

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.06.022

大球盖菇多糖的体外模拟消化研究

金明枝¹, 黄千里¹, 陈辉², 叶明¹

(1. 合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 上海市农业科学院食用菌研究所, 上海 201403)

摘要:文章从大球盖菇子实体中提取分离得到均一组分多糖(SP-1a), 采用体外模拟唾液、胃液和肠液模型, 并结合理化性质与体外抗氧化活性, 研究 SP-1a 在体外模拟消化体系中的变化。结果表明: 唾液对 SP-1a 无显著影响; 而在模拟胃液和肠液中, 随着还原糖质量浓度的不断增加, SP-1a 的分子量逐渐减小, 其表面形态由大块片状变为网状聚集体, 并且在高温下显现出不同的热解反应。此外体外抗氧化实验结果表明, SP-1a 胃消化产物对·OH具有较强的清除能力, 肠消化产物对 DDPH 自由基具有较强的清除能力及还原力。因此, SP-1a 可在模拟胃肠体系中被消化降解, 且其胃肠消化产物具有较强的抗氧化活性。

关键词:大球盖菇; 多糖; 体外消化; 理化性质; 抗氧化活性

中图分类号: Q939.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2023)06-0859-06

Research on *in vitro* simulated digestion of polysaccharides from *Stropharia rugosoannulata*

JIN Mingzhi¹, HUANG Qianli¹, CHEN Hui², YE Ming¹

(1. School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. Institute of Edible Fungi, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China)

Abstract: A homopolysaccharide (SP-1a) was extracted from the fruit bodies of *Stropharia rugosoannulata*. By simulating the digestion of human gastrointestinal tract *in vitro* and combining physicochemical properties with *in vitro* antioxidant activity, the changes of SP-1a in the simulated digestive system were explored. The results showed that saliva had no significant effect on SP-1a, but in gastrointestinal digestive system, with the increasing content of reducing sugars, the molecular weight of SP-1a gradually decreased, the surface morphology of SP-1a changed from large flakes to reticular aggregates, and it showed different pyrolysis reactions at high temperature. The results of *in vitro* antioxidant experiments showed that SP-1a gastric digestive products had strong ·OH scavenging ability, and intestinal digestive products had strong DPPH scavenging ability and reducing power. Therefore, SP-1a can be digested in the simulated gastrointestinal system, and its gastrointestinal digestive products have strong antioxidant activity.

Key words: *Stropharia rugosoannulata*; polysaccharide; digestion *in vitro*; physicochemical property; antioxidant activity

多糖是单糖经糖苷键连接而成的一种聚合糖高分子化合物, 通常以聚集体的形式存在于水溶液中。多糖在人体的肠道中会被分解吸收, 并通

过血液输送至体内需要营养的组织、器官^[1]。但由于人体实验成本昂贵且存在伦理争议, 而体外模拟消化模型所需样品少、操作简便快速且具有

收稿日期: 2021-04-09; 修回日期: 2021-05-07

基金项目: 上海市科技兴农资助项目(2019-02-08-00-12-F01132); 合肥工业大学产学研校企合作资助项目(W2019JSKF0082)

作者简介: 金明枝(1996—), 女, 安徽安庆人, 合肥工业大学硕士生;

叶明(1959—), 男, 安徽安庆人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师。

可重复性,使其逐渐成为消化研究的首选方法^[2]。但体外消化易受外界环境的影响,影响多糖体外消化的因素主要有以下 2 个方面:① 多糖自身因素,包括组成成分、分子量、糖苷键与构象等^[3];② 环境因素,包括消化液 pH 值、糖水解酶、温度和消化介质等^[4]。因此每种多糖的结构差异使其消化率均各不相同。

大球盖菇(*Stropharia rugosoannulata*)是联合国粮食及农业组织向发展中国家推荐种植的新菌种^[5-6],目前在中国已实现人工种植^[7]。大球盖菇含有多种活性成分,其中多糖含量较为丰富,具有抗氧化及抗肿瘤、降血糖血脂等活性^[8-9]。然而,关于不同消化阶段对大球盖菇多糖(SP-1a)的理化性质和生物活性的影响研究较少。本文利用体外模拟消化系统研究大球盖菇多糖的消化特性,为大球盖菇多糖的功能活性提供科学依据,促进其成为功能性食品或治疗药物。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

