

# 荔枝果渣可溶性膳食纤维去结合酚前后 结构和功能性质的比较

许涵婷<sup>1,2</sup>, 唐语谦<sup>1\*</sup>, 胡腾根<sup>2,3</sup>, 余元善<sup>2,3\*</sup>, 杨继国<sup>1</sup>, 陈晓维<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640) (2. 广东省农业科学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, 广东广州 510610)  
(3. 华工利亚(佛山)生物科技有限责任公司, 广东佛山 528012)

**摘要:** 该研究以荔枝果渣中的可溶性膳食纤维(Soluble Dietary Fiber, SDF)为原料, 探讨碱水解法去除其中的结合酚后 SDF 结构和功能性质的变化。结果表明荔枝果渣可溶性膳食纤维中结合酚含量为 4.53 mg GAE/g。扫描电镜结果表明去除结合酚后的 SDF 结构变得较为松散; 傅里叶红外光谱的结果表明 SDF 的主要成分为果胶和半纤维素, 去除结合酚后的 SDF 未发生官能团上的转化。单糖组成和流变特性分析结果表明 SDF 和去除结合酚后的 SDF 单糖组成相同, 且都为假塑性非牛顿流体; 但相同剪切速率下, 去除结合酚后的 SDF 表观黏度大为降低, 这与其更加松散的结构有关。相同浓度下, 去除结合酚后 SDF 的 DPPH 自由基清除能力降低了 15.06%~29.02%, ABTS 阳离子自由基清除能力降低了 42.06%~78.98%。此外, 去除结合酚后 SDF 对 3 种益生菌的体外增殖作用也显著降低。上述结果证实, 结合酚与荔枝果渣可溶性膳食纤维的生物活性息息相关, 为荔枝果渣的开发利用提供理论基础。

**关键词:** 荔枝果渣可溶性膳食纤维; 结合酚; 结构; 功能性质

文章编号: 1673-9078(2023)08-206-212

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.8.0988

## Comparison of the Structure and Functional Properties of Soluble Dietary Fiber from Lychee Pomace before and after the Removal of Bound Phenolics

XU Hanting<sup>1,2</sup>, TANG Yuqian<sup>1\*</sup>, HU Tenggen<sup>2,3</sup>, YU Yuanshan<sup>2,3\*</sup>, YANG Jiguo<sup>1</sup>, CHEN Xiaowei<sup>2</sup>

(1. College of Food Sciences and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)  
(2. Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China) (3. Huagong Leah (Foshan) Biotechnology Co. Ltd., Foshan 528012, China)

**Abstract:** In this research, soluble dietary fiber (SDF) from litchi pomace was used as the raw material to study the changes in the structure and functional properties of SDF after the removal of the bound phenolics via alkaline hydrolysis. The results showed that the content of bound phenolics in SDF from litchi fruit residue was 4.53 mg GAE/g. The results of SEM examination showed that the structure of SDF became looser after the removal of bound phenolics; the results of Fourier transform infrared spectroscopy analysis showed that the main

引文格式:

许涵婷, 唐语谦, 胡腾根, 等. 荔枝果渣可溶性膳食纤维去结合酚前后结构和功能性质的比较[J]. 现代食品科技, 2023, 39(8): 206-212

XU Hanting, TANG Yuqian, HU Tenggen, et al. Comparison of the structure and functional properties of soluble dietary fiber from lychee pomace before and after the removal of bound phenolics [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(8): 206-212

收稿日期: 2022-08-07

基金项目: 广东省现代农业产业技术体系创新团队荔枝加工岗位专家项目(2022KJ107-3); 广东省农业科学院团队建设和人才培养专项(202109TD; R2020PY-JG009); 华南理工大学国家大学科技园顺德创新园区项目(KJYS2021KZ05)

作者简介: 许涵婷(1998-), 女, 在读硕士研究生, 研究方向: 食品质量与安全, E-mail: xuhanting@qq.com

通讯作者: 唐语谦(1979-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品质量与安全, 工业微生物, E-mail: yq7tang@163.com; 共同通讯作者: 余元善(1983-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工, E-mail: yuyuanshan2016@qq.com

components of SDF were pectins and hemicelluloses, and the removal of bound phenolics from SDF did not change the functional groups. The analysis results of monosaccharide composition and rheological properties showed that the monosaccharide compositions of SDF samples before and after the removal of bound phenolics remained the same, and both SDF dispersions were pseudoplastic non-Newtonian fluids; However, at the same shear rate, the apparent viscosity of the SDF sample after the removal of bound phenolics was greatly reduced, which was related to the looser structure of this SDF. At the same SDF concentration, the removal of bound phenolics led to the decreases of DPPH radical scavenging ability by 15.06%~29.02% and ABTS<sup>+</sup> radical scavenging ability by 42.06%~78.98%. In addition, the effect of SDF on the *in vitro* proliferation of three probiotics was also significantly reduced after the removal the bound phenolics. The above results confirmed that the bound phenolics were closely related to the bioactivities of soluble dietary fiber from lychee pomace, and provide a theoretical basis for the exploitation and utilization of litchi pomace.

