

杨树桑黄与粗毛纤孔菌醇提物化学组成、体外抗氧化活性与降血糖潜力比较

范俐红¹, 殷朝敏^{2*}, 张琪², 高虹^{2,3}, 范秀芝², 史德芳², 陈盛⁴, 刘吉发⁵, 李真顺^{1*}

(1. 长江大学生命科学学院, 湖北荆州 434025) (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. 湖北省香菇产业技术研究院, 湖北随州 441309) (4. 湖北浩伟科技股份有限公司, 湖北钟祥 448000) (5. 新疆金桑湾生物科技有限公司, 新疆精河 833300)

摘要: 该研究采用超声辅助 95% 乙醇提取法制备了杨树桑黄与粗毛纤孔菌醇提物 (SEP 与 IEP), 深入对比了二者在活性成分、多酚组分及体外抗氧化与潜在降血糖活性上的差异, 并对其进行了相关性分析。结果显示, SEP 中总酚与总甾醇的质量分数分别为 33.06% 和 7.78%, 显著高于 IEP ($P<0.05$); 而 IEP 的得率 (18.59%) 和总黄酮质量分数 (25.53%) 显著高于 SEP (7.96% 和 13.90%) ($P<0.05$)。SEP 富含原儿茶酸、原儿茶醛和香草酸, 含量分别为 196.07、142.17 和 138.77 $\mu\text{g}/\text{mg}$, 显著高于 IEP ($P<0.05$), 且 SEP 中 7 种酚类化合物总含量更高。此外, SEP 的 DPPH、ABTS⁺、羟基自由基清除能力及还原力和抗脂质过氧化能力均优于 IEP, 且 SEP 对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用强于 IEP (IC_{50} 值分别为 0.44 和 0.62 mg/mL); 但 IEP (IC_{50} 值为 0.65 mg/mL) 对 α -淀粉酶的抑制能力比 SEP 更强 (IC_{50} 值为 0.46 mg/mL)。相关性分析结果表明, 酚类化合物与抗氧化活性和酶抑制能力之间相关性较强。综上, 尽管 SEP 的抗氧化活性优于 IEP, 但二者均具备显著的降血糖潜力, 鉴于 IEP 的高得率, 它可能更适宜成本控制下的降血糖产品开发。该试验结果能够推动桑黄资源的综合利用和深度开发。

关键词: 杨树桑黄; 粗毛纤孔菌; 多酚; 抗氧化; 降血糖

文章编号: 1673-9078(2025)11-117-126

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.11.1184

Comparison of Chemical Composition, *in Vitro* Antioxidant Activity, and Hypoglycemic Potential of Ethanol Extracts from *Sanghuangporus vaninii* and *Inonotus hispidus*

FAN Lihong¹, YIN Chaomin^{2*}, ZHANG Qi², GAO Hong^{2,3}, FAN Xiuzhi², SHI Defang², CHEN Sheng⁴, LIU Jifa⁵, LI Zhenshun^{1*}

(1.College of Life Science, Yangtze University, Jingzhou 434025, China)(2.Institute of Agro-Products Processing and Nuclear agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China)(3.Hubei Xianggu

引文格式:

范俐红,殷朝敏,张琪,等.杨树桑黄与粗毛纤孔菌醇提物化学组成、体外抗氧化活性与降血糖潜力比较[J].现代食品科技, 2025,41(11):117-126.

FAN Lihong, YIN Chaomin, ZHANG Qi, et al. Comparison of chemical composition, *in Vitro* antioxidant activity, and hypoglycemic potential of ethanol extracts from *Sanghuangporus vaninii* and *Inonotus hispidus* [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(11): 117-126.

收稿日期: 2024-08-13; 修回日期: 2024-10-21; 接受日期: 2024-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32072229); 湖北省农业科学院“青年拔尖人才”培养计划 (2022); 湖北省技术研发重大项目 (2023BEB022); 湖北省食用菌产业体系加工岗 (2023HBSTX4-09)

作者简介: 范俐红 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食用菌生物活性物质研究, E-mail: 2505524505@qq.com

通讯作者: 殷朝敏 (1987-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 食用菌生物活性物质研究, E-mail: yinchaomin@163.com; 共同通讯作者:

李真顺 (1978-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品组分相互作用及界面化学研究, E-mail: 84481552@qq.com

Mushroom Industrial Technology Research Institute, Suizhou 441309, China)(4.Hubei Haowei Technology Co. Ltd., Zhongxiang 448000, China)(5.Jinghe Golden Jinsangwan Biological Science and Technology Co. Ltd., Jinghe 833300, China)

Abstract: In this study, the ethanolic extracts of *S. vaninii* (SEP) and *I. hispidus* (IEP) were prepared by the ultrasonic-assisted extraction method using 95% ethanol, and their active components, major polyphenolic content, *in vitro* antioxidant activity, and potential hypoglycemic effects were analyzed and compared, with their correlations were analyzed. The results showed that the mass fractions of total phenolics and total sterols in SEP were 33.06% and 7.78%, respectively, which were significantly higher than those in IEP ($P<0.05$). However, the extraction yield (7.96%) and the mass fraction of total flavonoids (13.90%) of SEP were lower than those of IEP (18.59% and 25.53%, respectively) ($P<0.05$). Compared with IEP, SEP had higher contents of protocatechuic acid (196.07 $\mu\text{g}/\text{mg}$), protocatechuic aldehyde (142.17 $\mu\text{g}/\text{mg}$), and vanillic acid (138.77 $\mu\text{g}/\text{mg}$) ($P<0.05$), and a highertotal content of seven phenolic compounds. Moreover, SEP exhibited higher DPPH, ABTS⁺ and hydroxyl radical scavenging activities, reducing power, anti-lipid peroxidation activity, and stronger inhibitory activity against α -glucosidase ($\text{IC}_{50}=0.44 \text{ mg}/\text{mL}$) compared with IEP ($\text{IC}_{50}=0.62 \text{ mg}/\text{mL}$). However, IEP showed stronger inhibitory activity against α -amylase ($\text{IC}_{50}=0.46 \text{ mg}/\text{mL}$) than SEP ($\text{IC}_{50}=0.65 \text{ mg}/\text{mL}$). The correlation analysis revealed a strong correlation between the phenolic compounds and the antioxidant activities and enzyme inhibitory capacities. In summary, although SEP exhibits higher antioxidant activity and α -glucosidase inhibitory activity than IEP, both exhibit significant hypoglycemic potential. Considering the high yield of IEP, IEP may be more suitable for the development of hypoglycemic products due to its low cost. These results may promote the comprehensive utilization and in-depth development of Sanghuang resource.