材料为大球盖菇子实体,由上海市农业科学院食用菌研究所提供。

胃蛋白酶(3 000 U/mg,猪源)、胰蛋白酶(250 U/mg,猪源)、胰酶均购于 BioFroxx(GER);DPPH 购于阿拉丁试剂(上海)有限公司。其他试剂均为分析纯。

仪器有:LC-10A 高效液相色谱仪(high performance liquid chromatography, HPLC)(日本 Shimadzu 公司);Nicolet 67 傅里叶变换红外(Fourier transform Infrared, FTIR)光谱仪(美国尼高力仪器公司);Gemini 500 热场发射扫描电子显微镜(field emission scanning electron microscope, FESEM)(德国卡尔蔡司);STA449F3 同步热分析仪(德国耐驰公司);CARY5000 紫外-可见近红外分光光度计(安捷伦科技有限公司)。

1.2 体外唾液消化阶段

收集 3 名健康志愿者(年龄 20~30 岁,近 3 个月未摄入抗生素)的唾液,收集好的唾液离心(4 500 r/min, 10 min)以去除细胞,取上清液备用。随后将 10 mL SP-1a 溶液(4 g/L)与 10 mL 人唾液加入试管中并于 37 °C 孵育进行消化,分别在 5、15、30 min 取样 5 mL,于沸水浴灭活 15 min,离心(4 500 r/min, 10 min)收集上清液,同时将消化 30 min 后剩余的含 SP-1a 唾液消化液透析冻干得 SP-1a-S。

1.3 体外胃液消化阶段

参考文献[4]的方法制备胃消化液。将 30 mL SP-1a(4 g/L)溶液与 30 mL 人工胃液加入管中混匀,于 37 °C 的摇床中孵育进行消化,分别在 30、60、120、240、360 min 取样 5 mL,沸水浴中灭活 15 min,随后离心(4 500 r/min, 10 min)收集上清液,同时将消化 360 min 后剩余的含 SP-1a 胃消化液透析冻干得 SP-1a-G。

1.4 体外肠液消化阶段

参考文献[10]的方法制备肠消化液。通过 NaHCO₃ 溶液(1 mol/L)调节 SP-1a 胃消化液 pH 值至 7.0。将 9 mL 人工肠液与 30 mL 含 SP-1a 的胃消化液加入试管中,在 37 °C 摇床中孵育,分别在 30、60、120、240、360 min 取 5 mL 消化样品,于沸水浴中灭活 15 min,随后离心(4 500 r/min, 10 min)收集上清液,同时将消化 360 min 后剩余的含 SP-1a 肠消化液透析冻干得 SP-1a-I。

1.5 化学表征

参考文献[2]的方法使用高效液相色谱仪测定 SP-1a 消化产物的分子量;参考文献[11]的方法测定 SP-1a 消化产物的单糖组成;3,5-二硝基水杨酸法用于测定不同时段 SP-1a 消化液中的还原糖摩尔分数^[12]。

1.6 FTIR 分析

使用 FTIR 光谱仪进行红外光谱采集。将 SP-1a 及其消化样品粉末放在平台的检测窗上进行检测,扫描范围为 4 000~500 cm⁻¹。

1.7 表观形态分析

将 SP-1a 及其消化样品涂金粉后,通过 SEM 以 400 倍放大率观察样品形貌,以获得样品的微观形态。

1.8 热特性测定

采用同步热分析仪测定 SP-1a 消化产物热特性。测试温度范围为 25~500 °C,速率为 5 °C/min。吹扫气体的氮气流速为 50 mL/min。

1.9 多糖消化产物的体外抗氧化活性

1.9.1 ·OH 清除作用

参考文献[13]的方法,分别取 1.0 mL 磷酸盐缓冲液和 0.5 mL 邻二氮菲(2.5 mmol/L)于试管中,再加入 SP-1a 消化液、硫酸亚铁(2.5 mmol/L)、H₂O₂(20 mmol/L)各 0.5 mL,混匀后在 37 °C 水浴中反应 60 min,用蒸馏水调零,在 536 nm 波长处测定各组吸光度值,以蒸馏水代替样品溶液的空白组吸光度为 A₀,以蒸馏水代替 H₂O₂ 溶液的对照组吸光度为 A₁,样品组吸光值为 A₂。·OH

