

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.60027

红汁乳菇多糖的结构特征及对肠道菌群的影响

Structural characteristics of polysaccharides from *Lactarius hatsudake* and its effect on intestinal flora

张馨方^{1,2} 程孟雅^{1,2} 杨 桥^{1,2}ZHANG Xin-fang^{1,2} CHENG Meng-ya^{1,2} YANG Qiao^{1,2}常松林^{1,2} 任佳丽^{1,2}CHANG Song-lin^{1,2} REN Jia-li^{1,2}

(1. 林产可食资源安全与加工利用湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004;

2. 中南林业科技大学食品科学与工程学院, 湖南 长沙 410004)

(1. Hunan Key Laboratory of Forestry Edible Sources Safety and Processing, Changsha, Hunan 410004, China; 2. College of Food Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China)

摘要:目的:探究红汁乳菇多糖对肠道菌群的调节作用。

方法:以红汁乳菇(*Lactarius hatsudake*)为原料,通过热水提取获得红汁乳菇多糖 LHP,进一步纯化得到 LHP-1 和 LHP-2,对其基础结构进行表征,并通过抗生素诱导小鼠模型,研究 LHP 对小鼠体重和肠道微生物群组成的影响。**结果:**LHP-1 主要由甘露糖、葡萄糖、半乳糖组成,其摩尔质量比为 3.44 : 61.10 : 1.22; LHP-2 主要由甘露糖和葡萄糖组成,其摩尔质量比为 3.84 : 153.00,具有“神经元”结构和链状结构区域。LHP 的干预能通过增加拟杆菌属(*Bacteroides*)、阿克曼菌属(*Akkermansia*)等有益菌和减少肠球菌属(*Enterococcus*)、短杆菌属(*Brevundimonas*)等有害菌来恢复肠道菌群的结构和多样性,特别是有益菌嗜黏蛋白—阿克曼菌(*A. muciniphila*)的增加表明了 LHP 在人体肠道菌群调节中的巨大潜力。**结论:**红汁乳菇多糖能够作为潜在益生元改善肠道代谢。

关键词:红汁乳菇;多糖;结构;肠道菌群

Abstract: Objective: This study aimed to explore the regulatory effect of *Lactarius hatsudake* polysaccharide on intestinal flora.

Methods: LHP was extracted from *L. hatsudake* by hot water. LHP-1 and LHP-2 were further purified and characterized. The

effects of LHPs on body weight and intestinal microbiome composition were studied in antibiotic-induced mice. **Results:** LHP-1 was mainly composed of mannose, glucose and galactose. The molar mass ratio of LHP-1 was 3.44 : 61.10 : 1.22. LHP-2 is mainly composed of mannose and glucose, with a molar mass ratio of 3.84 : 153.00. It has a "neuronal" structure and a chain structure region. LHP intervention can restore the structure and diversity of intestinal flora by increasing beneficial bacteria such as *Bacteroides* and *Akkermansia* and reducing harmful bacteria such *Enterococcus* and *Brevundimonas*. In particular, the increase of the beneficial bacteria *A. muciniphila* indicates the great potential of LHP in the regulation of human intestinal flora. **Conclusion:** Polysaccharide from *Lactarius hatsudake* can improve intestinal metabolism as potential prebiotics.

Keywords: *Lactarius hatsudake*; polysaccharide; structure; gut microbiota

肠道菌群的组成与健康、发育和疾病等诸多方面关联紧密^[1],肥胖^[2-3]、免疫^[4]、炎症^[5]、慢性肾病^[6]等疾病受肠道菌群的影响尤为显著。研究^[7-9]发现,饮食干预可以直接降低风险并维持肠道稳态。目前发现具有调节肠道菌群能力的益生元包括菊粉、低聚糖、半乳糖和葡聚糖^[10-11],但这些物质也存在腹泻、胀气、便秘等不足,因此需要探索多样化的天然多糖作为替代物^[12]。

红汁乳菇(*Lactarius hatsudake*)是一种美味的食药真菌,分布广泛^[13],其中多糖是红汁乳菇中重要的生物活性成分^[14-15]。由于人体消化酶不能直接分解多糖,多

基金项目:湖南省创新平台与人才计划项目(编号:2019TP1029);湖南省重点研发计划项目(编号:2022SK2100,2020SK2100)