Key words: *Sanghuangporus vaninii*; *Inonotus hispidus*; polyphenol; antioxidant; hypoglycaemic

桑黄 (Sanghuang), 又称桑耳、桑臣, 分类学历史上将其归属于担子菌门、伞菌纲、锈革孔菌目、锈革孔菌科, 在我国已有 2000 多年的应用历史, 是一类珍贵的药用真菌^[1]。据《神农本草经》和《药性论》等医书记载, 桑黄可用于治疗久泄气虚、产后凝血、腹痛、腹泻、月经不调等疾病^[2]。现代研究表明, 桑黄富含多糖、多酚、三萜、类黄酮和脂肪酸等多种活性成分^[1], 这赋予了其抗炎^[3]、抗肿瘤^[4]、抗氧化^[5]、抗增殖^[6]等多种药理作用, 因此桑黄也被称为“森林黄金”。然而, 关于古籍中明确记载为“桑黄”的真菌种类, 学术界至今仍存在探讨与不同见解, 桑黄孔菌属 (*Sanghuangporus*)、纤孔菌属 (*Inonotus*) 等多个属种均被纳入讨论范畴^[2,7]。杨树桑黄 (*Sanghuangporus vaninii*) 作为桑黄孔菌属中的代表种, 活性成分含量丰富且在抗肿瘤、免疫调节等方面表现出显著功效^[4]。粗毛纤孔菌 (*Inonotus hispidus*) 也是一种具有多种药理活性的桑黄类真菌, 富含多酚类和多糖类物质, 表现出优异的抗氧化和抗炎作用, 且对药源性损伤有修复作用^[3,8]。目前, 这两种桑黄在我国均已实现人工栽培且产量较高、品质较好^[7], 因而受到研究者的广泛关注。

传统中药材常以水煎服, 但据古籍记载, 桑黄多以醇酒煎尝或热酒调服^[9], 这可能归因于其中的大量生物活性物质难溶于水, 而以醇酒作为溶剂能更有效地提取和利用这些活性成分^[1]。近年来, Zhang

等^[5]和张莹璐等^[7]研究发现桑黄醇提物中的主要活性物质为多酚类化合物, 并且具有较好的抗氧化活性; Lin 等^[6]的研究表明桑黄醇提物对肝癌细胞具有一定的抗增殖作用。同时已有多项研究表明, 酚类化合物对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶表现出较高的抑制活性^[10-12], 因此在高血糖治疗领域具有良好的应用前景。然而, 关于杨树桑黄和粗毛纤孔菌乙醇提取物降血糖活性的系统研究尚显匮乏, 还有待深入研究以拓展其药用价值。

本研究以杨树桑黄与粗毛纤孔菌子实体为原料制备其醇提物, 测定了提取物中的活性成分含量, 并对其多酚组分进行了定量分析, 同时比较了其体外抗氧化活性与降血糖潜力, 以期挖掘桑黄的药用价值, 促进桑黄功能产品的开发提供有力支持。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

杨树桑黄子实体 (杨树椴木仿野生栽培, 一年生), 吉林省长白县林丰菌业有限公司; 粗毛纤孔菌子实体 (桑树椴木仿野生栽培, 一年生), 新疆金桑湾生物科技有限公司。抗坏血酸 (Vc)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (DPPH)、2,2'-联氮-二 (3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸) 二铵盐 (ABTS⁺) 和标准品没食子酸、原儿茶酸、原儿茶醛、香草酸、咖啡酸、对香豆酸、二氢槲

皮素（均为色谱级），上海源叶生物科技有限公司。 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶，上海阿拉丁有限公司。乙腈、乙酸、甲醇（均为色谱级），赛默飞世尔科技公司。其余试剂均为标准分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

KQ-1000VDE 双频数控超声波清洗器，昆山市超声仪器有限公司。Prominence Plus 高效液相色谱仪、AQ-C18 型色谱柱（3 μm ，4.6 $\times$ 250 mm），日本岛津有限公司。Multiskan SkyHigh 多功能酶标仪，赛默飞世尔科技公司。

1.2 试验方法

1.2.1 样品制备

参考李雨鸿等^[13]的方法稍作修改，将桑黄子实体剪成细小短段置于 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干至恒重，随后粉碎并经 40 目网筛过滤得到桑黄子实体干粉，于 4 $^{\circ}\text{C}$ 条件下储存。以料液比 1:40 (m/V) 的比例将两种桑黄子实体干粉分别浸泡于体积分数为 95% 的乙醇中，并经 60 min 磁力搅拌以确保充分提取，随后在 400 W 功率条件下进行 20 min 超声辅助提取，再经过离心以分离出上清液。残渣重复提取两次，合并上清液，随后将其旋蒸浓缩至一定的体积后再经冷冻干燥得到杨树桑黄（SEP）与粗毛纤孔菌醇提物（IEP）。

1.2.2 不同提取物的活性成分含量分析

总多酚含量采用福林-酚比色法^[6]进行测定；总黄酮含量采用亚硝酸钠-硝酸铝比色法^[14]进行测定；总三萜含量采用香草醛-高氯酸比色法^[15]进行测定；总甾醇含量采用香草醛-高氯酸比色法^[16]进行测定。

1.2.3 不同提取物的主要多酚成分分析

使用高效液相色谱法（HPLC）测定不同提取物中的多酚成分。条件参数设定：流动相 A 为含 $\varphi=0.1\%$ 乙酸的乙腈溶液；流动相 B 为 $\varphi=0.1\%$ 的乙酸水溶液；流量设置为 0.5 mL/min；每次进样量 10 μL ；柱温 30 $^{\circ}\text{C}$ ；检测波长为 280 nm。梯度洗脱程序为：0~5 min，10%~20% A；5~20 min，20%~40% A；20~30 min，40%~50% A；30~35 min，50%~30% A；35~40 min，30%~10% A；40~50 min，10% A。首先检测不同浓度的标准品色谱图，记录峰面积，绘制浓度-峰面积标准曲线。随后，同等条件下测定样品色谱图，比对保留时间识别化合物，根据峰面积与标准曲线计算化合物的含量。

1.2.4 不同提取物的抗氧化活性测定

以 Vc 作为阳性对照，不同样品质量浓度范围设置为 0.0~2.5 mg/mL。依据 Liu 等^[14]所描述的方法测定了不同样品的 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基清除活性以及

脂质过氧化抑制活性。依据 Chen 等^[17]的方法进行羟基自由基清除活性及还原力的测定。

1.2.5 不同提取物的降血糖活性测定

1.2.5.1 α -淀粉酶抑制活性

以阿卡波糖作为阳性对照，评估不同样品的 α -淀粉酶抑制活性。基于 Yu 等^[10]的方法稍作修改，设置样品质量浓度梯度为 0.25~3.00 mg/mL，分别吸取不同质量浓度的样品 20 μL 于样品管中，加入等体积的 α -淀粉酶溶液（5 U/mL）与之混匀，随后 37 $^{\circ}\text{C}$ 反应 10 min；反应完成后在所有试管中加入 40 μL 的淀粉溶液（1.0 wt.%）并于同等条件下继续反应 10 min，随后立即取出并向其中加入 80 μL 3,5-二硝基水杨酸（DNS）试剂以终止酶反应，再将其置于沸水浴中加热 5 min 使其显色，最后冰浴冷却并用 1.0 mL 超纯水进行稀释，于 540 nm 处测定样品吸光度值，根据以下公式计算可得出 α -淀粉酶抑制率：

$$Y = \left(1 - \frac{C-D}{A-B}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中：

