

两种梭柄松苞菇富硒多糖的制备及其降血糖和抗氧化活性研究

刘韞滔, 曾思琪, 唐倩倩, 尤钰娴, 李益文, 陈荻, 刘爱平, 李诚

(四川农业大学食品学院, 四川雅安 625014)

摘要: 本研究以梭柄松苞菇为载体, 亚硒酸钠为硒源, 分析评价了在两种富硒培养方法(固体培养和液体培养)下, 硒浓度对梭柄松苞菇的生产效率、富硒量、有机硒转化率以及单位干重中有机硒含量的影响。结果表明, 在最适硒浓度条件下, 固体培养时, 每千克培养基可收获 91.30 g 子实体, 富硒量达到 69.8 $\mu\text{g/g}$, 有机硒转化率为 92.60%, 有机硒含量为 64.63 $\mu\text{g/g}$; 而液体培养时, 每升培养液可收获 4.50 g 的菌丝, 富硒量达到 199.50 $\mu\text{g/g}$, 有机硒转化率为 84.60%, 有机硒含量为 168.78 $\mu\text{g/g}$ 。同时分别测定了梭柄松苞菇的富硒子实体多糖(SFCs)、富硒菌丝多糖(SPCs)、未经富硒的子实体多糖(FCs)和菌丝多糖(PCs)的体外降血糖活性和抗氧化活性, 结果表明 SFCs 和 SPCs 对硒元素的富集, 可能是其降血糖和抗氧化活性高于 FCs 和 PCs 的重要原因, 并且 SPCs 的降血糖和抗氧化活性均显著高于阳性对照。

关键词: 梭柄松苞菇; 菌丝; 硒多糖; 抗氧化; 降血糖

文章编号: 1673-9078(2016)10-60-65

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.10.010

Preparation of Se-enriched Polysaccharides from *Catathelasma ventricosum* by Two Approaches and Their Antioxidant and Antihyperglycemic Activities

LIU Yun-tao, ZENG Si-qi, TANG Qian-qian, YOU Yu-xian, LI Yi-wen, CHEN Di, LIU Ai-ping, LI Cheng

(College of Food Science, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: The effects of selenium concentration on the productivity, amount of enriched selenium, conversion rate of organic selenium, and content of organic selenium per unit dry weight of *Catathelasma ventricosum* for two selenium enrichment methods (solid culture and liquid culture) were analyzed and evaluated. *C. ventricosum* was used as the carrier and sodium selenite as the selenium source. The results showed that under optimal selenium concentration conditions, 91.30 g dry fruiting body per kilogram of culture medium was obtained using the solid culture method, and the corresponding amount of enriched selenium, conversion rate of organic selenium, and content of organic selenium were 69.80 $\mu\text{g/g}$, 92.60%, and 64.63 $\mu\text{g/g}$, respectively. Using the liquid culture method, 4.50 g dry mycelia per liter of culture medium was obtained, and the amount of enriched selenium, conversion rate of organic selenium, and content of organic selenium were 199.50 μg , 84.60%, and 168.78 $\mu\text{g/g}$, respectively. Furthermore, the *in vitro* antioxidant and antihyperglycemic activities of fruiting body Se-polysaccharides, mycelial Se-polysaccharides, fruiting body polysaccharides, and mycelial polysaccharides were investigated. The results indicated that fruiting body Se-polysaccharides and mycelial Se-polysaccharides had higher antioxidant and antihyperglycemic activities than fruiting body polysaccharides and mycelial polysaccharides, likely because of the enrichment of selenium. In addition, selenium-polysaccharides exhibited higher antioxidant and antihyperglycemic activities than the positive control.

