

不同浓度银耳多糖的体外模拟消化特性比较

董传志, 龙慧, 李明洁, 滕建文, 黄丽, 韦保耀, 夏宁*

(广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530000)

摘要: 银耳多糖作为一种具有益生元潜力的多糖, 其在发挥作用前必需经过体内的消化与吸收。该研究通过探讨银耳多糖体外模拟消化过程中的物质组成与理化性质的变化来研究其在口腔、胃和肠三个阶段的消化特性。研究表明, 三个消化阶段结束后, 除质量分数 0.5% 样品略有增加外, 不同浓度的多糖样品中的还原糖含量均未产生显著变化; 银耳多糖主要由甘露糖、葡萄糖、半乳糖醛酸、半乳糖、葡萄糖醛酸组成, 且在整个消化过程中, 均未被消化酶分解而产生新的游离单糖; 不同浓度银耳多糖经胃液消化后, 低 pH 值的胃消化环境会引起多糖分子量的降解, 其中 0.5% 浓度样品组在经三个阶段消化后逐渐较低到 3.91×10^3 、 3.52×10^3 与 2.92×10^3 ku。消化过程中多糖的结构与组成变化主要取决于 pH 值的变化, 与消化液中的消化酶关系不大, 其中适宜浓度的多糖溶液可在消化过程中由于其粘度特性而保持更稳定的结构性质。

关键词: 银耳多糖; 消化; 浓度

文章编号: 1673-9078(2023)05-183-189

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.5.0595

Comparison of *in Vitro* Simulated Digestive Properties of *Tremella* Polysaccharides at Different Concentrations

DONG Chuanzhi, LONG Hui, LI Mingjie, TENG Jianwen, HUANG Li, WEI Baoyao, XIA Ning*

(College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530000, China)

Abstract: *Tremella* polysaccharide, as a polysaccharide with prebiotic potential, must be digested and absorbed in the body before it can function. In this study, the digestive characteristics of *Tremella* polysaccharide in the three stages of oral cavity, stomach and intestine were studied by examining the changes in material composition and physicochemical properties of *Tremella* polysaccharide during the *in vitro* simulated digestion process. The study showed that after the three digestion stages, the reducing sugar contents in the polysaccharide samples at different concentrations didn't change significantly, except for a slight increase in the 0.5%-sample; *Tremella* polysaccharide was mainly composed of mannose, glucose, galacturonic acid, galactose and glucuronic acid, and during the entire digestion process, they were not decomposed by digestive enzymes to generate new free monosaccharides; after different concentrations of *Tremella* polysaccharide were digested by gastric fluid, the molecular weight of polysaccharide was degraded in the low pH gastric digestive environment, among which, the 0.5%-sample group decreased gradually to 3.91×10^3 ku, 3.52×10^3 ku and 2.92×10^3 ku, respectively, after the three stages of digestion. The structural and compositional changes of the polysaccharides during the digestion process mainly depend on the changes of pH value, and have little to do with the digestive enzymes in the digestive juice. The polysaccharide solution at an appropriate concentration can maintain a more stable structural property during the digestion process due to its viscosity characteristics.

Key words: *Tremella* polysaccharide; digestion; concentration

引文格式:

董传志, 龙慧, 李明洁, 等. 不同浓度银耳多糖的体外模拟消化特性比较[J]. 现代食品科技, 2023, 39(5): 183-189.

DONG Chuanzhi, LONG Hui, LI Mingjie, et al. Comparison of *in vitro* simulated digestive properties of tremella polysaccharides at different concentrations [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(5): 183-189.

收稿日期: 2022-05-12

基金项目: 广西科技重大专项 (桂科 AA20302012-3)

作者简介: 董传志 (1995-), 女, 硕士, 研究方向: 食用菌多糖与益生作用, E-mail: 1196988966@qq.com

通讯作者: 夏宁 (1977-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食物蛋白与多糖的结构与功能, E-mail: xianing@gxu.edu.cn

多糖作为一种生物活性大分子, 往往由 10 个以上单糖通过糖苷键聚合而成。多糖广泛存在于植物、动物、微生物中, 具有安全性高、毒性小等特点^[1]。越来越多的研究显示多糖具有降血糖、抗氧化、免疫调节等生理活性, 这些生理活性的发挥与多糖在体内的消化代谢吸收密切相关。现有研究表明, 口腔和胃肠