Y——抑制率，%；

A——加酶不加样管的吸光度值；

B——不加酶不加样管的吸光度值；

C——加酶加样管的吸光度值；

D——不加酶加样管的吸光度值。

1.2.5.2 α -淀粉酶的抑制作用类型分析

将 α -淀粉酶溶液的浓度固定为 5 U/L，样品溶液的质量浓度设置为 0.0、1.0、3.0 mg/mL，淀粉溶液的质量浓度设置为 0.5~10.0 mg/mL，具体操作步骤同 1.3.5.1，在 540 nm 处测定加入不同质量浓度可溶性淀粉溶液时的吸光度。通过绘制反应体系的 Lineweaver-Burk 双倒数曲线以确定不同提取物对 α -淀粉酶的抑制作用类型。

1.2.5.3 α -葡萄糖苷酶抑制活性

以阿卡波糖作为阳性对照，评估不同样品的 α -葡萄糖苷酶抑制活性。基于 Ding 等^[18]的方法并稍作修改，设置样品质量浓度梯度为 0.2~1.0 mg/mL。分别将 100 μL 质量浓度不同的样品溶液与等体积的 α -葡萄糖苷酶溶液（0.24 U/mL）以及 700 μL pH 值为 6.8 的磷酸缓冲液（0.1 mol/L）吸取至样品管中均匀混合，然后将其置于 37 $^{\circ}\text{C}$ 条件下反应 10 min；反应完成后，加入 100 μL pNPG 溶液（2.5 mmol/L）并于同等条件下再次反应 20 min；随后在所有样品管中加入 400 μL Na_2CO_3 溶液（0.2 mol/L）以终止反应，并在波长 405 nm 处测定样品吸光度值，根据以下公式计算可得出 α -葡萄糖苷酶抑制率：

$$Y = (1 - \frac{C - D}{A - B}) \times 100\%$$

(2)

式中：
Y——抑制率，%；
A——加酶不加样管的吸光度值；
B——不加酶不加样管的吸光度值；
C——加酶加样管的吸光度值；
D——不加酶加样管的吸光度值。

1.2.5.4 α-葡萄糖苷酶的抑制作用类型分析

将 α-葡萄糖苷酶的质量浓度固定为 0.24 U/L，样品溶液的质量浓度设置为 0.0、50.0、100.0 μg/mL，pNPG 浓度设置为 0.5~3.0 mmol/L，具体操作步骤同 1.3.5.3，在 405 nm 处测定加入不同浓度的 pNPG 溶液时的吸光度。通过绘制反应体系的 Lineweaver-Burk 双倒数曲线以确定不同提取物对 α-葡萄糖苷酶的抑制作用类型。

1.3 数据处理

以上所有试验均设置 3 组平行。采用 Excel 2016 进行数据整理和分析，结果以均数 ± 标准差 (X ± SD) 表示，采用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与讨论

2.1 不同提取物活性成分及含量比较

不同提取物的得率及活性成分含量如表 1 所示，IEP 的得率为 18.59%，显著高于 SEP ($P < 0.05$)，这可能是由于不同种桑黄中含有的活性物质含量不同导致的^[19]。酚类与黄酮类物质是桑黄醇提物中的主要成分^[3]，SEP 中总酚的质量分数为 33.06%，显著高于 IEP (23.25%) ($P < 0.05$)；IEP 中总黄酮的质量分数为 25.53%，显著高于 SEP (13.90%) ($P < 0.05$)。吕国英等^[19]研究表明，杨树桑黄醇提物中总酚的质量分数为 15.38%，远低于本研究；但其总黄酮的质量分数 (13.58%) 与本研究相近。另外，本研究中两种提取物的总三萜与总甾醇的质量分数均较低，其中 SEP 中总甾醇的质量分数为 7.78%，显著高于 IEP ($P < 0.05$)；而两者中总三萜的质量分数无显著差异。张莹璐等^[7]研究发现，杨树桑黄提取物与粗毛纤孔菌提取物中总三萜的质量分数分别为 1.17% 和 1.32%，这与本研究结果相吻合。值得注意的是，据之前的研究^[20]，粗毛纤孔菌提取物中总黄酮含量高达 145.50 mg/g，而总酚含量仅 13.95 mg/g，但在本研究中，IEP 的总黄酮与总酚含量都比较丰富。不同来源与不同品种桑黄的醇提物中生物活性物质的种类可能存在差异，有研究发现^[21]，桑黄醇提物中还含有吡咯生物碱，这对提取

物的生物活性可能产生一定影响。

表 1 不同提取物的活性指标
Table 1 Activity index of different extracts ($\bar{x}\% \pm SD, n=3$)

指标/(wt.%)	SEP	IEP
得率	7.96 ± 0.28 ^a	18.59 ± 6.34 ^b
总酚	33.06 ± 2.17 ^b	23.25 ± 1.10 ^a
总黄酮	13.90 ± 0.41 ^a	25.53 ± 2.04 ^b
总三萜	1.97 ± 0.20 ^a	2.29 ± 0.72 ^a
总甾醇	7.78 ± 1.44 ^b	4.85 ± 0.62 ^a

注：同行右肩不同小写字母表示具有显著性差异 ($P < 0.05$)，下同。

2.2 不同提取物的主要多酚组分分析

表 2 不同提取物中主要多酚化合物的定量分析

Table 2 Quantitative analysis of main polyphenols in different extracts

序号	组分名称	含量 (μg/mg)	
		SEP	IEP
	酚酸类 (合计)	644.69 ± 1.90 ^b	341.53 ± 0.74 ^a
1	没食子酸	ND	188.02 ± 0.22
2	原儿茶酸	196.07 ± 0.42 ^b	153.51 ± 0.52 ^a
3	原儿茶醛	142.17 ± 0.09	ND
4	咖啡酸	94.25 ± 0.53	ND
5	香草酸	138.77 ± 0.58	ND
6	对香豆酸	73.43 ± 0.28	ND
	黄酮类 (合计)	97.12 ± 0.24 ^a	171.93 ± 0.43 ^b
7	二氢槲皮素	97.12 ± 0.24 ^a	171.93 ± 0.43 ^b
	总含量	741.81 ± 2.14 ^b	513.46 ± 1.17 ^a