作者简介:张馨方,女,中南林业科技大学在读硕士研究生。

通信作者:任佳丽(1977—),女,中南林业科技大学教授,博士。

E-mail: rjl_cl@163.com

收稿日期:2022-04-03

糖的消化吸收需要肠道微生物分泌的碳水化合物活性酶的帮助^[16]。研究^[17]证实,大多数多糖可调节肠道微生物群的丰度,如灵芝多糖可通过增加短链脂肪酸的产生来对抗氧化偶氮甲烷诱导的炎症、肿瘤的发生。研究拟提取红汁乳菇多糖 LHP,并获得纯化的级分,分析其基本结构并探索其对肠道菌群的影响,旨在为肠道微生物群失调相关的病理治疗提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

红汁乳菇:经 ITS 测序鉴定为红汁乳菇(*Lactarius hatsudake*),市售;

无水乙醇、正丁醇、氯仿:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

半乳糖(Gal)、葡萄糖(Glc)、鼠李糖(Rha)、甘露糖(Man)、DEAE-纤维素、Sephadex G-100;上海源叶生物科技有限公司;

大孔吸附树脂 D941:陕西乐博生化科技有限公司;

C57BL/6 雄性小鼠:(20±2) g,10 周龄,湖南斯莱克精达实验动物有限公司。

1.2 主要仪器设备

真空冷冻干燥机:LJG-10 型,北京松源华兴科技发展有限公司;

可见分光光度计:721G 型,上海仪电分析仪器有限公司;

高效液相色谱仪:LC-20A 型,日本岛津公司;

扫描电子显微镜:Quanta FEG250 型,美国 FEI 公司;

傅里叶红外光谱仪:IR Tracer-100 型,日本岛津公司。

1.3 方法

1.3.1 LHP 的提取和纯化 将干燥的红汁乳菇子实体粉末(100 g)与蒸馏水(2 L)混合,85 °C 提取 3 h 并不断搅拌,55 °C 超声处理 1 h,4 000 r/min 离心 15 min,重复提取两次并合并上清液,60 °C 旋蒸浓缩。浓缩物用乙醇缓慢沉淀至终浓度 80%,8 000 r/min 离心 20 min,得粗多糖。Sevage 试剂($V_{\text{氯仿}}:V_{\text{正丁醇}}=4:1$)用于除蛋白,微孔吸附树脂 D941 用于除色素,将冷冻干燥后获得的多糖命名为 LHP。将 LHP 溶解于水中(5 mg/mL),依次通过 DEAE-纤维素柱(16 mm×500 mm)和 Sephadex G-100 柱(16 mm×500 mm)进行纯化,分别用蒸馏水和不同浓度的氯化钠洗脱。透析(截留分子量 7 000 Da),冻干后获得进一步纯化的级分 LHP-1 和 LHP-2。

1.3.2 化学成分分析

(1) 多糖含量:采用苯酚—硫酸法^[18]。

(2) 蛋白质含量:采用考马斯亮蓝法^[19]。

(3) 单糖组成:参照文献^[20]。LHP-1 和 LHP-2 在 4 mol/L 三氟乙酸中 100 °C 酸解 6 h,所有酸解产物和标准品均由 0.5 mol/L PMP-甲醇溶液衍生化,然后通过高效液相色谱法分析纯度,色谱条件为 ODS-C₁₈(5 μm, 250 mm×4.6 mm)色谱柱,流速 1 mL/min,流动相为乙腈和 pH 6.8 的磷酸盐缓冲溶液($V_{\text{乙腈}}:V_{\text{磷酸盐缓冲液}}$ 为 13:87),进样量 20 μL,检测波长 250 nm。

1.3.3 扫描电子显微镜观察 取少量的多糖样品粘附于载物台上,减压至真空环境下喷上一薄层金粉,用场发射扫描电镜对样品不同方位的表面特征进行观察。

1.3.4 傅里叶变换红外光谱扫描 采用 KBr 压片法,扫描范围 4 000~400 cm⁻¹。

1.3.5 动物试验 饲养小鼠保持在(25±2) °C 环境中,12 h 明暗循环,自由采水。将 30 只小鼠随机分为 3 组,一组为正常对照组(记为 Cont 组),其余两组小鼠给予头孢曲松钠灌胃,每天一次,灌胃剂量为 8 g/kg 体重,持续灌胃 5 d,观察小鼠粪便状态,当小鼠出现腹泻现象视为造模成功^[21]。对于造模成功的两组小鼠,一组用红汁乳菇粗多糖进行干预(记为 AntP 组);一组作为自然恢复组(记为 Ant 组)。AntP 组自成功建模以来每天灌胃 300 mg/kg LHP,Cont 组和 Ant 组灌胃等体积的生理盐水。喂食期间,观察并记录小鼠体重、行动能力和粪便状态,收集干预第 0,3,7,14 天的粪便贮藏至液氮中。

