

莲藕可溶性膳食纤维与多酚复合物的稳定性及脂肪吸附活性研究

雷丹^{1,2}, 李军胜^{1,2}, 李书艺^{1,2,3*}, 祝振洲^{1,2,3}, 何静仁^{1,2,3}

¹ 武汉轻工大学食品科学与工程学院 武汉 430023

² 湖北省农产品加工与转化重点实验室 武汉 430023

³ 武汉轻工大学食品科学与工程学院现代产业学院 武汉 430023)

摘要 为研究莲藕可溶性膳食纤维与多酚复合物的降脂活性,采用离体试验模拟不同温度、pH 值环境,探讨可溶性膳食纤维-多酚复合物的稳定性及对油脂、胆固醇、胆酸盐的吸附能力和阳离子交换能力。结果表明:复合物的稳定性随温度、pH 值的升高而降低;可溶性膳食纤维-多酚复合物对油脂的吸附能力比可溶性膳食纤维及物理混合物好,效果极显著($P<0.01$),且对饱和脂肪与不饱和脂肪的吸附表现出相同的趋势。在模拟环境溶液 pH 7.0 条件下,复合物对胆固醇的吸附效果比可溶性膳食纤维好($P<0.05$),且复合物在模拟的肠道环境中(pH=7.0)对胆固醇的吸附量明显高于模拟的胃环境(pH=2.0)。此外,可溶性膳食纤维与多酚的相互作用显著改善了可溶性膳食纤维对胆酸盐的吸附效果($P<0.01$),提高了可溶性膳食纤维的阳离子交换能力。

关键词 可溶性膳食纤维-多酚复合物; 稳定性; 吸附能力

文章编号 1009-7848(2022)02-0031-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.02.004

我国传统膳食主要是植物性食物,然而,随着经济和工业的高速发展,人民的生活水平不断提高,饮食结构和膳食水平发生改变,过量糖类、脂肪及蛋白质的摄入及饮食的精细化导致高血糖、高血压、肥胖等代谢疾病患病率显著增高^[1]。随着食品营养学的发展,人们认识到谷物、蔬菜和水果等食物中富含的膳食纤维虽不能被人体消化吸收,但对人体有很好的保健作用并起到多种疾病的预防作用^[2]。膳食纤维被称为“第七类营养素”,具有很强的持水性、膨胀性以及吸附有机分子和交换阳离子等能力,在人体健康中发挥着重要作用,如降低血浆胆固醇,改善血糖生成,控制体重,降血压和预防心脑血管等疾病^[3-5]。莲藕中含有丰富的膳食纤维(Dietary fiber, DF),藕皮、藕节中的 DF 含量分别为 21.14%和 29.35%,根据 DF 的溶解性不同可将其分为水不溶性膳食纤维(Insoluble dietary fiber, IDF)和水溶性纤维(Soluble dietary fiber, SDF)^[6-8]。食物中的 IDF 具有显著增

加粪便体积和质量,促进排便,预防结肠癌的功能,而 SDF 的持水力高,黏性大,能够作为肠道微生物的基质,调节肠道菌群,降低餐后血糖和吸附脂肪、胆固醇等,增加粪便中脂肪及胆固醇的排出量,促进胆固醇转化为胆酸,降低脂肪及胆固醇的吸收^[9]。

Macagnan 等^[10]发现摄入高含量的多酚会为机体带来健康益处,这与多酚的降糖、改变肠道微生物、降血脂、抗肿瘤特性有关。食物基质中的部分酚类化合物可从胃肠道上部释放出来,直接被消化吸收,部分酚类化合物与 SDF 结合通过胃肠道上部,而这些未被小肠吸收的酚类化合物会在结肠中释放^[11-12]。酚类化合物可在一定程度上抑制脂质的消化,并在肠道内吸附胆酸盐和减少脂肪的吸收,使机体保持健康^[13]。研究表明莲藕中主要的酚类化合物包括儿茶酚、没食子酸、儿茶素、咖啡酸、香豆酸、白藜芦醇、芦丁、表儿茶素、绿原酸等,莲藕膳食纤维与这些酚类化合物常以结合态存在,可选择含量较大且不同构型的没食子酸与儿茶素作为研究对象,探究可溶性膳食纤维与多酚之间的相互作用及复合物的功能特性^[14]。

