

# 口腔加工对广叶绣球菌多糖剪切流变特性的影响

贾丰荧<sup>1</sup>, 吴佳蔓<sup>1</sup>, 靳雯<sup>1</sup>, 郭静<sup>1</sup>, 云少君<sup>1,2</sup>, 冯翠萍<sup>1</sup>

(1. 山西农业大学 食品科学与工程学院, 山西 晋中 030801; 2. 黄土高原食用菌山西省重点实验室, 山西 晋中 030801)

**摘要:** 为了探讨口腔加工对广叶绣球菌多糖(SLPs)流变性的影响, 为SLPs作为一种新型功能性原料提供理论依据, 试验将制备得到的SLPs与人工唾液以1:1(V/V)制备0.125%、0.25%、0.5%、1%、2%、4%混合液, 采用流变仪测定其静态及动态流变特性, 使用纳米粒度及电位分析仪测定0.5%、1%、2%、4%的SLPs溶液及混合液的粒径分布及平均粒径, 并分析其粒径分布。结果表明, 随着角频率的增加, SLPs溶液与混合液在0.25%~4.00%下表观黏度降低, 在0.125%时增加, 混合液的表现黏度大于SLPs溶液; SLPs溶液与混合液的剪切应力随剪切速率的增加而增大, 混合液的剪切应力大于SLPs溶液, 随着多糖浓度增加, 剪切应力增大; SLPs溶液为0.125%~2.000%时 $\tan\delta$ 值大于1, 在4%时低频率扫描下 $\tan\delta$ 值小于1, 高频率扫描下大于1, 混合液为0.125%~4.000%时 $\tan\delta$ 值大于1。SLPs溶液为0.5%~4.0%时粒径分布主要集中在10~100 nm, 极少部分分布在100~1 000 nm。混合液相比于SLPs溶液, 不同浓度混合液粒径分布更均匀, 少量粒径集中在100~1 000 nm, 大部分均匀集中在10~100 nm。由此可见, 口腔加工能够影响SLPs的流变学特性与粒径分布, 且SLPs与人工唾液之间具有一定的协同作用。

**关键词:** 广叶绣球菌多糖; 口腔加工; 剪切流变特性

中图分类号: TS201.2 文献标识码: A 文章编号: 1002-2481(2024)05-0152-07

## Effects of Oral Processing on Shear Rheological Properties of *Sparassis latifolia* Polysaccharides

JIA Fengying<sup>1</sup>, WU Jiaman<sup>1</sup>, JIN Wen<sup>1</sup>, GUO Jing<sup>1</sup>, YUN Shaojun<sup>1,2</sup>, FENG Cuiping<sup>1</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Edible Fungi in Loess Plateau, Jinzhong 030801, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of oral processing on the rheological properties of *Sparassis latifolia* polysaccharides (SLPs), provide theoretical basis for SLPs as a novel functional raw material, in this experiment, the prepared SLPs was mixed with artificial saliva at a ratio of 1:1(V/V) to prepare 0.125%, 0.25%, 0.5%, 1%, 2%, and 4% of mixed solutions, and their static and dynamic rheological properties were determined by rheometer. The particle size distribution and average particle size of SLPs solution with concentrations of 0.5%, 1%, 2% and 4% and the mixed solutions were determined by nano-particle size and potential analyzer, and their particle size distribution was analyzed. The results showed that with the increase of angular frequency, the apparent viscosity of SLPs solution and the mixed solutions decreased at 0.25%~4.00% concentration and increased at 0.125% concentration, and the apparent viscosity of the mixed solutions was greater than that of SLPs solution. The shear stress of SLPs solution and the mixed solutions increased with the increase of shear rate, and the shear stress of the mixed solutions was greater than that of SLPs solution, and increased with the increase of polysaccharide concentration.  $\tan\delta$  value was greater than 1 when the concentration of SLPs solution was 0.125%~2.000%, the valued was less than 1 under low frequency scanning at 4% and greater than 1 under high frequency scanning, and greater than 1 when the concentration of the mixed solutions was 0.125%~4.000%. When the concentration of SLPs solution was 0.5%~4.0%, the particle size distribution was mainly concentrated in 10~100 nm, and a few parts were in 100~1 000 nm. Compared with SLPs solution, the particle size distribution of the mixed solutions with different concentrations was more uniform, a small amount of particle size concentrated in 100~1 000 nm and most of them uniformly concentrated in 10~100 nm. It could be seen that oral processing could affect the rheological properties and particle size distribution of SLPs, and there was a certain synergy between SLPs and artificial saliva.