1.3.6 小鼠肠道菌群 16S rRNA 测序 对动物试验中收集的样本进行微生物测序,从粪便中提取 DNA 后,使用带有 barcode 的特异引物 341F CCTACGGGNGGCWGCAG 和 805R GACTACHVGGGTATCTAATCC 扩增 16S rDNA 的高变区 V3 和 V4 区,目标片段采用 AMPure XT beads 回收试剂盒进行回收。对纯化后的 PCR 产物使用 Qubit 对文库进行定量,将合格的各上机测序文库(Index 序列不可重复)梯度稀释后,根据所需测序量按相应比例混合,并经 NaOH 变性为单链进行上机测序,使用 NovaSeq 测序仪进行 2×250 bp 的双端测序。

1.3.7 统计分析 通过 SPSS 24.0 进行统计分析,数据采用单因素方差分析, $P<0.05$ 代表具有显著性差异。所有数据均表示为平均值±标准差。

2 结果与讨论

2.1 LHP-1 和 LHP-2 的组成

由图 1 可知,水洗多糖和盐洗多糖通过葡聚糖凝胶柱洗脱后均得到一个单一的洗脱峰,说明得到了纯度较高的均质多糖,分别将其命名为 LHP-1 和 LHP-2。

由表 1 可知,从红汁乳菇子实体中提取 LHP 的得率为 6.34%,与 LHP 相比,LHP-1 和 LHP-2 的得率较低,但中性糖含量较高,分别达到 98.20% 和 97.32%,而且几乎无蛋白质。LHP-1 主要由甘露糖、葡萄糖、半乳糖组

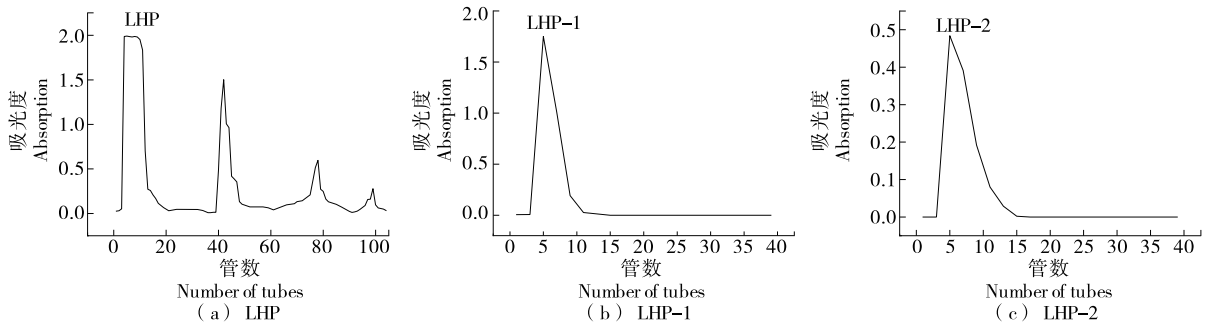


图 1 LHP 的 DEAE-纤维素柱和 Sephadex G-100 凝胶柱洗脱曲线

Figure 1 Elution profiles of DEAE-cellulose column and Sephadex G-100 gel column for LHP

表 1 LHP、LHP-1 和 LHP-2 的得率、化学成分与单糖组成

Table 1 Yields, chemical and monosaccharide composition of LHP, LHP-1 and LHP-2

样品	得率/ %	中性糖/ %	蛋白质/ %	单糖组成(摩尔质量)		
				甘露糖	葡萄糖	半乳糖
LHP	6.34	73.00	0.710			
LHP-1	24.80	98.20	0.002	3.44	61.10	1.22
LHP-2	19.40	97.32	0.004	3.84	153.00	0.00

