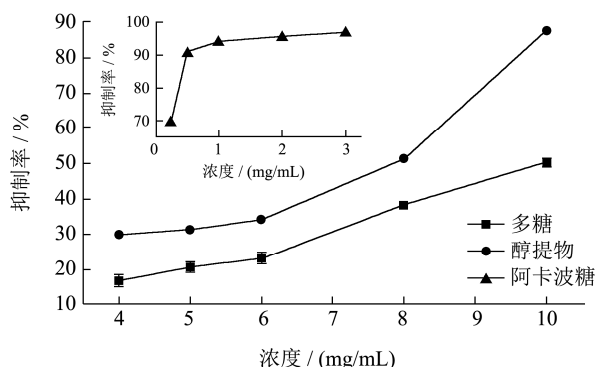


图 5 桑黄多糖和醇提取物对  $\alpha$ -淀粉酶的抑制作用

Fig.5 Inhibition effect of *S. vaninii* polysaccharides and ethanol extracts on  $\alpha$ -amylase

如图 5 所示,桑黄粗多糖和醇提取物对  $\alpha$ -淀粉酶均有一定的抑制效果。在浓度为 4.00~10.00 mg/mL 时,抑制率随着浓度的增加而逐渐增大,呈现出量效依赖

关系。当浓度增大到 10.00 mg/mL 时,多糖抑制率为 50.15%,而醇提取物则达到了 87.29%。此外,桑黄多糖和醇提取物的  $IC_{50}$  值分别为 10.35 mg/mL 和 6.63 mg/mL,远高于阿卡波糖  $IC_{50}$  值 (0.10 mg/mL)。相较而言,桑黄醇提取物可能比桑黄多糖更适于作为  $\alpha$ -淀粉酶的潜在抑制剂。

### 2.3.2 桑黄提取物对 $\alpha$ -淀粉酶的抑制类型

桑黄粗多糖和醇提取物对  $\alpha$ -淀粉酶抑制类型的双倒数 Lineweaver-Burk 图如图 6 所示。图 6a 中三组直线相交于第二象限靠近原点的一点,随着多糖浓度的升高,直线在纵轴的截距  $1/V$  依次增大,即  $V_{max}$  随多糖浓度增大而减小;在横轴的截距  $-1/K_m$  依次增大,即  $K_m$  随多糖浓度增大而增大,这表明桑黄多糖对  $\alpha$ -淀粉酶抑制类型为混合型抑制,其  $K_i$  值为 1.14 mg/mL。刘伟等<sup>[36]</sup>和 Wang 等<sup>[37]</sup>分别研究发现草莓多糖和刺梨果多糖对  $\alpha$ -淀粉酶抑制类型为非竞争性抑制,这表明多糖种类、结构不同可能会产生不同类型的  $\alpha$ -淀粉酶抑制作用。类似的,桑黄醇提取物对  $\alpha$ -淀粉酶抑制类型也为混合型抑制(图 6b),其  $K_i$  值为 3.26 mg/mL,该抑制类型与辣木叶乙醇提取物<sup>[38]</sup>和乳苣正丁醇提取物<sup>[39]</sup>和对  $\alpha$ -淀粉酶抑制类型相同。