**Key words:** *Sparassis latifolia* polysaccharides; oral processing; shear rheological property

收稿日期: 2023-11-04

基金项目: 食用菌山西省科技创新团队项目(201805D131009); 山西省基础研究计划(202103021224126); 山西省重点研发计划(重点)项目(201603D211201)

作者简介: 贾丰荧(1996-), 男, 山西偏关人, 在读硕士, 研究方向: 食品营养与安全。

通信作者: 冯翠萍(1970-), 女, 山西应县人, 教授, 博士, 主要从事食品营养与安全研究工作。

食品口腔加工作为食物在人体中分解的第一阶段,对于人体摄取营养、获得能量及感官愉悦具有重要意义<sup>[1]</sup>。HUTCHINGS等<sup>[2]</sup>提出了口腔中食品加工的三维模型,食物在口腔中的破碎过程是复杂且有个体差异的动态过程,牙齿、舌头、上颌以及口腔的感受腺体都参与其中。口腔加工是食品性质变化和口腔生理动态响应相互联系的复杂过程<sup>[3]</sup>,此过程中食物刺激引起唾液分泌,唾液的主要成分是99%水和1%有机物,由水和电解质组成连续相缓冲介质,高度糖化的黏蛋白组成凝胶网络,在凝胶网络中有较少的水溶性蛋白质以及分散的水不溶性类脂物质、细菌细胞和上皮细胞,它们共同组成口腔唾液胶体结构,这种结构使食品乳状液进入口腔后与唾液胶体相互作用,导致食品的微结构发生变化,并且可能影响感官感觉<sup>[4]</sup>。在食物口腔加工中,唾液的首要功能是润湿软化食物颗粒,使经过牙齿破碎的食物颗粒黏聚在一起形成具有一定内聚性的食团,再经过唾液的润滑作用进行吞咽,食物可进入食管<sup>[5]</sup>。整个咀嚼及吞咽的动态过程中,唾液与食团混合进行了与牙齿、舌头以及上颌之间的剪切形变<sup>[6]</sup>。吕治宏<sup>[7]</sup>通过19名志愿者用手指模拟食团在口腔中的剪切流变和拉伸流变行为,确定了人体感知拉伸黏度变化的能力要比感知剪切黏度的变化更敏感,并且确定可通过流变仪测定唾液混合物的剪切流变及拉伸流变性能。

多糖作为具有广泛生理调节作用的生物大分子,当其完全水化后,其水溶液常表现出不同的流变学特性,而影响多糖溶液流变学特性的本质在于多糖在水溶液中的超分子结构<sup>[8]</sup>。已有研究表明,秋葵多糖作为一种假塑性流体,在一定浓度范围内,其流变学性质与唾液胶体具有很好的协同作用,可促进吞咽<sup>[9]</sup>。苏攀峰等<sup>[10]</sup>研究发现,葛仙米多糖溶液是非牛顿假塑性流体,具有剪切稀释的特性,溶液黏度随质量浓度的增大而增加,与透明质酸具有协同增稠的效果。冀晓龙等<sup>[11]</sup>研究发现,木枣多糖溶液为非牛顿假塑性流体,同样表现出剪切稀释的特性且具有较好的热稳定性,适用于在食品生产工业中做稳定剂。

广叶绣球菌(*Sparassis latifolia*)是非褶孔菌目绣球菌科绣球菌属,子实体中等至大形,因形似巨大的绣球而得名<sup>[12]</sup>。广叶绣球菌多糖(*Sparassis latifolia* polysaccharides, SLPs)具有抗肿瘤、抗炎、免疫调节等生理调节作用,主要由半乳糖、葡萄糖、木糖、甘露糖、果糖构成,摩尔比为1:13:2:4:3,存在

三螺旋结构<sup>[13]</sup>。已研究表明,在0.5%~5.0%的浓度范围内,SLPs溶液表现为剪切稀化的假塑性流体,且多糖黏度对多糖浓度表现为一定的依赖性,当剪切速率一定时,溶液体系的表现黏度随多糖浓度的增加而增大,酸、碱及NaCl的加入以及高温处理会使SLPs溶液表现黏度降低<sup>[14-15]</sup>。但是SLPs经口腔加工后,其剪切流变学性质如何改变尚未见报道。

本试验以SLPs为研究对象,将其与人工唾液混合,利用流变仪进行体外模拟口腔加工的剪切流变过程,探讨口腔加工对SLPs流变性的影响,旨在为SLPs作为一种新型功能性原料提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

1.1.1 原料与试剂 广叶绣球菌(*Sparassis latifolia*)由山西农业大学食用菌中心提供;科研人工唾液由上海源叶生物科技有限公司提供。

食品级纤维素酶、果胶酶、中性蛋白酶、木瓜蛋白酶购于河南万邦实业有限公司;无水乙醇、乙醚、丙酮、盐酸、氯仿等均为国产分析纯。

1.1.2 仪器与设备 JS14S超微粉碎振荡机(江阴市祥达机械制造有限公司);85-2恒温磁力搅拌器(常州市华普达教学仪器有限公司);UV-1200紫外-可见分光光度计(上海美谱达仪器有限公司);WH-2微型涡旋混合仪(上海泸西分析仪器厂有限公司);SC-3610离心机(安徽中科中佳科学仪器有限公司);R-3 HB旋转蒸发仪(印度布奇运营私人有限公司);PL3000冷冻干燥机(美国Thermo公司);MCR102流变仪(奥地利安东帕有限公司);ZEN3690纳米粒度及电位分析仪(英国Malvern公司)。