成,其摩尔质量比为 3.44 : 61.10 : 1.22。LHP-2 主要由甘露糖和葡萄糖组成,其摩尔质量比为 3.84 : 153.00, LHP-2 中主要含有葡萄糖,而不含半乳糖,这两种多糖都可能属于葡聚糖^[22],该试验结果符合食用菌多糖的规律^[23]。

2.2 红外光谱分析

由图 2 可知,3 311,3 346 cm^{-1} 附近的强吸收带归因于 O—H 的伸缩振动,2 926,2 927 cm^{-1} 附近存在另一个弱峰,表示存在甲基或亚甲基,进一步证实这些样品为多糖。酰胺 I 带在 1 679,1 631 cm^{-1} 附近的强吸收带有 N—H 偏差振动,但是强度很弱,证明蛋白质较少。此外,1 079,1 078 cm^{-1} 处检测到的峰是由 C—O 伸缩引起的,1 028,1 031 cm^{-1} 处检测到的峰是由糖苷键引起的,843,856 cm^{-1} 处的光谱特征表明 LHP-1 和 LHP-2 存在 β 构型。

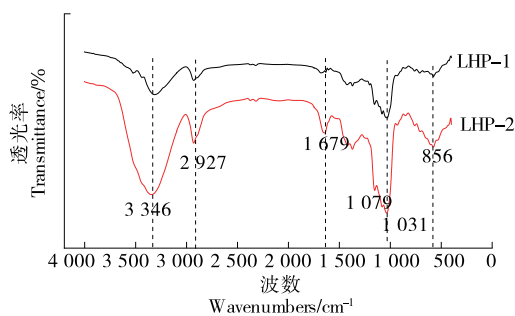


图 2 LHP-1 与 LHP-2 的红外图谱

Figure 2 Infrared spectra of LHP-1 and LHP-2

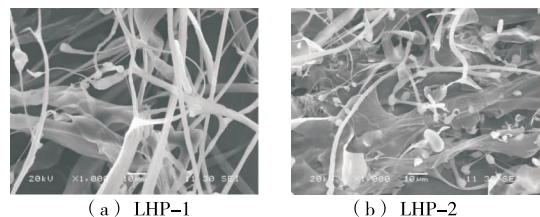
2.3 扫描电镜分析

由图 3 可知,LHP-1 呈非常均匀的状态,且由两种结构组成:一种类似于神经元的结构,中间是一个平面多边形的“细胞体”,细胞边缘延伸出几个“轴突”到 4 个侧面,称为“神经元”区域;另一个结构是链,符合多糖结构。LHP-2 整体看起来比较杂乱,“神经元”结构区和链状结构区几乎重叠,层次不清晰,可能与多糖状态有关。LHP-1 和 LHP-2 除了结构均匀性不同外,均有一条粗壮的主链,有很多分支,这些分支的末端呈球形,LHP-2 的末端小球明显多于 LHP-1。LHP-1 的骨架形态更直,而 LHP-2 则多呈弧形弯曲。

2.4 动物试验分析

2.4.1 LHP 对小鼠体重的影响 由图 4 可知,Cont、Ant 和 Antp 组的小鼠体重无显著性差异,且最终达到了相同的水平,说明 LHP 对小鼠体重无明显影响。

2.4.2 LHP 对肠道微生物群落水平的影响 对各试验



(a) LHP-1 (b) LHP-2

图 3 LHP-1 和 LHP-2 的扫描电镜图

Figure 3 SEM images of LHP-1 and LHP-2 (1 000 \times)