道环境的 pH 值、离子溶液和消化过程中的各类消化酶可能会改变多糖的物理和化学性质,如分子量、化学成分、表面形态等^[2,3]。Liu 等^[4]发现消化液中的 pH 和离子环境会导致多糖发生降解,多糖的抗氧化活性与其在体外模拟消化时的分子量呈负相关,因此消化后多糖的抗氧化活性增加;有研究^[3,5]表明消化过程也会导致多糖极性增强,对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用增强,这使得多糖在糖尿病方面具有潜在的调节作用。由此可见,消化过程中多糖结构与理化性质的变化对研究其生物活性具有一定的指示作用。

益生元因对宿主的多重健康调节作用而受到关注,其作用机制主要是人体摄食后通过对未消化的碳水化合物转运至结肠,由肠道内的菌群对其进行降解,从而产生对宿主机体健康有益的代谢产物(如短链脂肪酸等)^[6,7]。目前常见的益生元包括低聚果糖^[8]、低聚半乳糖^[9]以及某些抗消化多糖等。体内外益生实验结果表明,多糖因为糖组成、分子量、浓度等因素,常表现出不同的肠道菌群调节作用^[10-12]。因此,研究多糖的消化特性可以用于监测其到达结肠时的理化指标,从而判断其是否能稳定发挥益生元活性。

有研究发现来自食用菌的多糖具有与低聚果糖类似的益生元效应^[13,14],银耳多糖作为一种开发前景极好的食用菌多糖^[15,16],具有一定的促有益菌(双歧杆菌、植物乳杆菌等)增殖作用^[17-19]使其具有益生元潜力,但目前的研究未对银耳多糖在口腔和胃肠道消化环境中的变化以及消化酶对其产生的影响进行研究,因此为了明确银耳多糖的益生元潜力并拓展其应用,有必要对其体外消化特性进行探讨。

本研究通过体外消化实验模型^[20]对银耳多糖在口腔和胃肠道中的消化特性进行了研究,直接、简便地研究不同浓度银耳多糖在消化及吸收过程中的变化,这将为银耳多糖能否成为新型益生元提供理论依据,对新型银耳多糖产品的开发有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

银耳多糖,购于上海辉文生物技术股份有限公司,纯度 87%;唾液淀粉酶、胃蛋白酶、胰蛋白酶,西格玛奥德里奇有限公司;单糖标准品(甘露糖、葡萄糖、葡萄糖醛酸、半乳糖、半乳糖醛酸),中国食品药品检定研究院;

HC-3108R 型高速冷冻离心机,安徽中科中佳科学仪器有限公司;光栅型多功能微孔板检测仪(酶标仪),奥地利 TECAN 公司;Agilent 1260 液相色谱仪,

美国安捷伦科技有限公司。

1.2 方法

1.2.1 样品制备

用蒸馏水分别配置 0.5%、1%、2%、4% (m/m) 的银耳多糖溶液,分别记为样品组 Control、T0.5、T1、T2 和 T4;另取一组 T1 作为无酶实验对照组(在消化实验中以水代替酶液),记为样品 Tcon1。

1.2.2 体外模拟消化

口腔消化:吸取 Control、T0.5、T1、T2、T4、Tcon1 样品溶液各 5 mL 分别置于 50 mL 烧杯中,依次加入 4 mL 唾液电解质溶液、25 μ L 0.3 mol/L CaCl_2 溶液、0.5 mL 唾液淀粉酶(750 U/mL)、475 μ L 水,得到总体积为 10 mL 的口腔消化液,37 $^{\circ}\text{C}$ 消化 2 min,并于消化 0 min、2 min 分别取样,一部分用于后续胃肠消化,另一部分用于测定消化液的 pH 值和粘度后于 100 $^{\circ}\text{C}$ 加热 5 min 灭酶后备用,用于后续测定消化液中银耳多糖的结构组成。

胃消化:取口腔消化 2 min 后的各组样品 5 mL 分别置于 50 mL 烧杯中,向其中加入 4 mL 胃电解质溶液、2.5 μ L 0.3 mol/L CaCl_2 溶液、250 μ L 胃蛋白酶(2000 U/mL),加水至消化液总体积为 10 mL(消化液初始 pH 值为 3.0),37 $^{\circ}\text{C}$ 消化 120 min,并于消化 0、30、60 和 120 min 时分别取样,一部分用于后续小肠消化,另一部分用于测定消化液的 pH 值和粘度后于 100 $^{\circ}\text{C}$ 加热 5 min 灭酶后备用,用于后续测定消化液中银耳多糖的结构组成。

小肠消化:取胃消化 120 min 后的各组样品 5 mL 分别置于 50 mL 烧杯中,依次加入 2.125 mL 肠电解质溶液、10 μ L 0.3 mol/L CaCl_2 溶液、1.25 mL 胰酶(4000 U/mL)、625 μ L 胆汁,加超纯水至消化液总体积 10 mL(消化液初始 pH 值为 7.0),37 $^{\circ}\text{C}$ 消化 120 min,并于消化 0、30、60 和 120 min 时分别取样,用于测定消化液的 pH 值和粘度后于 100 $^{\circ}\text{C}$ 加热 5 min 灭酶后备用,用于后续测定消化液中银耳多糖的结构组成。