### 1.2 试验方法

1.2.1 SLPs的制备 参考谢添等<sup>[16-17]</sup>的方法采用水提醇沉法制备SLPs。将绣球菌子实体干燥后置于超微粉碎机超微粉碎10 min后过0.074 mm筛,称取一定量的绣球菌粉按照料液比1:16(g/mL)加入蒸馏水,调整溶液pH值为4.2,加入0.375%木瓜蛋白酶、0.375%纤维素酶和0.25%的果胶酶,54℃水浴3.5 h后100℃灭活10 min取出,4 500 r/min离心20 min收集离心上清液旋蒸浓缩后加入3倍体积的无水乙醇,4℃沉淀8 h,4 500 r/min离心5 min回收乙醇溶液,收集沉淀分别用丙酮和乙醚溶液淋洗至溶液澄清,加入蒸馏水加热溶解成均匀溶液,再加入0.6%中性蛋白酶,45℃水浴8 h,100℃

灭活 10 min 取出,加入 3 倍体积的 Savage 试剂磁力搅拌 20 min,4 500 r/min 离心 5 min 取上清液,重复加入 Savage 试剂至离心后无中间蛋白层,旋蒸浓缩后冷冻干燥,制得多糖。

1.2.2 SLPs 与口腔唾液混合液剪切流变特性 参考 BO 的方法将不同浓度的 SLPs 溶液与人工唾液按照体积比 1:1 混合,混合液中多糖实际浓度分别为 4%、2%、1%、0.5%、0.25%、0.125%,以等浓度的多糖溶液作为对照<sup>[8]</sup>。采用流变仪测定静态流动性和动态流动性<sup>[18-19]</sup>。

1.2.2.1 静态流变性 夹具采用锥形板 CP50-1,测定间隙为 0.103 mm,温度为 25 °C,角频率 0.1~100 rad/s,仪器自取点,取点时间控制为对数规律变化,共采集 21 个数据点,并在此过程中测定多糖溶液及多糖与唾液混合液表观黏度和剪切应力随剪切速率的变化,多糖流动曲线采用 power-low 模型  $\eta = k\gamma^n$  进行拟合<sup>[15]</sup>( $\eta$  为表观黏度(mPa·s), $k$  为稠度指数, $n$  为流动特性指数, $\gamma$  为剪切速率)。

1.2.2.2 动态流变性 夹具采用锥形板 CP60-0.5,测定间隙为 0.101 mm,温度为 25 °C,形变 2%,形变在线性黏弹区内,角频率 0.1~100.0 rad/s,仪器自取点,取点时间控制为对数规律变化,共采集 16 个

数据点,并在此过程中分别测定多糖溶液及多糖与唾液混合液的黏性模量和弹性模量随角频率的变化。

1.2.3 粒径测定 使用纳米粒度及电位分析仪测定 0.5%、1%、2%、4% 的多糖溶液及多糖与人工唾液 1:1(V/V)混合液的粒径分布及平均粒径,重复测定 3 次。

### 1.3 数据分析

所有试验重复 3 次,数据采用 SPSS Statistics 25.0 进行单因素方差分析及两独立样本  $t$  检验,以  $P < 0.05$  判定为差异具有统计学意义。

## 2 结果与分析

### 2.1 静态流变性

2.1.1 剪切速率对多糖及多糖与人工唾液混合液表观黏度的影响 power-low 模型曲线拟合复相关系数  $R^2$  均在 0.97~0.99。由图 1、表 1 可知,SLPs 溶液总体上随着剪切速率的增大,其表观黏度减小;在剪切速率一定时,溶液体系的黏度随多糖浓度的增加而增大。在 0.125%~4.000% 范围内,SLPs 的表观黏度减小趋势较小,并且随着剪切速率的变化,多糖表观黏度减小趋势较为显著。