注：ND 表示未检测到。

酚类物质具有优异的生物活性，如抗炎、抗菌、抗癌、抗氧化、抗糖尿病和代谢调节等^[15,22]。研究表明^[23]，原儿茶醛、原儿茶酸、咖啡酸等酚类化合物是桑黄中主要的多酚类物质。图 1 为不同提取物主要酚类化合物的高效液相色谱图，具体含量见表 2。两种提取物中均检测到原儿茶酸和二氢槲皮素两种成分，其中 SEP 中原儿茶酸的含量为 196.07 μg/mg，显著高于 IEP ($P < 0.05$)；IEP 中二氢槲皮素含量为 171.93 μg/mg，显著高于 SEP ($P < 0.05$)。除此之外，SEP 中还检测到其他酚酸，分别为原儿茶醛、咖啡酸、香草酸、对香豆酸，其中原儿茶醛与香草酸含量较高，分别为 142.17 和 138.77 μg/mg，且均高于 IEP。以上结果表明原儿茶酸是 SEP 中最主要的酚类物质，Gao 等^[23]研究发现，在杨树桑黄多酚提取物中，原儿茶醛 (394.68 μg/g) 与原儿茶酸 (196.88 μg/g) 的含量显著高于其他酚类化合物。另据报道^[18]，原儿茶酸对 α-

葡萄糖苷酶具有一定的抑制活性。值得注意的是,在 IEP 中含量最高(188.02 $\mu\text{g}/\text{mg}$)的没食子酸并未在 SEP 中被检测到,这一显著差异可能源于二者不同的来源^[21]。研究表明^[24],没食子酸在抑制 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶的活性方面发挥着重要作用。此外,有研究发现^[25], hispidin 及其衍生物是粗毛纤孔菌提取物中存在的主要多酚,然而,本研究在 IEP 中并未检测到相关化合物,这可能是由原料来源或提取方式不同所致。本研究中仅对桑黄醇提物中常见的 7 种酚类化合物进行了检测,色谱图中还含有少量未能鉴定的物质。

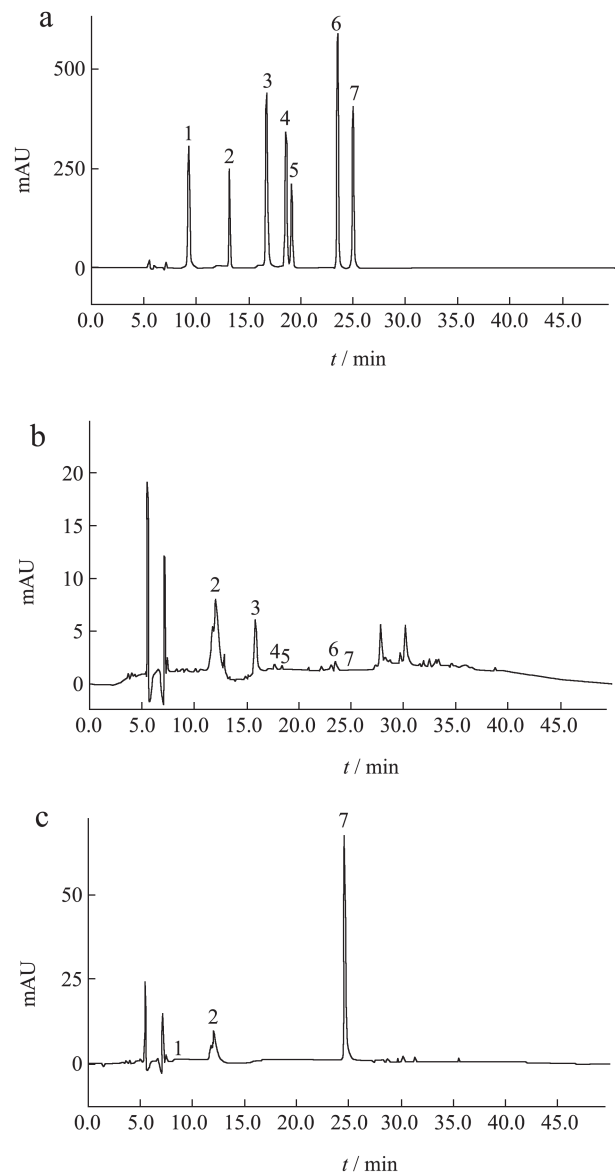


图 1 多酚标准品 (a)、SEP (b)、IEP (c) 的高效液相色谱图

Fig.1 High performance liquid chromatograms of polyphenol standards (a), SEP (b) and IEP (c)

注:1~7 分别表示没食子酸、原儿茶酸、原儿茶醛、咖啡酸、香草酸、对香豆酸和二氢槲皮素。

2.3 不同提取物的抗氧化活性

2.3.1 DPPH 自由基清除活性

DPPH 是一种稳定的亲脂性自由基^[26],广泛用于测定抗氧化剂的自由基清除能力。图 2 显示了不同提取物对 DPPH 自由基的清除活性。结果表明:两种提取物都具有较好的清除活性,并且在 0.25~2.50 mg/mL 范围内其活性呈现剂量依赖性增强,且 SEP 的活性显著高于 IEP ($P < 0.05$),但二者的活性均不及 Vc。当质量浓度达到最大时,SEP 对于自由基的清除活性达到 84.95%,而 IEP 为 74.28%。此外,SEP 和 IEP 清除 DPPH 自由基的半抑制浓度 IC_{50} 值分别为 0.48 mg/mL 和 0.94 mg/mL ,表明 SEP 具有更好的 DPPH 自由基清除能力。研究表明^[27],桑黄提取物的抗氧化作用主要得益于其中的多酚成分,因此 SEP 清除能力较强可能归因于其较高的多酚含量。

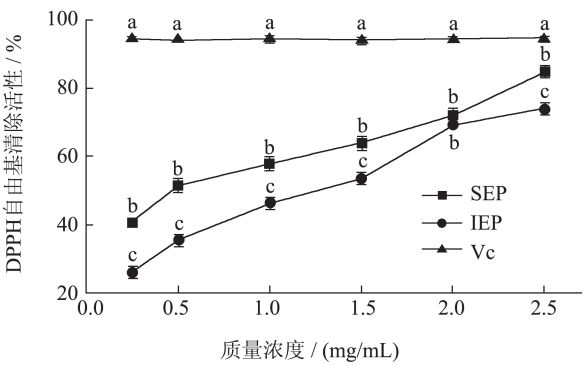


图 2 不同提取物的 DPPH 自由基清除活性

Fig.2 DPPH free radical scavenging activity of different extracts

注:图中不同小写字母表示具有显著性差异 ($P < 0.05$),下同。

2.3.2 ABTS⁺ 自由基清除活性

图 3 表明不同提取物对 ABTS⁺ 自由基都有较强的清除活性,与 Vc 相比,其清除效果由强到弱依次为: Vc>SEP>IEP。在 0.25~2.50 mg/mL 范围内,SEP 和 IEP 对于 ABTS⁺ 自由基的清除活性都随其质量浓度升高而增强,当质量浓度达到 2.50 mg/mL 时,二者均表现出最强的活性,分别为 87.22% 和 77.19%。此外,两种不同提取物清除 ABTS⁺ 自由基的 IC_{50} 值分别为 0.34 mg/mL 和 0.56 mg/mL 。比较不同提取物中酚类化合物的含量与两种自由基清除活性的关系可以发现,SEP 中酚类化合物含量较高,其自由基清除能力也更强,这与先前文献^[18]中的报道相吻合,即 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基的清除活性会随着多酚含量及其质量浓度的升高而增强。同时, Zhu 等^[15]的研究表明,多酚含量与抗氧化活性呈正相关,强调了多酚在抗氧化

