

# 桑叶多酚、多糖及其复配物的体外模拟消化特性、 降糖降脂和促益生菌增殖活性研究

师英春<sup>1,2</sup>, 廖森泰<sup>2</sup>, 杨琼<sup>2</sup>, 黎尔纳<sup>2</sup>, 邹宇晓<sup>1,2,3\*</sup>, 李倩<sup>2,3\*</sup>

(1. 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广州 510230; 2. 广东省农科院蚕业与农产品加工研究所/农业农村部功能食品重点实验室/广东省农产品加工重点实验室, 广州 510507; 3. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室茂名分中心, 茂名 525000)

**摘要:** **目的** 考察桑叶多酚(mulberry leaf polyphenol, MLPP)、桑叶多糖(mulberry leaf polysaccharide, MLPS)相互作用对其体外消化特性、降糖降脂和促益生菌增殖活性的影响。**方法** 以 MLPP、MLPS 和桑叶多酚多糖复配物(mulberry leaf polyphenol-polysaccharide complex, PPPS)为研究对象, 通过高效液相色谱法和傅里叶变换红外光谱法分析 MLPP、MLPS 和 PPPS 在模拟消化口腔、胃和肠阶段的变化, 采用微孔法分析三者的糖消化酶和脂肪消化酶抑制活性, 采用稀释平板法考察三者促益生菌增殖作用。**结果** MLPP 在口腔、胃、肠阶段的消化率分别为 5.26%、20.91%、59.49%; PPPS 在口腔、胃、肠阶段的消化率增长至 20.75%、39.01%、79.95%, 表明桑叶多酚多糖复配后可提高多酚的消化率。MLPS、PPPS 在口腔、胃、肠阶段消化中均未检出游离单糖, 表明多酚的加入对多糖的消化无影响。PPPS 对淀粉的消化和  $\alpha$ -淀粉酶均有良好的抑制作用, 且效果显著优于 MLPP、MLPS ( $P<0.05$ ); MLPP、PPPS 对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶、麦芽糖酶、蔗糖酶和脂肪酶的抑制作用显著优于 MLPS ( $P<0.05$ ), 但 MLPP、PPPS 对麦芽糖酶、蔗糖酶和脂肪酶的抑制作用无显著差异。MLPP、MLPS、PPPS 在适当的浓度范围均对鼠李糖乳杆菌(ATCC53103)有促增殖作用, PPPS 对肠膜明串珠菌(GIM1.774)的增殖率显著高于鼠李糖乳杆菌(ATCC53103)、植物乳杆菌(GIM1.191)、干酪乳杆菌(GIM1.411)、嗜酸乳杆菌(GIM1.321)。**结论** MLPP 和多糖复配后可提高多酚的消化率, 也表现出优于单一组分的降糖降脂活性和促益生菌增殖作用。

**关键词:** 桑叶多酚; 桑叶多糖; 复配物; 体外模拟消化; 降糖降脂活性; 促益生菌增殖

## Study on simulated digestive characteristics *in vitro*, hypoglycemic/hypolipidemic and probiotic proliferation activities of polyphenols, polysaccharides from mulberry leaves and their compounds

SHI Ying-Chun<sup>1,2</sup>, LIAO Sen-Tai<sup>2</sup>, YANG Qiong<sup>2</sup>, LI Er-Na<sup>2</sup>, ZOU Yu-Xiao<sup>1,2,3\*</sup>, LI Qian<sup>2,3\*</sup>

(1. College of Light Industry and Food, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510230, China; 2. Sericultural & Agri-food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agricultural and Rural Affairs/Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510507, China; 3. Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Maoming 525000, China)

**基金项目:** 广东省重点研发项目(2020B020225005)、广东省自然科学基金项目(2022A1515010930)、广东省农业科学院科技创新战略资金-金额之星项目(R2020PY-JX012)

**Fund:** Supported by the Key Research and Development Project of Guangdong Province (2020B020225005), the Natural Science Foundation of Guangdong Province (2022A1515010930), and the Scientific & Technological Innovation Strategy of GDAAS (R2020PY-JX012)

\***通信作者:** 邹宇晓, 研究员, 主要研究方向为功能食品。E-mail: yuxiaozou@163.com

李倩, 副研究员, 主要研究方向为食品科学。E-mail: liqian.hubei@163.com

\***Corresponding author:** ZOU Yu-Xiao, Professor, Sericultural & Agri-food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510507, China. E-mail: yuxiaozou@163.com

LI Qian, Associate Professor, Sericultural & Agri-food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, No.133, Yiheng Road, Tianhe District, Guangzhou 510507, China. E-mail: liqian.hubei@163.com

**ABSTRACT: Objective** To investigate the effects of the interaction between mulberry leaf polyphenol (MLPP) and mulberry leaf polysaccharide (MLPS) on the digestive characteristics *in vitro*, hypoglycemic/hypolipidemic and probiotic proliferation activities. **Methods** MLPP, MLPS and mulberry leaf polyphenol-polysaccharide complex (PPPS) were selected as the research objects. The changes of MLPP, MLPS and PPPS during simulated digestion of oral cavity, stomach and intestine *in vitro* were analyzed by high performance liquid chromatography and infrared Fourier transform spectrometry. The inhibitory activities of carbohydrate digesting enzymes and lipase were analyzed by microporous method, and the probiotic effect was investigated by dilution plate method. **Results** The digestibility of MLPP in oral, stomach and intestinal stages were 5.26%, 20.91% and 59.49%, respectively. The digestibility of PPPS in oral, gastric and intestinal stages were 20.75%, 39.01% and 79.95%, respectively, indicating that the polyphenol digestibility of mulberry leaf polyphenol polysaccharide could be improved after complex. No free monosaccharides were detected in oral, gastric and intestinal digestion of MLPS and PPPS, indicating that the addition of polyphenols had no effect on polysaccharide digestion. PPPS had good inhibitory effect on starch digestion and  $\alpha$ -amylase, and the effect was significantly better than MLPP and MLPS ( $P<0.05$ ). The inhibitory effects of MLPP and PPPS on  $\alpha$ -glucosidase, murine maltase, murine sucrase and lipase were significantly better than those of MLPS ( $P<0.05$ ), while there was no significant difference in the inhibitory effect of MLPP and PPPS on murine maltase, murine sucrase and lipase. MLPP, MLPS and PPPS promoted the proliferation of *Lactobacillus rhamnosus* (ATCC53103) in the appropriate concentration range, and the proliferation rate of PPPS to *Leuconostoc mesenteroides* (GIM1.774) was significantly higher than *Lactobacillus rhamnosus* (ATCC53103), *Lactobacillus plantarum* (GIM1.191), *Lactobacillus casei* (GIM1.411) and *Lactobacillus acidophilus* (GIM1.321). **Conclusion** The digestibility of polyphenols has been improved by the compound of MLPP and MLPS. Besides, the hypoglycemic/hypolipidemic activities and the probiotics proliferation effect of PPPS is better than the single components.

**KEY WORDS:** mulberry leaf polyphenol; mulberry leaf polysaccharide; compounds; *in vitro* simulated digestion; hypoglycemic/hypolipidemic activities; probiotic proliferation

## 0 引言

基于复杂组分在体内的相互作用评价食物对人体的健康效应是当代营养组学、代谢组学等前沿交叉学科的研究热点。当今功能食品的研发主要突出单一组分的功效性,而忽略了不同组分之间的相互作用,然而在摄入植物性食物时,功能性组分在体内会不可避免地发生相互作用而影响各自的代谢。

桑叶因其功能特性而广泛应用于民间食疗养生和传统医学,在糖尿病、血脂异常、肥胖、动脉粥样硬化和高血压等代谢性疾病的治疗中起重要作用<sup>[1]</sup>。桑叶中的多酚、多糖等单一活性成分在高脂高糖细胞和动物模型中表现出显著的降糖降脂作用,其主要通过增加胰岛素的敏感性、改善胰岛素抵抗、调节糖脂代谢酶的活性、提高抗氧化能力、调节肠道菌群和改善肠道功能等途径发挥糖脂代谢调节功效<sup>[2-3]</sup>。当前,基于桑叶多酚(mulberry leaf polyphenol, MLPP)、桑叶多糖(mulberry leaf polysaccharide, MLPS)相互作用调节糖脂代谢方面的研究并不多见,本课题组前期研究发现,桑叶多酚多糖基于肠道微生态途径调节糖脂代谢的协同作用<sup>[4]</sup>,在此基础上,本研究进一步考察 MLPP、MLPS 单一组分及桑叶多酚