**Key words:** soluble dietary fiber from lychee pomace; bound polyphenols; structure; functional nature

荔枝是一种具有传统食药价值的岭南佳果, 含多种对人体有益的生物活性成分<sup>[1]</sup>, 主要分布于我国南方地区, 我国荔枝的种植面积和产量均位列世界第一<sup>[2]</sup>。荔枝采收季节集中, 但采后易褐变和腐烂, 据统计, 荔枝每年有 20% 以上因腐烂变质造成损失<sup>[3]</sup>。随着农产品加工技术不断创新和发展, 荔枝加工产品的种类越来越丰富, 荔枝酒、荔枝果汁等荔枝饮品深受广大消费者喜爱, 但在荔枝加工过程中会产生大量的可食用的荔枝果渣, 产率为 40%~50%<sup>[4]</sup>。目前工业上荔枝榨汁后产生的荔枝果渣大多被丢弃, 造成环境的污染和资源浪费<sup>[5]</sup>。荔枝果渣富含膳食纤维等活性成分, 具有很高的营养价值, 可作为理想的膳食纤维来源, 值得高度开发利用<sup>[6,7]</sup>。

膳食纤维是具有 10 个或 10 个以上单体单位的碳水化合物聚合物, 其不能被内源性酶水解<sup>[8]</sup>。膳食纤维根据溶解性分为可溶性膳食纤维 (SDF) 和不可溶性膳食纤维 (Insoluble Dietary Fiber, IDF) 两部分<sup>[5]</sup>。SDF 可以溶于温水和热水中, 而 IDF 不溶于水, 二者均不能被人体消化系统水解<sup>[9]</sup>。研究表明膳食纤维可通过调节肠道菌群结构, 增加菌群多样性, 从而有利于机体代谢平衡<sup>[8]</sup>。例如 Zhu 等<sup>[10]</sup>的研究发现从甘薯渣中提取的 SDF 可以减少小鼠肠道中的气球菌属等可诱发炎症性疾病的有害细菌的丰度, 并促进具有抗炎作用的有益细菌如乳酸杆菌和粪杆菌的增殖。

多酚是一大类广泛存在于自然界、具有大量酚羟基结构单元的植物次生代谢产物<sup>[11]</sup>。按照结构分为类黄酮和非类黄酮化合物两大类<sup>[12]</sup>, 按性质可分为游离酚和结合酚。游离酚能够通过简单溶剂进行提取, 结合酚与植物基质共价结合, 不能被提取到水或有机溶剂<sup>[13]</sup>。许多研究已经报道了与游离酚类相比, 结合酚类更强的抗氧化能力<sup>[9]</sup>。当食物中的结合酚进入人体时先在胃和小肠中消化, 由于其不能被人体内酶系统消化, 后进入到结肠, 结肠中的肠道菌群降解植物基质的同时将其释放出来<sup>[13]</sup>。因此, 目前越来越多的研

究聚焦于膳食纤维中结合的多酚在调节人体肠道健康方面发挥的作用。

荔枝果渣富含膳食纤维和多酚类物质, 但目前关于荔枝果渣中可溶性膳食纤维及其结合酚的报道较少, 为了进一步探明结合酚对荔枝果渣可溶性膳食纤维的结构和功能性质的影响, 本研究以荔枝果渣中 SDF 为研究对象, 揭示了去除结合酚对 SDF 表面形貌、傅里叶红外、单糖组成、流变特性、抗氧化及益生活性的影响, 为荔枝果渣可溶性膳食纤维和结合酚在调控肠道菌群与防治疾病关系方面提供理论基础, 为提高荔枝副产物的高值化利用提供实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

荔枝果渣, 购于广州顺昌源绿色食品有限公司, 为荔枝 (品种为怀枝) 去皮去核榨汁后产生的果渣, 储存于 -20 °C 备用。Folin-Ciocalteu、中性蛋白酶 (100 U/mg)、 $\alpha$ -淀粉酶 (4 000 U/g), 购于上海源叶生物科技有限公司; 酿酒酵母 *RV002*, 购于安琪酵母股份有限公司; 单糖标准品, 美国 Sigma 公司; 氢氧化钠、DPPH、ABTS、碳酸钠、95%乙醇及其他试剂均为国产分析纯。本研究中, 嗜酸乳杆菌和植物乳杆菌、鼠李糖杆菌均由实验室保藏提供。

### 1.2 仪器与设备

PB-10 标准型 pH 计, 德国 Sartorius 公司; ALC-210.4 电子分析天平, 德国 ACCULAB 公司; JW-1042 低速离心机, 安徽嘉文仪器装备有限公司; SU8000 超高分辨场发射扫描电子显微镜, 日立高新技术公司; VERTEX70 红外光谱仪器, 德国 Bruker 公司; HWS24 电热恒温水浴锅, 上海一恒科学仪器有限公司; ST85B3-1 真空冷冻干燥机, 美国 Milirock 公司; XDW-6B 低温粉碎机, 济南达微机械有限公司;



LC-20A 高效液相色谱仪, 日本岛津公司; SW-CJ-2FD 无菌操作台, 苏净集团苏州安康空气技术有限公司; UV1800 紫外分光光度计, 日本岛津公司; SPX-250B-Z 生化培养箱、YXQ-LS-50S 型立式蒸汽灭菌锅, 上海博迅实业有限公司医疗设备厂。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 荔枝果渣 SDF 的制备