性能中的重要作用。

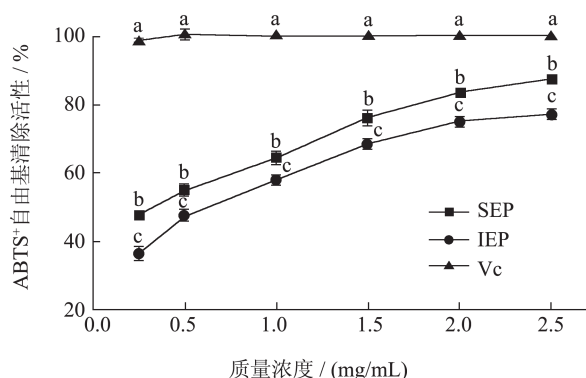


图3 不同提取物的 ABTS⁺ 自由基清除活性

Fig.3 ABTS⁺ free radical scavenging activity of different extracts

2.3.3 羟基自由基清除活性

羟基自由基的氧化能力极强^[26], 因此清除羟基自由基并将其浓度控制在安全范围内能够使组织免受损害。由图4可知, 不同提取物对羟基自由基的清除活性均随其质量浓度增加而增强, 呈现出明显的剂量依赖效应。当质量浓度达到 2.50 mg/mL 时, SEP 和 IEP 对羟基自由基的清除活性分别为 78.12% 和 70.80%。此外, 二者的 IC₅₀ 值分别为 0.84 mg/mL 和 1.06 mg/mL。刘梦凡等^[28]发现桑黄醇提取物对 ABTS⁺ 自由基的清除能力最强, 其次是清除 DPPH 自由基的能力, 而对羟基自由基的清除能力相对较弱, 本研究中两种桑黄的醇提取物对几种自由基的清除能力亦呈现相同的趋势。这可能是由于提取物中不同的酚酸与黄酮类化合物对清除不同的自由基具有选择性^[22], 从而导致其活性存在差异。

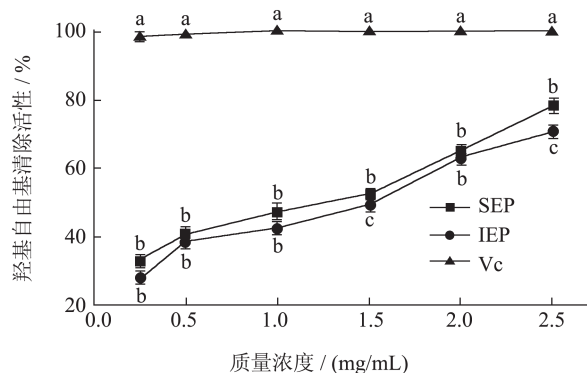


图4 不同提取物对于羟基自由基的清除活性

Fig.4 Hydroxyl free radical scavenging activity of different extracts

2.3.4 还原力

还原力是总抗氧化性能的重要指标。图5中显示了不同提取物与 Vc 的还原力的强弱, 由图可知, 两种提取物的还原力于 Vc 而言较低, 且这三种物质

的还原力由强到弱依次为 Vc > SEP > IEP, 同时, 其还原力均在 0.25~2.50 mg/mL 范围内呈现浓度依赖性增强。

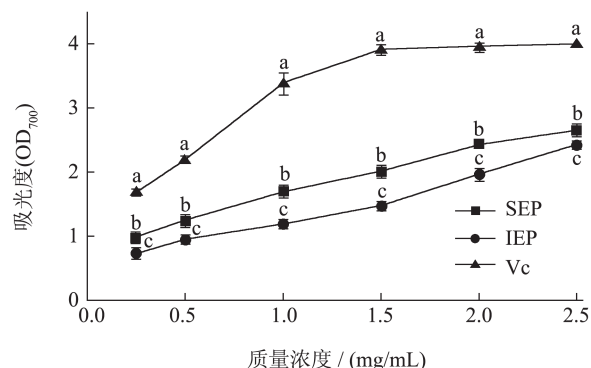


图5 不同提取物的还原力

Fig.5 Reducing power of different extracts

2.3.5 脂质过氧化

脂质过氧化是脂质中的不饱和脂肪酸在自由基的作用下产生的结果, 不仅会破坏生物膜的结构, 还会与蛋白质、DNA 或 RNA 交联, 导致一系列衰老疾病^[29]。如图6所示, SEP、IEP 和 Vc 均以浓度依赖性的方式表现出一定的脂质过氧化抑制活性。质量浓度为 2.50 mg/mL 时, SEP 和 IEP 的脂质过氧化抑制活性分别为 86.21% 和 71.90%。此外, SEP 的 IC₅₀ 为 0.46 mg/mL, 远低于 Vc (IC₅₀ 为 0.96 mg/mL), 而 IEP 的 IC₅₀ (0.99 mg/mL) 与 Vc 相近, 这表明 SEP 具有优异的脂质过氧化抑制活性, Gao 等^[23]的研究结果也表明了 SEP 在抑制脂质过氧化方面的显著优势。以上结果均表明, SEP 具有更强的抗氧化能力。Shen 等研究发现^[27], 多酚与黄酮类化合物是桑黄提取物中主要的抗氧化成分, 本研究中 SEP 总酚含量高于 IEP, 而总黄酮含量较其更低, 由此推测酚类化合物在抗氧化能力中可能发挥着更大的作用。此外, 研究表明^[25], 复合酚类提取物的总体抗氧化潜力可能是基质内不同多酚化合物协同作用的结果。