多糖与多酚等分子在食品加工过程中容易发生物理、化学反应,其非共价相互作用由氢键、静电吸引力、范德华力、疏水相互作用的组合共同驱

收稿日期: 2021-02-02

基金项目: 湖北省高校优秀中青年科技创新团队项目(T2020012);全国粮食行业青年拔尖人才自主选题项目

作者简介: 雷丹(1996—),女,硕士生

通信作者: 李书艺 E-mail: lishuyiz@sina.com

动,改变多酚的功能特性,影响食品的感官品质和营养价值^[15]。在体内代谢中,多糖与多酚形成的复合物能够改善多酚的性质,如谢吉敏^[16]利用环糊精衍生物包合多酚类物质,提高了多酚的溶解度、稳定性以及生物利用度。Costa等^[17]评估了多酚物质儿茶素、阿魏酸、咖啡酸分别与多糖类物质纤维素、木聚糖间的相互作用,发现这两种膳食纤维不会降低酚类化合物的生物适应性,且摄入适当的膳食纤维与多酚能够显著改善小鼠体内高脂高血糖等症状。尽管多糖与多酚相互作用会影响多酚的功能特性,然而关于SDF与多酚相互作用对油脂吸附特性的影响鲜见报道。本试验基于多酚与多糖的非共价相互作用,制备莲藕SDF与多酚的复合物,研究复合物对油脂、胆固醇吸附特性和阳离子交换能力的影响,以促进莲藕中活性资源的综合利用,为SDF-多酚复合物在功能性食品中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

莲藕(品种为“鄂莲五号”3735),武汉菱湖净菜中心;没食子酸(Gallic acid, GA)(纯度95%)、儿茶素(Catechin, CC)(纯度95%),上海源叶生物有限公司;花生油、猪油,购买于武汉常青花园武商量贩超市;胆酸钠(分析纯级),天津化工试剂集团;所有的酸均为分析纯级。

ME104E 万分之一电子分析天平,梅特勒-托利多仪器有限公司;SHZ-82 恒温摇床,国华仪器公司;T6 紫外分光光度计,北京普析通用仪器公司。

1.2 试验方法

1.2.1 莲藕中可溶性膳食纤维的提取 根据 GB/T 5009.88-2014《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》中的方法提取莲藕中的 SDF。

1.2.2 可溶性膳食纤维与多酚复合物、混合物的制备 取可溶性膳食纤维 120 mg,溶解于 60 mL 蒸馏水中,在 80 °C 下磁力搅拌 2 h 至完全溶解。冷却至室温后分别加入 30 mL 1 mg/mL GA 和 CC 溶液,混合均匀后将混合液转入预先处理好的透析袋(截留尺寸为 1 000 u)中,再将透析袋放入装有 500 mL 蒸馏水的烧杯中,控制反应温度,透析

至吸附平衡,以透析袋外游离的 GA 或 CC 在波长 280 nm 处的吸光值恒定不变为平衡终点^[18]。取出透析袋中溶液,经醇沉、冷冻干燥得到 SDF-GA 复合物/SDF-CC 复合物,并用福林酚法测得复合物中的总酚含量。

物理混合物的制备方法如下:按照醇沉干燥后得到的复合物中 SDF 与 GA 质量比为 69.4:1。称取 SDF 与 GA 粉末,将二者的固体粉末混合均匀得到 SDF 和 GA 的物理混合物;同样方法制备 SDF 与 CC 质量比为 56.2:1 的物理混合物。

1.2.3 复合物中酚类物质稳定性测定

1.2.3.1 热稳定试验 参考羊芹^[19]的方法,改用蒸馏水配置一定质量浓度的复合物样品溶液(1 mg/mL),分别取 0.5 mL 样品溶液加入试管中避光,于 20,30,40,50,60 °C 中水浴加热处理,1 h 后测定其总酚含量。

1.2.3.2 pH 值稳定性试验 分别配置 pH 值为:2.0,3.0,4.0,5.0,6.0,7.0 的磷酸缓冲液,再用不同 pH 值的缓冲液溶解样品,制成质量浓度为 1 mg/mL 不同 pH 值的样品溶液,装入试管中避光,水浴恒温(30 °C)下,1 h 后测定其总酚含量。

1.2.4 复合物及混合物对油脂的吸附试验

1.2.4.1 饱和脂肪的吸附 采用王崇队等^[20]和陈亚非等^[21]的试验方法,测定复合体对含油脂物质的吸附量。准确称取 5.000 g 样品,置于烧杯中,加入饱和脂肪 100 mL,搅拌均匀,加入 pH 2.0 的盐酸水溶液 50 mL,于恒温振荡摇床 37 °C 振荡 1 h,4 000 r/min 离心 20 min,去上层油,滤纸吸干残渣游离的脂肪,称重。油脂的吸附量按下式计算:

$$Q(\text{g/g}) = \frac{m_1 - m_2}{m_3} \quad (1)$$

式中, Q ——油脂的吸附量,g/g; m_1 ——所用油的质量,g; m_2 ——游离油的质量,g; m_3 ——样品的质量,g。

1.2.4.2 不饱和脂肪的吸附试验 准确称取 5.000 g 样品,置于烧杯中,加入不饱和脂肪 100 mL,搅拌均匀,加入 pH 2 的盐酸水溶液 50 mL,于恒温振荡摇床 37 °C 振荡 1 h,4 000 r/min 离心 20 min,去上层油,滤纸吸干残渣游离的脂肪,称重。计算公式如(1)式所示。