多糖复配物(mulberry leaf polyphenol-polysaccharide complex, PPPS)的体外消化特性、促益生菌增殖作用和降糖降脂活性,进一步揭示传统中医桑叶“消渴”“轻身”的科学内涵,为活性组分配伍的功能食品开发提供指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

$\alpha$ -D-葡萄糖苷酶( $\geq 50$  units/mg)、 $\alpha$ -淀粉酶(300~1500 units/mg)、脂肪酶(来源于猪胰腺,  $\geq 2000$  units/mg)、小鼠肠丙酮粉、4-甲基伞形酮油酸酯(纯度 $\geq 95\%$ )、对硝基苯- $\alpha$ -D-吡喃葡萄糖苷(*p*-nitrophenol glucopyranoside, *p*-NPG, 纯度 $\geq 99\%$ )、唾液酶( $\geq 5$  units/mg)、胃蛋白酶( $\geq 250$  units/mg)、胰脂肪酶(8×USP)(美国 Sigma 公司);胆汁盐(胆酸含量 $\geq 60\%$ , 上海源叶生物科技有限公司);MRS 培养基(广东环凯微生物技术有限公司);鼠李糖乳杆菌 *Lactobacillus rhamnosus* (ATCC53103)、植物乳杆菌 *Lactobacillus plantarum* (GIM1.191)、干酪乳杆菌 *Lactobacillus casei* (GIM1.411)、嗜酸乳杆菌 *Lactobacillus acidophilus* (GIM1.321)、肠膜明串珠菌 *Leuconostoc mesenteroides* (GIM1.774)(广东省微生物保藏中心);苯甲酸、表儿茶素、

丁香酸、儿茶素、槲皮素、金丝桃苷、咖啡酸、龙胆酸、芦丁、绿原酸、没食子酸、香草酸、紫云英苷标准品(纯度 $\geq 98\%$ )、甘露糖、木糖、核糖、葡萄糖、阿拉伯糖、半乳糖、半乳糖醛酸、葡萄糖醛酸标准单糖(纯度 $\geq 98\%$ )(广州市齐云生物科技有限公司);二硝基水杨酸(dinitrosalicylic acid, DNS)(分析纯,天津市大茂化学试剂厂)。

## 1.2 仪器与设备

SB-1300 型旋转蒸发器(日本东京理化器械株式会社);UV-2450 型紫外可见分光光度计(日本岛津有限公司);TECAN infinite 200 型酶标仪(瑞士 TECAN 公司);Agilent 1260 型液相色谱仪、ZORBAX SB-C<sub>18</sub>柱(250 mm $\times$ 4.6 mm, 5  $\mu$ m)(美国 Agilent 公司);BS124S 型分析天平(精度 0.1 mg, 德国赛多利斯科学仪器公司)。

## 1.3 方法

### 1.3.1 MLPP、MLPS、PPPS 的制备

MLPP 的提取:称取适量桑叶粉(10 g),加入 70%乙醇,使得料液质量浓度为 0.03 g/mL,在 400 W 的功率下超声波提取 60 min,提取液于真空旋转蒸发器中 55 $^{\circ}$ C 减压浓缩,静置 30 min 将提取液离心(5000 r/min, 10 min),取上清用 8~11  $\mu$ m 中速定性滤纸抽滤,得到澄清透明的 MLPP 提取液<sup>[5]</sup>。

MLPS 的提取:将上述残渣按料液质量浓度 0.04 g/mL,超声功率 300 W,超声 10 min 后在 80 $^{\circ}$ C 水中浸提 1 h,浸提液趁热过滤,离心(5000 r/min, 15 min),取上清液浓缩,加入 4 倍体积的无水乙醇,醇沉静置过夜,离心(5000 r/min, 15 min),将沉淀冷冻干燥即得 MLPS 提取物<sup>[6]</sup>。

PPPS 的制备:对上述两部分提取物进行定量分析,采用福林酚法<sup>[7]</sup>测定多酚含量,以没食子酸质量浓度( $\mu$ g/mL)为横坐标,吸光度(optical density, OD)为纵坐标,制作标准曲线,回归方程为: $Y=0.0379X-0.0016$ , $r^2=0.9994$ ,线性范围为 0~24  $\mu$ g/mL。采用苯酚-硫酸法<sup>[8]</sup>测定多糖含量,以葡萄糖质量浓度(mg/mL)为横坐标,OD 为纵坐标,制作标准曲线,回归方程为: $Y=1.1733X-0.0261$ , $r^2=0.9975$ ,线性范围为 0~1 mg/mL。定量分析后,桑叶粉 70%乙醇提取物中多酚与残渣水提醇沉多糖的含量比例为 1:2<sup>[4]</sup>,后续实验按 1:2 的比例配制不同浓度 PPPS,备用。

### 1.3.2 MLPP、MLPS、PPPS 体外模拟消化及高效液相色谱分析

体外模拟消化实验参照 INFOGEST 2.0 的方法<sup>[9]</sup>并略加修改。分别制备 4 mL 质量浓度为 1、2 mg/mL 的 MLPP、MLPS 及 PPPS(多酚:多糖=1:2,即 4 mL PPPS 体系中多酚、多糖质量浓度分别为 1、2 mg/mL,下同)进行体外模拟消化。按 INFOGEST 2.0 中的方法配制口腔消化盐溶液、胃消化盐溶液、肠消化盐溶液,样品消化之前,向口腔消化盐溶液中加入唾液淀粉酶(75 U/mL),消化 2 min;胃消化过程

中,调节样品 pH 为 3.0,在胃消化盐溶液中加入胃蛋白酶(2000 U/mL),消化 2 h;肠消化过程中,调节 pH 为 7.0,在肠消化盐溶液中加入胰蛋白酶(100 U/mL)和胆汁盐(200 mg/mL),消化 2 h。采用高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)进行酚类单体和单糖的定性和定量分析。

#### (1) 酚类单体的定性和定量分析

准确称取苯甲酸、表儿茶素、丁香酸、儿茶素、槲皮素、金丝桃苷、咖啡酸、龙胆酸、芦丁、绿原酸、没食子酸、香草酸、紫云英苷,甲醇定容,配制成 1 mg/mL 母液,经 0.22  $\mu$ m 有机相滤膜过滤,-20 $^{\circ}$ C 保存备用。色谱条件参考沈维治等<sup>[10]</sup>的方法。

#### (2) 单糖的定性和定量分析

准确称取甘露糖、木糖、核糖、葡萄糖、阿拉伯糖、半乳糖、半乳糖醛酸、葡萄糖醛酸标准单糖,用超纯水配制成 5 mg/mL 溶液,经衍生化处理后进行 HPLC 分析。衍生化处理参考 DAI 等<sup>[11]</sup>的方法:取各标品溶液 100  $\mu$ L 于离心管中,加入 200  $\mu$ L 0.5 mol/L 1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮(1-phenyl-3-methyl-5-pyrazolone, PMP)甲醇溶液,再加入 300  $\mu$ L 0.3 mol/L NaOH 溶液混匀,置于 70 $^{\circ}$ C 水浴中 1 h,冷却后再加入 300  $\mu$ L 0.3 mol/L HCl 溶液中和,加入 1.0 mL 氯仿,旋转 20 s,离心(8500 r/min, 5 min),吸取上清液于离心管,再加入 1 mL 氯仿,重复萃取 3 次后取上清液过 0.22  $\mu$ m 有机相滤膜备用。色谱条件:Agilent 1260 型液相色谱仪,ZORBAX SB-C<sub>18</sub>柱(250 mm $\times$ 4.6 mm, 5  $\mu$ m);流动相:0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液(phosphate buffer solution, PBS) (pH 6.7)和乙腈混合液(83:17, V:V);流速:1 mL/min;运行时间:60 min;柱温:30 $^{\circ}$ C;检测波长:245 nm。

### 1.3.3 傅里叶红外变换光谱分析

利用傅里叶红外变换光谱仪对各个消化阶段的样品进行傅里叶红外变换光谱分析。将各消化阶段的样品与 KBr 粉末(100 g)混合,压片机压制成 1 mm 薄片于红外光谱仪上测试,波长范围为 4000~400  $\text{cm}^{-1}$ 。

### 1.3.4 降糖降脂活性的测定

#### (1) MLPP、MLPS、PPPS 对淀粉消化的影响

糊化淀粉的制备:配制 2%的淀粉溶液,均匀搅拌后置于 100 $^{\circ}$ C 水浴中糊化 30 min,待样品冷却后,分别加入 4 mL 质量浓度为 1 mg/mL 的 MLPP、MLPS、PPPS 参照 INFOGEST 2.0 的方法进行消化,各消化阶段结束后于沸水浴中 15 min 灭酶活,离心(8000 r/min, 10 min),取上清液备用。采用 DNS 法测定消化产物中还原糖的含量<sup>[12]</sup>。