1.2.3 消化产物还原糖含量测定

采用 DNS(3,5-二硝基水杨酸)法测定样品中的还原糖含量^[21]。

1.2.4 消化产物的分子量测定

测定多糖分子量是采用液相色谱法(GPC 凝胶渗透色谱)^[22]。

配置 2 mg/mL 的葡聚糖系列标准品溶液、待测样液取 1 mL 过 0.45 μ m 水系滤膜,进行液相色谱分析。色谱条件:示差检测器,Shodex OHPak SB-804 HQ 色谱柱,柱温为 35 $^{\circ}\text{C}$,超纯水作为流动相,流量为

0.5 mL/min, 进样量为 20.0 μ L。

1.2.5 消化产物游离单糖测定

分别取不同消化不同阶段冻干后的样品复溶于 10 mL, 采用 PMP (1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮) 柱前衍生化法^[23]测定消化液中的游离单糖。

分别吸取不同浓度的标准品溶液以及复溶的各组样液 400 μ L, 分别加入 400 μ L 0.5 mol/L 的 PMP-甲醇溶液与 0.3 mol/L NaOH, 混匀, 70 $^{\circ}$ C 水浴反应 100 min。再加 500 μ L 0.3 mol/L HCl, 混匀, 用三氯甲烷洗涤 2 次, 每次 5 mL, 弃去三氯甲烷下层, 上层离心后, 取上 1 mL 清液过 0.45 μ m 有机滤膜, 进行液相色谱分析。

色谱条件: Waters C 18 色谱柱, 柱温 30 $^{\circ}$ C, 以体积比为 17: 83 的乙腈与 0.02 mol/L 乙酸铵溶液混合溶液为流动相, 体积流量 1.0 mL/min; 检测波长 250 nm, 进样量 10 μ L。

1.2.6 消化产物红外光谱分析

采用 KBr 压片法^[24]。称取 1 mg 冻干的消化产物与 100 mg 溴化钾研磨混合压片, 进行傅里叶红外光谱测定, 扫描波数范围为: 4 000~400 cm^{-1} 。

1.2.7 消化液粘度和 pH 值测定

通过数显粘度计^[25]和 pH 计对消化过程中各组溶液的粘度和 pH 值进行测定。

1.2.8 数据分析

每组实验至少重复 3 次, 结果以 $\bar{X} \pm SD$ 表示。采用 SPSS 20.0 对数据进行显著性分析, $P < 0.05$, 差异显著。常规数据绘图采用 Origin 2018 软件。

2 结果与讨论

2.1 消化产物的还原糖含量变化

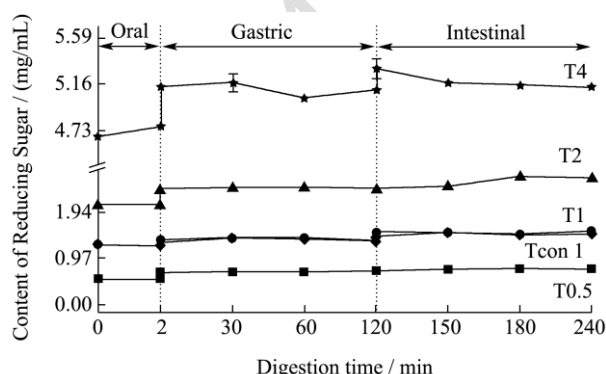


图 1 不同浓度的银耳多糖在不同消化阶段结束时的还原糖含量
Fig.1 Reducing sugar content of *Tremella* polysaccharides with different concentrations at the end of different digestion stages

各组消化产物的还原糖含量如图 1 所示, 各组消化产物在口腔和小肠阶段均无明显的还原糖产生, 而在胃消化前后, 各组消化产物的还原糖含量均呈不同

程度的增加, 其中 0.5% 质量分数 (T0.5) 还原糖增加的幅度最大, 由 0.51 mg/mL 增加到 0.71 mg/mL。还原糖含量的变化可能是由于多糖的降解过程产生了更多的还原端, 胡婕伦等^[26]在研究大粒车前子多糖模拟胃消化时还原糖含量也出现上升趋势, 与本实验的结果一致。由于 1% 质量分数正常消化组 (T1) 和 1% 无酶添加 (Tcon1) 组消化产物的还原糖含量在体外模拟消化各阶段均无明显差异, 表明银耳多糖在消化过程中多糖的降解与消化酶无关, 因此可推测胃消化前后还原端的产生是在酸性环境多糖的解聚所导致。