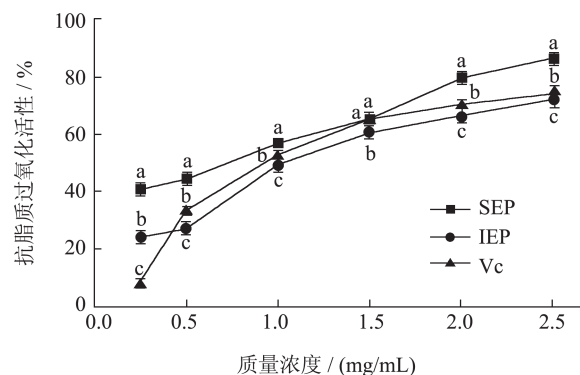


图6 不同提取物的抗脂质过氧化活性

Fig.6 Anti-lipid peroxidation activity of different extracts

2.4 不同提取物的降血糖潜力

2.4.1 α -淀粉酶抑制活性

α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶是促使寡糖降解生成葡萄糖的关键因子^[24]。抑制这两种酶的活性能够减少葡萄糖的生成,从而降低体内血糖水平。不同提取物对 α -淀粉酶的抑制作用如图 7 所示,图中显示 SEP 和 IEP 对于 α -淀粉酶均有一定的抑制活性。在 0.25~3.00 mg/mL 的质量浓度范围内,其抑制率与提取物的质量浓度呈正相关,但这两种提取物对于 α -淀粉酶的抑制活性均不及阿卡波糖。较低质量浓度时,IEP 的抑制活性略高于 SEP;随着质量浓度升高至 1.0~3.0 mg/mL 范围内,SEP 的活性显著增强,并优于 IEP;质量浓度达到最大时,SEP 对 α -淀粉酶的抑制率高达 82.81%,而 IEP 则为 76.47%,显示出 SEP 在此质量浓度下具有较强的抑制活性。此外,两种提取物的 IC_{50} 分别为 0.65 mg/mL 和 0.46 mg/mL,其中 IEP 的 IC_{50} 值与阿卡波糖 (IC_{50} 为 0.47 mg/mL) 相近,这表明 IEP 对 α -淀粉酶有良好的抑制活性,可作为潜在的 α -淀粉酶抑制剂。

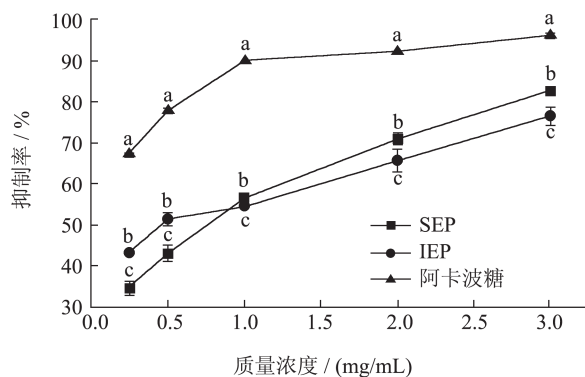


图 7 不同提取物的 α -淀粉酶抑制活性

Fig.7 α -amylase inhibitory activity of different extracts

2.4.2 α -淀粉酶抑制类型

图 8 为不同提取物对 α -淀粉酶抑制类型的双倒数 Lineweaver-Burk 图。图 8a 中显示,不同质量浓度 SEP 的双倒数曲线相交于第二象限,且随着其质量浓度的增加, V_{max} 即酶反应速率逐渐减小,而米氏常数 K_m 逐渐增大,这表明 SEP 对 α -淀粉酶的抑制类型为混合型抑制(竞争性与非竞争性),这与李雨鸿等^[13]所研究的杨树桑黄醇提取物对 α -淀粉酶抑制类型相似,混合型抑制的出现可能是由于不同化合物共同作用的结果。图 8b 中显示, V_{max} 与 K_m 均随质量浓度增加而减小,表明 IEP 对 α -淀粉酶的抑制类型为竞争性抑制与反竞争性抑制的混合型抑制,香蕉多酚^[11]对 α -淀粉酶的抑制机制也为相同类型的混合型抑制,且香蕉多酚中含

有一定的没食子酸和原儿茶酸,表明没食子酸和原儿茶酸可能在 IEP 对 α -淀粉酶的抑制作用中发挥了重要作用。根据现有研究^[30],多酚类化合物对 α -淀粉酶的抑制活性与其分子结构紧密相关,因此,两种提取物所表现的不同类型的混合型抑制可能是由于其多酚成分的种类、含量及结构差异所致。

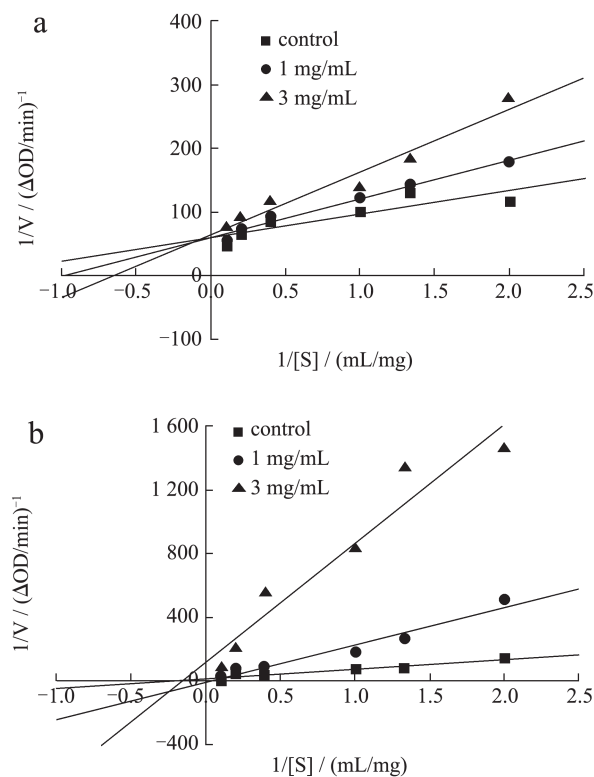


图 8 不同提取物对 α -淀粉酶的抑制类型曲线

Fig.8 Inhibition type curve of different extracts on α -amylase

2.4.3 α -葡萄糖苷酶抑制活性

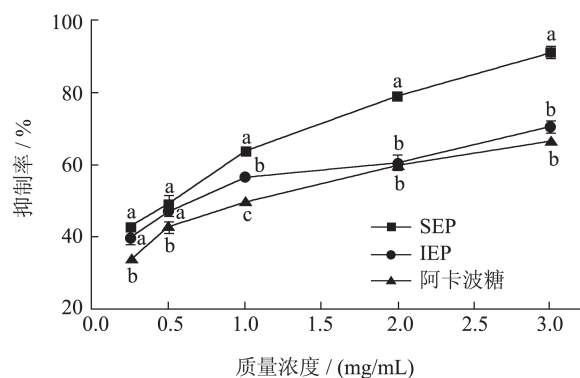


图 9 不同提取物的 α -葡萄糖苷酶抑制活性

Fig.9 Inhibition type curve of different extracts on α -glucosidase

SEP 和 IEP 对于 α -葡萄糖苷酶的抑制活性如图 9 所示,图中显示,两种提取物对于 α -葡萄糖苷酶的抑制率随着其质量浓度在 0.25~3.00 mg/mL 范围内的升高而增强,呈现出剂量依赖性,在质量浓度为 3.00 mg/mL 时,

SEP 和 IEP 对于 α -葡萄糖苷酶的抑制率分别为 91.21% 和 70.47%。同时计算得出二者的 IC_{50} 值分别为 0.44 mg/mL 和 0.62 mg/mL, 均小于阿卡波糖的 IC_{50} 值 (0.91 mg/mL), 表明 SEP 对于 α -葡萄糖苷酶的清除能力较强。综合以上结果得出, SEP 和 IEP 均具有显著的降血糖潜力。