参考 Li 等<sup>[14]</sup>的方法略作调整。将荔枝果渣与蒸馏水 (1:20, *m/V*) 混合, 加入 0.02% (*m/m*) 活化的酿酒酵母 28 °C 下发酵 24 h。随后, 加入 0.2% (*m/m*, 2 000 U/g)  $\alpha$ -淀粉酶在 pH 值 6.0、60 °C、150 r/min 下水解 1 h。此后, 再加入 1.0% (*m/m*, 100 U/mg) 中性蛋白酶并在 pH 值 7.0、50 °C 下孵育 1.5 h。将处理过的混合物以 6 000 r/min 离心 10 min。上清液真空浓缩并以 4 倍体积的  $\phi=95\%$  乙醇在 25 °C 下放置 12 h。5 000 r/min 离心 10 min 后, 收集沉淀物用 85% 的乙醇反复洗涤后溶解在蒸馏水中, 通过真空旋转蒸发除去乙醇, 然后冷冻干燥, 得到荔枝果渣可溶性膳食纤维 (SDF)。

#### 1.3.2 脱酚可溶性纤维的制备

参考徐灼辉等<sup>[15]</sup>的方法略作调整。干燥的 SDF 称重, 按 1:20 (*m/V*) 的比例加入 4 mol/L 的 NaOH 溶液, 孵育 90 min。将样品以 8 000 r/min 离心 10 min, 保留上清液用于测量结合酚含量, 沉淀加水装入 300 U 的透析袋中透析至电导率和蒸馏水无差别后, 冻干即得去结合酚荔枝果渣可溶性膳食纤维记为 SDF-DF。

#### 1.3.3 结合酚含量测定

参照 Kwaw 等<sup>[16]</sup>的方法, 通过福林-酚试剂比色法测定结合酚的含量, 含量以没食子酸毫克当量表示。

#### 1.3.4 单糖组成

参考张启月等<sup>[17]</sup>的方法测定。准确称取 0.01 g 待测样品于螺纹顶空瓶, 加入 2 mL 2 mol/L 三氟乙酸, 100 °C 水解 5 h 后转至旋转瓶中。旋转蒸发至干燥后, 再加入 1 mL 甲醇旋转蒸发至干燥, 重复两次, 然后加入蒸馏水定容至 1 mL, 离心待用。采用外标法定量分析单糖含量, 称取一定量的标准品, 用水稀释至不同浓度衍生化处理后配置成混标制作标曲。

PMP 衍生处理: 取 100  $\mu$ L 样品液/标准单糖溶液于离心管中, 加入 200  $\mu$ L 0.5 mol/L PMP 甲醇溶液, 混匀后加入 300  $\mu$ L 0.3 mol/L NaOH 溶液, 混匀后于 70 °C 水浴 1 h, 冷却 10 min 后拿出, 再加入 300  $\mu$ L 0.3 mol/L HCl 溶液中和, 随后加入 1 mL 氯仿涡旋振荡萃取, 8 500 r/min 离心 10 min, 保留上清液, 重复萃取三次。上清液用 0.22  $\mu$ m 滤膜过滤后, 待上机。

检测条件: 色谱柱为 Wondasil C18 (4.6 mm $\times$

250 mm, 5  $\mu$ m); 流动相为 0.05 mol/L pH 值 6.85 磷酸盐缓冲溶液:乙腈=82:18 (*V/V*), 流速为 1.0 mL/min; 进样量为 20  $\mu$ L; 柱温为 30 °C; 波长为 250 nm。

#### 1.3.5 静态流变特性

样品表观粘度通过配备锥面几何系统 (直径 40 mm, 间隙 1 mm) 的 AR1500EX 流变仪测定。在稳定剪切试验中, 分析了在 0.1~100 s<sup>-1</sup> 剪切速率范围和 25 °C 下测量不同含量 (2%、4%和 8%, *m/V*) 样品溶液的表观粘度。

#### 1.3.6 扫描电子显微镜

用导电胶带将样品固定后对样品进行喷金处理, 于扫描电子显微镜 1 000 $\times$  观察样品表观结构, 并拍照采集图像。

#### 1.3.7 傅里叶变换红外 (Fourier Transform Infrared, FT-IR) 光谱

通过 Bruker Vertex 70, 在 370~4 000 cm<sup>-1</sup> 下扫描样品, 分辨率为 4 cm<sup>-1</sup>, 累积 32 次, 测定 FT-IR 光谱曲线。

#### 1.3.8 抗氧化活性测定

##### 1.3.8.1 DPPH 自由基清除能力测定

DPPH 自由基清除能力参照 Yan 等<sup>[18]</sup>的方法并作适当修改。用无水乙醇制备 130  $\mu$ mol/L 的 DPPH 溶液, 用去离子水配置浓度为 1、2、4、6、8、10 mg/mL 样品溶液。调零: 1 mL 样品稀释液+5 mL 乙醇; 空白: 1 mL 水+5 mL DPPH; 样品: 1 mL 稀释后的样品+5 mL DPPH, 测定 517 nm 吸光值。清除率按公式 (1) 计算。

$$C_1 = \left( 1 - \frac{A_{\text{样品1}}}{A_{\text{空白}}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中:

$C_1$ ——DPPH 自由基清除率, %;

$A_{\text{样品1}}$ ——1 mL 稀释后的样品+5 mL DPPH 溶液吸光度;