2.2 消化产物的分子量变化

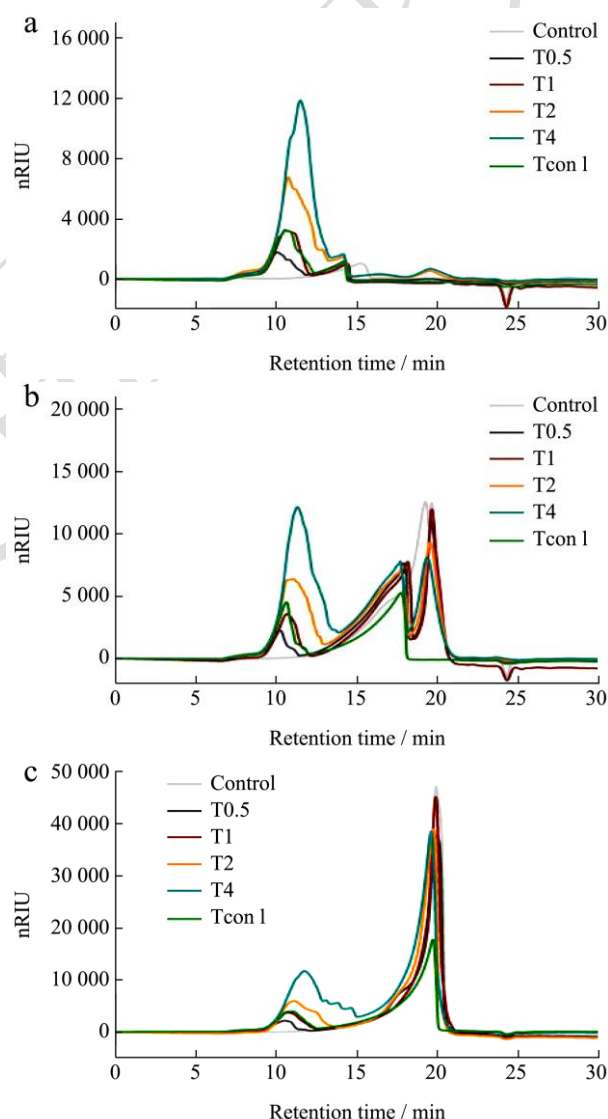


图 2 不同浓度的银耳多糖在不同消化阶段结束时的 GPC 展开图
Fig.2 GPC expansion diagram of *Tremella* polysaccharide with the same concentration at the end of different digestion stages

注: a: 口腔消化; b: 胃消化; c: 肠消化。图 4 同。

从表 1 中不同消化阶段消化产物中多糖分子量变化我们可以发现, 同一组样品经口腔、胃、肠消化后,

分子量均一定程度地降低,但从表 1 得知,同为 1% 质量分数下正常消化组(T1)和无酶液添加组(Tcon1)在口腔消化结束时分子量无明显差异,在胃消化结束后无酶添加组的分子量产生了显著变化,在肠消化结束后两组样品的分子量均发生了显著变化,且无酶添加组分子量为 2.35×10^3 ku, 小于正常消化组的 2.43×10^3 ku, 这说明了银耳多糖分子量的降低与消化酶无关。研究表明多糖在酸性条件下会被降解^[27], 因此推测此时各组样品在消化过程中分子量的降低是由于酸水解造成的多糖聚集体解聚, 这与蝉拟青霉胞外多糖在消化过程中的分子量变化结果一致^[28]。

0.5% 质量分数(T0.5)组的分子量在各个消化阶段中较其他组变化更为显著,原因可能是 T0.5 组的样品溶液粘度最小, 因此受酸性环境和搅拌作用的影响大, 从而更多多糖在消化过程中发生了解聚, 导致分子量变化更显著。

只有 2% 质量分数(T2)组在胃阶段和肠阶段结束后的分子量无显著变化, 结合前人关于浓度与稳定性的关系可知, 适宜浓度的银耳多糖可以在特殊环境中保持稳定, 而非浓度越大越好, 所以 2% 质量分数

(T2) 的银耳多糖更利于维持在肠液中的稳定性。

表 1 不同质量分数的银耳多糖在不同消化阶段结束时的分子量($\times 10^3$ ku)