1.2.5 复合物及混合物对胆固醇的吸附试验 采

用邻苯二甲醛法比色法测定胆固醇含量。取新鲜鸡蛋蛋黄,用 9 倍量蒸馏水充分搅打成乳液,准确称取 0.500 g 样品于 50 mL 锥形瓶中,加入 50 g 稀释蛋黄,搅拌均匀,调 pH 值至 2.0(胃环境)或 7.0(小肠环境),放置在 37 °C 恒温摇床中震荡 2 h, 4 000 r/min 离心 20 min,取上清液 0.04 mL,用蒸馏水补齐至 0.4 mL,加入 1 mg/mL 邻苯二甲醛溶液 0.2 mL,混合酸(90%醋酸加等体积浓硫酸)4.0 mL,混匀后静置 10 min,在波长 550 nm 处比色测量吸光值^[22-23]。以胆固醇为标准品,按照相同方法测定吸光值,并绘制标准曲线 $y=21.837x+0.0241$, $R^2=0.9958$ 。

1.2.6 复合物及混合物胆酸盐的吸附试验 分别精确称取各样品 0.2000 g 置于具塞试管中,加入 1 mL 60%冰醋酸制备的 1 mg/mL 胆酸钠溶液,再分别加入新制的糠醛溶液 1.0 mL,冰水浴 5 min,再加入 13 mL 硫酸溶液(硫酸 50 mL+蒸馏水 65 mL),混匀,在 70 °C 水浴 10 min,然后迅速冰水浴 2 min 后于波长 605 nm 处测吸光值^[21,24]。以胆酸钠为标准品,按照相同方法制备标准曲线为 $y=0.308x+0.0668$, $R^2=0.9956$ 。

1.2.7 复合物及混合物的阳离子交换试验 准确称取 SDF 与多酚复合物样品 300 mg,溶解于 30 mL 0.01 mol/L HCl 溶液中,在 4 °C 下过夜,用 0.1 mol/L NaOH 滴定,记录 NaOH 消耗体积和溶液 pH 值变化,作 VNaOH-pH 关系图^[24-25]。以不加样

品的 30 mL 0.01 mol/L HCl 溶液做空白。

1.3 数据分析

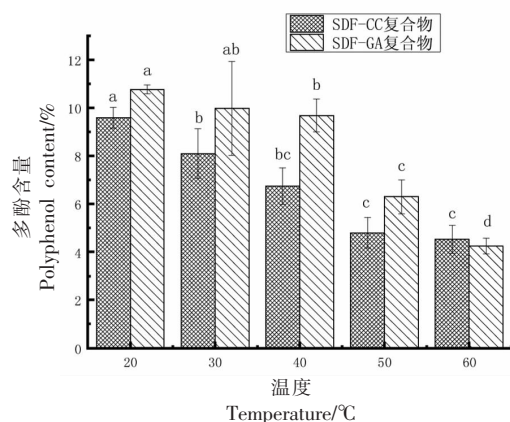
每组试验设置 3 个平行,结果取平均值,采用 Excel,Origin 9.0 作图和 SPSS 19.0 进行统计学分析,差异显著水平 $P<0.05$ 与非常显著 $P<0.01$ 。

2 结果与分析

2.1 复合物中酚类物质的稳定性

2.1.1 温度对热稳定性影响 如图 1 所示,随着温度升高,复合物中的总酚含量逐渐降低。在 20~40 °C 范围内多酚含量变化不大,温度升高到 40 °C 以上 SDF-CC 复合物中酚类化合物含量迅速降低 4.80%,而 SDF-GA 复合物中的酚类含量降低 4.47%,这种酚类含量随温度变化的结果与李利华等^[26]及矫馨瑶等^[27]的结论一致。SDF-CC 复合物中酚类化合物的含量比 SDF-GA 复合物降低快,这是由于具有更多羟基数目的 CC 比 GA 在加热情况下更容易氧化。郑燕菲等^[28]和赵玉等^[29]发现多酚置于较高温度环境下会发生裂解等反应,这是因为具有不饱和键的多酚类化合物会发生氧化聚合被降解,且羟基的数目与其还原性的强弱有关,酚羟基数目越多越易受热氧化,且温度越高氧化发生越快,酚类含量损失越大。