#### (2) $\alpha$ -淀粉酶、 $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制活性的测定

参照 JIANG 等<sup>[13]</sup>的方法并略加修改。取 50  $\mu$ L 系列稀释浓度的待测样品于 96 孔板,加入 50  $\mu$ L 10 U/mL  $\alpha$ -葡萄糖苷酶溶液(pH 6.8, 0.1 mol/L PBS 配制),于 37 $^{\circ}$ C 恒温孵育 10 min。继续加入 50  $\mu$ L 0.5 mmol/L *p*-NPG, 37 $^{\circ}$ C 恒温孵育 20 min,放入冰水浴 5 min 降低酶活,再加 50  $\mu$ L 1 mol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 终止反应,于 405 nm 处测定其吸光度值。以阿卡波糖为阳性

对照, 按公式(1)计算  $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性抑制率:

$$\text{酶活抑制率}/\%=[1-(A_a-A_b)/(A_c-A_d)]\times 100\% \quad (1)$$

式中:  $A_a$  为样品组吸光度,  $A_b$  为样品背景组吸光度(等体积缓冲液替代酶液),  $A_c$  为对照组吸光度(等体积缓冲液替代样品液),  $A_d$  为对照背景组吸光度(等体积缓冲液替代样品和酶液)。

取 50  $\mu\text{L}$  系列稀释浓度的待测样品于 96 孔板, 加入 50  $\mu\text{L}$  10 U/mL  $\alpha$ -淀粉酶溶液(pH 7.0, 0.1 mol/L PBS 配制), 于 37°C 恒温孵育 10 min。继续加入 50  $\mu\text{L}$  质量浓度为 0.1% 的淀粉溶液, 37°C 恒温孵育 20 min, 放入冰水浴 5 min 降低酶活。再加入 100  $\mu\text{L}$  二硝基水杨酸, 沸水浴 5 min, 冷却后于 540 nm 处测定其吸光度值。以阿卡波糖为阳性对照, 按公式(1)计算  $\alpha$ -淀粉酶活性抑制率。

### (3) 麦芽糖酶、蔗糖酶抑制活性的测定

参照 LI 等<sup>[14]</sup>的方法并略加修改。取 20  $\mu\text{L}$  系列稀释浓度的待测样品于 96 孔板中, 加入 50  $\mu\text{L}$  麦芽糖酶和蔗糖酶(鼠小肠丙酮粉配制), 加入 56 mmol/L 的蔗糖溶液或 7 mmol/L 的麦芽糖溶液 50  $\mu\text{L}$  启动反应, 在 37°C 反应 30 min。随后加入 50  $\mu\text{L}$  0.05 mol/L 的 Tris-HCl 溶液终止反应。以阿卡波糖为阳性对照, PBS (pH 6.8) 代替样品作为空白对照, PBS 代替酶液作为对照组, 采用葡萄糖测定试剂盒测定反应产生的葡萄糖的含量。

### (4) 脂肪酶抑制活性的测定

在微孔板中通过荧光法测定脂肪酶活力<sup>[15]</sup>。在微孔板中加入 50  $\mu\text{L}$  0.1 mL 4-甲基伞形酮油酸酯和 25  $\mu\text{L}$  不同浓度的样品, 后加入 25  $\mu\text{L}$  50 U/mL 的胰脂肪酶在 25°C 孵育 30 min, 再加入 100  $\mu\text{L}$  柠檬酸钠(0.1 mol/L pH 4.2)终止反应, 在激发波长 355 nm 和发射波长 460 nm 下测荧光值。以奥利司他为阳性对照, 按公式(2)计算脂肪酶抑制活性:

$$\text{脂肪酶抑制率}/\%=[1-(B_a-B_b)/(B_c-B_d)]\times 100\% \quad (2)$$

式中:  $B_a$  为样品组或阳性对照组吸光度,  $B_b$  为样品背景组吸光度(等体积缓冲液替代脂肪酶液),  $B_c$  为对照组吸光度(等体积缓冲液替代样品液),  $B_d$  为对照背景组吸光度(缓冲液替代酶液, 水代替样品)。

### 1.3.5 MLPP、MLPS、PPPS 促益生菌增殖作用

将 MLPP、MLPS、PPPS 分别配制成不同浓度样品, 过 0.22  $\mu\text{m}$  滤膜, 分别加入相同的 121°C 灭菌 15 min 的 MRS 培养液体系。以 1% 的接种量接入鼠李糖乳杆菌(ATCC53013)、植物乳杆菌(GIM1.191)、干酪乳杆菌(GIM1.411)、嗜酸乳杆菌(GIM1.321)、肠膜明串珠菌(GIM1.774), 37°C 温度, 摇床转速 180 r/min 条件下进行增殖培养, 采用稀释平板法计数, 以 MRS 液体培养基为阴性, 将阴性对照组活菌总数设置为 100%, 计算增殖率。

## 1.4 数据处理

采用 GraphPad Prism 9 软件进行绘图与分析。所有实验重复 3 次, 结果为平均值 $\pm$ 标准偏差。用 SPSS 23.0 软件对数据进行分析, 得到相应的半数抑制浓度(half maximal

inhibitory concentration,  $\text{IC}_{50}$ )值; 用 Duncan's 多重比较方法进行显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 MLPP、MLPS 及 PPPS 的消化特性

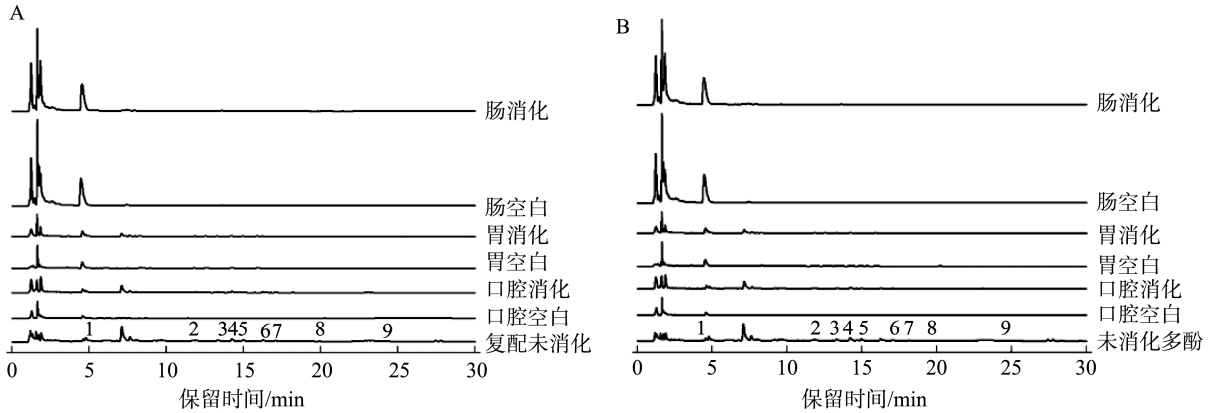
#### 2.1.1 MLPP 和 PPPS 的消化特性

由 MLPP、PPPS 的 HPLC 色谱图(图 1)中多酚单体在未消化、口腔消化、胃消化、肠消化等阶段出峰时间和峰面积得出 MLPP、PPPS 经体外模拟消化后各多酚单体含量的变化情况(表 1)。如表 1 所示, 相较于未消化的 MLPP, 经口腔、胃消化的 MLPP 单体的含量略有减少, 多酚消化率分别为 5.26%、20.91%, 而经肠消化阶段 MLPP 单体含量明显的减少, 多酚消化率为 59.49%; 相较于未消化的 PPPS, 经口腔、胃、肠消化的 PPPS 中的多酚单体含量明显减少, 在 3 个阶段多酚的消化率分别为 20.75%、39.01%、79.95%, 均分别高于 MLPP 的多酚消化率。

MLPP 的消化过程中, 没食子酸、绿原酸、丁香酸等在口腔-胃消化阶段含量变化无显著差异, 难以被消化, 而香草酸、表儿茶素、芦丁在此阶段显著降低, 降幅分别为 8.38%、9.75%、19.35%; 在肠消化阶段, 没食子酸、咖啡酸、丁香酸、龙胆酸未检出, 绿原酸、香草酸、表儿茶素、芦丁也有所降低, 降幅分别为 63.78%、12.54%、37.96%、37.29%。