Key words: *Catathelasma ventricosum*; mycelium; selenium-polysaccharides; antioxidant activity; antihyperglycemic activity

糖尿病是危害人类健康的慢性疾病之一, 其致病原因是胰岛素的缺乏或胰岛素功能紊乱, 具体症状表

收稿日期: 2015-11-11

基金项目: 中国博士后科学基金面上资助(2015M580795); 四川省教育厅科研项目(16ZB0053)

作者简介: 刘韞滔(1982-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 功能多糖

相为较高的血糖浓度^[1], 长期的高血糖状态会产生过剩的活性氧自由基(Reactive oxygen species, ROSs), 从而提高机体的氧化应激水平。这些自由基会导致脂质的过氧化, 造成机体的氧化损伤, 进而引发各种并发症。

硒是人体必需的微量元素, 硒的缺乏会导致人体

出现各种疾病,如克山病。同时硒也具有十分重要的生理功能,包括降血糖、抗肿瘤、提高免疫力等功效。研究发现硒是谷胱甘肽过氧化物酶的重要组成部分,谷胱甘肽过氧化物酶是人体内重要的抗氧化酶,它可催化过氧化物(如过氧化氢)的还原,从而降低脂质的过氧化。基于硒元素的重要生物功能,利用硒对糖尿病进行干预治疗已成为当今研究热点,尤其是利用食用真菌、蔬菜和水果富集硒元素,将无机硒转换为更易吸收和更安全的有机硒。程天德等人^[2]经过研究发现,富硒大豆低聚肽的抗氧化功能明显强于不含硒的大豆低聚肽;黄峰等人^[3]发现富硒螺旋藻中的含硒蛋白是一种具有较高抗氧化活性的天然活性硒资源。随着研究的不断深入,越来越多的研究发现当多糖结合了硒之后会显著提高其抗氧化活性。并且 Navarro-Alarcon 和 Cabrera-Vique 指出,富硒食用菌中的含硒多糖,是其具有抗氧化、调节免疫和抗肿瘤活性的主要原因^[4]。

梭柄松苞菇(*Catathelasma Ventricosum*)是一种主要产于我国西南地区的食用真菌,由于其具有良好的适口性,较高的营养价值及其突出的生物活性,在当地被广泛食用。但到目前为止,大部分梭柄松苞菇均生长于野外条件,这并不利于充分利用这种“珍稀”食用菌资源,因此建立其高效人工栽培技术具有重要的现实意义和经济价值。

Pappa 等人^[5]指出,食物脂肪的含量与硒的含量呈负相关,食物蛋白质含量与硒的含量呈正相关。而根据 Liu 等人所做相关实验可知,梭柄松苞菇的总脂肪含量仅为 1.52×10^{-2} g/g,而蛋白质含量高达 29.13×10^{-2} g/g^[6]。因此梭柄松苞菇具备成为良好富硒载体的潜质。本研究将利用液体深层发酵富硒和传统固体栽培富硒的方法,对梭柄松苞菇进行富硒培养,并比较培养基中不同硒浓度对梭柄松苞菇的生产效率、富硒量、有机硒转化率以及单位干重中有机硒含量的影响。同时还将分别评价在最适硒浓度条件下,梭柄松苞菇的富硒子实体多糖(SFCs)、富硒菌丝多糖(SPCs)的降血糖活性和抗氧化活性。

1 材料与方法

1.1 菌株

梭柄松苞菇菌种,购于绵阳市食用真菌研究所。

1.2 培养基及其富硒方法

1.2.1 液体发酵培养基

(1) 母种采用改良的马铃薯葡萄糖琼脂(PDA)

培养基:土豆 200 g、葡萄糖 20 g、蛋白胨 2 g、磷酸二氢钾 2 g、硫酸镁 1 g、维生素 B₁ 0.01 g,溶于 1 L 超纯水里,pH 自然(如需要制备固体培养基,则加入琼脂 20 g)^[7]。

(2) 富硒发酵液体培养基。

接种梭柄松苞菇种子于 PDA 液体培养基中,在 22 °C 条件下生长 4 d。取 2.5 mL 该培养液,加入到 250 mL 的三角瓶中,内含 47.5 mL 富硒发酵培养液(4%玉米粉、2%葡萄糖、0.4%花生饼粉、0.2%磷酸二氢钾、0.5%磷酸氢二钾、0.1%硫酸镁、0.01%维生素 B₁ 和一定浓度的亚硒酸钠 Na₂SeO₃,培养液中 Na₂SeO₃ 终浓度为 50~350 μg/mL),在 22 °C 条件下摇瓶培养 2 周(100 r/min)。