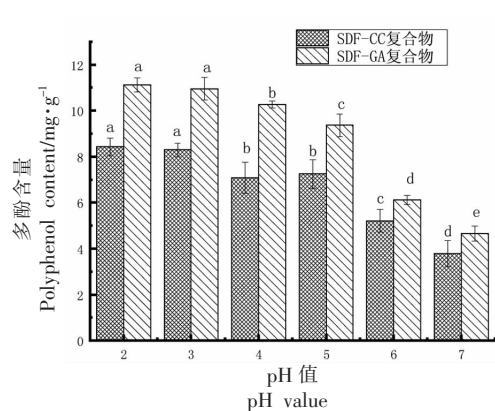
2.1.2 pH 值对复合物稳定性的影响 如图 2 所示,在不同 pH 值条件下,两种复合物酚类化合物含量的变化表现出相同的趋势,复合物中的酚类



注:图中 a,b,c,d 表示平均值在同水平下($n=3$)的结果具有显著性差异($P<0.05$)。

图 1 不同温度对复合物中酚类物质的稳定性影响

Fig.1 Effect of different temperatures on the stability of phenolic compounds in complex



注:图中 a,b,c,d,e 表示平均值在同水平下($n=3$)的结果具有显著性差异($P<0.05$)。

图 2 不同 pH 值对复合物中酚类物质稳定性的影响

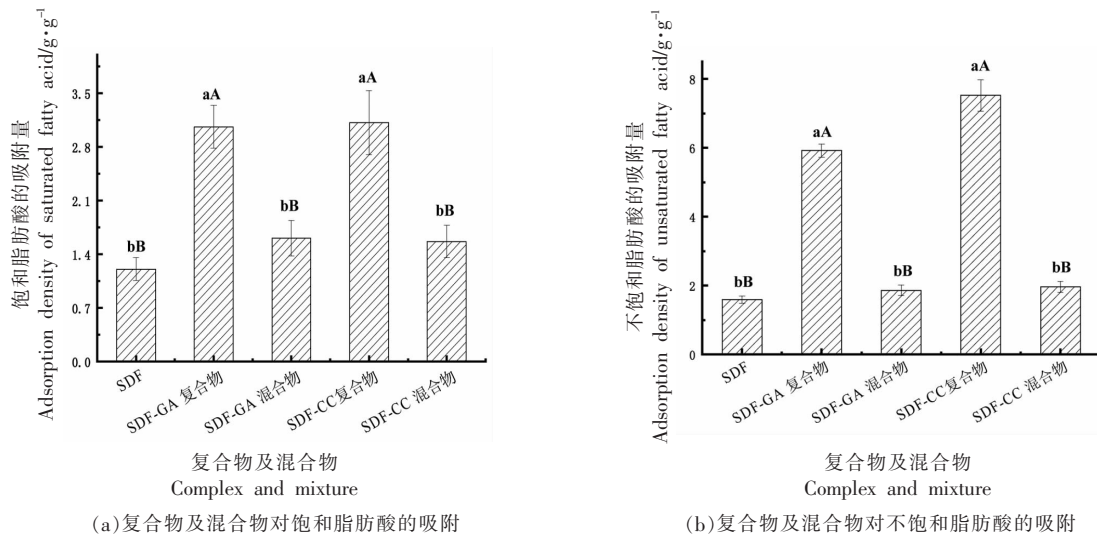
Fig.2 Effect of different pH value on the stability of phenolic compounds in complex

在较强的酸性环境下较为稳定,体系 pH 值大于 5.0 后复合物中的酚类含量降低较明显,SDF-GA 复合物总酚含量减少 1.76%,SDF-CC 复合物中酚类含量降低 1.17%。这与高凝轩等^[30]发现多酚在 pH 2.0~3.0 范围最为稳定,pH 值大于 5.0 以后多酚的保留率显著降低结果一致。两种酚类化合物对于不同的 pH 值溶液的稳定性差异,可能是负载的酚类 CC 与 GA 结构中酚羟基数目多少与结构的差异,另外由于多酚中含有大量的羟基,呈弱酸性,所以在酸性环境下较为稳定。席利莎等^[31]在不同 pH 值条件下对甘薯茎叶进行加工,发现甘薯茎叶中多酚的稳定性在中性和弱酸性体系中较好。

2.2 复合物对油脂的吸附作用

改性可溶性膳食纤维在胃肠道内黏性增大,膨胀后产生饱腹感可减少总能量的摄入,吸附脂肪后延缓脂肪的消化吸收,抑制脂肪的摄入,从而达到降脂作用^[32]。复合物对油脂的吸附作用如图 3a 所示,SDF、SDF-GA 复合物、SDF-GA 物理混合