PPPS 的消化过程中, 没食子酸在口腔-胃消化阶段含量变化无显著差异, 相较于未消化阶段, 香草酸、绿原酸、芦丁在口腔-胃消化阶段的含量显著降低, 降幅分别为 7.94%、11.67%、65.22%。胃消化阶段, 咖啡酸、丁香酸、表儿茶素、龙胆酸已经无法检出; 在肠消化阶段, 没食子酸、香草酸、咖啡酸、丁香酸、表儿茶素、龙胆酸均未检出, 绿原酸、芦丁分别降低 66.87%、83.13%。综上, MLPP、PPPS 中各多酚单体相较于未消化阶段在肠液中含量均显著下降。

没食子酸在胃偏酸性的环境中较稳定<sup>[16-17]</sup>, MLPP、PPPS 中没食子酸在口腔-胃阶段含量变化无显著差异。绿原酸分子结构中含有酯键和不饱和双键, 易被碱水解<sup>[18]</sup>, 因此可见 MLPP 中绿原酸在肠消化阶段含量显著降低; 此外, 一些酚类化合物在胃环境中发生水解、去糖基化、酯化、氧化和裂解等反应, 造成一定程度的损耗<sup>[19]</sup>, 如在胃消化阶段, MLPP 中咖啡酸、表儿茶素、龙胆酸、芦丁含量显著减少, PPPS 中咖啡酸、丁香酸、表儿茶素、龙胆酸在该阶段均未检出; 在肠消化阶段, 表儿茶素、香草酸在 MLPP 组中含量分别为(11.569 $\pm$ 1.418)  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 、(11.978 $\pm$ 0.960)  $\mu\text{g}/\text{mL}$ , 而在 PPPS 组中未检出, 表明 MLPS 可促进 PPPS 中表儿茶素、香草酸的消化, 即多糖的加入可促进多酚的消化。前期亦有研究证明, 脂质和蛋白质对表儿茶素和儿茶素黄烷醇的消化与吸收影响较小, 而碳水化合物可促进儿茶素黄烷醇的消化与吸收<sup>[20-21]</sup>, 一方面可能与两者间的相互作用有关, 另一方面膳食中的碳水化合物组成可能通过影响胃分泌物的运动和肝血流来影响类黄酮的消化和吸收。



注: 1. 没食子酸; 2. 龙胆酸; 3. 绿原酸; 4. 香草酸; 5. 咖啡酸; 6. 丁香酸; 7. 表儿茶素; 8. 儿茶素; 9. 芦丁。

图 1 PPPS (A)和 MLPP (B)经体外模拟消化后的 HPLC 图  
Fig.1 HPLC profiles of PPPS (A) and MLPP (B) after simulated digestion *in vitro*

表 1 MLPP 和 PPPS 经体外模拟消化后各组分的变化(μg/mL, n=3)  
Table 1 Component changes of MLPP and PPPS after simulated digestion *in vitro* (μg/mL, n=3)

项目	未消化		口腔		胃		肠	
	MLPP	PPPS	MLPP	PPPS	MLPP	PPPS	MLPP	PPPS
没食子酸	12.616±0.456 <sup>a</sup>	12.616±0.257 <sup>a</sup>	12.243±0.231 <sup>a</sup>	12.27±0.539 <sup>a</sup>	11.281±1.020 <sup>a</sup>	11.804±1.132 <sup>a</sup>	—	—
绿原酸	85.956±0.382 <sup>a</sup>	81.809±2.389 <sup>a</sup>	84.372±1.602 <sup>a</sup>	75.44±2.148 <sup>b</sup>	70.589±5.760 <sup>a</sup>	70.2±2.460 <sup>b</sup>	31.136±0.469 <sup>b</sup>	29.208±2.843 <sup>c</sup>
香草酸	13.696±0.153 <sup>a</sup>	13.322±0.484 <sup>a</sup>	12.641±0.257 <sup>ab</sup>	12.364±0.195 <sup>ab</sup>	12.548±0.368 <sup>b</sup>	12.016±0.277 <sup>b</sup>	11.978±0.960 <sup>b</sup>	—
咖啡酸	3.875±0.026 <sup>a</sup>	3.823±0.2032 <sup>a</sup>	3.812±0.255 <sup>a</sup>	2.016±0.220 <sup>b</sup>	—	—	—	—
丁香酸	4.713±0.683 <sup>a</sup>	4.713±0.398 <sup>a</sup>	4.312±0.744 <sup>a</sup>	—	3.658±0.167 <sup>a</sup>	—	—	—
表儿茶素	18.648±0.253 <sup>a</sup>	14.354±0.869 <sup>a</sup>	18.232±0.979 <sup>a</sup>	12.62±0.530 <sup>a</sup>	16.828±0.708 <sup>b</sup>	—	11.569±1.418 <sup>c</sup>	—
龙胆酸	11.664±1.865 <sup>a</sup>	10.763±1.218 <sup>a</sup>	6.526±0.556 <sup>b</sup>	6.526±0.585 <sup>b</sup>	4.201±0.298 <sup>c</sup>	—	—	—
芦丁	29.597±1.966 <sup>a</sup>	30.149±1.307 <sup>a</sup>	29.114±1.341 <sup>a</sup>	14.672±1.051 <sup>b</sup>	23.868±0.269 <sup>b</sup>	10.604±1.385 <sup>c</sup>	18.56±1.134 <sup>c</sup>	5.188±0.830 <sup>d</sup>

注: 不同小写字母表示不同消化阶段之间存在显著差异,  $P < 0.05$ ; —表示未检出。

2.1.2 MLPS、PPPS 的消化特性

图 2 为 MLPS、PPPS 经口腔、胃、肠消化后的 HPLC 色谱图。MLPS 经口腔、胃和肠消化的峰面积与对照口腔液、胃液和肠液的峰面积无明显区别, 说明 MLPS 经口腔、胃、肠消化后无游离单糖生成; PPPS 经口腔、胃和肠消化的峰面积与对照口腔液、胃液和肠液的峰面积无明显区别, 说明 PPPS 经口腔、胃、肠消化后无游离单糖生成, 表明 MLPP 的

加入对 MLPS 的消化无影响。HU 等<sup>[22]</sup>探讨大粒车前子多糖在体外模拟胃液及胃肠液中的消化状况时, 在胃肠消化产物中未检测到游离单糖, SANDBERG 等<sup>[23]</sup>的研究也显示柑橘果胶在胃及小肠中基本不被消化, 与本研究结果一致。MLPS、PPPS 中的多糖在口腔、胃、肠消化中极为稳定, 这为其在结肠中被微生物利用提供了物质基础, 后续可进一步通过结肠发酵模型考察肠道微生物对 MLPP、MLPS、PPPS 的降解。

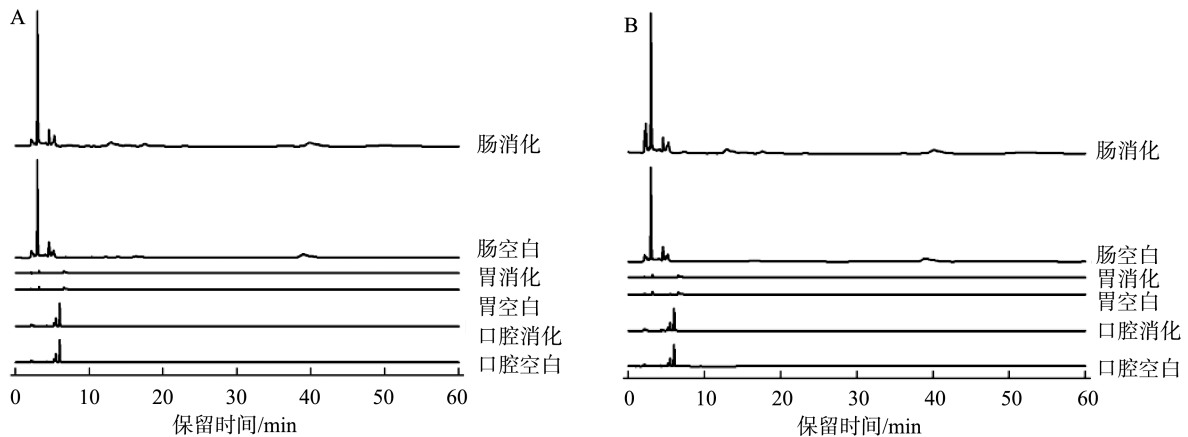


图 2 MLPS (A)、PPPS (B)经体外模拟消化后的 HPLC 图  
Fig.2 HPLC profiles of MLPS (A) and PPPS (B) after simulated digestion *in vitro*