同时也制备了不含有亚硒酸钠的液体发酵培养基(制备与培养操作过程与富硒发酵液体培养基相同),以证明发酵产物抗糖尿病活性提高的主要原因是硒元素的富集引起的。

1.2.2 固体发酵培养基

(1) 菌丝培养基:经沸水蒸煮过的无菌小麦 100 g 加入塑料袋中,并加入 150 mL 双蒸水,使培养基的含水量为 60% (m/m)。再将该袋培养基置于 121 °C 条件下灭菌 1 h,待其冷却后,接种 1 cm² 面积的母种斜面,然后在 20 °C 条件下避光培养 15~20 d,直到梭柄松苞菇菌丝完全覆盖了塑料袋中的小麦^[8]。

(2) 子实体发酵培养基:78%甘蔗渣,20%水稻麸皮(甘蔗渣和水稻麸皮来源于广东汕头市,并被研磨成 100 目的粉末),0.4%碳酸钙、1.6%硫酸钙和一定浓度的亚硒酸钠 Na₂SeO₃(培养基中 Na₂SeO₃ 终浓度为 50~350 μg/g),培养基的含水量为 70% (m/m)。取 300 g 该培养基,加入到塑料袋中,并于 121 °C 条件下灭菌 1 h。待其冷却后,接种 5% (m/m) 的梭柄松苞菇菌丝(来源于菌丝培养基),并置于 22 °C 条件下,避光培养约 15 d。再将该培养物转移至自然光照并通风的环境中继续培养(二氧化碳浓度应 <1200×10⁻⁶、相对湿度为 90%左右、培养温度 20 °C),待梭柄松苞菇子实体菌伞完全展开,即可收取^[8]。

同时也制备了不含有亚硒酸钠的固体发酵培养基(制备与培养操作过程与富硒发酵固体培养基相同),以证明发酵产物抗糖尿病活性提高的主要原因是硒元素的富集引起的。

1.3 生产效率测定

采用干重法(将菌丝发酵液 5000 r/min 离心 5 min,弃去上清液并收集菌丝),将培养的菌丝和子实体置于 60 °C 烘箱,至恒重。

$$\eta = G \div L(\text{或}V)$$

注: 生产效率(g/kg 或 g/L)为 η , 富硒产品干重(g)为G, 固体培养基的质量(kg)或液体培养基的体积(L)为m 或 V。

1.4 硒的测定

利用3,3-二氨基联苯胺(DAB)比色法对硒的含量进行测定^[9]。

(1) 硒总含量: 梭柄松苞菇菌丝和子实体中硒含量测定(以亚硒酸作为标准物, 绘制标准曲线): 准确称取1 g 富硒产物, 放入烧瓶中, 加入4 ℃预冷的10 mL 消化液(5 g 钼酸钠加入蒸馏水:浓硫酸:高氯酸/3:3:4 的溶液中配置而成), 直至消化成无色透明液体。待冷却后, 将此消化液转入50 mL 容量瓶中, 用NaOH 溶液调节pH 到7.0 左右, 最后将溶液定容至50 mL, 最后取10 mL 消化样液, 按DAB 比色法计算硒含量。(为确保实验的准确性, 本研究在预实验里对该方法稳定性影响最大的两个参数: 掩蔽剂EDTA 加入量和反应时间进行优化, 且该步骤的测定均重复3 次)。

(2) 有机硒总量: 梭柄松苞菇富硒产物0.5 g, 放入透析袋中(截留分子量为3000 Da), 充分透析24 h 后(去除无机硒), 取透析袋中物质, 按步骤(1)进行硒含量测定。

富硒量($\mu\text{g/g}$)=硒总含量(μg) \div 菌丝或子实体干重(g)

有机硒转化率(%)=有机硒总量(μg) \div 硒总含量(μg) $\times 100\%$

有机硒含量($\mu\text{g/g}$)=有机硒总量(μg) \div 菌丝或子实体干重(g)