物、SDF-CC 复合物及 SDF-CC 物理混合物对饱和脂肪的吸附量分别为 (1.20 ± 0.15) 、 (3.06 ± 0.28) 、 (1.61 ± 0.23) 、 (3.12 ± 0.42) g/g 和 (1.57 ± 0.21) g/g;对不饱和脂肪的吸附量分别为 (1.60 ± 0.10) 、 (5.92 ± 0.19) 、 (1.87 ± 0.16) 、 (7.52 ± 0.46) g/g 和 (1.96 ± 0.16) g/g。由结果可知,两复合物对油脂的吸附量明显($P<0.01$)比 SDF 大,而两物理混合物对油脂的吸附效果与 SDF 相比无明显区别。SDF-CC 复合物与 SDF-GA 复合物对不饱和脂肪的吸附显著强于饱和脂肪,原因可能是复合物易与不饱和键中的氢原子相互吸引和结合。在前期试验中发现复合物的粒径小于混合物的粒径,且其对油脂的吸附量大小与粒径大小有相关性,这种由于复合物粒径较小对脂肪的吸附量大的结果与 Raghavendra 等^[33]的结论一致。Raghavendra 等^[33]发现椰子渣膳食纤维的粒度减小,其水合性能及脂肪吸收能力反而增大,这是由于随着粒度减小其表面积、总孔体积变大,导致其对脂肪的吸附容量变大。



注:图中 a,b,c 表示平均值在同水平下($n=3$)的结果具有显著性差异($P<0.05$);图中 A,B,C 表示平均值在同水平下($n=3$)的结果具有极显著性差异($P<0.01$)。

图 3 复合物及混合物对不同脂肪酸的吸附能力

Fig.3 Adsorption capacity of complex and mixture for different fatty acids

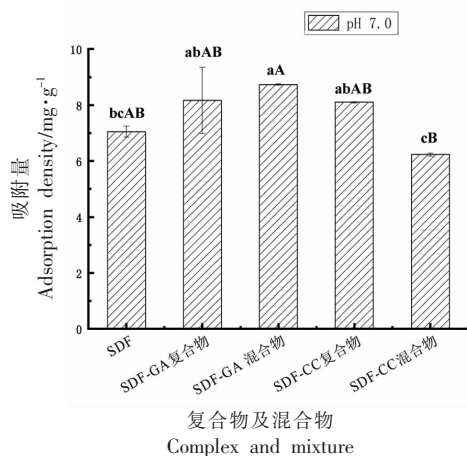
2.3 复合物对胆固醇的吸附作用

膳食纤维通过刺激血浆和肝脏中的胆固醇使其转变成胆酸,并与胆酸结合防止其重吸收,进而抑制胆固醇的合成,增加粪便中胆固醇的含量,从而降低体内胆固醇^[34-35]。如图 4 所示,模拟环境溶

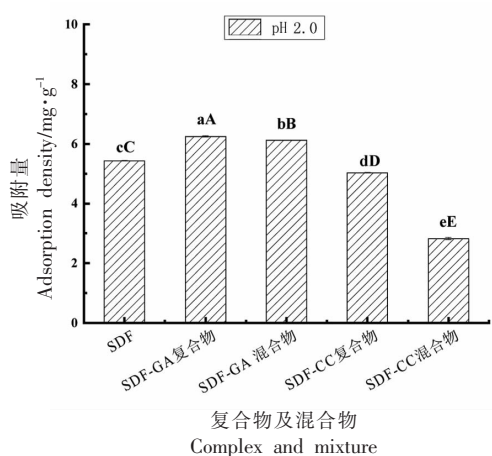
液在 pH 7.0 条件下,SDF、SDF-GA 复合物、SDF-GA 混合物、SDF-CC 复合物及 SDF-CC 混合物对胆固醇的吸附量分别为 (7.05 ± 0.19) 、 (8.17 ± 1.12) 、 (8.73 ± 0.02) 、 (8.09 ± 0.02) mg/g 和 (6.23 ± 0.05) mg/g,复合物对胆固醇的吸附效果极显著高于 SDF($P<$

0.01)。在 pH 2.0 时对胆固醇的吸附量分别为 (5.43 ± 0.01) , (6.25 ± 0.02) , (6.12 ± 0.01) , (5.03 ± 0.01) mg/g 和 (2.83 ± 0.04) mg/g, 这说明不同多酚与 SDF 之间相互作用会改变 SDF 对胆固醇的吸附能力, 且复合物在中性条件下对胆固醇的吸附量比

酸性条件下的高。周笑犁等^[36]和杨振寰^[37]发现可溶性膳食纤维对胆固醇的吸附能力与体系的酸碱性有较大的关系, 且在中性条件下膳食纤维对胆固醇的吸附量比在酸性条件大。



(a) pH=7 时复合物及混合物对胆固醇的吸附



(b) pH=2 时复合物及混合物对胆固醇的吸附

注:图中 a,b,c 表示平均值在同水平下 ($n=3$) 的结果具有显著性差异 ($P<0.05$); 图中 A,B,C 表示平均值在同水平下 ($n=3$) 的结果具有极显著差异 ($P<0.01$)。