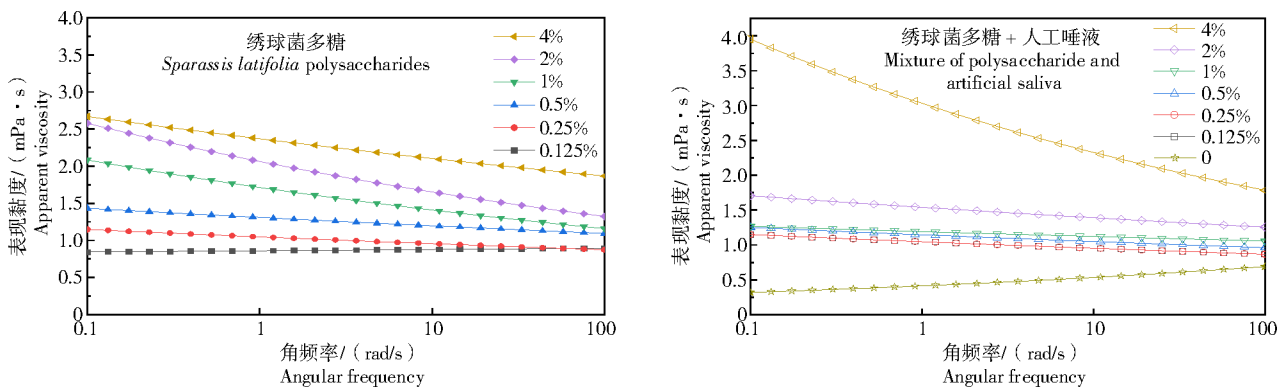


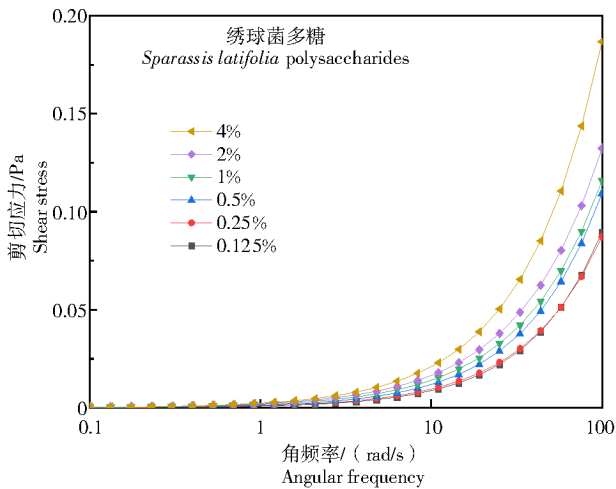
图 1 剪切速率对表观黏度的影响  
Fig.1 Effect of the shear rate on the apparent viscosity

表 1 power low 模型流变参数  
Tab.1 The rheological parameters of power law model

浓度/% Concentration	k/(mPa·s)		n	
	绣球菌多糖 <i>Sparassis latifolia</i> polysaccharide	绣球菌多糖+唾液 <i>Sparassis latifolia</i> polysaccharide + saliva	绣球菌多糖 <i>Sparassis latifolia</i> polysaccharide	绣球菌多糖+唾液 <i>Sparassis latifolia</i> polysaccharide + saliva
0		0.10±0.01		1.01±0.01
0.125	0.85±0.01	0.92±0.01	0.99±0.01	0.98±0.01
0.25	1.00±0.01	1.10±0.01	0.96±0.01	0.96±0.01
0.5	1.11±0.01	1.30±0.01	0.96±0.01	0.96±0.01
1	1.20±0.02	1.70±0.01	0.91±0.01	0.97±0.01
2	1.50±0.01	2.00±0.01	0.90±0.01	0.95±0.01
4	2.40±0.01	3.30±0.02	0.95±0.02	0.89±0.01

从图1和表1可以看出,人工唾液的表观黏度随着剪切速率的增大而增大。人工唾液与SLPs溶液混合后,在0.125%~4.000%范围内,随着SLPs溶液浓度的增加,混合液则表现为剪切稀化的假塑性流体。

2.1.2 剪切速率对多糖及多糖与人工唾液混合液



剪切应力的影响 从图2可以看出,剪切应力随着剪切速率的增加而增大;在相同的剪切速率下,浓度高的SLPs溶液的剪切应力大。加入人工唾液后,混合液的剪切应力大于多糖溶液,与表观黏度变化一致;在0.125%~4.000%的范围内,随着多糖浓度的增加,混合液的剪切应力随之增大。

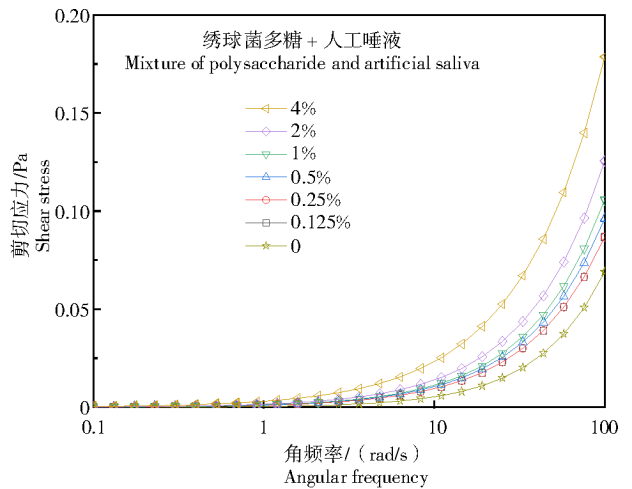


图2 剪切速率对剪切应力的影响  
Fig.2 Effect of the shear rate on the shear stress

2.2 动态流变性

从图3可以看出,不同浓度的SLPs溶液体系的tanδ变化,随着角频率的增大,溶液的tanδ逐渐增加;当SLPs溶液的浓度为0.125%~2.000%时,

tanδ值始终大于1。当SLPs溶液浓度为4%时,低频率扫描下tanδ小于1,在高频率扫描下tanδ大于1。与人工唾液混合后,0.125%~4.000%的SLPs与人工唾液混合液的tanδ值始终大于1。