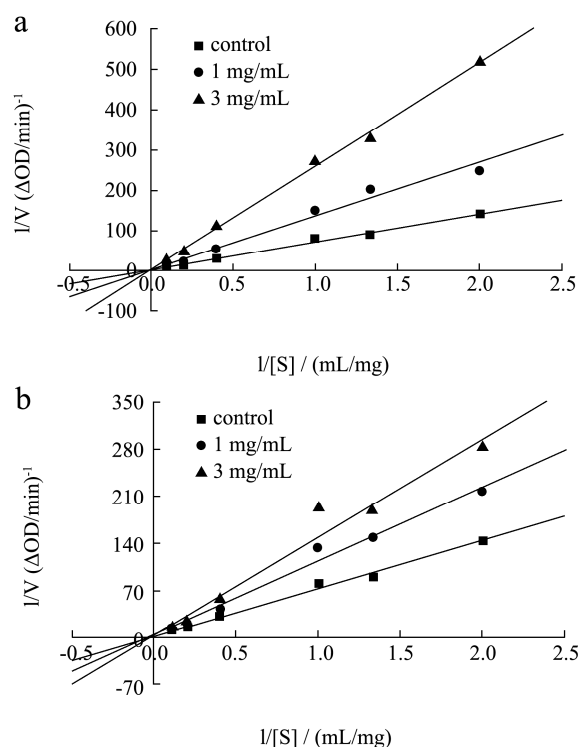


图 6 桑黄提取物对  $\alpha$ -淀粉酶的双倒数曲线

Fig.6 Lineweaver-Burk plots for the inhibition type of *S. vaninii* polysaccharides (a) and ethanol extracts (b) against  $\alpha$ -amylase

注: a.多糖; b.醇提取物。表 8、10 同。

### 2.3.3 $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制率的测定

在样品浓度为 0.20~1.00 mg/mL 时,桑黄多糖和

醇提取物均表现出一定的  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制活性,且具有浓度依赖效应(图7)。在浓度为 1.00 mg/mL 时,桑黄多糖和醇提取物对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制率分别为 33.84%和 81.03%。桑黄多糖  $IC_{50}$  值为 1.80 mg/mL,高于阳性对照阿卡波糖  $IC_{50}$  值(0.87 mg/mL),而桑黄醇提取物  $IC_{50}$  值为 0.43 mg/mL,显著低于阿卡波糖,这表明桑黄醇提取物对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制活性优于阿卡波糖,这与李榕娣等<sup>[40]</sup>的研究结果一致,原因可能是醇提取物中具有丰富的黄酮和酚类化合物,使得  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制作用强于阿卡波糖。也可能是多种化合物的共同作用,郑智音等<sup>[41]</sup>的研究结果表明:与单一给药相比,鲜马齿苋多糖、生物碱及多酚这三类组分整体给药能够让糖尿病小鼠血糖显著下降。