### 2.1.3 MLPS、PPPS 消化前后红外光谱图

图 3 为 MLPS、PPPS 体外模拟消化前后的红外光谱图( $4000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ )。一般认为  $3600\sim 3200\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰是 O-H 的伸缩振动吸收峰,  $3200\sim 2800\text{ cm}^{-1}$  处为 C-H 的伸缩振动吸收峰,  $1400\sim 1200\text{ cm}^{-1}$  处是 C-H 的变角振动吸收峰, 由 C-O-H 和吡喃糖环的 C-O-C 两种 C-H 形成的伸缩振动区出现于  $1200\sim 1000\text{ cm}^{-1}$  处<sup>[24]</sup>。MLPS、PPPS 体外模拟消化前在  $3600\sim 3200\text{ cm}^{-1}$ 、 $3200\sim 2800\text{ cm}^{-1}$ 、 $1200\sim 1000\text{ cm}^{-1}$  处都出现特征吸收峰, 而 MLPS、PPPS 体外模拟消化后在  $3600\sim 3200\text{ cm}^{-1}$ 、 $3200\sim 2800\text{ cm}^{-1}$ 、 $1200\sim 1000\text{ cm}^{-1}$  谱段亦出现的特征吸收峰, 表明 MLPS、PPPS 消化后在  $3600\sim 3200\text{ cm}^{-1}$ 、 $3200\sim 2800\text{ cm}^{-1}$ 、 $1200\sim 1000\text{ cm}^{-1}$  处仍存在 O-H、C-H、C-H 基团。由此可见, MLPS、PPPS 中的多糖在消化过程中多糖的特征吸收峰均未发生变化, 表明 MLPS 在口胃肠消化阶段较为稳定, MLPP 的加入对多糖的消化未产生影响。

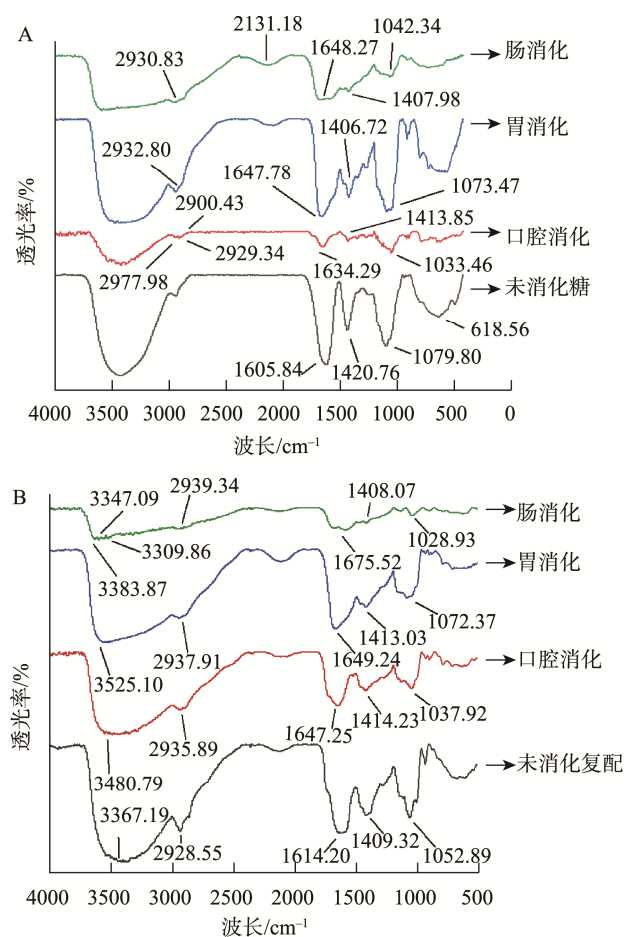
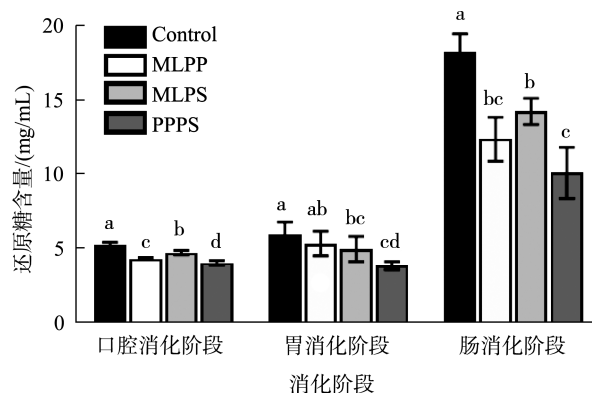


图 3 MLPS (A)和 PPPS (B)体外模拟消化前后红外光谱图  
Fig.3 Infrared spectrograms of MLPS (A) and PPPS (B) after simulated digestion *in vitro*

## 2.2 MLPP、MLPS、PPPS 降糖降脂活性

$\alpha$ -淀粉酶、 $\alpha$ -葡萄糖苷酶等的消化酶酶活是影响淀粉消化速率的主要因素, 在淀粉的消化过程中加入淀粉酶或

糖苷酶抑制剂可影响其酶活, 从而阻碍或延缓碳水化合物的消化, 从而减少葡萄糖的生成<sup>[25]</sup>。图 4 为 MLPP、MLPS、PPPS 经口腔-胃-肠模拟消化后消化液中还原糖的含量。由图 4 可知, 在口腔、胃、肠消化阶段, 3 个样品组中还原糖浓度均低于空白组, 表明 MLPP、MLPS、PPPS 对淀粉的消化均有抑制作用。相比于 MLPP、MLPS, PPPS (MLPP:MLPS=1:2)在消化过程中对淀粉消化释放还原糖的抑制作用更明显, 尤其在口腔消化阶段, 消化液中还原糖的浓度明显低于单组分。这表明复配后的 PPPS 对淀粉消化的抑制作用优于 MLPP、MLPS。



注: 不同小写字母表示同一阶段各组之间存在显著差异,  $P < 0.05$ , 下同。

图 4 体外模拟消化各阶段还原糖的浓度( $n=6$ )  
Fig.4 Concentration of reducing sugar at each stage of digestion *in vitro* ( $n=6$ )

MLPP、MLPS、PPPS 对  $\alpha$ -淀粉酶、 $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制活性见图 5。由图 5A 可知, 对照组对  $\alpha$ -淀粉酶的抑制效果显著优于 MLPP、MLPS、PPPS ( $P < 0.05$ )。其中, PPPS 活性最强,  $IC_{50}$  值为  $(21.3743 \pm 0.6714)\text{ g/L}$ , 显著优于 MLPP、MLPS ( $P < 0.05$ ); MLPS 显著优于 MLPP ( $P < 0.05$ )。由图 5B 可知, PPPS 对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制作用显著高于其他组 ( $P < 0.05$ ),  $IC_{50}$  值为  $(14.4620 \pm 1.0901)\text{ g/L}$ ; MLPP 显著优于 MLPS ( $P < 0.05$ ), 并显著低于阳性对照组 ( $P < 0.05$ )。综上, MLPP、MLPS 复配后对  $\alpha$ -淀粉酶、 $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制效果都明显优于 MLPP、MLPS 单一组分。多酚对  $\alpha$ -淀粉酶、 $\alpha$ -葡萄糖苷酶酶活的抑制作用与多酚单体的组成及单体间的协同或抑制作用有关, 多糖的单糖组成、分子量、支链结构、立体构象是影响其将血糖活性的重要因素<sup>[26]</sup>, 两种评价降血糖方法均表明 PPPS 的降血糖活性更好, 但其体外降血糖活性的物质基础及其作用机制有待进一步研究。

MLPP、MLPS、PPPS 对麦芽糖酶、蔗糖酶的抑制活性见图 6。由图 6A 可知, PPPS、MLPP 和阳性对照组对麦芽糖酶的抑制效果显著优于 MLPS ( $P < 0.05$ ), 三者的  $IC_{50}$  值分别为  $(0.1678 \pm 0.0013)$ 、 $(0.3623 \pm 0.0011)$ 、 $(2.1843 \pm 0.8521)\text{ g/L}$ , 而对照组、PPPS、MLPP 对麦芽糖酶的抑制效果并无显著性差异; 由图 6B 可知, MLPP、PPPS 和阳性对照组对蔗糖酶的抑