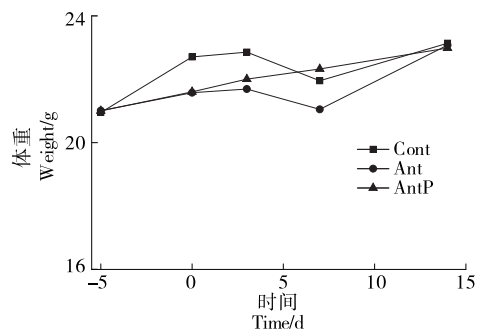


图 4 小鼠平均体重变化

Figure 4 Average body weight changed of mice

组中丰度前 20 的门进行物种注释,并在菌门水平上分析各试验组的细菌群落组成,结果见图 5。小鼠肠道中丰度高的细菌包括拟杆菌门(*Bacteroidetes*)、变形菌门(*Proteobacteria*)、厚壁菌门(*Firmicutes*)、疣微菌门(*Verrucomicrobia*)和蓝细菌(*Cyanobacteria*)。与 Cont 组相比,干预第 0 天,Ant 组的拟杆菌门丰度极低,变形菌门丰度较高;干预第 7 天,疣微菌门和拟杆菌门丰度显著增加,而变形菌门丰度急剧下降至与 Cont 相同的水平,厚壁菌门丰度也减少,蓝细菌无影响,表明小鼠肠道菌群具有一定的恢复能力。对于 Antp 组,疣微菌门丰度随 LHP 干预时间的延长而增加,且显著高于 Cont 组;变形菌丰度显著下降,但仍显著高于 Cont 组;拟杆菌丰度随多糖干预时间的延长而增加,但干预第 14 天仍显著低于 Cont 组。

由图 6、图 7 可知,Cont 组的菌群组成基本一致,以肠球菌属和阿克曼菌属为主,拟杆菌属次之。Ant 组的菌群组成差异较大,干预第 0~3 天,肠球菌属、短杆菌属和拟杆菌属是优势种,干预第 4~14 天,肠球菌和短单胞菌丰度减少,而卟啉单胞菌科、阿克曼菌属和拟杆菌属是优势

种,且干预第 14 天,拟杆菌丰度急剧下降,阿克曼菌丰度减少,而变形杆菌数量显著增加。Antp 组干预第 0 天的结果与 Ant 组相似,肠球菌在干预第 3 天迅速增加并成为优势种,随后逐渐减少退出优势种群之列,阿克曼菌的丰度随干预时间的推移而增加,并显著高于 Cont 组。从第 14 天菌属组成情况上来看,Ant 组细菌组成与 Cont 组相似,Antp 组细菌组成及比例与 Cont 组有显著差异。

综上,LHP 干预后使一些有益菌属增加。阿克曼菌作为一种优势菌,随干预时间的推移逐渐增加,最终高于其他组。阿克曼菌具有促进免疫、减轻肥胖和抗癌的作用^[24],是主要的丁酸生产者,可预防多种疾病^[25]。拟杆菌属是另一个优势属,试验结果中超过了 Cont 组,拟杆菌可以分泌大量的碳水化合物活性酶,碳水化合物的利用能迅速调整以适应各种饮食,此外,拟杆菌属通过消化多糖为其他细菌提供合适的多糖,有利于复杂肠道菌群之间的互利共生^[26]。另一方面,肠球菌等有害菌^[27]明显减少,说明 LHP 具有调节肠道菌群结构和多样性,维持其稳态的作用,并且具有治疗与肠道微生物群失调相关的疾病的潜力。