$A_{\text{空白}}$ ——1 mL 水+5 mL DPPH 溶液吸光度。

##### 1.3.8.2 ABTS<sup>+</sup>自由基清除率能力测定

ABTS 阳离子自由基清除能力参照李斌等<sup>[19]</sup>的方法并作适当修改。用去离子水制备 7.4 mmol/L 的 ABTS 溶液, 与 2.45 mmol/L 过硫酸钾溶液混合, 避光静置过夜。用无水乙醇稀释上述溶液直至在 734 nm 波长处吸光度为 0.70 $\pm$ 0.02。用去离子水配置质量浓度为 1、2、4、6、8、10 mg/mL 样品溶液, 取 0.1 mL 样品溶液与 3.6 mL 的 ABTS 稀释液混合, 避光条件下反应 20 min, 于 734 nm 波长处测定吸光度。

$$C_2 = \left( 1 - \frac{A_{\text{样品2}}}{A_{\text{空白2}}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中:

$C_2$ ——ABTS<sup>+</sup>自由基清除率, %;

$A_{\text{样品2}}$ ——0.1 mL 稀释后的样品+3.6 mL ABTS 溶液吸光度;

$A_{空白} - 0.1 \text{ mL 水} + 3.6 \text{ mL ABTS 溶液吸光度}$ 。

### 1.3.9 SDF 和 SDF-DF 的体外益生发酵

参考 Li 等<sup>[14]</sup>的方法。首先, 制备无碳源 MRS 基础培养基。然后, 将 1% (m/V) 样品添加到无碳源 MRS 基础培养基中, 而无碳源 MRS 基础培养基作为空白对照。所有 MRS 培养基均在 121 °C 高压灭菌 20 min 并冷却至 50 °C, 然后接种 2% (V/V) 的细菌悬浮液并在 37 °C 下恒温培养。取 0、12、24 h 菌液, 通过测量发酵液的 pH 值和 600 nm 处光密度 (OD) 来监测菌株的生长情况。

### 1.3.10 数据分析

每组实验三个平行, 数据计算采用 Microsoft Excel 2021, 实验结果表示为平均值±标准差。采用 SPSS 26.0 软件进行数据显著性分析, 并采用 Duncan 多范围检验方法, 以  $P < 0.05$  表示差异显著, 用 Origin 2021 软件绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 结合酚含量

本实验结果表明荔枝果渣可溶性膳食纤维中结合酚含量为 4.53 mg GAE/g, 龚小洁<sup>[20]</sup>通过碱水解测得怀枝果渣中结合酚的含量为 5.41 mg GAE/g, 徐灼辉<sup>[15]</sup>通过碱水解测得荔枝干果肉可溶性膳食纤维中结合酚的含量为 0.29~3.66 mg GAE/g。

### 2.2 SDF 和 SDF-DF 的微观结构

图 1 为 SDF 和 SDF-DF 的扫描电镜下的微观结构。SDF 和 SDF-DF 都呈碎片状, 但 SDF-DF 呈卷曲薄片, 结构更松散和碎裂, 这可能是由于碱水解时氢氧化钠的强氧化作用导致<sup>[21]</sup>, 在强碱性环境下 SDF 中许多以结合形式存在的活性物质被释放, 且 SDF 被碱水解出现部分碎裂<sup>[15]</sup>。结果表明结合酚的存在有利于维系 SDF 表面形貌的稳定<sup>[15]</sup>。

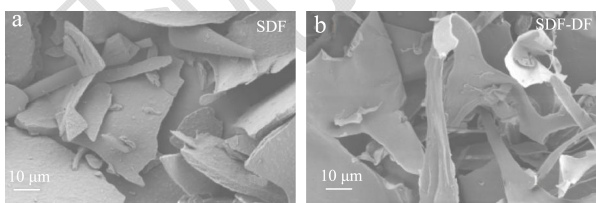


图 1 SDF 和 SDF-DF 的扫描电子显微镜图

Fig.1 The scanning electron microscopy of SDF and SDF after removal of bound polyphenols

### 2.3 SDF 和 SDF-DF 的 FT-IR 光谱分析

SDF 和 SDF-DF 的 FT-IR 光谱如图 2 所示。可以

看出, SDF 和 SDF-DF 的大多数特征键是相似的。3 431  $\text{cm}^{-1}$  附近的宽振动峰是 O-H 基团的伸缩振动峰, 1 200~1 400  $\text{cm}^{-1}$  范围内为 C-H 角振动引起的吸收峰, 这代表了碳水化合物骨架的典型结构<sup>[14]</sup>, 2 937  $\text{cm}^{-1}$  处为 C-H 糖亚甲基的伸缩振动<sup>[22]</sup>, 代表半纤维素的典型结构。1 748  $\text{cm}^{-1}$  是羧基生成的 C=O 的伸缩振动, 1 620  $\text{cm}^{-1}$  附近的吸收峰是 C=O 的伸缩振动吸收, 表明 SDF 和 SDF-DF 中存在多糖糖醛酸<sup>[23]</sup>。1 749.44、1 419.61、1 242.16  $\text{cm}^{-1}$  一般为低甲基果胶引起的吸收峰<sup>[17]</sup>。综上所述, 这些结果表明 SDF 和 SDF-DF 的主要成分为果胶和半纤维素, 在碱水解去除结合酚的过程中未出现主要的官能团转化, 这与徐灼辉<sup>[15]</sup>和 Liu 等<sup>[24]</sup>的结果一致。