1.5 培养基最适浓度的选择

优先考虑子实体或菌丝中的有机硒含量, 并综合考虑生产效率、富硒量和有机硒转化率, 从而确定最优的培养基硒浓度。

1.6 粗多糖的制备

提取方法参照Liu 等人的报道^[10], 利用水提、醇沉、去除蛋白质(多次)和透析等步骤(所得多糖含量均高于99%, 并且紫外全波长扫描在280 nm 和260 nm 处没有吸收峰), 分别提取在最适硒浓度条件下的梭柄松苞菇菌丝富硒多糖(SPCs)和梭柄松苞菇子实体富硒多糖(SFCs)。另外培养基中不含有亚硒酸钠的梭柄松苞菇菌丝多糖(PCs)和梭柄松苞菇子实体多糖(FCs)也被提取, 所有多糖样品冻干后, 置于-80 ℃冰箱备用。

1.7 体外降血糖和抗氧化活性的测定

分别对体外降血糖活性: α -葡萄糖苷酶抑制活性、 α -淀粉酶抑制活性、高级糖基化终产物(AGEs)的抑制活性; 体外抗氧化活性: 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH) 自由基清除活性、还原力、金属螯合活性进行测定, 测定方法参照Liu 等人的报道^[6]。另外, 在本课题组的前期研究证明从野生梭柄松苞菇子实体中提取的多糖(CVPs)具有较强的降血糖和抗氧化活性^[10], 因此本文所有体外活性测定均选用CVPs 作为阳性对照。

1.8 数据统计分析

每个实验均重复三次, 数据以平均值 \pm 标准偏差(Means \pm SD)表示, 利用软件SPSS 16.0 进行单因素方差分析(One-Way ANOVA), 随后利用Tukey 多重比较对差异显著性进行分析。以 $p < 0.05$ 确定差异是否有统计学意义。

2 结果与讨论

2.1 两种富硒方法的建立

2.1.1 液体发酵富硒

De Silva 等人^[1]指出, 液体发酵相对于固体发酵所需要的培养时间更短, 并且可以便于产品质量的控制, 生产出较为稳定和均一的产品。由表1 可知: 梭柄松苞菇菌丝具有十分出色的富硒能力, 随着培养基中硒浓度的增加, 菌丝的富硒量也随之明显增高(从71.30 $\mu\text{g/mL}$ 增高到324.10 $\mu\text{g/mL}$)。但当硒浓度超过200 $\mu\text{g/mL}$ 时, 菌丝的产量显著降低。而在硒浓度为350 $\mu\text{g/mL}$ 时, 1 L 发酵液只能获得2 g 干重菌丝(硒浓度低于200 $\mu\text{g/mL}$ 时, 菌丝生产效率处于4.3~4.5 g/L)。Li 等人的试验证明硒浓度在0.5~40 mg/L 的硒溶液能够很好地促进螺旋藻的生长, 而大于50 mg/L 的硒溶液对螺旋藻有毒性^[11]。Biacs 等人发现了硒对胡萝卜也具有相似作用特点, 即低浓度硒对胡萝卜有益, 而高浓度则有毒害作用, 抑制胡萝卜的生长^[12]。由此可见, 低浓度硒可促进机体生长, 而高浓度硒则会对机体生长表现出抑制甚至毒害作用。其原因可能是, 无机硒本身有毒, 且吸收率低, 随着硒浓度的增加, 过量的硒对机体产生毒害作用, 从而导致机体生长受到抑制甚至无法生长。

由图1 可以看出, 随着培养基中硒浓度的增加, 菌丝的颜色越来越深, 出现红硒现象, 尤其是当硒浓度高于200 $\mu\text{g/mL}$ 时, 此现象更加显著。这是食用真