Table 1 Molecular weights of *Tremella* polysaccharides at different concentrations at the end of different digestion stages

| 样品组 | 口消化后 | 胃消化后 | 肠消化后 |
|---------|-------------------|----------------------|-------------------|
| Control | 0 | 0 | 0 |
| T0.5 | 3.91 ± 0.01^a | 3.52 ± 0.02^b | 2.92 ± 0.02^c |
| T1 | 2.85 ± 0.07^a | 2.60 ± 0.02^a | 2.43 ± 0.03^b |
| T2 | 2.48 ± 0.04^a | 2.09 ± 0.10^{ab} | 1.93 ± 0.04^b |
| T4 | 1.46 ± 0.02^a | 1.34 ± 0.02^b | 1.17 ± 0.02^c |
| Tcon1 | 2.84 ± 0.01^a | 2.63 ± 0.02^b | 2.35 ± 0.03^c |

注: 同行右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$), 下表同。

2.3 消化过程产生的游离单糖

由表 2 可知, 银耳多糖是一种由甘露糖、葡萄糖、葡萄糖醛酸、半乳糖醛酸和半乳糖组成的酸性多糖, 在研究消化过程中的是否有游离单糖的产生可以更好地说明多糖在消化过程中的变化。

表 2 银耳多糖的单糖组成

Table 2 Monosaccharide composition of *Tremella* polysaccharide

| 单糖种类 | 甘露糖 | 半乳糖醛酸 | 葡萄糖醛酸 | 半乳糖 | 葡萄糖 |
|------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| 含量% | 54.06 ± 1.09 | 5.51 ± 0.01 | 12.90 ± 0.65 | 3.90 ± 0.88 | 23.90 ± 0.44 |

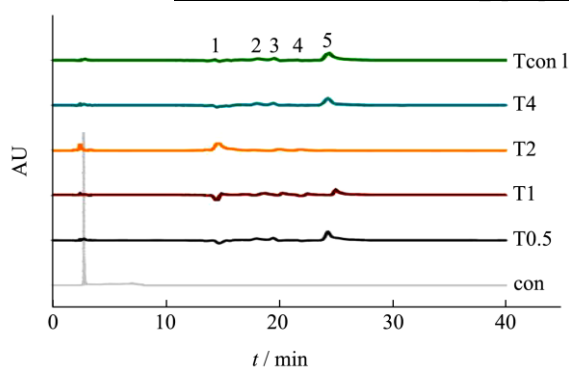


图 3 不同浓度的银耳多糖在肠消化阶段结束时产生的游离单糖 HPLC 展开图

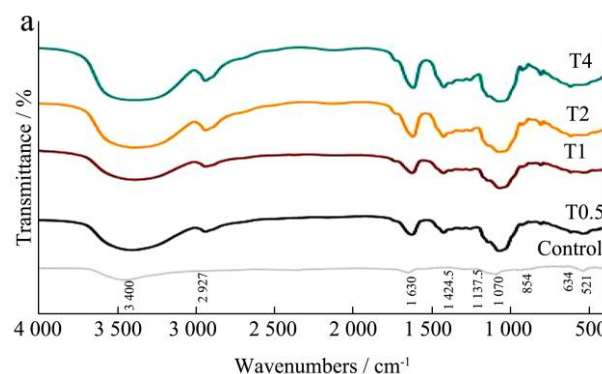
Fig.3 HPLC development of free monosaccharides produced by different concentrations of *Tremella* polysaccharides at the end of the intestinal digestion stage

注: 1 甘露糖; 2 半乳糖醛酸; 3 葡萄糖醛酸; 4 半乳糖; 5 葡萄糖。

各组消化产物在肠消化阶段结束后产生的游离单糖情况如图 3 所示, 经过消化后, 各组峰 2、3、4 均未有明显改变, 即消化过程半乳糖醛酸、葡萄糖醛酸和半乳糖的含量保持相对稳定的状态, 这与 Shao 等^[29]

发现多糖中醛酸和半乳糖在消化过程中保持稳定的结论一致。峰 1 有负峰可以推断出是 PMP 的衍生峰与甘露糖的出峰时间接近而出现的假峰, 并不是甘露糖信号峰; 峰 5 不排除为葡萄糖信号峰, 但从同为 1% 质量分数下正常消化组(T1)和无酶液添加组(Tcon1)同时出现近似面积的峰 5 可以推断出, 该峰并不是由消化酶的存在而产生的, 这表明不同浓度的银耳多糖溶液经过体外模拟消化后多糖分子结构保持稳定, 因此没有游离单糖的产生。