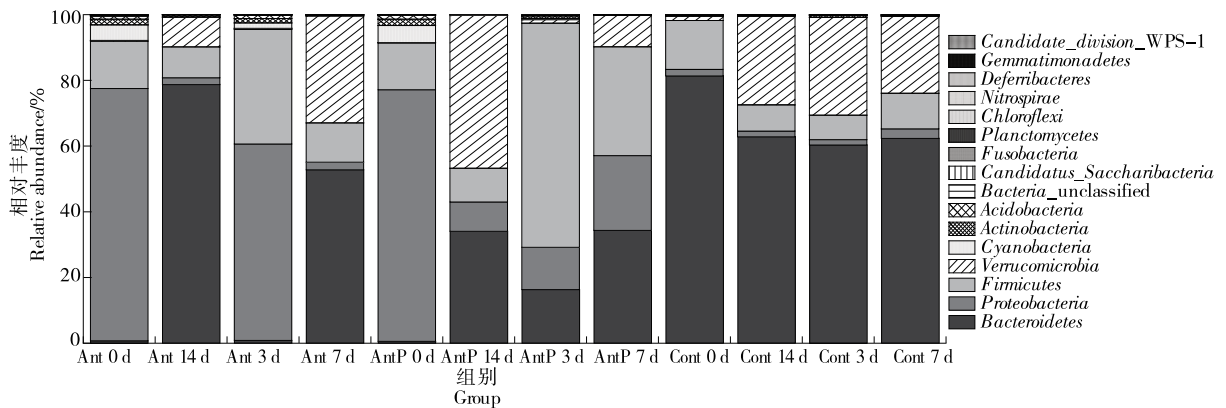


图 5 门水平上的肠道微生物组成

Figure 5 Gut microbial composition at the phylum level

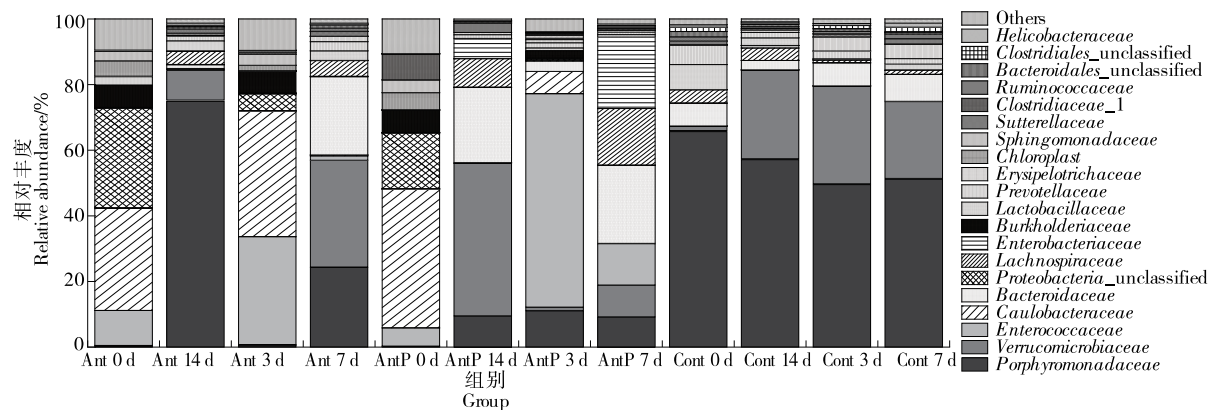


图 6 属水平上的肠道微生物组成

Figure 6 Gut microbial composition at the genus level

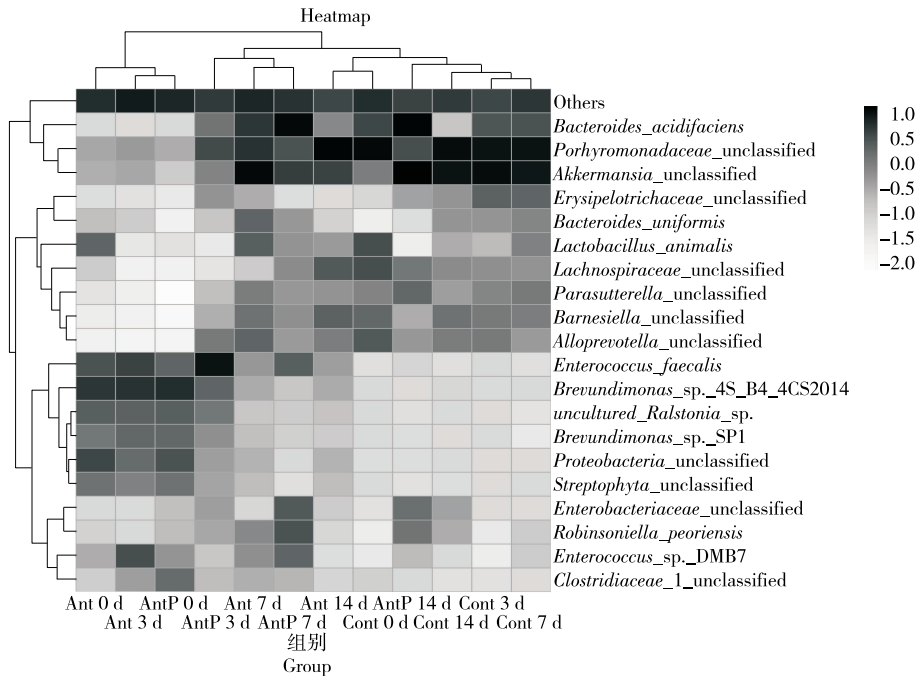


图7 属相对丰度条形图

Figure 7 Genus relative abundance bar chart

3 结论

从红汁乳菇中提取了红汁乳菇多糖(LHP),并确定了其纯化级分 LHP-1 和 LHP-2 的单糖组成、官能团和直观的表面结构。结果表明,LHP-1 主要由甘露糖、葡萄糖、半乳糖组成,其摩尔质量比为 3.44 : 61.10 : 1.22, LHP-2 主要由甘露糖和葡萄糖组成,其摩尔质量比为 3.84 : 153.00,具有“神经元”结构和链状结构区域。动物试验表明,小鼠体重在喂食期间无影响,有益菌阿克曼菌和拟杆菌属数量增加明显并超过对照组,说明红汁乳菇多糖具有调节肠道菌群紊乱以维持体内平衡的能力,但其作用机制有待进一步探究。