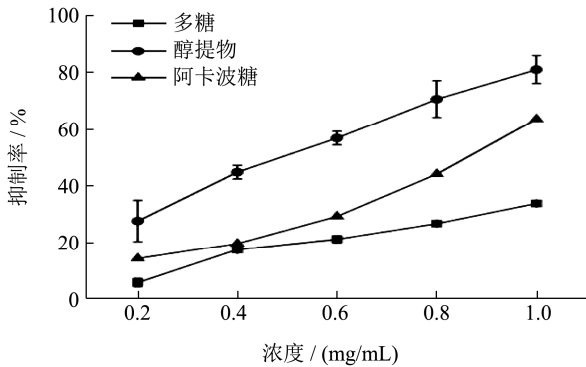


图7 桑黄多糖和醇提取物对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制作用

Fig.7 Inhibition effect of *S. vaninii* polysaccharides and ethanol extracts on  $\alpha$ -glucosidase

### 2.3.4 桑黄提取物对 $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制类型

桑黄多糖和醇提取物对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制类型的双倒数 Lineweaver-Burk 图如图8所示。图8a中,不同浓度的多糖溶液曲线均过Y轴上的一点,随着多糖浓度的升高,  $V_m$  不变,  $K_m$  增大,这种曲线特征符合竞争性可逆抑制的特点,所以桑黄粗多糖对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制类型属于竞争性可逆抑制,其抑制常数  $K_i$  值为 0.04 mg/mL。这与刺梨多糖对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的混合型抑制类型有所不同<sup>[37]</sup>。

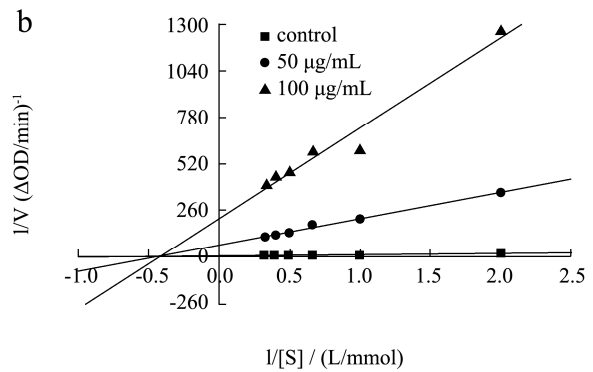
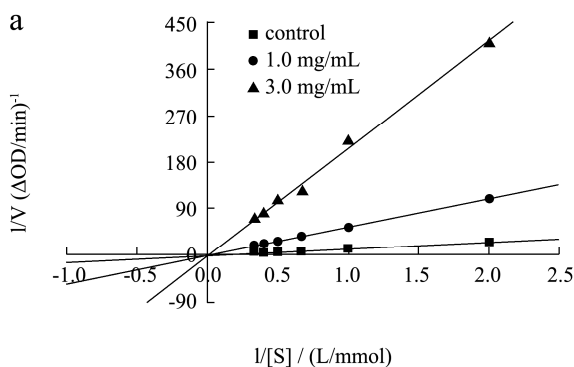