2.4 消化结束后多糖的红外光谱图



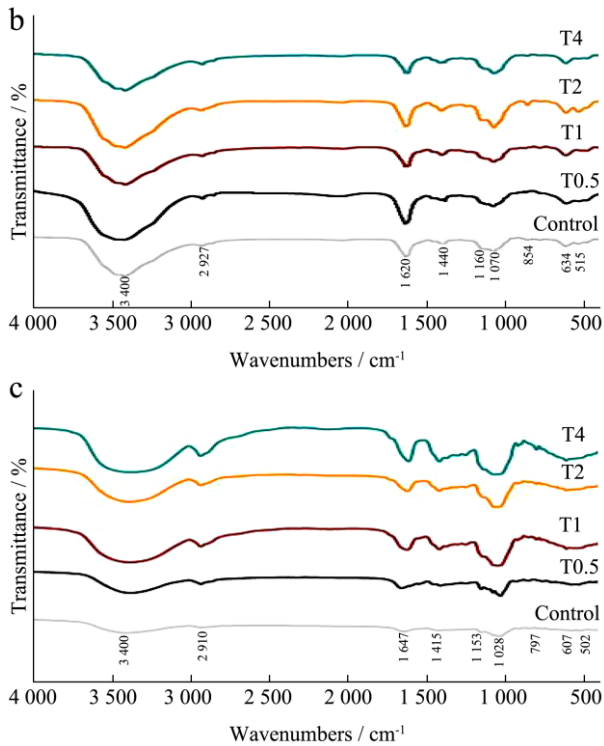


图4 不同质量分数的银耳多糖在不同消化阶段结束时的FT-IR展开图

Fig.4 FT-IR expansion diagram of *Tremella* polysaccharides at different concentrations at the end of different digestion stages

图4为各组消化产物在不同消化阶段结束时的傅里叶变换红外光谱展开对比图。各组产物在 3400 cm^{-1} 附近均有一个强吸收峰,该吸收峰主要是由-OH的伸缩振动产生的;在 2927 cm^{-1} 附近出现的吸收峰,证明存在C-H伸缩振动;在 1630 cm^{-1} 附近的吸收峰是由于COO-的不对称伸缩带引起的^[30],表明银耳多糖是含有-COOH的酸性多糖;在 1400 cm^{-1} 出现吸收峰,证明存在羧基的C=O对称伸缩振动,说明银耳多糖中含有一定量糖醛酸物质;在 854 cm^{-1} 附近存在强吸收峰,表明银耳多糖含有 β -糖苷键和有 α -糖苷键。

不同质量分数的银耳多糖溶液经体外模拟消化,由-OH的伸缩振动引起的吸收峰没有向长波方向移动,说明-OH未发生改变,在消化过程中未伴随糖苷键的断裂,银耳多糖消化前后结构保持稳定。C-H伸缩振动随着消化的进行略有后移,说明有极少量的C-H改变,多糖在水相体系中很容易形成聚合物,但在酸性胃液环境中容易发生聚集体破裂^[31],这证实了各组还原糖含量变化和分子量变化的是由于酸性条件下大分子解聚造成的。

2.5 消化过程中消化液粘度与pH值变化情况

各组消化产物的pH值测定结果如图5。在口腔消化阶段,随银耳多糖添加量的增加pH值呈增加趋势,

在胃阶段pH值,除0.5%质量分数(T0.5)组外均呈不同程度的先增加后减小趋势。在肠阶段消化过程中,各组均呈不同程度的先增加后减小趋势,研究表明,当环境pH值偏酸性时,会出现多糖的解聚现象。

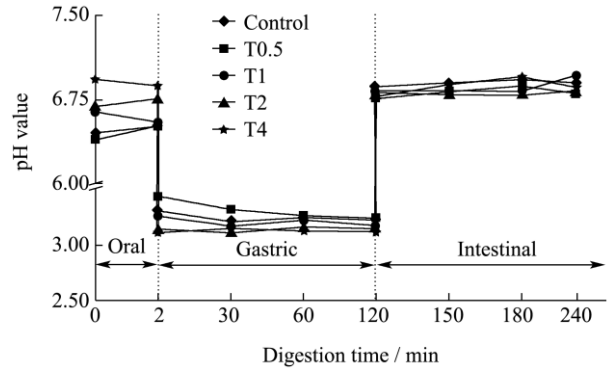


图5 不同质量分数的银耳多糖在消化过程中消化液pH值的变化

Fig.5 Changes of pH of digestive solution with different concentrations of *Tremella* polysaccharides during digestion

表3 不同质量分数的银耳多糖在不同消化阶段结束时的粘度 (mPa·s)