清除率(H)的计算公式为:

$$H = \frac{A_2 - A_1}{A_0 - A_1} \times 100\% \quad (1)$$

1.9.2 DPPH 自由基清除作用

参考文献[14]的方法,取 1 mL SP-1a 消化液与 1 mL DPPH-乙醇溶液混合,在室温黑暗条件下保持 30 min,用蒸馏水调零,随后在 517 nm 波长处测定各组吸光度值,以蒸馏水代替样品溶液的空白对照组吸光度值为 A_0 ,以乙醇代替 DPPH-乙醇溶液的对照组吸光度值为 A_3 ,样品组吸光度值为 A_4 。DPPH 清除率(D)的计算公式为:

$$D = 1 - \frac{A_4 - A_3}{A_0} \times 100\% \quad (2)$$

1.9.3 还原力

参考文献[15]的方法,分别取 0.8 mL SP-1a 消化液、0.4 mL PBS(0.2 mol/L) 与 0.4 mL 1% $K_3[Fe(CN)_6]$ 于试管中,50 °C 水浴反应 20 min,取出待冷却后,加入 0.4 mL 10% 三氯乙酸,随后离心(4 500 r/min, 5 min)取上清液 1.5 mL,加入 1 mL 去离子水和 0.4 mL 0.1% 的三氯化铁,静置 5 min,于 700 nm 测定各组吸光度值,以蒸馏水代替样品作为空白组的吸光度值为 A_0 ,样品组吸光度值为 A_5 。还原力(R)的计算公式为:

$$R = A_5 - A_0 \quad (3)$$

1.10 结果处理

所有实验均重复 3 次,实验数据以(平均值±标准差)表示。使用 SPSS26.0 软件对实验数据进行统计分析,单向方差分析(ANOVA)用于测定各组之间的显著性差异。 $P < 0.05$ 表示不同组间存在显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 还原糖质量浓度分析

糖苷键的断裂会引起还原糖质量浓度的增加^[9],因此还原糖质量浓度的变化可作为判断多糖是否被降解的依据。SP-1a 在消化过程中还原糖质量浓度的变化见表 1 所列。从表 1 可以看出,在唾液消化阶段还原糖质量浓度未发生显著性变化,而在模拟的胃肠消化中,还原糖质量浓度随着消化时间增加而逐渐增多,尤其是在肠液消化 360 min 后,还原糖质量浓度显著增加($P < 0.05$),达到了(0.525±0.060) mg/mL,结果与文献[3]研究结果一致。结果表明在胃肠消化中,SP-1a 可被降解吸收,这可能是由于胃肠液中的环境易引起糖苷键断裂,从而使还原糖质量浓度

逐渐增多^[16]。

表 1 不同消化阶段 SP-1a 的还原糖质量浓度

| 消化阶段 | 消化时间/min | ρ (还原糖)/(mg·mL ⁻¹) |
|------|----------|-------------------------------------|
| 唾液消化 | 5 | 0.058±0.010 ^b |
| | 15 | 0.059±0.010 ^b |
| | 30 | 0.062±0.020 ^a |
| 胃液消化 | 30 | 0.080±0.080 ^c |
| | 60 | 0.081±0.090 ^c |
| | 120 | 0.096±0.050 ^c |
| | 240 | 0.133±0.070 ^b |
| | 360 | 0.168±0.120 ^a |
| 肠液消化 | 30 | 0.167±0.150 ^c |
| | 60 | 0.135±0.080 ^c |
| | 120 | 0.171±0.070 ^c |
| | 240 | 0.433±0.060 ^b |
| | 360 | 0.525±0.060 ^a |

注:不同字母表示在同一消化阶段的不同时间有显著性差异($P < 0.05$)。

2.2 分子量与单糖摩尔分数分析

多糖的生物活性与其分子量和单糖组成紧密相关。根据标准品校准曲线 $\lg M_w = -0.1828t + 11.895$ 与出峰时间,可计算出 SP-1a 及消化产物的分子量。SP-1a 及其消化产物的高效凝胶渗透色谱图(high performance gel permeation chromatography, HPGPC)如图 1 所示。