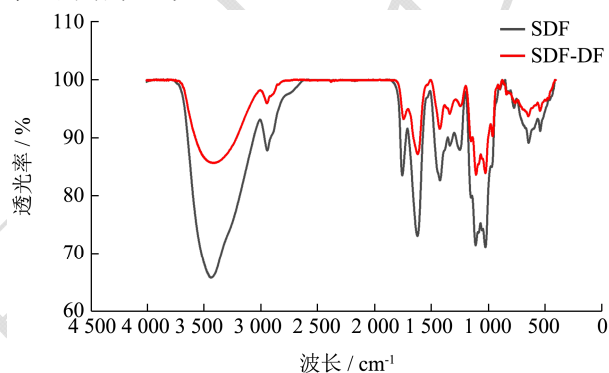


图 2 SDF 和 SDF-DF 的红外光谱图

Fig.2 Fourier transform infrared spectroscopy analysis of SDF and SDF-DF after removal of bound polyphenols

### 2.4 SDF 和 SDF-DF 的单糖组成

表 1 SDF 和 SDF-DF 中单糖含量 (mg/g)

Table 1 Monosaccharide content in SDF and SDF-DF

单糖种类	SDF	SDF-DF
甘露糖	16.65±0.06 <sup>a</sup>	6.9±0.05 <sup>b</sup>
核糖	21.55±0.2 <sup>a</sup>	16.91±0.11 <sup>b</sup>
鼠李糖	16.46±0.06 <sup>b</sup>	17.64±0.07 <sup>a</sup>
半乳糖醛酸	41.57±0.21 <sup>a</sup>	56.68±0.28 <sup>b</sup>
葡萄糖	10.34±0.00 <sup>a</sup>	6.9±0.04 <sup>b</sup>
半乳糖	36.88±0.03 <sup>a</sup>	36.82±0.01 <sup>a</sup>
阿拉伯糖	199.25±0.20 <sup>b</sup>	216.93±0.18 <sup>a</sup>
岩藻糖	1.32±0.05 <sup>a</sup>	1.28±0.01 <sup>a</sup>

注: 表中同行不同字母表示不同样品之间的差异显著 ( $P < 0.05$ )。

表 1 分析了 SDF 和 SDF-DF 的单糖的组成和含量。研究发现, SDF 和 SDF-DF 的单糖组成相同, 但部分单糖含量有差异。SDF 和 SDF-DF 中主要检测到了 8 种单糖, 其中阿拉伯糖的含量最高。SDF-DF 中半乳糖醛酸 (56.68 mg/g) 和阿拉伯糖 (216.93 mg/g)

含量显著高于 SDF ( $P < 0.05$ )。半乳糖醛酸、半乳糖、阿拉伯糖和鼠李糖是果胶的典型成分<sup>[25]</sup>, 果胶是一种重要的水溶性膳食纤维, 主链由半乳糖醛酸经  $\alpha$ -1,4-糖苷键链接形成, 侧链是由半乳糖、鼠李糖和阿拉伯糖等中性多糖组成<sup>[26]</sup>。碱水解去除结合酚的过程中可能促使了一部分可溶性半纤维素的降解, 使去酚后的 SDF 保留了更多的果胶结构。

### 2.5 SDF 和 SDF-DF 静态流变分析

如图 3 所示, SDF 和 SDF-DF 表观黏度随着剪切速率的增加而降低, 随着样品浓度的降低而降低, 呈现出剪切稀化现象, 这表明二者都为具有假塑性特性的非牛顿流体<sup>[14]</sup>; SDF 和 SDF-DF 的表观粘度也随着浓度的增加相应增加, 与 Feng 等<sup>[25]</sup>的实验结果一致。在相同浓度和相同剪切速率下, SDF 的表观黏度远大于 SDF-DF, 是由于 SDF 和 SDF-DF 在高剪切速率下分子骨架发生重排, SDF-DF 的微观结构更松散不能形成更细的网络从而导致黏度降低<sup>[14]</sup>, SDF 的功能性质很大程度上取决于黏度<sup>[17,27]</sup>。

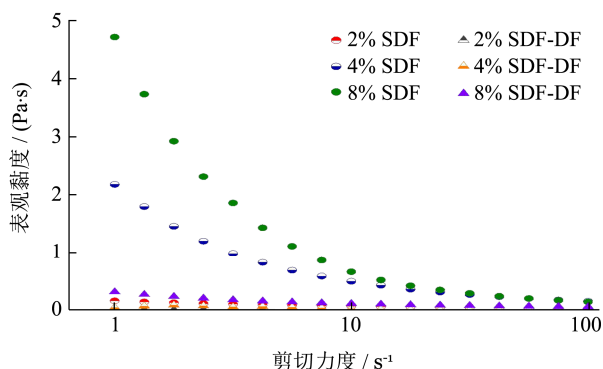


图 3 不同质量浓度 SDF 和 SDF-DF 水溶液的黏度曲线

Fig.3 The viscosity curves of SDF and SDF-DF aqueous solution with different mass concentrations