Table 3 Viscosity of *Tremella* polysaccharides at different concentrations at the end of different digestion stages

| 样品组 | 口腔消化后 | 胃消化后 | 肠消化后 |
|---------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Control | 8.33±0.20 ^f | 12.67±0.15 ^d | 7.30±0.32 ^d |
| T0.5 | 20.57±0.35 ^e | 8.43±0.20 ^e | 10.00±0.15 ^d |
| T1 | 43.17±0.20 ^c | 17.50±0.00 ^c | 13.00±0.23 ^c |
| T2 | 68.30±0.35 ^b | 29.27±0.27 ^b | 19.40±0.12 ^b |
| T4 | 100.00±0.00 ^a | 91.30±0.06 ^a | 37.03±0.41 ^a |
| Tcon1 | 42.63±0.29 ^d | 17.40±0.26 ^c | 14.63±0.12 ^c |

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。

多糖的活性与其粘度息息相关,而随着多糖溶液浓度变高,单个分子开始重叠,诱导形成分子间连接,从而限制了聚合物链的排列和拉伸,因此,多糖溶液的粘度会随之增加^[32]。表3为各组消化液在不同消化阶段结束时的粘度,除0.5%质量分数(T0.5)组外,其他组随着消化过程中口腔、胃、小肠消化阶段的样品液逐渐被稀释,其粘度也逐渐下降;由于肠消化时的溶液是胃消化后稀释一倍得来的,但在肠道阶段的0.5%质量分数(T0.5)的粘度高于胃消化阶段,这可能与粘性多糖大分子之间的相互作用有关,在胃液中时,较低的pH值会抑制多糖间的聚合作用,而到了肠阶段之后肠液的中性pH值会使聚合作用再次增加,此时消化液粘度增加,这将带来2个直接的结果:1是分子间的聚合增加会导致聚合物的分子量增大,这与表1中0.5%质量分数组在肠阶段的分子量较胃阶段大提供了依据;2是这与黄原胶在消化体系中的黏弹

性变化趋势相同^[31],说明0.5%质量分数(T0.5)组可能呈现出与黄原胶相似的抗消化性原理。

整个消化过程中,2%质量分数(T2)组消化液粘度一直显著低于4%质量分数(T4)组,但其在表1中表现出的更稳定的分子量说明银耳多糖在消化过程中保持适宜的质量分数更利于维持其高抗消化性,而过高的质量分数会因为溶解度的降低而不能继续提高抗消化性。

3 结论

本文通过对质量分数在0.5%到4%之间的银耳多糖溶液在体外消化各阶段消化产物的还原糖含量、分子量、游离单糖生成量、红外光谱以及消化液的pH值和粘度进行测定,发现各浓度银耳多糖均呈现出不同程度的抗消化性。实验发现,不同浓度银耳多糖溶液的物理性质发生变化(银耳多糖分子量在胃肠阶段呈降低趋势、还原糖含量不变或略升高)主要是由于消化体系中pH值的改变造成银耳多糖分子的解聚或聚集作用、质量分数不同导致粘度差异以及银耳多糖溶解度的影响而产生不同,其中0.5%质量分数组的抗消化性原理可能与黄原胶类似,2%质量分数组较其他组相比具有更好的抗消化性。这表明适宜浓度的银耳多糖可以在口、胃和肠消化后保持较完整的结构与性质,这为研究银耳多糖在结肠发酵中的益生元潜力研究提供了理论依据。