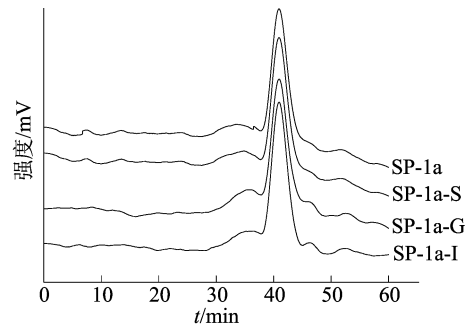


图 1 SP-1a 及其消化产物的 HPGPC 谱图

从图 1 可以看出,经过唾液消化后 SP-1a 的分子量未明显变化,而经模拟胃液和肠液各孵育 360 min 后,SP-1a 的分子量分别为 18.493、17.594 kDa,此结果表明,SP-1a 在胃肠中可被降解吸收,且 SP-1a 在胃中的分子量变化大于肠液中的变化,这可能是由于胃液中的酸性环境更容易导致分子量减小^[17]。结合还原糖质量浓度结果表明,SP-1a 糖苷键的断裂主要在肠液巾发生,而胃液消化主要引起 SP-1a 聚集体的破坏,这与 *Rosa roxburghii* Tratt 多糖的消化结果类似^[3]。此外单糖组成及其摩尔分数见表 2 所列。由表 2

可知,在各消化阶段,单糖的组成有所差异,其中葡萄糖的摩尔分数逐渐降低,这可能是由于葡萄糖间的糖苷键在胃肠液中更易于断裂,这与文献[1]中的 *Inonotus obliquus* 多糖在胃肠中单糖结果相似。

表 2 SP-1a 及其消化产物中单糖组成及其摩尔分数 %

| 单糖 | SP-1a | SP-1a-S | SP-1a-G | SP-1a-I |
|-----|-------|---------|---------|---------|
| 岩藻糖 | 3.33 | 3.42 | 3.59 | 3.99 |
| 半乳糖 | 35.19 | 35.83 | 36.96 | 38.12 |
| 葡萄糖 | 61.48 | 60.75 | 59.43 | 57.89 |

2.3 FTIR 结果分析

SP-1a 及其消化产物的 FTIR 谱图如图 2 所示。从图 2 可以看出:SP-1a、SP-1a-S、SP-1a-G 和 SP-1a-I 的红外吸收峰基本稳定;经过消化后 SP-1a 特征吸收峰未消失,在 $1\ 356$ 、 $1\ 148\ \text{cm}^{-1}$ 处的弱吸收峰分别由 C—H 的弯曲振动和 C—O 的伸缩振动引起^[18-19];在 $1\ 016\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰表明 SP-1a 的消化产物依然具有吡喃糖环。而 SP-1a 及其消化产物红外图谱在 $1\ 644\sim 1\ 022\ \text{cm}^{-1}$ 范围内,此范围内各产物的吸收峰强度不同,结合单糖组成的结果可知,可能是由于消化前后 SP-1a 发生降解导致单糖组成不同所引起的^[6]。

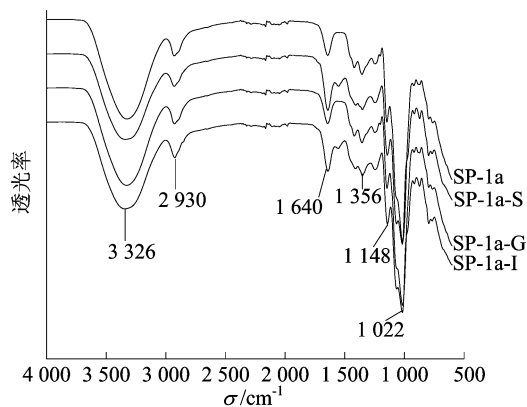


图 2 SP-1a 及消化产物的 FTIR 谱图

2.4 SP-1a 的表观形态特性分析

SP-1a 及其消化产物的微观形态如图 3 所示。从图 3 可以看出:未经消化的 SP-1a 呈片状,且表面光滑平整^[18];经过唾液消化后,其消化产物 SP-1a-S 显示有细杆状出现;而经胃肠消化后,SP-1a-G 形状变为表面多孔的聚集体,特别是在肠消化 360 min 后,其消化产物 SP-1a-I 的分子变小且分布松散,这与分子量和还原糖质量浓度结果一致,表明 SP-1a 在胃肠道中可被降解。文献

[10]显示 *Holothurial eucospilota* 多糖在胃肠消化时由于降解微结构发生了变化,这与本文研究结果一致。

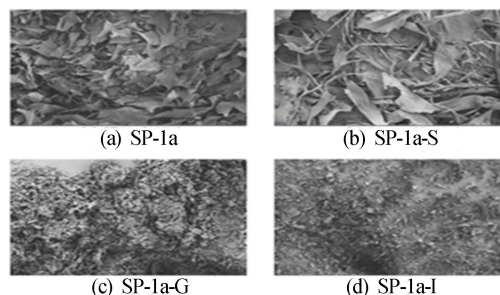


图 3 SP-1a 及其消化产物的 SEM 图

2.5 热特性分析

差示扫描量热法(differential scanning calorimeter, DSC)可用来研究多糖的热物理性质。SP-1a 及其消化产物的 DSC 曲线如图 4 所示。