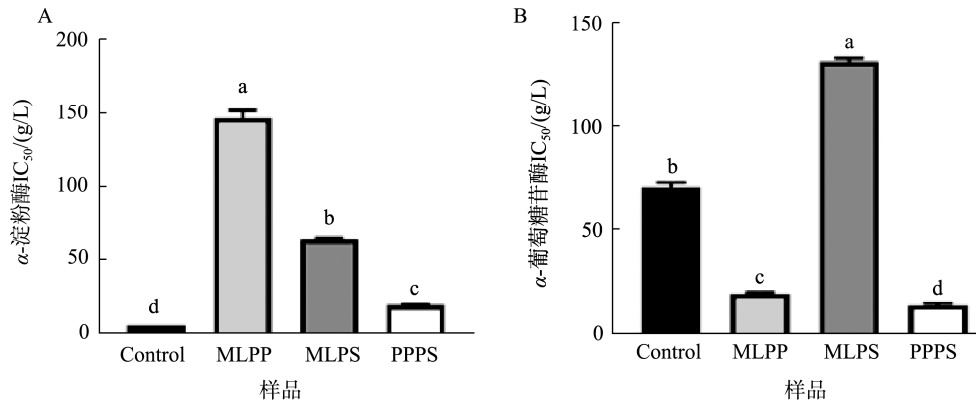


图 5 MLPP、MLPS、PPPS 对 α-淀粉酶(A)、α-葡萄糖苷酶(B)的抑制活性(n=6)

Fig.5 Inhibitory effects of MLPP, MLPS and PPPS on α-glucosidase (A) and α-glucosidase (B) (n=6)

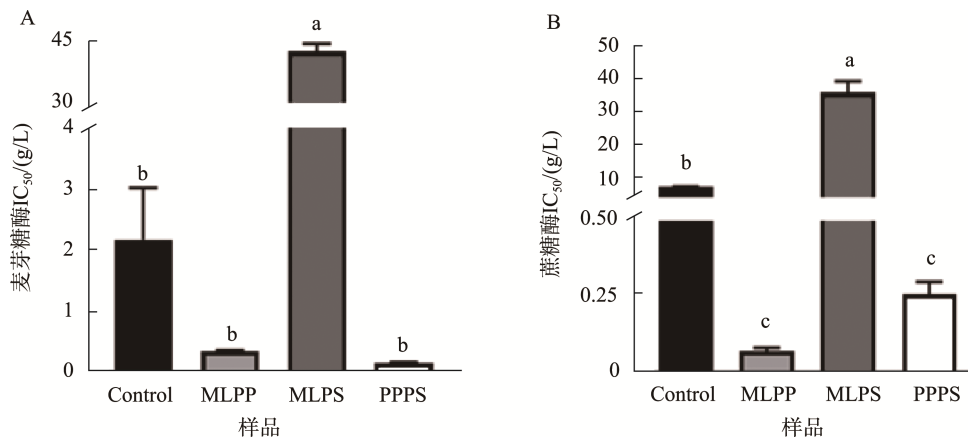


图 6 MLPP、MLPS、PPPS 对麦芽糖酶(A)、蔗糖酶(B)的抑制作用(n=6)

Fig.6 Inhibitory effects of MLPP, MLPS and PPPS on murine maltase (A) and murine sucrose (B) (n=6)

制效果显著优于 MLPS ( $P < 0.05$ ), 三者的  $IC_{50}$  值分别为  $(0.0720 \pm 0.0117)$ 、 $(0.2606 \pm 0.0399)$ 、 $(8.1415 \pm 0.0325)$  g/L, 其中 MLPP、PPPS 对蔗糖酶的抑制效果无显著性差异, 表明 MLPP 对二糖酶的抑制作用显著, 在 PPPS 中, MLPS 的抑制贡献率不大。王晨<sup>[27]</sup>研究表明 MLPP 对二糖酶有较强的抑制作用, 而植物多糖对二糖酶的抑制率较低<sup>[28]</sup>, 与本研究结果一致。

### 2.3 MLPP、MLPS、PPPS 对脂肪酶的抑制活性

MLPP、MLPS、PPPS 对脂肪酶的抑制活性见图 7。由图 7 可知, 对照组、PPPS 和 MLPP 对脂肪酶的抑制效果显著优于 MLPS ( $P < 0.05$ ), 三者的  $IC_{50}$  值分别为  $(3.2903 \pm 0.2895)$ 、 $(31.1413 \pm 2.7418)$ 、 $(49.6790 \pm 7.4934)$  g/mL, 且 PPPS 与 MLPP 组之间无显著差异。综上, MLPP、PPPS 对脂肪酶的抑制效果优于 MLPS, 且 PPPS 中的多酚、多糖对胰脂肪酶抑制作用均有贡献。天然来源的酶消化抑制剂大多作用效果较为温和, 研究表明 MLPS 的脂肪酶抑制作用显著低于奥利司他<sup>[29]</sup>, 与本研究结果一致。值得注意的是, MLPP、PPPS 对脂肪酶的抑制效果无显著性差异, 其中 MLPP、PPPS 抑制作用的物质基础及机制有待进一步研究。

### 2.4 MLPP、MLPS 及 PPPS 促益生菌增殖作用

由图 8A~B 可知, MLPP、MLPS 和 PPPS 在适当的范围

内均对鼠李糖乳杆菌(ATCC53103)有促增殖效果。其中, MLPP 浓度在 0.10‰~1.00‰范围内均有增殖效果, 而浓度为 0.25‰时, 促鼠李糖乳杆菌(ATCC53103)增殖效果最好, 增值率为  $231.41\% \pm 0.24\%$ ; MLPS 浓度为 0.40‰和 0.80‰时, 鼠李糖乳杆菌(ATCC53103)增值率分别为  $468.11\% \pm 12.11\%$ 、 $477.14\% \pm 20.01\%$ , 两者间无显著差异。由图 8C 可知,

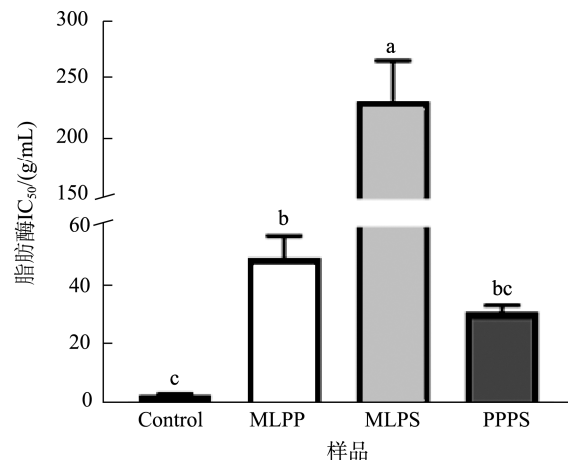
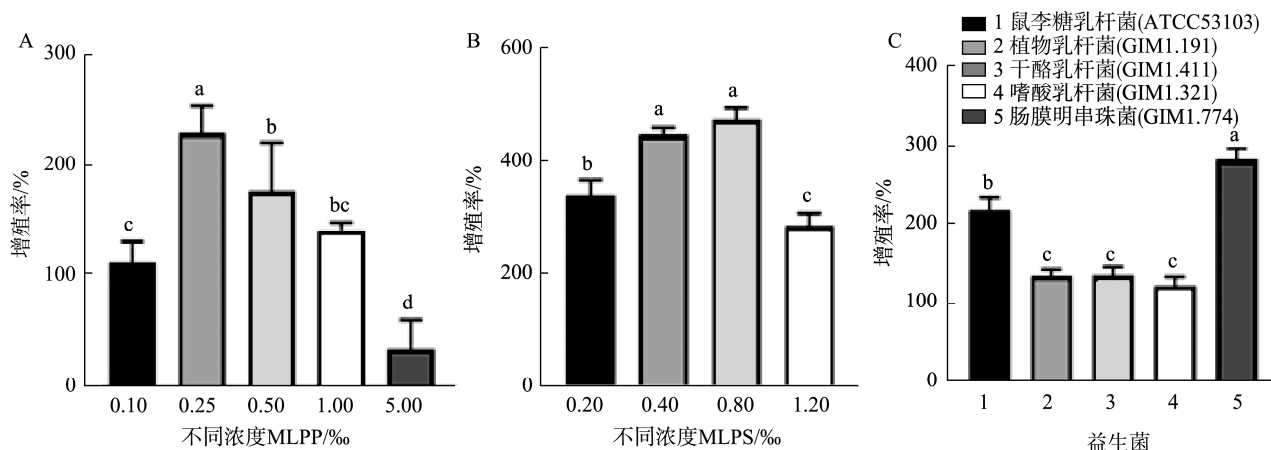