图8 桑黄提取物对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的双倒数曲线

Fig.8 Lineweaver-Burk plots for the inhibition type of *S. vaninii* polysaccharides (a) and ethanol extracts (b) against  $\alpha$ -glucosidase

图8b中,三条直线均过第三象限的一点,随着反应体系中桑黄醇提取物质量浓度的增大,体系  $K_m$  值减小,而最大反应速率  $V_m$  逐渐减小,这种现象属于竞争与反竞争的混合型抑制的特征,其抑制常数  $K_i$  值为 0.01 mg/mL。类似的,岩藻黄素<sup>[42]</sup>和焦枞酸<sup>[43]</sup>对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制类型均为混合型抑制。

## 2.4 降尿酸活性

### 2.4.1 黄嘌呤氧化酶抑制率的测定

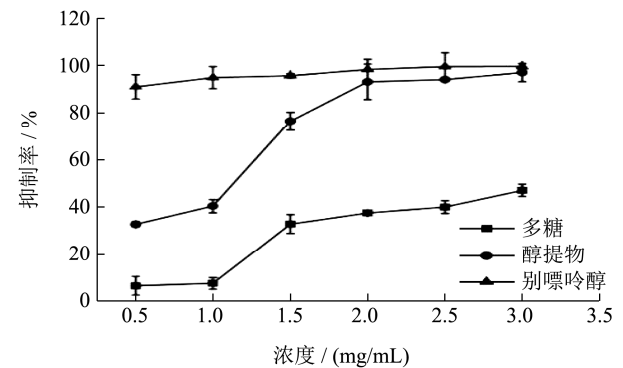


图9 桑黄多糖和醇提取物对黄嘌呤氧化酶的抑制作用

Fig.9 Inhibition effect of *S. vaninii* polysaccharides and ethanol extracts on xanthine oxidase

作为人体内嘌呤代谢的关键酶,黄嘌呤氧化酶可催化黄嘌呤和次黄嘌呤生成尿酸,过多的尿酸却会导致高尿酸血症,并引发痛风,而黄嘌呤氧化酶抑制剂通过抑制 XOD 活性,能够减少尿酸盐的生成<sup>[23]</sup>。已有研究表明酚类和黄酮类化合物对黄嘌呤氧化酶有较好的抑制作用<sup>[44,45]</sup>,有关多糖降尿酸活性的研究相对较少。因此,本研究通过桑黄醇提取物与多糖对黄嘌呤氧化酶的抑制能力来评价其作为黄嘌呤氧化酶抑制剂的潜力。以别嘌呤醇为阳性对照,分析了不同浓度的

桑黄提取物对黄嘌呤氧化酶抑制率的影响。如图 9 所示, 在 0.50~3.00 mg/mL 的浓度范围内, 随着样品浓度的增加, 桑黄多糖和醇提取物对 XOD 的抑制率也呈现出增加的趋势。在 3.00 mg/mL 时, 桑黄醇提取物抑制率为 97.07%, 显著高于桑黄多糖抑制率 (47.34%)。此外, 桑黄醇提取物  $IC_{50}$  值为 0.85 mg/mL, 远低于桑黄多糖的  $IC_{50}$  值 (3.03 mg/mL), 但二者  $IC_{50}$  值均高于阳性对照别嘌呤  $IC_{50}$  值 (0.05 mg/mL)。