2.4.4 α -葡萄糖苷酶抑制类型

图 10a 中显示, 不同质量浓度 SEP 对 α -葡萄糖苷酶抑制作用的双倒数曲线相交于 X 负半轴上一点, 表明随提取物质量浓度增加, V_{max} 呈现下降趋势, 而 K_m 值保持不变, 符合非竞争性抑制的特征。这与二氢槲皮素^[31]对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用类型一致, 但本研究却发现二氢槲皮素并非 SEP 中的主要成分, 其抑制效果可能源自多种酚类物质的协同作用。而图 10b 中的双倒数曲线相交于第二象限, 与 SEP 对 α -淀粉酶的抑制作用类型相同, IEP 对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用类型也为竞争性抑制与非竞争性抑制的混合型抑制, 姜酚^[12]对 α -葡萄糖苷酶的抑制类型亦是如此。此外, 本研究发现两种提取物针对 α -葡萄糖苷酶的抑制效果优于其对 α -淀粉酶的抑制作用。这一发现与棕果榄仁提取物^[32]抑制这两种酶活性的研究结论相似, 表明多酚类化合物在调节酶活性方面可能具有特定的选择性。

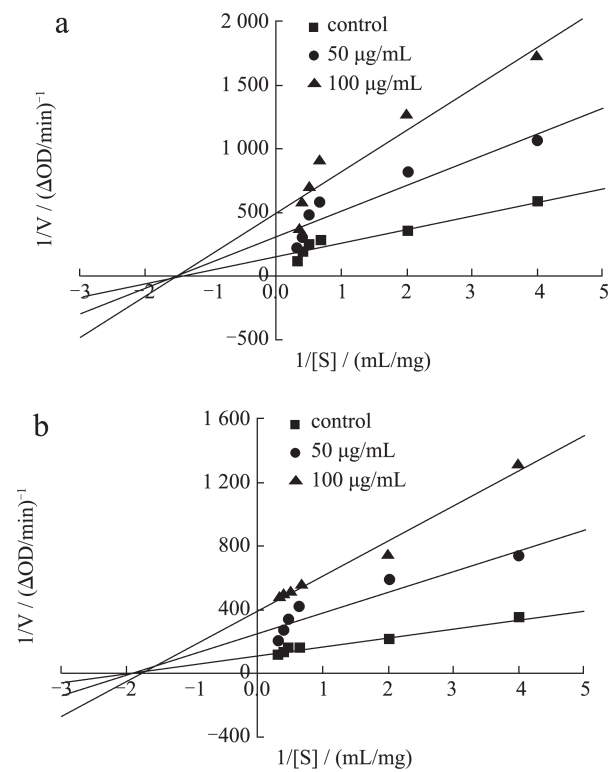


图 10 不同提取物对 α -葡萄糖苷酶的抑制类型曲线
Fig.10 Lineweaver-Burk curves of SEP (a) and IEP (b)
on α -glucosidase

2.5 不同提取物的活性成分、酚类化合物含量与其生物活性的相关性分析

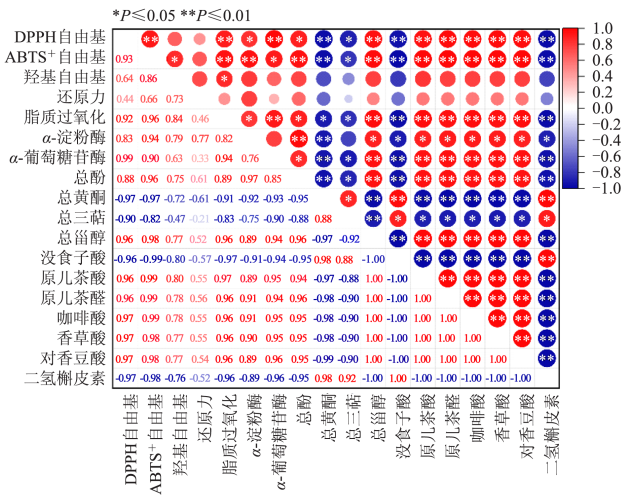


图 11 不同活性成分及生物活性的相关性分析
Fig.11 Correlation analysis of different active components
and biological activities

将不同提取物的活性成分、酚类化合物含量与其抗氧化活性和对两种酶的抑制作用进行 Pearson 相关性分析, 结果如图 11 所示。提取物中的总酚含量与原儿茶酸、原儿茶醛、咖啡酸、香草酸和对香豆酸含量呈现极显著正相关 ($P < 0.01$), 表明这 5 种酚酸是提取物中的重要酚类化合物。此外, 总黄酮含量与上述几种酚酸的含量呈现极显著负相关 ($P < 0.01$), 表明提取物中总黄酮含量越少, 相应的 5 种酚酸含量也更低, 这与表 1 和表 2 中的结果相印证。

不同提取物中活性成分含量与体外抗氧化活性之间存在一定的相关性。总酚含量与 $ABTS^{+}$ 自由基呈现极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 DPPH 自由基和脂质过氧化呈现显著正相关 ($P < 0.05$), 即丰富的酚类物质与较高的抗氧化活性之间存在相关性, 表明多酚含量与抗氧化活性直接相关^[25]。此外, 总甾醇含量与 DPPH 自由基、 $ABTS^{+}$ 自由基和脂质过氧化均呈现极显著正相关 ($P < 0.01$)。同时不同提取物中活性成分的含量与 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶之间也存在一定的相关性; 总酚含量与 α -淀粉酶呈现极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 α -葡萄糖苷酶呈现显著正相关 ($P < 0.05$); 总甾醇含量与 α -淀粉酶呈现显著正相关 ($P < 0.05$), 与 α -葡萄糖苷酶呈现极显著正相关 ($P < 0.01$)。

原儿茶酸与 DPPH 自由基、 $ABTS^{+}$ 自由基、脂质过氧化和 α -葡萄糖苷酶的均呈现极显著的正相关 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.96、0.99、0.97、0.95; 与 α -淀粉酶呈现显著正相关 ($P < 0.05$), 相关系数为

0.89。此外,原儿茶醛、咖啡酸、香草酸、对香豆酸与抗氧化活性相关指标和酶的相关性与原儿茶酸具有相同的特征。SEP中原儿茶酸、原儿茶醛、咖啡酸、香草酸和对香豆酸的含量相对较高,因此SEP表现出对DPPH自由基和ABTS⁺自由基较强的清除作用,以及较强的抗脂质过氧化能力,同时对两种酶也表现出较强的抑制作用,这表明原儿茶酸、原儿茶醛、咖啡酸、香草酸和对香豆酸可能是SEP发挥抗氧化活性和潜在降血糖作用的主要成分^[33]。

3 结论

本研究对比了杨树桑黄与粗毛纤孔菌子实体醇提物在活性物质、多酚组分及体外抗氧化活性和降血糖潜力方面的差异。结果显示,二者在化合物组成与生物活性上存在显著差异,SEP多酚含量较高且种类丰富,具有较强的抗氧化活性与酶抑制作用;IEP则总黄酮含量较高,同时也表现出显著的酶抑制活性。虽然SEP在抗氧化活性上表现优异,但二者降血糖潜力相当,因此,提取率较高的IEP或具更高经济效益。然而,粗提物中关键活性成分未明,还需进一步研究以揭示具体降血糖机制。