图 7 MLPP、MLPS、PPPS 对脂肪酶的抑制作用(n=6)

Fig.7 Inhibitory effects of MLPP, MLPS and PPPS on lipase (n=6)



注: A~B 为不同浓度 MLPP、MLPS 条件下鼠李糖乳杆菌(ATCC53103)的增殖率, C 为 PPPS (MLPS:MLPP=1:2, MLPP、MLPS 复配后质量浓度分别为 0.25%和 0.50%)条件下鼠李糖乳杆菌(ATCC53103)、植物乳杆菌(GIM1.191)、干酪乳杆菌(GIM1.411)、嗜酸乳杆菌(GIM1.321)、肠膜明串珠菌(GIM1.774)的增殖率。

图 8 不同浓度 MLPP、MLPS 及 PPPS 条件下益生菌的增殖率( $n=3$ )

Fig.8 Proliferation rates of probiotics under different concentrations of MLPP, MLPS and PPPS ( $n=3$ )

PPPS 对鼠李糖乳杆菌(ATCC53103)、植物乳杆菌(GIM1.191)、干酪乳杆菌(GIM1.411)、嗜酸乳杆菌(GIM1.321)、肠膜明串珠菌(GIM1.774)均有促增殖作用,其中鼠李糖乳杆菌(ATCC53103)、肠膜明串珠菌(GIM1.411)的增殖率( $P<0.05$ )增殖率显著高于植物乳杆菌(GIM1.191)、干酪乳杆菌(GIM1.411)、嗜酸乳杆菌(GIM1.321),肠膜明串珠菌(GIM1.411)的增殖率最高,达到(280.57±8.38)%。杨诗沅<sup>[30]</sup>研究发现桑枝多糖与对照组相比差异基因达到 397 个,GO 富集分析发现上调差异基因主要集中在细胞成分和分子功能,KEGG 功能富集分析发现桑枝多糖组菌体通过上调脂肪酸合成相关基因的表达促进菌体进行生物代谢及细胞合成,从而促进鼠李糖乳杆菌(ATCC53103)的增殖。由此可见,MLPP、MLPS、PPPS 对益生菌的增殖作用与菌体生物代谢及细胞合成相关基因的表达密切相关,因而 MLPP、MLPS、PPPS 对益生菌的增殖表现出差异。

### 3 讨论与结论

MLPP、MLPS、PPPS 在消化特性、降糖降脂活性、促益生菌增殖活性方面存在差异。MLPP 在口腔阶段难以消化,在胃肠阶段部分被消化;MLPS 在口腔、胃、肠阶段均难以消化;而 MLPS 的加入促进 MLPP 的消化,可能与 MLPP、MLPS 之间的相互作用,如物理或共价连接有关<sup>[31]</sup>。天然活性成分的消化特性对其功效影响深远,多糖和多酚以物理或化学方式结合形成共轭物有较高的消化率,有利于机体对活性成分的消化吸收,从而提高健康效应,可用于相关功能食品的开发。然而,多酚-多糖复配物的结构仍不明确,从而阻碍了构效关系的明晰。因此,需要进一步探究多酚-多糖复配物消化特性、生物利用度及其代谢情况,为功效

机制研究提供基础。

$\alpha$ -淀粉酶、 $\alpha$ -葡萄糖苷酶、麦芽糖酶、蔗糖酶和脂肪酶的活性调控,对机体血糖血脂的防控和治疗具有重大意义<sup>[32]</sup>, $\alpha$ -淀粉酶、 $\alpha$ -葡萄糖苷酶、二糖酶和脂肪酶与碳水化合物、膳食脂肪的消化吸收密切相关,是降血糖降血脂膳食补充剂的合适靶标<sup>[33]</sup>,酶抑制剂主要包括人工合成和天然产物两大类<sup>[34]</sup>,目前市面上  $\alpha$ -淀粉酶、 $\alpha$ -葡萄糖苷酶和二糖酶抑制剂如阿卡波糖,胰脂肪酶抑制剂奥利司他等对人体具有一定的毒副作用,天然活性物质安全性高,已成为酶抑制剂的研究重点。本研究结果显示,多酚多糖复配对淀粉的消化、 $\alpha$ -淀粉酶的抑制效果优于单一组分,故仍需深入研究多酚多糖复配物与  $\alpha$ -淀粉酶结合的分子作用机制,进一步揭示分子结构和抑制作用间构效关系,为其广泛应用于食品工业、医药领域奠定基础。

多酚在食品中以糖苷配基糖苷或聚合物的形式存在,其中只有水解的糖苷配基在小肠中可直接吸收,而其余未被吸收的多酚到达结肠经肠道菌群降解而被人体吸收<sup>[3]</sup>;生物大分子多糖在胃肠道内不被消化到达结肠通过肠道微生物代谢从而对机体健康产生影响。肠道微生物与人体健康关系密切,对宿主脂代谢和能量代谢有直接的影响<sup>[35]</sup>,多酚、多糖等活性成分可促进有益菌并抑制有害菌的生长使宿主受益<sup>[36-37]</sup>。本研究表明,MLPP、MLPS、PPPS 对鼠李糖乳杆菌(ATCC53103)、植物乳杆菌(GIM1.191)、干酪乳杆菌(GIM1.411)、嗜酸乳杆菌(GIM1.321)、肠膜明串珠菌(GIM1.774)等益生菌均有促增殖效果,而 PPPS 对肠膜明串珠菌(GIM1.774)的促增殖效果显著高于其他益生菌( $P<0.05$ ),肠膜明串珠菌具有高产酸和拮抗致病菌的能力<sup>[38]</sup>,桑叶多酚多糖复配物对肠膜明串珠菌良好的促增殖效果,这为开发桑叶功能成分益生元产品提供科学理论依据和新的思路。