#### 2.4.2 桑黄提取物对黄嘌呤氧化酶的抑制类型

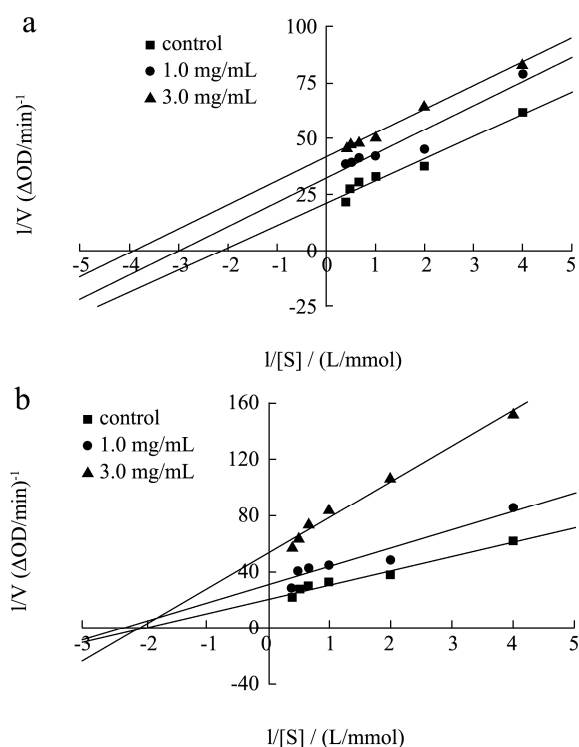


图 10 桑黄提取物对黄嘌呤氧化酶的双倒数曲线

Fig.10 Lineweaver-Burk plots for the inhibition type of *S. vaninii* polysaccharides (a) and ethanol extracts (b) against xanthine oxidase

桑黄多糖和醇提取物对黄嘌呤氧化酶抑制类型的双倒数 Lineweaver-Burk 图如图 10 所示。图 10a 中, 不同浓度的多糖溶液直线在图上呈现出一组平行的直线, 随着多糖浓度的升高, 反应速率  $V_m$  降低,  $K_m$  减小, 这种曲线特征符合反竞争性可逆抑制的特点, 所以桑黄粗多糖对黄嘌呤氧化酶的抑制类型属于反竞争性可逆抑制, 其抑制常数  $K_i=3.58$  mg/mL。这与鼠尾藻水溶性组分<sup>[46]</sup>对黄嘌呤氧化酶的抑制类型一致。

图 10b 中, 不同浓度的醇提取物溶液直线相交于 X 负轴上的一点, 随着桑黄醇提取物浓度的增大, 体系  $K_m$  值保持不变, 而最大反应速率  $V_m$  逐渐减小, 符合非竞争抑制类型的特征, 其抑制常数  $K_i=1.86$  mg/mL。万茵等<sup>[23]</sup>研究发现, 荞麦籽、白高粱对黄嘌呤氧化酶的抑制类型为竞争性抑制, 麦仁、薏仁米对黄嘌呤氧

化酶的抑制类型为混合型抑制, 这表明醇提取物所含成分不同, 其对黄嘌呤氧化酶抑制类型也不同。

### 3 结论

实验以桑黄子实体为原料, 采用超声提取方法制备了桑黄粗多糖和醇提取物, 对二者基本组成、体外抗氧化、降血糖和降尿酸活性进行了系统研究。结果显示, 桑黄粗多糖中总糖含量为 74.87%, 另外含有少量蛋白质、糖醛酸及硫酸基; 桑黄醇提取物中, 其主要活性成分是酚类和黄酮类, 其酚类含量高达 35.72%, 黄酮类含量为 8.98%。体外抗氧化实验表明桑黄多糖和醇提取物具有一定的 DPPH 自由基、ABTS 自由基、羟自由基清除能力和一定的还原力, 总体来看, 桑黄醇提取物抗氧化活性好于桑黄多糖。体外降血糖实验表明桑黄粗多糖和醇提取物对  $\alpha$ -淀粉酶、 $\alpha$ -葡萄糖苷酶均有一定的抑制效果, 但是桑黄醇提取物体外降血糖效果明显优于桑黄多糖。另外, 桑黄醇提取物对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制作用  $IC_{50}$  值为 0.43 mg/mL, 远低于阿卡波糖  $IC_{50}$  值 (0.87 mg/mL), 这表明桑黄醇提取物可能具有一定降血糖功效。动力学试验表明, 桑黄多糖和醇提取物对  $\alpha$ -淀粉酶活性的抑制作用类型均为混合型抑制; 桑黄多糖对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性的抑制作用类型为竞争性抑制, 而醇提取物为混合型抑制。体外降尿酸实验发现, 桑黄多糖和醇提取物均对黄嘌呤氧化酶具有一定的抑制作用, 并且桑黄醇提取物降尿酸活性优于桑黄粗多糖; 二者对黄嘌呤氧化酶抑制作用类型截然不同, 桑黄多糖呈现反竞争性抑制, 而醇提取物为非竞争抑制。综上所述, 桑黄醇提取物具有较高体外抗氧化、降血糖和降尿酸活性, 但粗提取物中起主要作用的活性成分和结构是哪一种, 目前尚不清楚, 还需进一步纯化明确其作用机制, 同时还需通过动物实验验证其体内的生物活性。