菌对硒的富集由生理性富集转变为病理性富集的标志, 说明其对食用真菌菌丝的生长已产生了较强的毒性; 另一方面, 有机硒转化率随着培养基中硒浓度的增加, 而不断降低(从 87.20%降低到 45.20%)。培养基中硒浓度为 100 μg/mL~350 μg/mL 范围内, 有机硒的总量很接近。并且在硒浓度为 100 μg/mL 时, 单位干重中有机硒含量最高。综合菌丝的生产效率、富硒量、有机硒转化率以及单位干重中有机硒含量, 我们

选择 100 μg/mL 为梭柄松苞菇液体发酵最适富硒浓度。

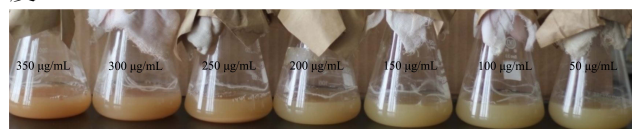


图 1 梭柄松苞菇在含不同浓度硒液体培养基中的差异

Fig.1 Appearance of *Catathelasma ventricosum* (mycelia) in liquid media containing different concentrations of selenium

表 1 硒浓度对梭柄松苞菇菌丝的生产效率、富硒量和有机硒转化率的影响

Table 1 Effect of selenium concentrations on the productivity, amount of enriched selenium, and conversion rate of organic selenium of *Catathelasma ventricosum* in liquid fermentation

指标	硒浓度/(μg/mL)						
	50	100	150	200	250	300	350
生产效率	4.40±0.10 ^c	4.50±0.20 ^c	4.30±0.20 ^c	4.50±0.20 ^c	3.10±0.10 ^b	2.40±0.10 ^a	2.00±0.10 ^a
富硒量	71.30±5.70 ^a	199.50±18.20 ^b	254.30±14.80 ^c	274.50±15.50 ^d	308.70±22.60 ^e	319.20±15.50 ^f	324.10±27.40 ^f
有机硒转化率	87.20±8.40 ^f	84.60±7.80 ^f	63.50±4.60 ^e	55.30±5.20 ^d	48.90±3.80 ^c	46.50±3.70 ^b	45.20±4.00 ^a
有机硒含量	62.17±0.48 ^a	168.78±1.42 ^b	161.48±0.68 ^b	151.80±0.81 ^b	150.95±0.86 ^b	148.43±0.57 ^b	146.49±1.10 ^b

注: 有机硒含量表示每克干菌丝体中有机硒的含量 (μg/g); 表中所示数值均表示为三次测试的平均值±标准偏差 (Means±SD), 同一行中不同的字母表示具有显著差异 ($p < 0.05$); 生产效率 (g/L); 富硒量 (μg/g); 有机转换率 (%)。

2.1.2 固体发酵富硒

近期大量的研究报道了利用食用菌子实体对硒元素的富集, Song 等人利用大球盖菇富硒, 获得 422.70 μg/g 的富硒量^[13], 而 Dong 等人^[14]利用蛹虫草富硒, 仅获得了 1.07 μg/g 的富硒量。由此可见, 不同来源的富硒产品, 对富硒量具有较大影响。由表 2 可

知: 梭柄松苞菇子实体的富硒能力略逊于菌丝, 随着培养基中硒浓度的增加, 子实体外表的红色越来越深, 其富硒量也随之增高。当硒浓度为 350 μg/g 时, 子实体的硒含量达到峰值 92.80 μg/g。但培养基中硒浓度对子实体生产效率的影响并不如菌丝明显, 直到硒浓度为 350 μg/g 时, 子实体生产效率才出现明显降低。



图 2 梭柄松苞菇在含不同浓度硒固体培养基中的差异

Fig.2 Appearance of *Catathelasma Ventricosum* (fruit bodies) in solid media containing different concentrations of selenium