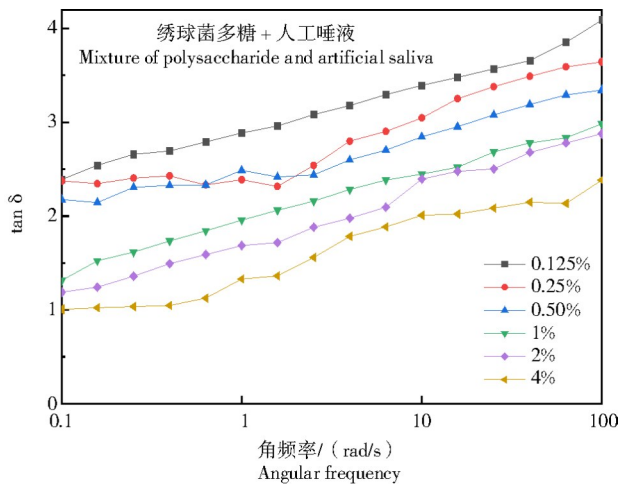
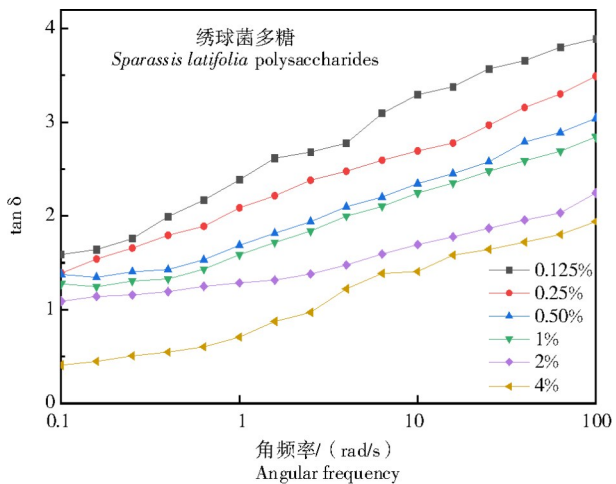


图3 加入人工唾液前后绣球菌多糖角频率变化对tanδ的影响  
Fig.3 Effect of angular frequency on the tan δ before and after the addition of artificial saliva in Sparassis latifolia polysaccharide solution

2.3 粒径分布及平均粒径

从图4可以看出,SLPs溶液的粒径分布主要集中在10~100 nm,极少部分分布在100~1 000 nm。当多糖溶液与人工唾液1:1混合后,混合液的粒径分布相比于SLPs溶液,不同浓度的混合液粒径分

布更均匀,除少量粒径集中在100~1 000 nm外,大部分粒径均匀集中在10~100 nm。

从表2可以看出,在0.5%~4.0%的绣球菌多糖浓度范围内,随着多糖浓度的增加,多糖分子之间的聚集性使得多糖分子的平均粒径增加,与剪切

流变学性质一致。在 0.5%~4.0% 浓度范围内, SLPs 与人工唾液混合后平均粒径如表 2 所示, 加

入人工唾液后, SLPs 混合液的平均粒径显著增大 ( $P<0.05$ )。

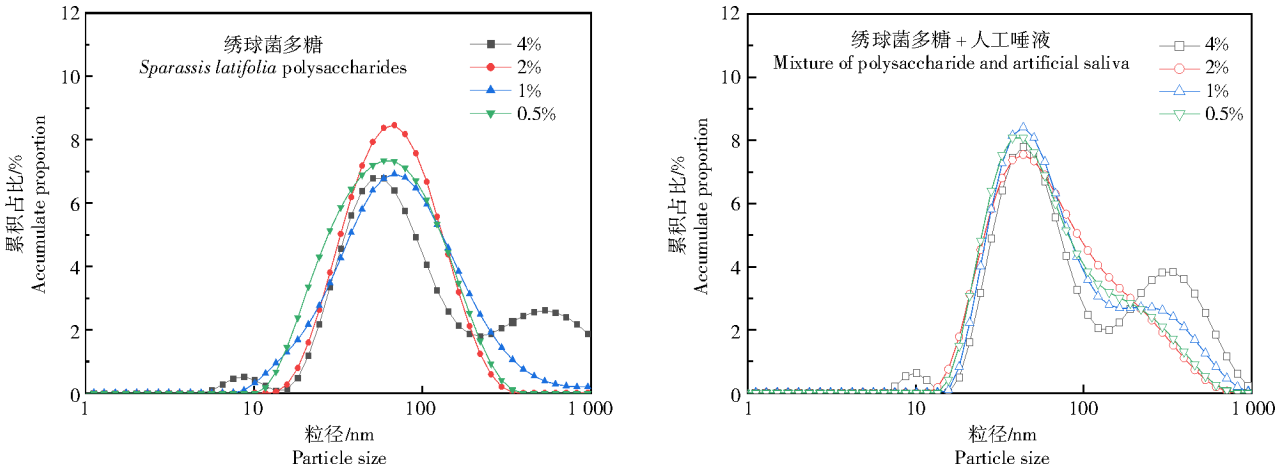


图 4 不同溶液粒径分布的变化  
Fig.4 Changes in particle size distribution of different solutions