### 参考文献

- [1] 吴声华,戴玉成.药用真菌桑黄的种类解析[J].菌物学报, 2020,39(5):781-794  
WU Shenghua, DAI Yucheng. Species clarification of the medicinal fungus sanghuang [J]. Mycosystema, 2020, 39(5): 781-794
- [2] 王豪,钱坤,司静,等.桑黄类真菌多糖研究进展[J].菌物学报, 2021,40(4):895-911  
WANG Hao, QIAN Kun, SI Jing, et al. Research advances on polysaccharides from sanghuang [J]. Mycosystema, 2021, 40(4): 895-911
- [3] 曹红妹,胡桂萍,石旭平,等.药用真菌桑黄的研究进展[J].蚕业科学,2019,45(2):285-292

- CAO Hongmei, HU Guiping, SHI Xuping, et al. Research progress on medicinal fungus sanghuang [J]. Science of Sericulture, 2019, 45(2): 285-292
- [4] 吕国英,宋婷婷,蔡为明,等.野生桑树桑黄和杨树桑黄化学成分及抗氧化活性比较[J].菌物学报,2021,40(7):1833-1843
- LYU Guoying, SONG Tingting, CAI Weiming, et al. Comparative study of chemical components and antioxidant activities of wild *Sanghuangporus sanghuang* and *Sanghuangporus vaninii* [J]. Mycosystema, 2021, 40(7): 1833-1843
- [5] Zheng N, Ming Y, Chu J, et al. Optimization of extraction process and the antioxidant activity of phenolics from *Sanghuangporus baumii* [J]. Molecules, 2021, 26(13): 3850
- [6] 胡晓彤,叶玉洁,石光,等.桑黄子实体多糖的提取及其对 D-半乳糖诱导的 3T3 细胞损伤的保护作用[J].食品科学,2020, 41(19):204-211
- HU Xiaotong, YE Yujie, SHI Guang, et al. Extraction of polysaccharides from fruiting bodies of *Phellinus igniarius* and its protective effect on D-galactose induced 3T3 cell injury [J]. Food Science, 2020, 41(19): 204-211
- [7] Feng H, Zhang S J, Wan J M F, et al. Polysaccharides extracted from *Phellinus linteus* ameliorate high-fat high-fructose diet induced insulin resistance in mice [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 200: 144-153
- [8] Wang W H, Wu F H, Yang Y, et al. Hypoglycemic effect of ethanol and ethyl acetate extract of *Phellinus baumii* fruiting body in streptozotocin-induced diabetic mice [J]. Evidence-based Complementary and Alternative Medicine, 2015, 3: 783460
- [9] Guo Q, Zhao L, Zhu Y, et al. Optimization of culture medium for *Sanghuangporus vaninii* and a study on its therapeutic effects on gout [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2021, 135: 111194
- [10] Zhou L W, Ghobad-Nejhad M, Tian X M, et al. Current status of 'Sanghuang' as a group of medicinal mushrooms and their perspective in industry development [J]. Food Reviews International, DOI: 10.1080/87559129.2020.1740245
- [11] NY/T 1676-2008,食用菌中粗多糖含量的测定[S]
- NY/T 1676-2008, Determination of Crude Mushroom Polysaccharides [S]
- [12] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72(1-2): 248-254
- [13] 郝金斌,孟国良,杨军,等.奶油栓孔菌子实体多糖的理化性质、抗氧化活性与保肝作用[J].菌物学报,2020,39(12):2355-2368
- HAO Jinbin, MENG GuoLiang, YANG Jun, et al. Physicochemical properties, antioxidant activities and liver protective effects of polysaccharides from fruiting bodies of *Trametes lactinea* [J]. Mycosystema, 2020, 39(12): 2355-2368
- [14] Dodgson K S, Price R G. A note on the determination of the ester sulphate content of sulphated polysaccharides [J]. Biochemical Journal, 1962, 84(1): 106-110
- [15] Mehmood A, Murtaza G. Phenolic contents, antimicrobial and antioxidant activity of *Olea ferruginea* Royle (Oleaceae) [J]. BMC Complementary and Alternative Medicine, 2018, 18(1): 1-6
- [16] Yhaia E M, Gutiérrez-Orozco F, Moreno-Pérez M A. Identification of phenolic compounds by liquid chromatography-mass spectrometry in seventeen species of wild mushrooms in central Mexico and determination of their antioxidant activity and bioactive compounds [J]. Food Chemistry, 2017, 226: 14-22
- [17] NY/T 3676-2020,灵芝中总三萜含量的测定 分光光度法[S]
- NY/T 3676-2020, Determination of Total Triterpene in *Ganoderma*-Spectrophotometric Method [S]
- [18] 张俊峰,张忠,汪雯翰,等.桑黄菌丝体和子实体中次级代谢产物及其活性的比较[J].菌物学报,2020,39(2):398-408
- ZHANG Junfeng, ZHANG Zhong, WANG Wenhan, et al. Comparison of active secondary metabolites between mycelia and fruiting bodies of *Sanghuangporus sanghuang* [J]. Mycosystema, 2020, 39(2): 398-408
- [19] Chen Z, Yin C, Fan X, et al. Characterization of physicochemical and biological properties of *Schizophyllum commune* polysaccharide extracted with different methods [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 156: 1425-1434
- [20] Shang H, Zhou H, Duan M, et al. Extraction condition optimization and effects of drying methods on physicochemical properties and antioxidant activities of polysaccharides from comfrey (*Symphytum officinale* L.) root [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 112: 889-899
- [21] 王静,刁翠茹,王华丽,等.鼠尾草酸对  $\alpha$ -淀粉酶的抑制作用[J].食品科学,2020,41(3):12-17
- WANG Jing, DIAO Cuiru, WANG Huali, et al. Inhibitory mechanism of carnosic acid on  $\alpha$ -amylase [J]. Food Science,