表 2 硒浓度对梭柄松苞菇子实体的生产效率、富硒量和有机硒转化率的影响

Table 2 Effect of Se on the productivity, amount of enriched selenium, and conversion rate of organic selenium of *Catathelasma*

ventricosum in solid fermentation

指标	硒浓度/(μg/g)						
	50	100	150	200	250	300	350
生产效率	93.50±8.10 ^b	97.40±5.40 ^b	95.10±6.20 ^b	91.30±5.20 ^b	93.60±7.40 ^b	91.30±4.50 ^b	55.30±3.10 ^a
富硒量	41.50±1.70 ^a	52.50±3.50 ^b	64.40±3.30 ^c	69.80±3.80 ^d	77.40±5.80 ^e	84.70±6.90 ^f	92.80±6.40 ^g
有机硒转化率	98.40±6.60 ^d	97.30±5.80 ^d	94.40±7.40 ^d	92.60±7.30 ^d	80.60±4.90 ^c	70.40±4.40 ^b	59.30±3.60 ^a
有机硒含量	40.84±0.11 ^a	51.08±0.20 ^b	60.79±0.24 ^b	64.63±0.28 ^b	62.38±0.28 ^b	59.63±0.30 ^b	55.03±0.230 ^b

注: 有机硒含量表示每克干子实体中有机硒的含量 (μg/g); 表中所示数值均表示为三次测试的平均值±标准偏差 (Means±SD), 同一行中不同的字母表示具有显著差异 ($p < 0.05$); 生产效率 (g/kg); 富硒量 (μg/g); 有机转换率 (%)。

由此可知, 梭柄松苞菇子实体具有比菌丝更好的硒耐受性。而 Song 等人研究发现当硒浓度在 0~80 μg/g 时, 大球盖菇生长良好, 硒浓度为 200 μg/g 时, 其生长已明显受到抑制^[13]。虽然子实体的有机硒转化

率明显高于菌丝体的有机硒转化率, 但由于子实体富硒总量偏低, 这使得子实体含有的有机硒总量低于菌丝体。值得注意的是, 培养基中硒浓度为 200 μg/g 时, 子实体中有机硒含量最高 (64.63 μg/g)。综合子实体

的生产效率、富硒量、有机硒转化率以及单位干重中有机硒含量,我们选择 200 $\mu\text{g/g}$ 为梭柄松苞菇固体发酵最合适的富硒浓度。

2.2 两种富硒多糖的降血糖、抗氧化活性比较

2.2.1 两种富硒多糖的获得

分别提取在 100 $\mu\text{g/mL}$ 硒浓度条件下的梭柄松苞菇菌丝富硒多糖 SPCs 和 200 $\mu\text{g/g}$ 硒浓度条件下的梭柄松苞菇子实体富硒多糖 SFCs (多糖含量>99%)。并测得 SPCs 和 SFCs 的硒含量分别为 77.14 $\mu\text{g/g}$ 和 59.35 $\mu\text{g/g}$ 。另外培养基中不含有亚硒酸钠的 PCs 和 FCs 也被提取,所得多糖样品冻干后,置于 -80 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱备用。

表 3 两种富硒多糖降血糖和抗氧化活性的比较

Table 3 Hypoglycemic and antioxidant activities of two Se-polysaccharides from *Catathelasma ventricosum*

生物活性	组别				
	CVPs (对照)	SPCs	PCs	SFCs	FCs
α -GI (Ae)	3.04 \pm 0.21 ^b	2.56 \pm 0.32 ^a	3.64 \pm 0.31 ^c	3.08 \pm 0.44 ^b	3.54 \pm 0.23 ^c
α -AI (Ae)	2.51 \pm 0.23 ^b	2.26 \pm 0.12 ^a	2.64 \pm 0.27 ^b	2.29 \pm 0.33 ^a	3.19 \pm 0.34 ^c
DPPH (Ae)	3.12 \pm 0.53 ^b	2.28 \pm 0.37 ^a	3.86 \pm 0.48 ^c	2.35 \pm 0.42 ^a	4.02 \pm 0.49 ^c
RP (Ae)	1.34 \pm 0.13 ^b	0.97 \pm 0.25 ^a	1.79 \pm 0.09 ^c	1.39 \pm 0.08 ^b	1.87 \pm 0.21 ^c
FI (Ae)	5.73 \pm 0.55 ^b	4.14 \pm 0.74 ^a	6.74 \pm 0.48 ^c	5.67 \pm 0.87 ^b	6.69 \pm 0.63 ^c