### 2.6 SDF 和 SDF-DF 抗氧化能力

本实验通过测定 ABTS 阳离子自由基清除能力和 DPPH 自由基清除能力来比较碱水解去除结合酚前后 SDF 的体外抗氧化活性。由图 4 和图 5 可以发现, 随着样品浓度的增加, SDF 和 SDF-DF 对 DPPH 自由基清除能力及对 ABTS 阳离子自由基清除能力逐渐增加。而 SDF 对 ABTS 阳离子自由基清除活性随浓度的变化没有显著变化 ( $P > 0.05$ ), 维持在 85.01%~90.59%, 显著高于 SDF-DF 的清除活性 (6.03%~48.53%)

( $P < 0.05$ ); 同时, SDF 的 DPPH 自由基清除活性在 56.13%~85.95%, 而 SDF-DF 的清除活性在 27.11%~70.88%之间。上述结果表明, SDF 较 SDF-DF 有更高的抗氧化活性, 这是由于结合酚被释放引起的, 有研

究表明结合酚的去除会影响胡萝卜膳食纤维的抗氧化活性<sup>[24]</sup>。

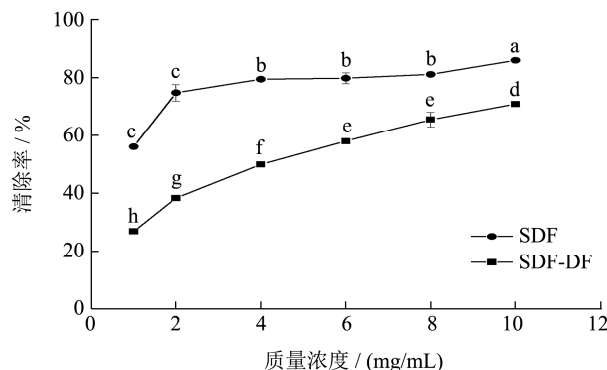


图 4 SDF 和 SDF-DF 的 DPPH 自由基清除能力

Fig.4 DPPH radical scavenging activities of SDF and SDF-DF

注: 图中的字母表示不同处理之间的差异显著 ( $P < 0.05$ )。

下图同。

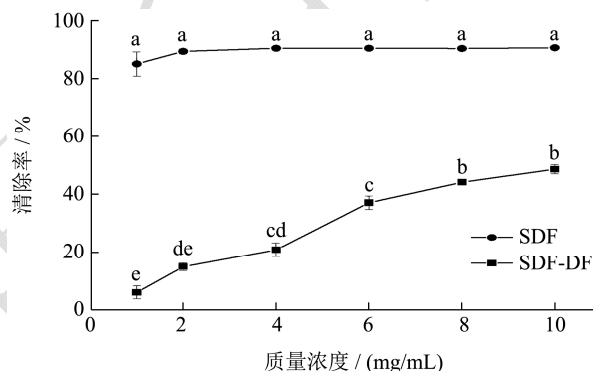


图 5 SDF 和 SDF-DF 的 ABTS 自由基清除能力

Fig.5 ABTS radical scavenging activities of SDF and SDF-DF

### 2.7 SDF 和 SDF-DF 体外益生活性

由图 6 和图 7 可知, 益生菌在 SDF 培养基中的生长速度在 0~12 h 较快, 在 12~24 h 生长速度趋于平缓; 相比于 SDF, 益生菌在以 SDF-DF 为碳源的培养基中生长速度较缓慢, 在无碳源培养基中几乎不生长 ( $P > 0.05$ )。在 SDF 培养基中, 益生菌的增长量远高于以 SDF-DF 为碳源的培养基 ( $P < 0.05$ ), 这可能是由于益生菌发酵 SDF 时释放出了结合多酚从而更好的促进益生菌的生长; 比较培养基中 pH 值的变化可以发现, SDF 培养基中 pH 值的降低程度显著高于 SDF-DF 培养基, 这是由于 SDF 培养基促进益生菌的生长效果更好, 益生菌的产酸量高于 SDF-DF 培养基 ( $P < 0.05$ )。

综上, 通过体外益生实验发现, 3 种益生菌在无碳源培养基中无明显增长, 在以 SDF 培养基中生长的最好, 并且 3 种益生菌在 SDF 和 SDF-DF 培养基中的生长情况以及 pH 值的变化具有显著差异。尽管不同的菌种对逆环境的耐受能力不同可能会导致其

对菌种的生长增殖产生影响<sup>[28]</sup>, SDF 对 3 种益生菌的促生长效果都显著优于 SDF-DF。结果表明结合酚的去除极大的影响了其益生活性, 这证实结合酚对可溶性膳食纤维的益生活性具有重要影响, 这与 Liu 等<sup>[24]</sup>的结论一致。