- 2020, 41(3): 12-17
- [22] 刘合生,柳余莉,陈秋平,等.杨梅黄酮类化合物对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性的抑制作用[J].核农学报,2018,32(1):70-77  
LIU Hesheng, LIU Yuli, CHEN Qiuping, et al. Inhibitory activity of flavonoids from *Myrica rubra* on  $\alpha$ -glucosidase [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(1): 70-77
- [23] 万茵,李益珍,梁玉禧,等.谷物杂粮醇提物体外抑制黄嘌呤氧化酶的作用[J].中国食品学报,2018,18(5):29-36  
WAN Yin, LI Yizhen, LIANG Yuxi, et al. Inhibitory effect of common cereal and grain ethanol extracts on xanthine oxidase *in vitro* [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(5): 29-36
- [24] 王钦博,杨焱,刘艳芳,等.一年生和两年生桑黄子实体的成分和生物活性[J].食用菌学报,2010,17(2):71-75  
WANG Qinbo, YANG Yan, LIU Yanfang, et al. Chemical composition and bioactivities of one-and two-year-old *Phellinus baumii* fruit bodies [J]. Acta Edulis Fungi, 2010, 17(2): 71-75
- [25] Yang N C, Wu C C, Liu R H, et al. Comparing the functional components, SOD-like activities, antimutagenicity, and nutrient compositions of *Phellinus igniarius* and *Phellinus linteus* mushrooms [J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2016, 24(2): 343-349
- [26] 叶玉洁,石光,周正乙,等.桑黄菌丝体与子实体成分的比较分析[J].食品科学,2019,40(24):246-251  
YE Yujie, SHI Guang, ZHOU Zhengyi, et al. Comparative chemical composition of mycelium and fruit body of *Phellinus igniarius* [J]. Food Science, 2019, 40(24): 246-251
- [27] 宋吉玲,周祖法,闫静,等.基于 UPLC-MS/MS 技术的代谢组学方法研究麸皮对杨树桑黄代谢的影响[J].菌物学报,2021, 40(3):641-655  
SONG Jiling, ZHOU ZuFa, YAN Jing, et al. Study of effects of bran on the metabolism of *Sanghuangporus vaninii* based on metabolomics of UPLC-MS/MS [J]. Mycosystema, 2021, 40(3): 641-655
- [28] Yuan Q, Zhao L, Li Z, et al. Physicochemical analysis, structural elucidation and bioactivities of a high-molecular-weight polysaccharide from *Phellinus igniarius* mycelia [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 1855-1864
- [29] Shen Q H, Huang Q, Xie J Y, et al. A rapid analysis of antioxidants in *Sanghuangporus baumii* by online extraction-HPLC-ABTS [J]. RSC Advances, 2021, 11(41): 25646-25652
- [30] 梁丽,朱雯琦,刘晓芳,等.茶叶籽油中酚类化合物的提取优化及其抗氧化相互作用动力学研究[J].中国油脂,DOI: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.210463  
LIANG Li, ZHU Wenqi, LIU Xiaofang, et al. Extraction optimization and antioxidant interaction kinetics of phenolic compounds from tea seed oil [J]. China Oils and Fats, DOI: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.210463
- [31] 应瑞峰,黄梅桂,王耀松,等.桑黄子实体与桑黄菌丝多糖抗氧化活性研究[J].食品研究与开发,2017,38(21):1-5  
YING Ruifeng, HUANG Meigui, WANG Yaosong, et al. Antioxidant activity of polysaccharides from *Phellinus igniarius* fruiting body and mycelium [J]. Food Research and Development, 2017, 38(21): 1-5
- [32] 佟晓红,王欢,刘宝华,等.生物解离大豆蛋白酶解物体外模拟消化抗氧化活性变化[J].食品科学,2019,40(15):50-56  
TONG Xiaohong, WANG Huan, LIU Baohua, et al. Changes in antioxidant activity of soybean protein hydrolysates from enzyme-assisted aqueous extraction of oil under simulated gastrointestinal digestion [J]. Food Science, 2019, 40(15): 50-56
- [33] 孙宁云,姚欣,张英慧,等.鸡蛋花多糖提取工艺优化及生物活性研究[J].食品工业科技,2022,43(3):180-187  
SUN Ningyun, YAO Xin, ZHANG Yinghui, et al. Optimization of extraction process of polysaccharides from *Plumeriarubra* L. cv. *Acutifolia* and evaluation of biological activity [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(3): 180-187
- [34] 李帆,邢珂慧,邵佩兰,等.红枣色素与枣多糖的协同抗氧化作用[J].食品工业科技,2019,40(9):13-17,23  
LI Fan, XING Kehui, SHAO Peilan, et al. Synergistic antioxidant effects of pigments and polysaccharides from jujube [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(9): 13-17, 23
- [35] 何晋浙,徐瑶阳,孙培龙.不同来源猴头菌营养成分及其多糖化学组成和抗氧化活性比较[J].食品与发酵工业,2016, 42(1):134-140  
HE Jinzhe, XU Yaoyang, SUN Peilong. The comparison of nutrients, chemical composition and antioxidant activity of polysaccharides from six *Hericium erinaceus* specimens [J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(1): 134-140
- [36] 刘伟,刘倩楠,张良,等.草莓多糖树脂法脱色工艺优化及其化学性质研究[J].食品工业科技,2020,41(10):38-46,51  
LIU Wei, LIU Qiannan, ZHANG Liang, et al. Optimization of decoloration process by macroporous resins and its chemical properties of strawberry polysaccharides [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(10):