注:表中所示数值均表示为三次测试的平均值 \pm 标准偏差 (Means \pm SD),同一行中不同的字母表示具有显著差异 ($p<0.05$); α -GI: α -葡萄糖苷酶抑制活性 ($\mu\text{g/mL}$); α -AI: α -淀粉酶抑制活性 ($\mu\text{g/mL}$); DPPH: DPPH 清除活性,表示为当 DPPH 自由基清除率为 50% 时,加入抗氧化剂的有效浓度 (mg/mL); RP: 还原力,表示为当光吸收值达到 0.5 时,加入抗氧化剂的有效浓度 (mg/mL); FI: 金属螯合活性,表示为当金属螯合率为 50% 时加入抗氧化剂的有效浓度 (mg/mL)。

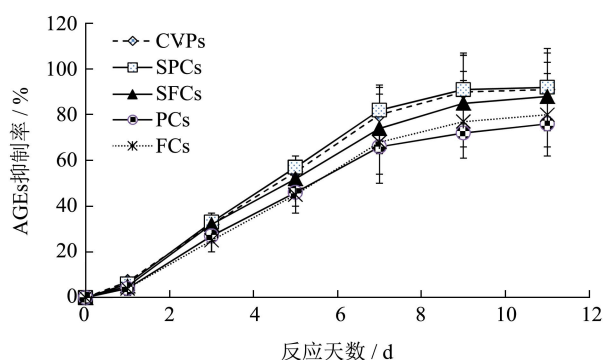


图 3 梭柄松苞菇子实体多糖和菌丝多糖的 AGEs 抑制率

Fig.3 AGEs inhibition rate of the polysaccharides in *Catathelasma ventricosum* (fruit bodies and mycelia)

表 3 的结果表明,SPCs 具有非常突出的降血糖和抗氧化活性,SPCs 的所有测试指标都显著优于阳性对照 CVPs ($p<0.05$)。SFCs 的这两种生物活性也较为优异,甚至 α -淀粉酶抑制活性和 DPPH 清除活性优于阳性对照 CVPs ($p<0.05$),而与 SPCs 相当 ($p>0.05$)。但 SFCs 的 α -葡萄糖苷酶抑制活性、还原力和金属螯合活性均低于 SPCs ($p<0.05$)。值得注意的是,SFCs 和 SPCs 的所有体外抗氧化和降血糖活性指标均显著

2.2.2 两种富硒多糖生物活性的比较

晚期糖基化终末产物 (AGEs) 是还原糖与氨基酸发生非酶褐变反应的产物之一,其与氧化应激相关的多种疾病有着直接关系。因此,利用抗氧化剂抑制 AGEs 的产生,是治疗这些疾病的有效方法。如图 3 所示,SPCs 的 AGEs 抑制活性略高于 SFCs ($p>0.05$),并且与 CVPs 的抑制活性没有显著差异 ($p>0.05$)。而 SFCs 和 SPCs 的 AGEs 抑制活性均显著高于 FCs 和 PCs ($p<0.05$)。在反应 11 d 后 SPCs 的 AGEs 抑制率达到峰值 92.10%,而 SFCs 和 CVPs 的 AGEs 抑制率也达到了 91.20% 和 88.10%,但 FCs 和 PCs 的 AGEs 抑制率仅为 76.5% 和 80.2%。

优于 FCs 和 PCs ($p<0.05$)。

综上所述说明梭柄松苞菇菌丝富硒多糖 SPCs 具有更突出的降血糖和抗氧化活性。当向固体和液体培养基中添加亚硒酸钠,能够提升梭柄松苞菇多糖的抗氧化和降血糖活性,并且 SFCs 和 SPCs 富集的硒元素,很可能是其抗氧化和降血糖活性高于 FCs 和 PCs 的重要原因。