表 2 不同浓度绣球菌多糖与多糖-人工唾液混合液平均粒径对比

Tab.2 Comparison of average particle size of *Sparassis latifolia* polysaccharides and polysaccharide-artificial saliva mixed solutions with different concentrations

浓度/% Concentration	绣球菌多糖 <i>Sparassis latifolia</i> polysaccharides	绣球菌多糖+人工唾液 <i>Sparassis latifolia</i> polysac- charides+artificial saliva
0.5	50.42±0.01A	52.17±0.03 <sup>a</sup>
1	51.46±0.01A	54.67±0.22 <sup>a</sup>
2	52.49±0.02A	58.42±0.05 <sup>**b</sup>
4	55.97±0.43B	60.48±0.01 <sup>**b</sup>

注:组内比较,不同字母为差异显著( $P<0.05$ );组间比较,\*表示差异显著( $P<0.05$ ),\*\*表示差异极显著( $P<0.01$ )。

Note: Different lettres represented comparisons within groups, the difference was significant( $P<0.05$ ); \* meant the difference was significant( $P<0.05$ ), \*\* meant the difference was extremely significant( $P<0.01$ ).

### 3 结论与讨论

本研究表明,SLPs 在 0.125%~4.000% 的浓度范围内表现为剪切稀化的假塑性流体( $n<1$ ),总体上随着剪切速率的增大,多糖的表观黏度减小,在剪切速率一定时,溶液体系的黏度随多糖浓度的增加而增大,整体变化趋势与 HAO 等<sup>[20]</sup>对绣球菌多糖溶液表观黏度的研究结果一致。同时在此浓度范围内,绣球菌多糖的表观黏度减小趋势较小,而人工唾液的表观黏度随着剪切速率的增大而增大,说明所使用的人工唾液表现为剪切增稠的胀塑性流体( $n>1$ ),这与人体的真实唾液剪切流变性趋于一致<sup>[21]</sup>。人工唾液与 SLPs 混合后,在 0.125%~4.000% 的浓度范围内,随着 SLPs 浓度的增加,混

合液则表现为剪切稀化的假塑性流体,溶液体系为流体特性,说明在整个溶液体系中,随着绣球菌多糖浓度的增加,多糖分子逐渐与人工唾液的成分相互结合作用,改变了绣球菌多糖溶液内部的分子体系,且整体上混合液的表面黏度要大于单独的绣球菌多糖溶液黏度,与 FUNAMI 等<sup>[22]</sup>的研究一致。可见,随着混合液中多糖浓度的增加,多糖分子与人工唾液的离子成分等相互作用使得混合液的表观黏度增加,虽多糖原料以及使用人工唾液的种类不同,但整体变化趋势与 YUAN 等<sup>[9]</sup>的研究结果一致,说明绣球菌多糖与人工唾液之间具有一定的协同作用。

先前研究表明,水溶液中 SLPs 分子呈现链状构象,具有高度的分支结构,多糖链间由于氢键的作用,多股单链相互纠缠缔合形成多糖分子聚集体<sup>[15,23]</sup>。相比于 SLPs 水溶液的表观黏度变化,剪切应力的变化可以更加直观地说明多糖分子之间的相互作用。本研究中,剪切应力随着剪切速率的增加而增大,混合液在 0.125%~4.000% 的浓度范围内,随着多糖浓度的增加,剪切应力随之增大,可能是由于人工唾液中 99% 的成分是水,水与多糖分子之间的氢键作用和其他金属离子与多糖分子之间的作用,使得多糖分子与人工唾液之间的相互作用增强,从而使得剪切应力增大<sup>[24]</sup>。因此,相同浓度的混合液的剪切应力大于多糖溶液。

SLPs 是一种黏弹性材料,具有固体和液体的 2 种性质,损失正切  $\tan\delta=G''/G'$  ( $\delta$  为损耗角),是黏性模量与弹性模量的比值,可直观反映体系的黏

弹性。当  $\tan\delta > 1$  时,表明体系的黏性强于弹性,主要表现出液体的黏性; $\tan\delta < 1$ ,则表明体系的弹性大于黏性,表现出固体的凝胶特性<sup>[17]</sup>。SLPs 在 0.125%~2.000% 的浓度范围内,根据其  $\tan\delta$  值始终大于 1,表明在 0.125%~2.000% 的浓度范围内 SLPs 主要表现出液体的黏性,是流动状态;浓度为 4% 时,低频率扫描下  $\tan\delta$  小于 1,在高频率扫描下  $\tan\delta$  大于 1,根据 Cox-Mert 原则<sup>[25]</sup>,在高频率下聚合物出现剪切稀化现象,使得分子之间的缠结解开重新取向,说明随着角频率的增加,4% 的 SLPs 溶液体系发生了变化,多糖分子之间链接解开,黏性成分逐渐占主体,表现出流体的性质,因此,在低频率下表现为弱凝胶状态,在高频率状态下表现为流体状态。SLPs 与人工唾液混合后,浓度范围为 0.125%~4.000% 的 SLPs 与人工唾液混合液的  $\tan\delta$  值始终大于 1,说明加入人工唾液后,多糖分子充分溶解于人工唾液中,在多糖分子与唾液成分的相互作用下整个溶液体系黏性成分占比较高,表现为流体特征,且多糖分子与人工唾液的相互作用改变了浓度为 4% 的 SLPs 的黏弹性特征。