- 38-46, 51
- [37] Wang L, Zhang B, Xiao J, et al. Physicochemical, functional, and biological properties of water-soluble polysaccharides from *Rosa roxburghii* Tratt fruit [J]. Food Chemistry, 2018, 249: 127-135
- [38] 钟英英,谢勇鹏,郭莎莎,等.辣木叶中  $\alpha$ -淀粉酶抑制物的提取工艺[J].食品工业,2019,40(8):118-122  
ZHONG Yingying, XIE Yongpeng, GUO Shasha, et al. Optimization for the extraction of  $\alpha$ -amylase inhibitor from *Moringa adans* leaves [J]. The Food Industry, 2019, 40(8): 118-122
- [39] 高义霞,陶超楠,郑婷,等.乳苣不同溶剂提取物对  $\alpha$ -淀粉酶的抑制作用及光谱研究[J].食品工业科技,2018,39(7):104-109  
GAO Yixia, TAO Chaonan, ZHENG Ting, et al. Inhibition effects and spectrum of different solvent extracts from *Mulgedium tataricum* L. on  $\alpha$ -amylase [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(7): 104-109
- [40] 李榕娣,庄远杯,魏爱红,等.不同蕨菜制品醇提取物体外抗氧化及降血糖活性研究[J].食品工业科技,2021,19:56-63  
LI Rongdi, ZHUANG Yuanbei, WEI Aihong, et al. Antioxidant and hypoglycemic activities of different processing products from ethanol extracts of *Blechnum orientale* L. *in vitro* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 19: 56-63
- [41] 郑智音,贾晓斌,舒雯,等.鲜马齿苋多糖、生物碱和多酚类组分的制备及其降血糖活性研究[J].中草药,2014,45(18): 2673-2677  
ZHENG Zhiyin, JIA Xiaobin, SHU Luan, et al. Preparation of polysaccharides, alkaloids, and polyphenols from fresh *Portulaca oleracea* and their anti-diabetic effects [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2014, 45(18): 2673-2677
- [42] Zaharudin N, Staerk D, Dragsted L O. Inhibition of  $\alpha$ -glucosidase activity by selected edible seaweeds and fucoxanthin [J]. Food Chemistry, 2019, 270: 481-486
- [43] Zheng L, Lee J, Yue L M, et al. Inhibitory effect of pyrogallol on  $\alpha$ -glucosidase: integrating docking simulations with inhibition kinetics [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 112: 686-693
- [44] Nile S H, Nile A S, Keum Y S, et al. Utilization of quercetin and quercetin glycosides from onion (*Allium cepa* L.) solid waste as an antioxidant, urease and xanthine oxidase inhibitors [J]. Food Chemistry, 2017, 235: 119-126
- [45] Qi J, Sun L, Qian S Y, et al. A novel multi-hyphenated analytical method to simultaneously determine xanthine oxidase inhibitors and superoxide anion scavengers in natural products [J]. Analytica Chimica Acta, 2017, 984: 124-133
- [46] 张璐.鼠尾藻和羽藻提取物对黄嘌呤氧化酶抑制作用的研究[D].青岛:中国海洋大学,2013  
ZHANG Luo. Studies on inhibition effects of extracts from *Sargassum thumbergii* and *Bryopsis plumose* on the xanthine oxidase [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013

(上接第 303 页)

- [31] 李伟,韩建平,高钧,等.液相色谱-电喷雾质谱联用测定细辛及养血清脑颗粒中马兜铃酸 A[J].分析化学,2007,12:1798-1800  
LI Wei, HAN Jianping, GAO Jun, et al. Determination of aristolochic acid A in rhizoma asari and Yangxueqingnao granules using liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2007, 12: 1798-1800
- [32] 李功辉,陈莎,鄢兰,等.UPLC-QQQ-MS 测定中药材中马兜铃酸 I 的含量[J].中国实验方剂学杂志,2017,23(13):61-65  
LI Gonghui, CHEN Sha, WU Lan, et al. Determination of aristolochic acid in traditional Chinese medicine by UPLC-QQQ-MS [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2017, 23(13): 61-65
- [33] 丁慧,沈君子,费文静,等.UPLC-MS/MS 检测马兜铃属药材中 4 种马兜铃酸的含量[J].中国民族民间医药,2018,27(18): 38-43  
DING Hui, SHEN Junzi, FEI Wenjing, et al. Determination of aristolochic acid A、B、C、D in aristolochia herbs by UPLC-MS/MS [J]. Chinese Journal of Ethnomedicine and Ethnopharmacy, 2018, 27(18): 38-43