图 4 复合物及混合物对胆固醇的吸附能力

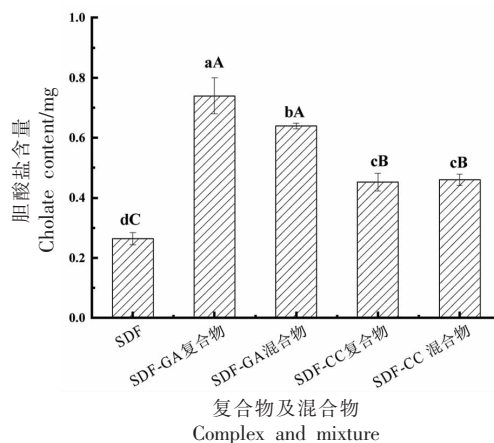
Fig.4 Adsorption capacity of complex and mixture for cholesterol

2.4 复合物对胆酸盐吸附作用

胆酸盐是指人体和动物胆汁中由胆固醇衍生的具有甾核结构的一类两性大分子, 胆酸盐被膳食纤维吸附排出体外, 从而对脂肪和胆固醇的消化吸收起重要作用^[35,38]。如图 5 所示, SDF 对胆酸钠的吸附量最小, SDF-GA 复合物对胆酸钠的吸附量高于 SDF-GA 物理混合物 ($P<0.05$), 而 SDF-CC 复合物对胆酸钠的吸附作用与 SDF-CC 物理混合物无明显区别。结果表明, 酚类的存在能显著性提高 SDF 对胆酸钠的吸附作用, 且吸附量大小与酚类化合物种类有关。胡凯等^[38]通过体外模拟不同茶叶结合胆酸钠的试验, 发现茶多酚结合胆酸盐的能力与茶多酚含量成正相关。刘淑敏等^[39]在模拟 pH 值与尿素对胆酸盐吸附试验中, 同样发现绿茶多酚是绿茶浸提液中结合胆酸盐的功能成分, 且主要相互作用力是静电引力与氢键作用。

2.5 复合物对阳离子交换能力

阳离子交换能力是膳食纤维维持肠道 pH 值稳定和保持离子浓度平衡的一种能力, 膳食纤维



注:图中 a,b,c 表示平均值在同水平下 ($n=3$) 的结果具有显著性差异 ($P<0.05$); 图中 A,B,C 表示平均值在同水平下 ($n=3$) 的结果具有极显著差异 ($P<0.01$)。

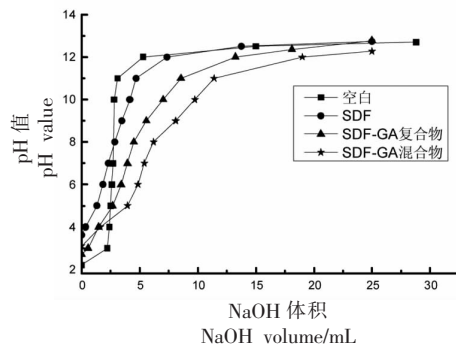
图 5 复合物及混合物对胆酸盐的吸附能力

Fig.5 Adsorption capacity of complex and mixture for cholate

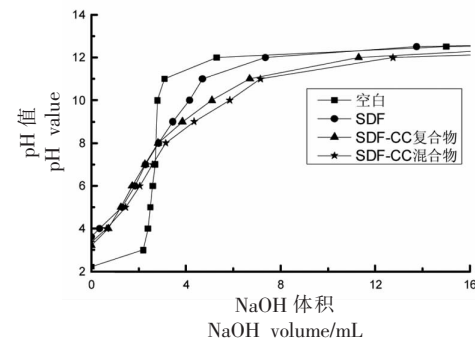
与酚类化合物的分子结构带有一些含有羧基和羟基的侧链基团, 侧链基团中的羧基和羟基可以与

弱酸性阳离子实现可逆交换^[24,40]。曲鹏宇等^[3]试验发现曲线斜率越小表示SDF的阳离子交换能力越强。如图6a所示,各组物质对阳离子的交换能力依次为SDF-GA物理混合物>SDF-GA复合物>SDF,图6b所示各组物质对阳离子的交换能力依次为SDF-CC复合物>SDF-CC物理混合物>SDF,

表明酚类加入可以显著提高SDF的阳离子交换能力。这是因为SDF与酚类化合物之间相互作用以一定的方式连接改变了复合物的部分性质,复合物比SDF中维持溶液的pH值的基团多,使得复合物维持溶液pH值能力显著高于SDF。