参考文献

- [1] 彭睿,徐睿鹏,辛芮,等.桑黄中的酚类化合物研究进展[J].中草药,2023,54(9):2978-2992.
- [2] 包海鹰,杨烁,李庆杰,等.“桑黄”的本草补充考证[J].菌物研究,2017,15(4):264-270.
- [3] SU X, LIU K, XIE Y, et al. Protective effect of a polyphenols-rich extract from *Inonotus sanghuang* on bleomycin-induced acute lung injury in mice [J]. Life Sciences, 2019, 230: 208-217.
- [4] QIU P, LIU J, ZHAO L, et al. Inoscavin A, a pyrone compound isolated from a *Sanghuangporus vaninii* extract, inhibits colon cancer cell growth and induces cell apoptosis via the hedgehog signaling pathway [J]. Phytomedicine, 2022, 96: 153852.
- [5] ZHANG L, ZHAO H L, PENG S D, et al. Whitening and antioxidant activities of *Inonotus sanghuang* extract and development of primary whitening gel products [J]. Natural Product Research, 2024, 149: 1-7.
- [6] LIN W C, DENG J S, HUANG S S, et al. Evaluation of antioxidant, anti-inflammatory and anti-proliferative activities of ethanol extracts from different varieties of *Sanghuang* species [J]. Royal Society of Chemistry Advances, 2017, 7(13): 7780-7788.
- [7] 张莹璐,夏伯阳,陈天娇,等.不同种桑黄子实体醇提物化学组成及抗氧化活性比较[J].菌物学报,2024,43(4):72-83.
- [8] 王帅,包海鹰.不同生长期粗毛纤孔菌的生药学研究[J/OL].菌物研究,1-8[2025-5-30].
- [9] 吴凡,关澳,杨瑶,等.基于古籍文献考据的桑黄临床应用探析[J].中医临床研究,2022,14(29):1-5.
- [10] YU Q, TIAN Y, FAN L. Inhibition mechanisms of wounded okra on the α -glucosidase/ α -amylase [J]. Food Bioscience, 2023, 51: 102333.
- [11] 王倩,王娟,傅金凤,等.青香蕉果肉多酚成分鉴定及其对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制作用[J].食品科学,2024,45(7):61-68.
- [12] 徐菁,孙浩强,张校志. Lineweaver-Burk双倒数法研究姜酚对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的动力学抑制活性[J].现代食品,2024, 30(5):201-204.
- [13] 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.
- [14] LIU K, XIAO X, WANG J, et al. Polyphenolic composition and antioxidant, antiproliferative, and antimicrobial activities of mushroom *Inonotus sanghuang* [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 82: 154-161.
- [15] ZHU Z, WANG Y, LIN D, et al. Changes in polyphenols composition and antioxidative properties of hemp (*Cannabis sativa* L.) inflorescences pretreated by *Ganoderma lucidum* [J]. Industrial Crops and Products, 2023, 195: 116422.
- [16] 高山雪,王琦,郭艳芳,等.响应面法优化纤维素酶提取草菇中甾醇类化合物的工艺[J].菌物研究,2021,19(3):163-169.
- [17] 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.
- [18] DING H, HUANG S, CHOOK C Y, et al. Blood glucose-lowering activity of protocatechuic acid is mediated by inhibiting α -glucosidase [J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13(3): 1212-1219.
- [19] 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.
- [20] CHAUDHARY H, MODI N, RAWAL R. Preliminary screening, quantitative analysis, antioxidant and antimicrobial activities of mushrooms along with FTIR analysis [J]. Vidya-A Journal of Gujarat University, 2023, 2(2): 242-250.
- [21] SEEPHONKAI P, THEERAPONG T, JAIKHAN S, et al. Characterisation of indole alkaloids and phenolic acids from wild mushroom *Tropicoporus linteus* and its chemical profiles compared with other *Sanghuang* mushrooms [J]. Natural Product Research, 2024, 38(2): 198-205.
- [22] JIN H M, DANG B, ZHANG W G, et al. Polyphenol and anthocyanin composition and activity of highland barley with different colors [J]. Molecules, 2022, 27(11): 3411.
- [23] GAO H, YIN C, LI C, et al. Phenolic profile, antioxidation and anti-proliferation activity of phenolic-rich extracts from *Sanghuangporus vaninii* [J]. Current Research in Food Science, 2023, 6: 100519.
- [24] XUE N, HE B, JIA Y, et al. The mechanism of binding with the α -glucosidase *in vitro* and the evaluation on hypoglycemic effect *in vivo*: cocrystals involving synergism of gallic acid and conformer [J]. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2020, 156: 64-74.

- [25] MACHADO-CARVALHO L, MARTINS T, AIRES A, et al. Optimization of phenolic compounds extraction and antioxidant activity from *Inonotus hispidus* using ultrasound-assisted extraction technology [J]. *Metabolites*, 2023, 13(4): 524.
- [26] ZHAI C, LIN Y, MAO C, et al. Construction, characterization, antioxidant activity and effects on properties *in vitro* digestion of selenium nanoparticles decorated with *Cyperus esculentus* polysaccharides [J]. *Food Bioscience*, 2024, 59: 104062.
- [27] SHEN Q H, HUANG Q, XIE J Y, et al. A rapid analysis of antioxidants in *Sanguangporus baumii* by online extraction-HPLC-ABTS [J]. *Royal Society of Chemistry Advances*, 2021, 11(41): 25646-25652.
- [28] 刘梦凡,殷朝敏,张琪,等.比较3种杨树桑黄提取物体外抗氧化、降血糖和抑菌活性[J].食品安全质量检测学报,2024,15(3):18-25.
- [29] LIN Y, PI J, JIN P, et al. Enzyme and microwave co-assisted extraction, structural characterization and antioxidant activity of polysaccharides from Purple-heart Radish [J]. *Food Chemistry*, 2022, 372: 131274.
- [30] MIAO M, JIANG H, JIANG B, et al. Structure elucidation of catechins for modulation of starch digestion [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 57(1): 188-193.
- [31] 潘俊坤,焦中高,张强.二氢槲皮素抑制 α -葡萄糖苷酶的机理研究[J/OL].中国食物与营养,1-6[2025-5-30].
- [32] GOMES J H D S, MBIKOP U C, OLIVEIRA R L, et al. Polyphenol-rich extract and fractions of *Terminalia phaeocarpa* Eichler possess hypoglycemic effect, reduce the release of cytokines, and inhibit lipase, α -glucosidase, and α -amylase enzymes [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2021, 271: 113847.
- [33] 张琪,殷朝敏,高虹,等.不同极性溶剂提取对杨树桑黄功能成分及其抗氧化活性的影响[J].食品工业科技,2025,46(6):325-333.