参考文献

- [1] ZENGLER K, ZARAMELA L S. The social network of microorganisms: How auxotrophies shape complex communities[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, 16(6): 383-390.
- [2] GARRETT W S. The gut microbiota and colon cancer[J]. *Science*, 2019, 364(6446): 1133-1135.
- [3] KHUAT L T, LE CT, PAI C S, et al. Obesity induces gut microbiota alterations and augments acute graft-versus-host disease after allogeneic stem cell transplantation[J]. *Science Translational Medicine*, 2020, 12(571): eaay7713.
- [4] WASTYK H C, FRAGIADAKIS G K, PERELMAN D, et al. Gut-microbiota-targeted diets modulate human immune status[J]. *Cell*, 2021, 184(16): 4137-4153.
- [5] LAMAS B, HERNANDEZ G L, GALIPEAU H J, et al. Aryl hydrocarbon receptor ligand production by the gut microbiota is decreased in celiac disease leading to intestinal inflammation[J]. *Science Translational Medicine*, 2020, 12(566): eaba0624.
- [6] GULDRIS S C, PARRA E G, AMENOS A C. Gut microbiota in chronic kidney disease[J]. *Nefrología (English Edition)*, 2017, 37(1): 9-19.
- [7] LACOURSE K D, JOHNSTON C D, BULLMAN S. The relationship between gastrointestinal cancers and the microbiota[J]. *The Lancet Gastroenterology & Hepatology*, 2021, 6(6): 498-509.
- [8] 屈青云, 许伟, 胡源, 等. 抗性淀粉饮食模式下 L-茶氨酸对大鼠肠道免疫功能的调节作用[J]. *食品与机械*, 2021, 37(12): 32-39. QU Qin-yun, XU Wei, HU Yuan, et al. Effect of L-theanine on intestinal immunity of rats under resistant starch feeding[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(12): 32-39.
- [9] 唐甜, 索化夷, 李键, 等. 膳食营养与宿主遗传通过肠道菌群调节能量代谢研究进展[J]. *食品与机械*, 2019, 35(3): 225-230. TANG Tian, SUO Hua-yi, LI Jian, et al. Research progress in regulation of energy metabolism by dietary nutrition and host inheritance via intestinal flora[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(3): 225-230.
- [10] DU H, ZHAO A, WANG Q, et al. Supplementation of inulin with various degree of polymerization ameliorates liver injury and gut microbiota dysbiosis in high fat-fed obese mice[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(3): 779-787.
- [11] ZHAO S, JANG C, LIU J, et al. Dietary fructose feeds hepatic lipogenesis via microbiota-derived acetate [J]. *Nature*, 2020, 579