(a)SDF-GA复合物及混合物的阳离子交换能力



(b)SDF-CC复合物及混合物的阳离子交换能力

图6 复合物及混合物的阳离子交换能力

Fig.6 Cation exchange capacity of complex and mixture

3 结论

通过体外模拟试验可知温度、pH值对莲藕可溶性膳食纤维与多酚复合物的稳定性有显著影响,随着温度的不断升高,复合物中多酚含量逐渐下降。在极酸的环境条件下复合物中的多酚类物质较稳定,随着pH值升高酚类物质显著性降低。另外,SDF与酚类化合物之间的相互作用显著增强了SDF对油脂、胆固醇、胆酸盐的吸附能力和阳离子交换能力,且复合物对不饱和油脂的吸附量强于饱和油脂。综上所述,莲藕可溶性膳食纤维与多酚间的相互作用在降脂、降胆固醇等方面有积极的保健作用。

参 考 文 献

- [1] 刘美艳. 辅助降血脂功能因子研究进展[J]. 肉类研究, 2010(11): 83-86.
LIU M Y. Advances in research of functional factors with auxiliary lipid-lowering effect[J]. Meat Research, 2010(11): 83-86.
- [2] 郑文新, 刘占英, 石雅丽, 等. 可溶性膳食纤维提取的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(27): 107-109, 202.
ZHENG W X, LIU Z Y, SHI Y L, et al. Research

progress on extraction of soluble dietary fiber[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(27): 107-109, 202.

- [3] 曲鹏宇, 李丹, 李志江, 等. 膳食纤维功能、提取工艺及应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(19): 218-224.
QU P Y, LI D, LI Z J, et al. Research progress on function, extraction process and application of dietary fiber[J]. Food Research and Development, 2018, 39(19): 218-224.
- [4] 白青云, 管爱萍. 莲藕膳食纤维的特性与提取工艺研究[J]. 淮阴工学院学报, 2007, 16(1): 56-60.
BAI Q Y, GUAN A P. Study on the technology of dietary fiber extraction from lotus root and its functional properties[J]. Journal of Huaiyin Institute of Technology, 2007, 16(1): 56-60.
- [5] 谢碧霞, 李安平. 膳食纤维[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 18-19.
XIE B X, LI A P. Dietary fibre[M]. Beijing: Beijing Science Publishing House, 2006: 18-19.
- [6] 李慧娜. 莲藕渣中膳食纤维的提取及其功能活性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
LI H N. Study on preparation of dietary fiber from lotus root dregs and its bioactivity[D]. Wuhan: Huazhong Agriculture University, 2009.

- [7] 权美平, 侯云云. 可提取膳食纤维的多种原材料比较及其在生产中的应用[J]. 江苏调味副食品, 2014, 137(2): 18-20.
QUAN M P, HOU Y Y. Comparison and application of various materials for extracting dietary fiber [J]. Jiangsu Condiment and Subsidiary Food, 2014, 137(2): 18-20.
- [8] 贾立冬. 膳食纤维在食品中的应用进展[J]. 农产品加工, 2019, 7(13): 89-90, 93.
JIA L D. Application progress of dietary fiber in food[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2019, 7(13): 89-90, 93.
- [9] 修建成, 曹荣安, 孔保华, 等. 膳食纤维的生理功能及应用现状[J]. 农产品加工(学刊), 2005, 42(8): 48-50, 53.
XIU J C, CAO R A, KONG B H, et al. Physiological function and application of dietary fiber[J]. Farm Products Processing, 2005, 42(8): 48-50, 53.
- [10] MACAGNAN F T. Dietary fibre: The scientific search for an ideal definition and methodology of analysis, and its physiological importance as a carrier of bioactive compounds[J]. Food Research International, 2016, 85(4): 144-154.
- [11] LI X X, JIAO W X, ZHANG W L, et al. Characterizing the interactions of dietary condensed tannins with bile salts[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(34): 9543-9550.
- [12] 李星亚, 汪东风, 王林戈, 等. 茶多糖和茶多酚对糖尿病的协同防治作用[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(11): 72-76.
LI X Y, WANG D F, WANG L G, et al. Synergistic-protective effects of tea polysaccharides and tea polyphenols on diabetes[J]. Food Research and Development, 2013, 34(11): 72-76.
- [13] 唐传核. 葡萄多酚类化合物以及生理功能[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2000, 4(2): 11-15.
TANG C H. Grape polyphenol compounds and its physiological functions[J]. Sino-overseas Grapevine & Wine, 2000, 4(2): 11-15.
- [14] 严守雷. 莲藕多酚提取分离鉴定及生物活性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2003.
YAN S L. Studies on the extration, separation, identification and biological activity of polyphenol from lotus root [D]. Wuhan: Huazhong Agriculture University, 2003.
- [15] WANG L Y, LI F X, YANG Y X, et al. Interaction mechanism between polyphenols and polysaccharides and effect on polyphenolic properties [J]. Food Science, 2017, 38(11): 276-282.
- [16] 谢吉敏. 多酚类药物与环糊精衍生物的相互作用及其溶液热力学研究[D]. 聊城: 聊城大学, 2017.
XIE J M. Studies on the interactions between polyphenols drugs and cyclodextrin derivatives and its solution thermodynamics[D]. Liaocheng: Liaocheng University, 2017.
- [17] COSTA T S, ROGEZ H, PENA R S. Adsorption capacity of phenolic compounds onto cellulose and xylan[J]. Food Science and Technology, 2015, 35(2): 314-320.
- [18] 随勇. 燕麦 β -葡聚糖提高荔枝果皮原花青素生物利用率和调节高脂大鼠脂代谢及其机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
SUI Y. The improving effect and mechanism of oat beta-glucan on bioavailability and lipid metabolism regulation of litchi pericarp procyanidins in high-fat-diet rats[D]. Wuhan: Huazhong Agriculture University, 2016.
- [19] 羊芹. 柳树叶原花青素的提取纯化及其功能研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
YANG Q. The study on extraction, purification and functionality of proanthocyanidin from willow leaves [D]. Chongqing: Southwest University, 2009.
- [20] 王崇队, 张明, 杨立风, 等. 不同来源膳食纤维品质分析及抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2019, 44(5): 78-83.
WANG C D, ZHANG M, YANG L F, et al. Quality analysis and antioxidant activity of dietary fiber from different sources[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(5): 78-83.
- [21] 陈亚非, 赵谋明. 水溶性与水不溶性膳食纤维对油脂、胆固醇和胆酸钠吸附作用研究[J]. 现代食品科技, 2005, 21(3): 58-60.
CHEN Y F, ZHAO M M. Adsorption capacity of dietary fiber complexes for fat, cholesterol and bile acid *in vitro*[J]. Modern Food Science & Technology, 2005, 21(3): 58-60.
- [22] 刘明研, 余丽访, 杨芬, 等. 小黑药水溶性成分吸附胆酸盐、胆固醇的研究[J]. 曲靖师范学院学报, 2016, 35(6): 37-41.
LIU M Y, YU L F, YANG F, et al. Study on the adsorption of bile salts and cholesterol by water soluble constituents from *Sanicula astrantiifolia*[J]. Jour-