## 参考文献

- [1] ZHANG R, ZHANG Q, ZHU S, *et al.* Mulberry leaf (*Morus alba* L.): A review of its potential influences in mechanisms of action on metabolic diseases [J]. *Pharmacol Res*, 2022, 175: 1043–6618.
- [2] YAN H, LU J, WANG Y, *et al.* Intake of total saponins and polysaccharides from *Polygonatum kingianum* affects the gut microbiota in diabetic rats [J]. *Phytomedicine*, 2017, 26: 45–54.
- [3] LIU J, HE Z, MA N, *et al.* Beneficial effects of dietary polyphenols on high-fat diet-induced obesity linking with modulation of gut microbiota [J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 68(1): 33–47.
- [4] LI Q, LIU F, LIU J, *et al.* Mulberry leaf polyphenols and fiber induce synergistic antiobesity and display a modulation effect on gut microbiota and metabolites [J]. *Nutrients*, 2019, 11(5): 1017.
- [5] LI Q, WANG C, LIU F, *et al.* Mulberry leaf polyphenols attenuated postprandial glucose absorption *via* inhibition of disaccharidases activity and glucose transport in Caco-2 cells [J]. *Food Funct*, 2020, 11(2): 1835–1844.
- [6] 王芳, 郑海雪. 桑叶多糖的提取工艺研究[J]. *浙江师范大学学报*, 2008, 89(1): 77–83.  
WANG F, ZHENG HX. Several extraction processes of polysaccharide from *Morus alba* L. leaves [J]. *J Zhejiang Norm Univ*, 2008, 89(1): 77–83.
- [7] JULKUNEN-TITTO R. Phenolic constituents in the leaves of northern willows: Methods for the analysis of certain phenolics [J]. *J Agric Food Chem*, 1985, 33(2): 213–217.
- [8] DUBOIS M, GILLES K, HAMILTON JK, *et al.* A colorimetric method for the determination of sugars [J]. *Nature*, 1951, 168(4265): 167.
- [9] BRODKORB A, EGGER L, ALMINGER M, *et al.* INFOGEST static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion [J]. *Nat Protoc*, 2019, 14(4): 991–1014.
- [10] 沈维治, 廖森泰, 邹宇晓, 等. 不同类型桑种质资源的桑叶总多酚及单体酚类物质含量测定[J]. *蚕业科学*, 2014, 40(3): 493–497.  
SHEN WZ, LIAO ST, ZOU YX, *et al.* Determination of total polyphenols and monomer phenols in mulberry leaves of different mulberry germplasm resources [J]. *Acta Sericol Sin*, 2014, 40(3): 493–497.
- [11] DAI J, WU Y, CHEN SW, *et al.* Sugar compositional determination of polysaccharides from *Dunaliella salina* by modified RP-HPLC method of precolumn derivatization with 1-phenyl-3-methyl-5-pyrazolone [J]. *Carbohydr Polym*, 2010, 82(3): 629–635.
- [12] ROLLET-LABELLE E, GRANGE MJ, ELBIM C, *et al.* Hydroxyl radical as a potential intracellular mediator of polymorphonuclear neutrophil apoptosis [J]. *Free Radical Biol Med*, 1998, 24(4): 563–572.
- [13] JIANG S, ZHAO X, LIU C, *et al.* Identification of phenolic compounds in fruits of *Ribes stenocarpum* Maxim. by UHPLC-QTOF/MS and their hypoglycemic effects *in vitro* and *in vivo* [J]. *Food Chem*, 2021, 344: 128568.
- [14] LI Q, WANG C, LIU F, *et al.* Mulberry leaf polyphenols attenuated postprandial glucose absorption *via* inhibition of disaccharidases activity and glucose transport in Caco-2 cells [J]. *Food Funct*, 2020, 11(2): 1835–1844.
- [15] KWON CS, SOHN HY, KIM SH, *et al.* Anti-obesity effect of *Dioscorea nipponica* Makino with lipase-inhibitory activity in rodents [J]. *Biosci Biotechnol Biochem*, 2003, 67(7): 1451–1456.
- [16] BERMÚDEZ-SOTO MJ, TOMÁS-BARBERÁN FA, GARCÍA-CONESA MT. Stability of polyphenols in chokeberry (*Aronia melanocarpa*) subjected to *in vitro* gastric and pancreatic digestion [J]. *Food Chem*, 2007, 102(3): 865–874.
- [17] XIE C, YU K, ZHONG D, *et al.* Investigation of isomeric transformations of chlorogenic acid in buffers and biological matrixes by ultra performance liquid chromatography coupled with hybrid quadrupole/ion mobility/orthogonal acceleration time-of-flight mass spectrometry [J]. *J Agric Food Chem*, 2011, 59(20): 11078–11087.
- [18] WEI F, TANOKURA M. Chapter 17-Organic compounds in green coffee beans [M]. PREEDY VR. *Coffee in Health and Disease Prevention*. San Diego: Academic Press, 2015.
- [19] RUEDA A, CANTARERO S, SEIQUER I, *et al.* Bioaccessibility of individual phenolic compounds *in extra* virgin argan oil after simulated gastrointestinal process [J]. *LWT*, 2017, 75: 466–472.
- [20] SCHRAMM DD, KARIM M, SCHRADER HR, *et al.* Food effects on the absorption and pharmacokinetics of cocoa flavanols [J]. *Life Sci*, 2003, 73(7): 857–869.
- [21] SERRA A, MACIÀ A, MARIA-PAZ R, *et al.* Bioavailability of procyanidin dimers and trimers and matrix food effects *in vitro* and *in vivo* models [J]. *Brit J Nutr*, 2010, 103(7): 944–952.
- [22] HU JL, NIE SP, MIN FF, *et al.* Artificial simulated saliva, gastric and intestinal digestion of polysaccharide from the seeds of *Plantago asiatica* L. [J]. *Carbohydr Polym*, 2013, 92(2): 1143–1150.
- [23] SANDBERG AS, AHDERINNE R, ANDERSSON H, *et al.* The effect of citrus pectin on the absorption of nutrients in the small intestine [J]. *Hum Nutr Clin Nutr*, 1983, 37(3): 171–183.
- [24] HONG T, YIN JY, NIE SP, *et al.* Applications of infrared spectroscopy in polysaccharide structural analysis: Progress, challenge and perspective [J]. *Food Chem: X*, 2021, 12: 100168.
- [25] 王红岩, 曹际娟, 胡冰, 等. 食品功能组分对淀粉类食品升糖指数影响的研究进展[J]. *食品科技*, 2021, 46(7): 250–254.  
WANG HY, CAO JJ, HU B, *et al.* Research progress on the effect of functional components of food on glycemic index of starchy foods [J]. *Food Sci Technol*, 2021, 46(7): 250–254.
- [26] 杨玉洁, 刘静宜, 谭艳, 等. 多糖降血糖活性构效关系及作用机制研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(23): 355–363.  
YANG YJ, LIU JY, TAN Y, *et al.* Progress in understanding the structure-activity relationship and hypoglycemic mechanism of polysaccharides [J]. *Food Sci*, 2021, 42(23): 355–336.
- [27] 王晨. 桑叶多酚的物质组成分析及其对二糖消化的影响[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2018.  
WANG C. Analysis of the composition of mulberry leaf polyphenols and its effect on disaccharide digestion [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2018.
- [28] 刘悦, 杨慧文, 林榆子, 等. 白藜中性多糖对 2 型糖尿病小鼠肠道二

- 糖酶的调节作用[J/OL]. 现代食品科技: 1-10. [2023-02-10]. DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.11.1442
- LIU Y, YANG HW, LIN YZ, *et al.* Regulatory effect of neutral polysaccharide from *Acanthopanax trifoliatum* (L.) Merr on Intestinal disaccharidase in type 2 diabetic mice [J/OL]. Mod Food Sci Technol: 1-10. [2023-02-10]. DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.11.1442
- [29] 陈永丽, 黄俊僮, 王玲, 等. 桑叶多糖的化学组成及其对胰脂肪酶的抑制作用研究[J]. 食品科技, 2021, 46(3): 162-166.
- CHEN YL, HUANG JT, WANG L, *et al.* Chemical composition of mulberry leaf polysaccharide and its inhibitory effect on pancreatic lipase [J]. Food Sci Technol, 2021, 46(3): 162-166.
- [30] 杨诗沅. 桑枝低聚糖结构表征与益生活性初探及其降血糖作用研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2020.
- YANG SY. Structural characterization and probiotic activity of oligosaccharides from mulberry branch and their hypoglycemic effects [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020.
- [31] GUO Q, XIAO X, LU L, *et al.* Polyphenol-polysaccharide complex: Preparation, characterization, and potential utilization in food and health [J]. Annu Rev Food Sci Technol, 2022, 13: 59-87.
- [32] 符群, 吴小杰. 刺玫果不同醇提物对降糖酶活性影响及其加工稳定性[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(3): 143-151.
- FU Q, WU XJ. Effects of different *Rosa davurica* alcohol extracts on the activity of hypoglycemic enzyme and their processing stabilities [J]. J Cent South Univ For Technol, 2022, 42(3): 143-51.
- [33] PARK JY, KIM CS, PARK KM, *et al.* Inhibitory characteristics of flavonol-3-O-glycosides from *Polygonum aviculare* L. (common knotgrass) against porcine pancreatic lipase [J]. Sci Rep, 2019, 9(1): 18080.
- [34] PARK JP, KIM J, PARK M, *et al.* Potential agents for cancer and obesity treatment with herbal medicines from the green garden [J]. Biotechnol Bioproc Eng, 2011, 16: 1065-1076.
- [35] 李媛媛, 于良晓, 裴海生, 等. 药食同源生物活性物质降脂减重机制研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(22): 7407-7414.
- LI YY, YU LX, PEI HS, *et al.* Progress in understanding the lipid-lowering and weight-reducing mechanism of medicinal and edible homologous compounds [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(22): 7407-7414.
- [36] CATALKAYA G, VENEMA K, LUCINI L, *et al.* Interaction of dietary polyphenols and gut microbiota: Microbial metabolism of polyphenols, influence on the gut microbiota, and implications on host health [J]. Food Front, 2020, 1(2): 109-33.
- [37] 叶青雅, 赵灵慧, 陆春雷, 等. 樟芝深层发酵多糖促进乳酸菌生长及增殖[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(20): 6585-6591.
- YE QY, ZHAO LH, LU CL, *et al.* Polysaccharide from *Antrodia cinnamomea* in submerged fermentation promoting the growth and proliferation of *Lactobacillus* [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(20): 6585-6591.
- [38] HOLLAND R, LIU SQ. Lactic acid bacteria *Leuconostoc* spp. [M]. FUQUAY JW. Encyclopedia of Dairy Sciences (Second Edition). San Diego: Academic Press, 2011.

(责任编辑: 郑丽 韩晓红)

## 作者简介



师英春, 硕士, 主要研究方向为食品加工与安全。

E-mail: 3145875940@qq.com

邹宇晓, 研究员, 主要研究方向为功能食品。

E-mail: yuxiaozou@163.com



李倩, 副研究员, 主要研究方向为食品科学。

E-mail: liqian.hubei@163.com