- (7 800): 586-591.
- [12] HURTADO R A, DEL T M, GARCIA L E, et al. Innovative technologies for the production of food ingredients with prebiotic potential: Modifications, applications, and validation methods [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 104: 117-131.
- [13] ZHANG A, LIU L, WANG M, et al. Bioactive ergosterol derivatives isolated from the fungus *Lactarius hatsudake*[J]. Chemistry of Natural Compounds, 2007, 43(5): 637-638.
- [14] ZHENG J, ZHANG T, FAN J, et al. Protective effects of a polysaccharide from *Boletus aereus* on S180 tumor-bearing mice and its structural characteristics [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 188: 1-10.
- [15] YANG X, LIN P, WANG J, et al. Purification, characterization and anti-atherosclerotic effects of the polysaccharides from the fruiting body of *Cordyceps militaris*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 181: 890-904.
- [16] EI K A, ARMOUGOM F, GORDON J I, et al. The abundance and variety of carbohydrate-active enzymes in the human gut microbiota [J]. Nature Reviews Microbiology, 2013, 11 (7): 497-504.
- [17] GUO C, GUO D, FANG L, et al. *Ganoderma lucidum* polysaccharide modulates gut microbiota and immune cell function to inhibit inflammation and tumorigenesis in colon [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 267: 118231.
- [18] DUBOIS M, GILLES K A, HAMILTON J K, et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances[J]. Analytical Chemistry, 1956, 28(3): 350-356.
- [19] 郭丰铭. 香菇菇蛋白提取及其功能特性研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2017: 6-7.
GUO Feng-min. Research on extraction and the functional properties of *Pleurotus eryngii* protein[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2017: 6-7.
- [20] SANG T, GUO C, GUO D, et al. Suppression of obesity and inflammation by polysaccharide from sporoderm-broken spore of *Ganoderma lucidum* via gut microbiota regulation [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 256: 117594.
- [21] 孟艳鸽, 李岩. 不同剂量长双歧杆菌对抗生素诱导大鼠肠道菌群失调的疗效观察[J]. 中国微生态学杂志, 2015, 27(3): 280-283.
MENG Yan-ge, LI Yan. The efficacy of different doses of *Bifidobacterium longum* on rat intestinal microbiota dysbiosis induced by antibiotic[J]. Chinese Journal of Microecology, 2015, 27 (3): 280-283.
- [22] BAI J, REN Y, LI Y, et al. Physiological functionalities and mechanisms of β -glucans [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 88: 57-66.
- [23] WANG Y, ZHANG T, HUANG X, et al. Heteroglycans from the fruiting bodies of *Agrocybe cylindracea*: Fractionation, physicochemical properties and structural characterization[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 114: 106568.
- [24] WU J, XU Y, SU J, et al. Roles of gut microbiota and metabolites in a homogalacturonan-type pectic polysaccharide from *Ficus pumila* Linn. fruits mediated amelioration of obesity[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 248: 116780.
- [25] BELZER C, CHIA L W, AALVINK S, et al. Microbial metabolic networks at the mucus layer lead to diet-independent butyrate and vitamin B12 production by intestinal symbionts[J]. M Bio, 2017, 8 (5): e00770-17.
- [26] YE M, YU J, SHI X, et al. Polysaccharides catabolism by the human gut bacterium *Bacteroides thetaiotaomicron*: Advances and Perspectives[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(21): 3 569-3 588.
- [27] WEN J, CAO P, YANG G, et al. Changes of the mice intestinal microbes by the oligosaccharides-enriched fermented milk in a gender-dependent pattern [J]. Food Research International, 2021, 140: 110047.
-
- (上接第 142 页)
- [21] 孙玉姣, 侯淑婷, 鱼喆喆, 等. 宁夏红果枸杞多糖提取及其体外抗氧化活性研究[J]. 陕西科技大学学报, 2018, 36(5): 39-45.
SUN Yu-jiao, HOU Shu-ting, YU Zhe-zhe, et al. Study on antioxidant activity of *Lycium barbarum* polysaccharides [J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2018, 36(5): 39-45.
- [22] 卢旭. 莲子低聚糖对双歧杆菌增殖效应的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012: 44-52.
LU Qu. Study on the preparation and regulatory mechanisms of lotus seed oligosaccharides to probiotics and pathogens in the intestinal tract[D]. Fuzhou: Fujian agriculture and Forestry University, 2012: 44-52.
- [23] 陈林林, 吴春, 李伟. 菟丝子黄酮的抗氧化性能研究[J]. 食品工业科技, 2008, 29(11): 116-121.
CHEN Lin-lin, WU Chun, LI Wei. Study on antioxidative activity of flavonoids from *semen cuscudae*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2008, 29(11): 116-121.
- [24] ZHANG W, ZHANG J, DING D, ZHANG L, et al. Synthesis and antioxidant properties of *Lycium barbarum* polysaccharides capped-selenium nanoparticles using tea extract [J]. Artificial Cells Nanomedicine & Biotechnology, 2017, 7: 1-8.
- [25] WANNES W A, MHAMDI B, SRITI J, et al. Antioxidant activities of the essential oils and methanol extracts from myrtle (*Myrtus communis* var. *italica* L.) leaf, stem and flower [J]. Food & Chemical Toxicology, 2010, 48(5): 1 362-1 370.
- [26] PENG Q, SONG J J, LU X P, et al. Structure characterization of an arabinogalactan-protein from the fruits of *Lycium ruthenicum* [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(37): 9 424-9 429.