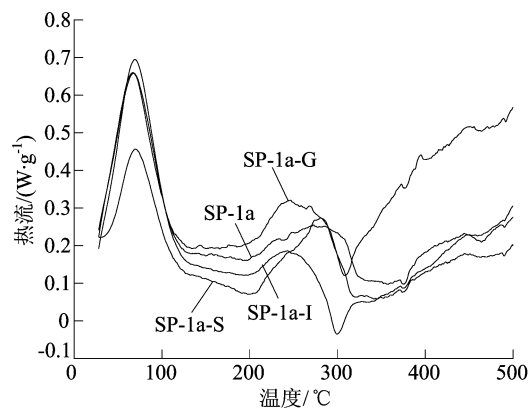


图 4 SP-1a 及消化产物的热分析

从图 4 可以看出 SP-1a 在 $25\sim 500\ ^\circ\text{C}$ 范围内有 2 个热解峰:第 1 个吸热峰在 $67\ ^\circ\text{C}$ 左右,这可能是由于 SP-1a 中的水分蒸发所致^[2];第 2 个吸热峰在 $284\ ^\circ\text{C}$ 左右,这可能是 SP-1a 的熔点。经过消化后,唾液消化产物 SP-1a-S 的热解趋势与 SP-1a 一致,而胃液消化产物 SP-1a-G 和肠液消化产物 SP-1a-I 各有 1 个吸热峰和 1 个放热峰,前者与 SP-1a 结果一致,是水分蒸发引起的热解峰,后者可能是由于 SP-1a 被降解成小分子而产生了不同的热解反应,具体机制还有待进一步研究。

2.6 抗氧化活性分析

2.6.1 SP-1a 消化产物对 $\cdot\text{OH}$ 的清除作用

$\cdot\text{OH}$ 可以与人体中多种分子进行结合从而对人体造成危害,是危害最大的一种自由基^[19]。SP-1a 在不同消化阶段对 $\cdot\text{OH}$ 清除作用如图 5

所示。从图 5 可以看出:SP-1a 的唾液消化产物对 $\cdot\text{OH}$ 的清除作用未发生显著性改变;在胃液消化过程中,其清除率呈上升趋势,在 240 min 时其 $\cdot\text{OH}$ 清除率达到 88% 并趋于稳定;而在肠液消化过程中,清除率较为稳定,在 360 min 达到最大值约 78.67%。结果显示,胃肠消化产物能够有效清除 $\cdot\text{OH}$,这可能是多糖被降解提供了氢原子,从而与 $\cdot\text{OH}$ 结合达到清除效果^[20]。图 5 中,不同字母表示 $P < 0.05$ 具有显著性差异,下同。