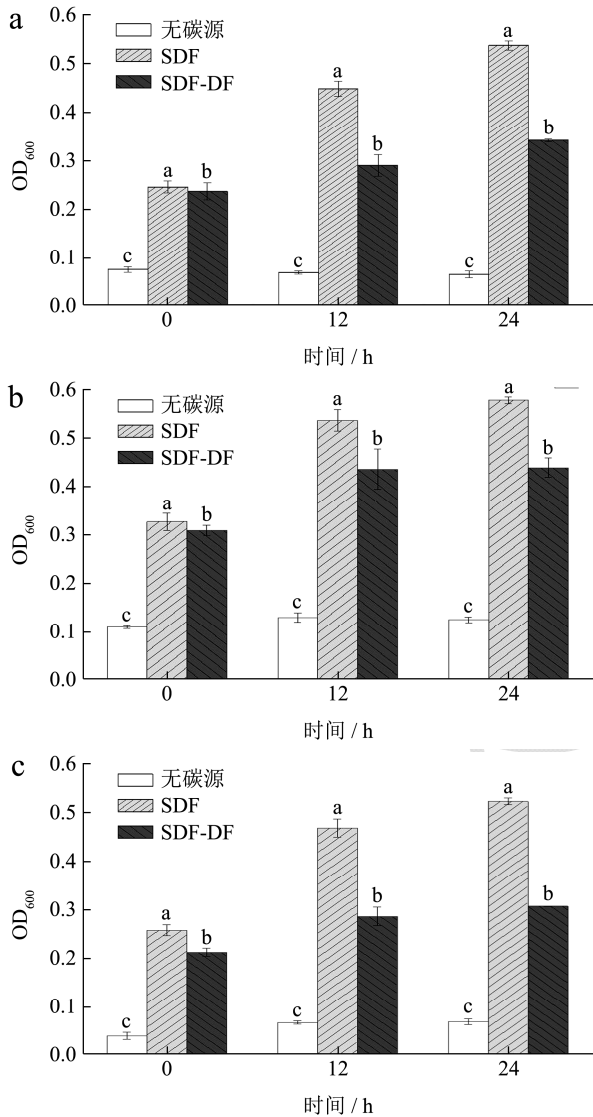


图 6 三种益生菌在不同碳源培养基中 OD<sub>600</sub> 的变化

Fig.6 Change of OD<sub>600</sub> of three probiotics in different carbon source medium

注: a-鼠李糖杆菌, b-嗜酸乳杆菌, c-植物乳杆菌。图 7 同。

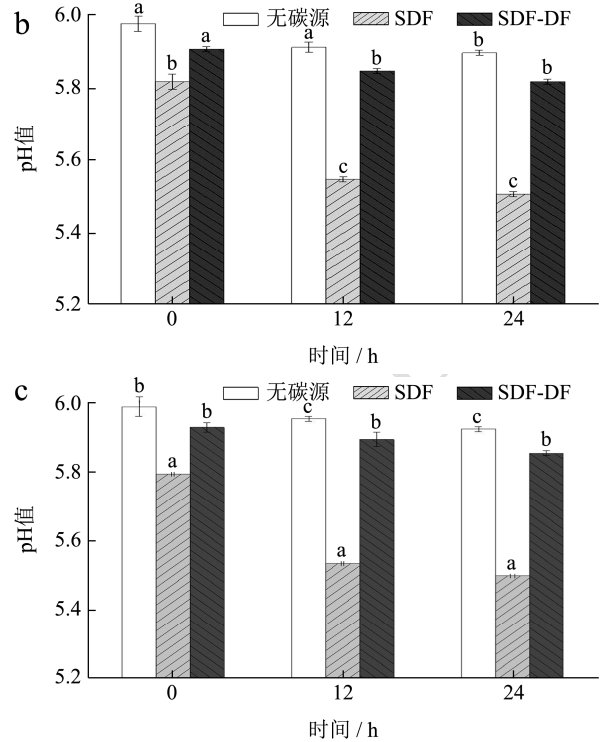
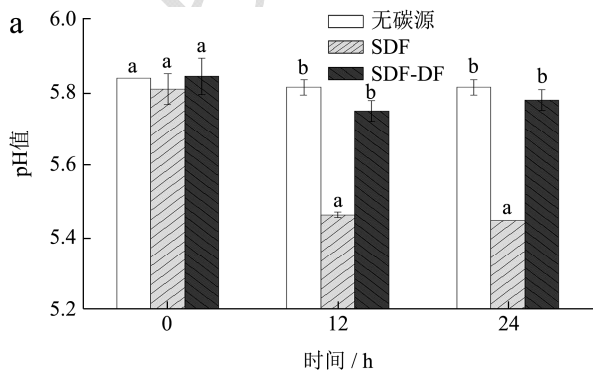


图 7 三种益生菌在不同碳源培养基中 pH 值的变化

Fig.7 Change of pH of three probiotics in different carbon source medium

### 3 结论

本文通过碱水解除去 SDF 中的结合酚, 并研究了去除结合酚前后 SDF 结构和功能性质的变化。碱水解除去结合酚后, SDF 的整体结构更加松散和碎裂, 但没有出现官能团的转化。SDF 和 SDF-DF 的单糖组成相同, 但 SDF-DF 更加疏松的结构使其表观黏度低于 SDF。SDF 去结合酚后, DPPH 自由基清除能力和 ABTS 阳离子自由基清除能力明显下降, 并且 3 种益生菌在 SDF-DF 培养基中的生长情况都不如 SDF 培养基, 表明结合酚在 SDF 的抗氧化活性和益生活性中起着重要作用。综上所述, 结合酚与荔枝果渣可溶性膳食纤维的营养价值息息相关, 本研究将为评价荔枝果渣可溶性膳食纤维作为肠道益生元提供理论依据。