溶液的粒径分布均匀表示溶液体系较为稳定,相同溶质溶于不同的溶液中,溶液的平均粒径越小,溶液体系越稳定<sup>[26]</sup>。SLPs 的粒径分布主要集中在 10~100 nm,极少部分分布在 100~1 000 nm,而浓度为 4% 的 SLPs 在 100~1 000 nm 的粒径分布相比于其他浓度较多,可能是由于多糖分子之间的聚集,形成了比较大的多聚体,多聚体和多糖小颗粒占据了大量的空间,这与绣球菌多糖的流变学性质一致,随着多糖浓度的上升,多糖分子之间的聚集增多,导致多糖的黏度增加,剪切应力增大。当 SLPs 与人工唾液 1:1 混合后,相比于绣球菌多糖溶液,不同浓度的 SLPs 粒径分布更均匀,除少量粒径集中在 100~1 000 nm 外,大部分粒径均匀集中在 10~100 nm,粒径的均匀分布可以说明 SLPs 在人工唾液中稳定性较好,人工唾液中的离子与多糖相互作用可以促进多糖在整个溶液体系中的均匀分布。

此外,SLPs 在 0.5%~4.0% 范围内,随着多糖浓度的增加,多糖分子之间的聚集性使得多糖分子的平均粒径增加,与剪切流变学性质一致。在 0.5%~4.0% 范围内,加入人工唾液后,绣球菌多糖混合液的平均粒径显著增大,可能是因为人工唾液中含有金属离子如  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等,金属离子在整个体系中分布较多,与多糖分子间通过离子

间的相互作用缔结,使得多糖分子与金属离子缠联,导致多糖分子的粒径变大。因此,也使得在相同浓度下,相比于多糖溶液,混合液的表现黏度和剪切应力要大。

本研究表明,口腔加工能够影响 SLPs 的流变学特性与粒径分布,SLPs 与人工唾液之间具有一定的协同作用,SLPs 与人工唾液混合后,溶液表现黏度增加,剪切应力增加,黏弹性发生改变;人工唾液促进了多糖分子在整个溶液体系中的均匀分布,多糖的平均粒径增大。

#### 参考文献:

- [1] DEVEZEAUX DE LAVERGNE M, YOUNG A K, ENGMANN J, et al. Food oral processing-an industry perspective[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2021, 8:634410.
- [2] HUTCHINGS J B, LILLFORD P J. The perception of food texture-the philosophy of the breakdown path[J]. *Journal of Texture Studies*, 1988, 19(2):103-115.
- [3] CHEN J S. Food oral processing-a review[J]. *Food Hydrocolloids*, 2008, 23(1):1-25.
- [4] SARKAR A, YE A Q, SINGH H. Oral processing of emulsion systems from a colloidal perspective[J]. *Food & Function*, 2017, 8(2):511-521.
- [5] PELEG M. On fundamental issues in texture evaluation and texturization-a view[J]. *Food Hydrocolloids*, 2006, 20(4):405-414.
- [6] ENTOV V M, HINCH E J. Effect of a spectrum of relaxation times on the capillary thinning of a filament of elastic liquid[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 1997, 72(1):31-53.
- [7] 吕治宏. 剪切流变和拉伸流变在吞咽过程中的控制作用研究[D]. 杭州:浙江工商大学, 2017.  
LÜ Z H. Study on the control function of shear rheology and tensile rheology in swallowing process[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2017.
- [8] 李秀秀, 尚静, 杨曦, 等. 多糖的增稠、胶凝及乳化特性研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(15):300-308.  
LI X X, SHANG J, YANG X, et al. A review on thickening, gelling and emulsifying properties of polysaccharides[J]. *Food Science*, 2021, 42(15):300-308.
- [9] YUAN B, RITZOULIS C, CHEN J S. Extensional and shear rheology of okra polysaccharides in the presence of artificial saliva[J]. *NPJ Science of Food*, 2018, 2:20.
- [10] 苏攀峰, 唐庆九, 陈盛, 等. 葛仙米多糖理化性质和流变学特性的研究[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(14):39-43.  
SU P F, TANG Q J, CHEN S, et al. Physicochemical properties and rheological properties of *Nostoc sphaeroides* Kütz polysaccharide[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(14):39-43.
- [11] 冀晓龙, 李环宇, 韩林, 等. 木枣多糖的理化特性研究[J]. *食品科学技术学报*, 2017, 35(5):41-45.  
JI X L, LI H Y, HAN L, et al. Physicochemical study on polysaccharides from *Ziziphus jujube* cv. Muzao[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2017, 35(5):41-45.