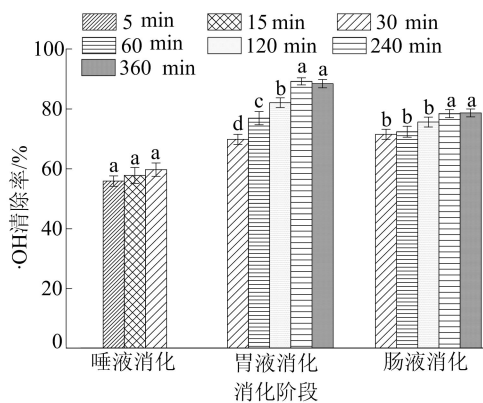


图 5 SP-1a 在不同消化阶段对 $\cdot\text{OH}$ 的清除作用

2.6.2 SP-1a 消化产物对 DPPH 的清除作用

DPPH 是一种稳定的自由基,常用来评估抗氧化活性。SP-1a 在不同消化阶段对 DPPH 自由基的清除作用如图 6 所示。

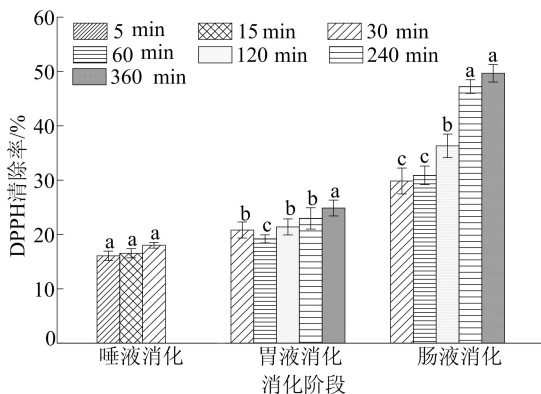


图 6 SP-1a 在不同消化阶段对 DPPH 自由基的清除作用

从图 6 可以看出:唾液消化产物的 DPPH 自由基清除率没有显著变化,胃消化产物对 DPPH 自由基清除率随消化时间的增加而呈增强趋势,360 min 后达到了约 25%;在肠液消化过程中,其对 DPPH 自由基的清除率不断增强,在 240 min 时,DPPH 自由基清除率显著增强($P < 0.05$),达

到 47%,在消化 360 min 后最高达到 50%。这表明多糖经过胃肠消化后具有较强的 DPPH 自由基清除作用。

2.6.3 SP-1a 消化产物的还原力

还原力也是抗氧化活性的检测指标之一,其反应液在 700 nm 处具有最大吸光值^[21]。SP-1a 消化产物还原力如图 7 所示。由图 7 可知:SP-1a 经唾液消化后还原力较为稳定,约为 0.110;胃消化产物的还原力逐渐上升并趋于稳定,在 360 min 时达到 0.165 左右;在肠液消化过程中,可能是 SP-1a 消化产物被稀释,开始时的还原力低于胃消化产物,而后还原力逐渐上升,在 360 min 后达到 0.268 左右。结果显示,SP-1a 经胃肠消化后具有较强的还原力,并显著高于唾液和胃消化液的还原力($P < 0.05$)。

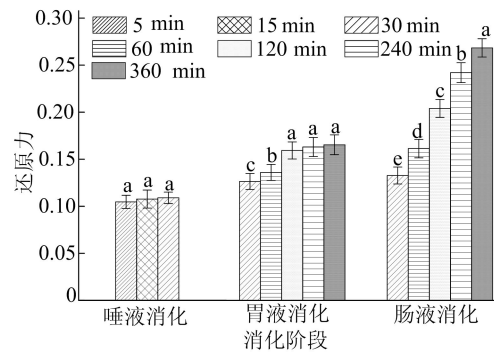


图 7 SP-1a 在不同消化阶段的还原力

在胃肠消化过程中,多糖可能受温度、pH 值、酶等因素的影响发生降解,使其化学性质与结构等发生改变,从而引起多糖抗氧化活性的变化。文献[1]报道 *Inonotus obliquus* 多糖的胃肠消化产物具有显著的抗氧化和酶抑制活性,有助于防止氧化应激和高血糖;文献[10]研究发现胃肠消化对 *Holothurial eucospilota* 多糖的抗氧化活性有显著增强影响;文献[13]显示 *Artocarpus heterophyllus Lam.* 多糖经过胃肠消化后,具有较高的自由基清除活性。这些结果与 SP-1a 消化后的抗氧化活性相似,表明胃肠降解有利于提高多糖的生物活性。

3 结 论

本研究经过从大球盖菇子实体中提取分离得到分子量为 22.907 kDa 的均一组分 SP-1a。其在体外唾液消化阶段,分子量、单糖组成与还原糖质量浓度均无明显变化;而在模拟胃液和肠液消

化后分子量减小至 17.594 kDa, 还原糖质量浓度也显著增加, 并且其微观形态由片状变为网状聚集体, 这表明 SP-1a 主要在胃肠消化中发生降解, 且 SP-1a 胃肠消化液具有较强的 ·OH 和 DPPH 自由基清除能力和还原力, 尤其是肠消化液具有更强的抗氧化活性。因此, 本研究为探索大球盖菇多糖在体内的降解吸收和生物活性提供了理论依据。

[参 考 文 献]