### 参考文献

[1] 蒋黎艳, 罗思玲, 周旭, 等. 荔枝多酚的提取和纯化技术研究进展[J]. 果树学报, 2020, 37(1): 130-139.  
 [2] Chen H B. Litchi industry development report [J]. Modern Agricultural Equipment, 2018, 4: 22-24.  
 [3] Alves J A, Lima L C, Dias D R, et al. Effects of spontaneous and inoculated fermentation on the volatile profile of Lychee (*Litchi chinensis* Sonn) fermented beverages [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2010, 45(11):

- 2358-2365.
- [4] 郝森林,余元善,陈卫东,等.地衣芽孢杆菌无氧发酵对荔枝果渣理化性质的影响[J].饲料研究,2019,42(1):97-101.
- [5] Mckee L H, Latner T A. Underutilized sources of dietary fiber: A review [J]. *Plant Foods for Human Nutrition* (Dordrecht, Netherlands), 2000, 55(4): 285-304.
- [6] 李依娜,余元善,李璐,等.不同脱糖方式下荔枝果渣膳食纤维的理化特性比较[J].现代食品科技,2022,38(2):94-103.
- [7] 龚小洁,余元善,徐玉娟,等.荔枝汁中果肉沉淀物的营养成分分析及其稳定性研究[J].广东农业科学,2014,41(19):90-93.
- [8] 李丽娟,师风华,谭木秀,等.膳食纤维调节肠道菌群的作用机制研究进展[J].中国现代医生,2020,58(36):188-192.
- [9] C M Ajila, U J S Prasada Rao. Mango peel dietary fibre: Composition and associated bound phenolics [J]. *Journal of Functional Foods*, 2013, 5(1): 444-450.
- [10] ZHU Liuying, GAO Meiling, LI Hongyan, et al. Effects of soluble dietary fiber from sweet potato dregs on the structures of intestinal flora in mice [J]. *Food Bioscience*, 2021, 40(3): 100880.
- [11] 任彩君,吴黎明,王凯.膳食多酚对肠道菌群影响研究进展[J].食品工业科技,2022,43(1):400-409.
- [12] 卢烽,廖小军,胡小松,等.多酚对肠道微生物影响的研究进展及对多酚指示菌的探讨[J].食品工业科技,2018,39(16):330-335.
- [13] Pérez-Jiménez Jara, Torres Josep Lluís. Analysis of nonextractable phenolic compounds in foods: the current state of the art [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(24): 12713-12724.
- [14] LI Yina, YU Yuanshan, WU Jijun, et al. Comparison the structural, physicochemical, and prebiotic properties of litchi pomace dietary fibers before and after modification [J]. *Foods*, 2022, 11(3): 248.
- [15] 徐灼辉.荔枝干果肉膳食纤维-结合酚加合物结构表征及其润肠通便作用机制[D].广州:广州大学,2020.
- [16] Kwaw E, Ma Y, Tchabo W, et al. Effect of lactobacillus strains on phenolic profile, color attributes and antioxidant activities of lactic-acid-fermented mulberry juice [J]. *Food Chemistry*, 2018, 250: 148-154.
- [17] 张启月,张士凯,郝良卿,等.不同提取方法对樱桃酒渣水溶性膳食纤维结构、理化与功能性质的影响[J].食品科学,2021,42(7):98-105.
- [18] Xiaoguang Yan, Ran Ye, Ye Chen. Blasting extrusion processing: The increase of soluble dietary fiber content and extraction of soluble-fiber polysaccharides from wheat bran [J]. *Food Chemistry*, 2015, 180(1): 106-115.
- [19] 李斌,雷月,孟宪军,等.响应面试验优化超声波辅助提取蓝靛果多酚工艺及其抗氧化活性[J].食品科学,2015,36(22):33-39.
- [20] 龚小洁.荔枝果渣的乳酸菌发酵特性及其功能性果粉的加工工艺研究[D].南昌:江西农业大学,2015.
- [21] 王司琪,王佳佳,李泊铮,等.提取方法对玉米膳食纤维结构特征和功能特性的影响[J].食品科学,2022,43(24):93-101.
- [22] 朱珂,董文江,程金焕,等.咖啡果皮与不同来源可溶性膳食纤维结构及性质比较研究[J].热带作物学报,2023,44(2):394-404
- [23] Lifan Zhang, Xinqian Ye, Tian Ding, et al. Ultrasound effects on the degradation kinetics, structure and rheological properties of apple pectin [J]. *Ultrasonics-Sonochemistry*, 2013, 20(1): 222-231.
- [24] Shuai Liu, Mengyun Jia, Jiajun Chen, et al. Removal of bound polyphenols and its effect on antioxidant and prebiotics properties of carrot dietary fiber [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 93: 284-292.
- [25] Yuree Wandee, Dudsadee Uttapap, Petra Mischnick. Yield and structural composition of pomelo peel pectins extracted under acidic and alkaline conditions [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 87: 237-244.
- [26] 李晓娇,汪玉洁,杨丽华,等.不同提取和改性方式小粒咖啡果皮果胶的理化性质及其抗氧化活性[J].食品与发酵工业,2022,48(19):115-124.
- [27] 姚妹,韦沁伶,王鸿飞,等.水蜜桃渣可溶性膳食纤维的提取及其性能研究[J].食品与发酵工业,2022,48(22):101-109.
- [28] 尹立晨,童群义.改性豆渣膳食纤维的理化性质、结构及其益生活性研究[J].食品与发酵工业,2022,48(3):141-148.