参考文献

- [1] 丁孟汝,王国栋,袁平川,等.多糖调控糖脂代谢的作用及其机制研究进展[J].南方医科大学学报,2021,41(3): 471-475.
- [2] Li E, Yang H, Zou Y, et al. *In-vitro* digestion by simulated gastrointestinal juices of *Lactobacillus rhamnosus* cultured with mulberry oligosaccharides and subsequent fermentation with human fecal inocula [J]. LWT, 2019, 101: 61-68.
- [3] Wang C, Li W, Chen Z, 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.
- [4] Liu Y, Li Y, Ke Y, et al. *In vitro* saliva-gastrointestinal digestion and fecal fermentation of *Oudemansiella radicata* polysaccharides reveal its digestion profile and effect on the modulation of the gut microbiota [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 251: 117041.
- [5] Kasipandi M, Manikandan A, Sreeja P S, et al. Effects of *in vitro* simulated gastrointestinal digestion on the antioxidant, α -glucosidase and α -amylase inhibitory activities of water-soluble polysaccharides from *Opilia amentacea roxb* fruit [J]. LWT, 2019, 111: 774-781.
- [6] Cockburn D W, Koropatkin N M. Polysaccharide degradation by the intestinal microbiota and its influence on human health and disease [J]. Journal of Molecular Biology, 2016, 428(16): 3230-3252.
- [7] Lordan C, Thapa D, Ross R P, et al. Potential for enriching next-generation health-promoting gut bacteria through prebiotics and other dietary components [J]. Gut Microbes, 2020, 11(1): 1-20.
- [8] 张丽.两种低聚果糖理化特性及对益生菌作用的研究[D].天津:天津科技大学,2016.
- [9] 赖田甜,郑义,马依淼,等.低聚半乳糖对益生性植物乳杆菌 YW11 冰淇淋加工特性的影响[J].中国乳品工业,2021,49(11):24-29.
- [10] Chen X, Sun Y, Hu L, et al. *In vitro* prebiotic effects of seaweed polysaccharides [J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2018, 36(3): 926-932.
- [11] Liu Y, Duan X, Duan S, et al. Effects of *in vitro* digestion and fecal fermentation on the stability and metabolic behavior of polysaccharides from *Craterellus cornucopioides* [J]. Food & Function, 2020, 11(8): 6899-6910.
- [12] Chen D, Chen G, Wan P, et al. Digestion under saliva, simulated gastric and small intestinal conditions and fermentation *in vitro* of polysaccharides from the flowers of *Camellia sinensis* induced by human gut microbiota [J]. Food & Function, 2018, 244(1): 331-339.
- [13] 张功,张和平.对平菇浸汁促进嗜酸乳杆菌生长的研究[J].内蒙古师范大学学报:自然科学版,1996.
- [14] 康怀彬,陈树兴,李道敏.乳酸菌发酵平菇酸奶的研制[J].冷饮与速冻食品工业,2003,9(2):14-15,32.
- [15] 卢玉容,郭秀兰,唐仁勇,等.银耳多糖对低脂酸奶发酵、质构及感官品质的影响[J].食品工业科技,2019,40(10):73-77.
- [16] 吴子健,陈庆森,闫亚丽,等.银耳多糖对嗜酸乳杆菌 L101 发酵生长影响的研究[J].食品研究与开发,2008,29(11):22-25.
- [17] 李国光.银耳多糖益生元效应的研究[J].现代食品,2021,3: 215-217.
- [18] 张浩,廖阔遥,刘宏伟,等.饲料添加银耳多糖对断奶仔猪生长性能和腹泻的影响[J].养猪,2020,1:14-16.
- [19] 郑守晶,王玉贝,郑明锋.银耳多糖对植物乳杆菌增殖作用的研究[J].福建轻纺,2020,4:30-36.
- [20] Brodkorb A, Egger L, Alminger M, et al. INFOGEST static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion [J]. Nature Protocols, 2019, 14(4): 991-1014.

- [21] Yang Y, Zhao C, Diao M, et al. The prebiotic activity of simulated gastric and intestinal digesta of polysaccharides from the *Hericium erinaceus* [J]. *Molecules*, 2018, 23(12): 3158.
- [22] Zhu K, Yao S, Zhang Y, 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.
- [23] You X, Li Z, Ma K, et al. Structural characterization and immunomodulatory activity of an exopolysaccharide produced by *Lactobacillus helveticus* LZ-R-5 [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 235: 115977.
- [24] Yang M, Zhang Z, He Y, et al. Study on the structure characterization and moisturizing effect of *Tremella* polysaccharide fermented from GCMCC5.39 [J]. *Food Science and Human Wellness*, 2021, 10(4): 471-479.
- [25] 严尚隆.长松藻多糖降解、结构解析及生物活性研究[D]. 上海:上海海洋大学,2021.
- [26] 胡婕伦.大粒车前子多糖体内外消化与酵解特征体系构建及其促进肠道健康的作用[D].南昌:南昌大学,2014.
- [27] Hu J, Nie S, Min F, et al. Artificial simulated saliva, gastric and intestinal digestion of polysaccharide from the seeds of *Plantago asiatica* L. [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 92(2): 1143-1150.
- [28] Tian J, Wang X, Zhang X, et al. Simulated digestion and fecal fermentation behaviors of exopolysaccharides from *Paecilomycescicadae* TJJ1213 and its effects on human gut microbiota [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 168: 733-742.
- [29] Shao Y, Kang Q, Zhu J, et al. Antioxidant properties and digestion behaviors of polysaccharides from Chinese yam fermented by *Saccharomyces boulardii* [J]. *LWT*, 2022, 154: 112752.
- [30] Dou Z, Chen C, Fu X. Digestive property and bioactivity of blackberry polysaccharides with different molecular weights [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(45): 12428-12440.
- [31] Fei H A, Rh A, Yang Y B, et al. *In vitro* digestion and human gut microbiota fermentation of longan pulp polysaccharides as affected by *Lactobacillus fermentum* fermentation [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 147: 363-368.
- [32] Bae I Y, Oh I, Lee S, et al. Rheological characterization of levan polysaccharides from *Microbacterium laevaniformans* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2008, 42(1): 10-13.