- [12] 廉添添,杨涛,孙军德,等.人工栽培绣球菌的鉴定及其子实体  $\beta$ -葡聚糖含量的酶法测定[J].菌物学报,2014,33(2):254-261.  
LIAN T T, YANG T, SUN J D, et al. Molecular identification of cultivated *Sparassis* species and determination of  $\beta$ -glucan content of the fruiting body by using enzymatic method[J]. Mycosystema, 2014, 33(2):254-261.
- [13] OHNO N, MIURA N N, NAKAJIMA M, et al. Antitumor 1, 3-beta-glucan from cultured fruit body of *Sparassis crispa*[J]. Biological & Pharmaceutical Bulletin, 2000, 23(7):866-872.
- [14] HARADA T, MASUDA S, ARII M, et al. Soy isoflavone aglycone modulates a hematopoietic response in combination with soluble beta-glucan: SCG[J]. Biological & Pharmaceutical Bulletin, 2005, 28(12):2342-2345.
- [15] 郝正祺.绣球菌多糖结构鉴定、凝胶流变学特性及其抗氧化和免疫功能的研究[D].太谷:山西农业大学,2018.  
HAO Z Q. Study on structure identification, gel rheological properties, antioxidant and immune functions of polysaccharide from *Streptococcus embroiderus*[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2018.
- [16] 谢添,郝正祺,常明昌,等.广叶绣球菌水溶性多糖结构表征及其对巨噬细胞 RAW<sub>264.7</sub>增殖能力的影响[J].山西农业科学,2021,49(2):150-155.  
XIE T, HAO Z Q, CHANG M C, et al. Structural characterization and its effects on proliferation of macrophage RAW<sub>264.7</sub> of water-soluble polysaccharides from *Sparassis latifolia*[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2021, 49(2):150-155.
- [17] 杨亚茹,郝正祺,常明昌,等.绣球菌酸性多糖的分离纯化、结构鉴定及抗氧化活性研究[J].食用菌学报,2019,5(3):105-112.  
YANG Y R, HAO Z Q, CHANG M C, et al. Isolation, purification, structural identification and antioxidant activity of acidic polysaccharide in *Sparassis crispa*[J]. Acta Edulis Fungi, 2019, 5(3):105-112.
- [18] 陈发河,周彦强,吴光斌.黄秋葵发酵酒渣果胶多糖的流变学性质[J].食品科学,2020,41(22):64-73.  
CHEN F H, ZHOU Y Q, WU G B. Rheological characterization of pectic polysaccharides from okra wine pomace[J]. Food Science, 2020, 41(22):64-73.
- [19] 朱丹实,魏立威,任晓俊,等.大豆种皮多糖对低糖型樱桃酱流变性质的影响[J].中国食品学报,2020,20(10):142-149.  
ZHU D S, WEI L W, REN X J, et al. Effects of soy hull polysaccharide on rheological properties of low-sugar cherry jam[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(10):142-149.
- [20] HAO Z Q, CHEN Z J, CHANG M C, et al. Rheological properties and gel characteristics of polysaccharides from fruit-bodies of *Sparassis crispa*[J]. International Journal of Food Properties, 2018, 21(1):2283-2295.
- [21] YUAN B, RITZOULIS C, CHEN J S. Extensional and shear rheology of okra hydrocolloid - saliva mixtures[J]. Food Research International, 2018, 106:204-212.
- [22] FUNAMI T, NAKAUMA M. Instrumental characteristics from extensional rheology and tribology of polysaccharide solutions[J]. Journal of Texture Studies, 2021, 52(5/6):567-577.
- [23] 郝正祺,王荣荣,冯翠萍,等.绣球菌多糖及其功能研究[J].中国食用菌,2017,36(1):48-51.  
HAO Z Q, WANG R R, FENG C P, et al. Research of *Sparassis crispa* polysaccharide and its function[J]. Edible Fungi of China, 2017, 36(1):48-51.
- [24] 倪柳芳,余璟,汪心婷,等.ATR-IR分析氢氧化钠对水及离子液体/水体系氢键作用的影响[J].光谱学与光谱分析,2021,41(10):3106-3110.  
NI L F, YU J, WANG X P, et al. Studies on the effects of sodium hydroxide on hydrogen bonding of water and ionic liquid/H<sub>2</sub>O systems by ATR-IR analyses[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(10):3106-3110.
- [25] 周红,赵冰楠,杨丽,等.琥珀酰多糖的流变特性研究[J].食品科技,2019,44(2):209-215.  
ZHOU H, ZHAO B N, YANG L, et al. Rheological properties of succinoglycan[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(2):209-215.
- [26] 赵晨宇,布冠好,陈复生,等.糖基化大豆分离蛋白纳米乳液的制备及其稳定性研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2021,42(4):22-29.  
ZHAO C Y, BU G H, CHEN F S, et al. Preparation and stability of nanoemulsions from glycosylated soy protein isolate[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 42(4):22-29.