- [1] WANG C, LI W W, CHEN Z Q, et al. Effects of simulated gastrointestinal digestion *in vitro* on the chemical properties, antioxidant activity, α -amylase and α -glucosidase inhibitory activity of polysaccharides from *Inonotus obliquus* [J]. Food Research International, 2018, 103: 280-288.
- [2] GAO J, LIN L Z, CHEN Z J, et al. *In vitro* digestion and fermentation of three polysaccharide fractions from *Laminaria japonica* and their impact on lipid metabolism-associated human gut microbiota [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(26): 7496-7505.
- [3] WANG L, LI C, HUANG Q, et al. *In vitro* digestibility and prebiotic potential of a novel polysaccharide from *Rosa roxburghii* Tratt fruit [J]. Journal of Functional Foods, 2019, 52: 408-417.
- [4] LIANG L, LIU G M, ZHANG F M, et al. Digestibility of squash polysaccharide under simulated salivary, gastric and intestinal conditions and its impact on short-chain fatty acid production in type-2 diabetic rats [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 235: 115904.
- [5] WU J, FUSIMI K, TOKUYAMA S, et al. Functional-food constituents in the fruiting bodies of *Stropharia rugosoannulata* [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2011, 75(8): 1631-1634.
- [6] ZHANG W W, TIAN G T, GENG X R, et al. Isolation and characterization of a novel lectin from the edible mushroom *Stropharia rugosoannulata* [J]. Molecules, 2014, 19(12): 19880-19891.
- [7] 刘瑞壁. 大球盖菇高效栽培技术 [J]. 食用菌, 2021, 43(1): 65-66.
- [8] HE P X, GENG L J, WANG J Z, et al. Production, purification, molecular characterization and bioactivities of exopolysaccharides produced by the wine cap culinary-medicinal mushroom, *Stropharia rugosoannulata* 2# (higher Basidiomycetes) [J]. International Journal of Medicinal Mushrooms, 2012, 14(4): 365-376.
- [9] ZHAI X H, ZHAO A J, GENG L J, et al. Fermentation characteristics and hypoglycemic activity of an exopolysaccharide produced by submerged culture of *Stropharia rugosoannulata* # 2 [J]. Annals of Microbiology, 2013, 63(3): 1013-1020.
- [10] YUAN Y Q, LI C, ZHENG Q W, et al. Effect of simulated gastrointestinal digestion *in vitro* on the antioxidant activity, molecular weight and microstructure of polysaccharides from a tropical sea cucumber (*Holothuria leucospilota*) [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 735-741.
- [11] ZENG F K, CHEN W B, HE P, et al. Structural characterization of polysaccharides with potential antioxidant and immunomodulatory activities from Chinese water chestnut peels [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 246: 116551.
- [12] 高文军, 李卫红, 王喜明, 等. 3,5-二硝基水杨酸法测定蔓菁中还原糖和总糖含量 [J]. 中国药业, 2020, 29(9): 113-116.
- [13] ZHU K X, YAO S W, ZHANG Y J, et al. Effects of *in vitro* saliva, gastric and intestinal digestion on the chemical properties, antioxidant activity of polysaccharide from *Artocarpus heterophyllus* Lam. (Jackfruit) Pulp [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 87: 952-959.
- [14] 叶丹蕾, 韩苗苗, 吴玉兰, 等. 马齿苋多糖理化性质及其抗氧化活性研究 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(10): 1415-1418.
- [15] 杨卓, 王艳辉, 尹宝颖, 等. 不同干燥方法对香菇柄多糖的体外抗氧化研究 [J]. 中国调味品, 2018, 43(6): 6-12.
- [16] YUAN Q, HE Y, XIANG P Y, et al. Effects of simulated saliva-gastrointestinal digestion on the physicochemical properties and bioactivities of okra polysaccharides [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 238: 116183.
- [17] YUN L, LI D, YANG L, et al. Hot water extraction and artificial simulated gastrointestinal digestion of wheat germ polysaccharide [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 123: 174-181.
- [18] 王珊珊, 孙敏, 王永霞, 等. 鸡腿蘑胞外多糖的形貌结构及分子量动态变化与抗氧化的相关性研究 [J]. 生物技术通报, 2021, 37(2): 129-137.
- [19] 汪彬慧, 陈寒青. 莲雾果多糖的结构及抗氧化活性测定 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(6): 849-854.
- [20] 杜湛湛, 张婧, 徐平, 等. 粒毛盘菌多糖纯化、硫酸酯化修饰及抗氧化活性评价 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(1): 134-139.
- [21] CAO Y Y, JI Y H, LIAO A M, et al. Effects of sulfated, phosphorylated and carboxymethylated modifications on the antioxidant activities *in vitro* of polysaccharides sequentially extracted from *Amana edulis* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 146: 887-896.

(责任编辑 闫杏丽)