3 结论

本研究首次以梭柄松苞菇为载体,亚硒酸钠为硒源,成功的建立了梭柄松苞菇固体和液体发酵富硒的方法。尤其液体发酵富硒,相较于固体发酵富硒,其反应条件更易控制,发酵周期更短,生物质干重中有机硒含量更高。同时,体外抗氧化和降血糖的实验结果显示,富硒多糖 SFCs 和 SPCs 的这两种生物活性均高于未富硒多糖 FCs 和 PCs。由此可推断,SFCs 和 SPCs 对硒元素的富集,很可能是其降血糖和抗氧化活性高于 FCs 和 PCs 的重要原因。综上,利用液体发酵富硒,是获得梭柄松苞菇富硒菌丝的理想途径,而从中提取的菌丝多糖 SPCs 具备被进一步开发成预防或

治疗糖尿病等与机体氧化应激相关疾病药物的潜力。

参考文献

- [1] De Silva D, Rapior S, Hyde K D, et al. Medicinal mushrooms in prevention and control of diabetes mellitus [J]. *Fungal Diversity*, 2012, 56: 1-29
- [2] 程天德,戴必胜,梁延省.富硒大豆低聚肽的抗氧化活性研究[J].现代食品科技,2013,29(2):277-279
CHENG Tian-de, DAI Bi-sheng, LIANG Yan-sheng. Study on antioxidation of se-riched soybean oligopeptides [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2013, 29(2): 277-279
- [3] 黄峰,单雪风,张水妹,等.螺旋藻富硒转化含硒蛋白质的鉴定及其抗氧化活性研究[J].现代食品科技,2015,31(7):99-104
HUANG Feng, SHAN Xue-feng, ZHANG Shui-mei, et al. Identification of selenoproteins formed via biotransformation of selenium-enriched streptomyces platensis and their oxygen free radical scavenging activities [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2015, 31(7): 99-104
- [4] Navarro-Alarcon M, Cabrera-Vique C. Selenium in food and the human body: A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 400: 115-141
- [5] Pappa E C, Pappas A C, Surai P F. Selenium content in selected foods from the Greek marked and estimation of the daily intake [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 372: 100-108
- [6] Liu Y T, Sun J, Luo Z Y, et al. Chemical composition of five wild edible mushrooms collected from southwest China and their antihyperglycemic and antioxidant activity [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2012, 50(5): 1238-1244
- [7] Liu Y T, Sun J, Rao S Q, et al. Antidiabetic activity of mycelia selenium-polysaccharide from *Catathelasma ventricosum* in STZ-induced diabetic mice [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2013, 62: 285-291
- [8] Liu Y T, Sun J, Luo Z Y. Effect of supplements Mn^{2+} , Cu^{2+} , and aromatic compounds and *Penicillium decumbens* on lignocellulosic enzyme activity and productivity of *Catathelasma ventricosum* [J]. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2013, 23(4): 565-571
- [9] Cheng K L. Determination of traces of selenium 3, 3'-Diaminobenzidine as selenium (IV) organic reagent [J]. *Analytica Chimica Acta*, 1956, 28: 1738
- [10] Liu Y T, Sun J, Rao S Q, et al. Antihyperglycemic and antioxidant activities of polysaccharides from *Catathelasma ventricosum* in streptozotocin-induced diabetic mice [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2013, 57: 39-45
- [11] Li Z Y, Guo S Y, Li L. Bioeffects of selenite on the growth of *Spirulina platensis* and its biotransformation [J]. *Bioresource Technology*, 2003, 54(89):171-176
- [12] Biacs P A, Daood H G, Kadar I. Effect of Mo, Se, Zn and Cr treatments on the yield [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1995, 43(12):589-591
- [13] Song Z, Jia L, Xu F, et al. Characteristics of Se-enriched mycelia by *Stropharia rugoso-annulata* and its antioxidant activities *in vivo* [J]. *Biological Trace Element Research*, 2009, 131(1): 81-89
- [14] Dong J Z, Ding J, Yu P Z, et al. Composition and distribution of the main active components in selenium-enriched fruit bodies of *Cordyceps militaris* link [J]. *Food Chemistry*, 2013, 137: 164-167