- nal of Qujing Normal University, 2016, 35 (6): 37-41.
- [23] 曾蓓蓓, 常锦玉, 吕庆云, 等. 黑糯米米糠中水不溶膳食纤维功能特性研究[J]. 中国食物与营养, 2019, 25(6): 51-55.
ZENG B B, CHANG J Y, LÜ Q Y, et al. Functional properties of insoluble dietary fiber from black glutinous rice bran[J]. Food and Nutrition in China, 2019, 25(6): 51-55.
- [24] 钟丽萍. 水溶性膳食纤维的制备及性能研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2011.
ZHONG L P. Studies on properties and preparation of soluble dietary fiber[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [25] 郭增旺, 马萍, 刁静静, 等. 超微型大豆皮水不溶性膳食纤维理化及吸附特性[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 106-112.
GUO Z W, MA P, DIAO J J, et al. Physicochemical and adsorption properties of ultramicro insoluble dietary fiber from soybean hull [J]. Food Science, 2018, 39(5): 106-112.
- [26] 李利华, 宋凤敏, 郭豫梅. 桂皮多酚的提取及稳定性研究[J]. 中国调味品, 2019, 44(11): 18-21.
LI L H, SONG F M, GUO Y M. Study on extraction and stability of cinnamon polyphenols[J]. China Condiment, 2019, 44(11): 18-21
- [27] 矫馨瑶, 李恩惠, 王月华, 等. 蓝莓多酚稳定性及热降解动力学研究[J]. 中国食品学报, 2018, 18 (1): 81-87.
JIAO X Y, LI E H, WANG Y H, et al. Studies on the stability and thermal degradation kinetics of blueberry polyphenols[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18 (1): 81-87.
- [28] 郑燕菲, 张强, 廖晓澜. 巨尾桉叶中多酚的抗氧化性及稳定性的研究[J]. 食品科技, 2019, 44(9): 243-247.
ZHENG Y F, ZHANG Q, LIAO X L. Antioxidant activity and stability of polyphenols from leaf of *Eucalyptus grandis* X *Europhylla*[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(9): 243-247.
- [29] 赵玉, 任亚梅, 张爽, 等. 苹果果皮和果肉多酚稳定性研究[J]. 中国食品学报, 2014, 14(2): 93-101.
ZHAO Y, REN Y M, ZHANG S, et al. Study on the stability of polyphenol in apple peel and pulp[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(2): 93-101.
- [30] 高凝轩, 李斌, 杜姗姗, 等. 黑果腺肋花楸多酚稳定性的研究[J]. 食品科学, 2016, 37(23): 20-24.
GAO N X, LI B, DU S S, et al. Stability of polyphenols from *Aronia melanocarpa* fruits[J]. Food Science, 2016, 37(23): 20-24.
- [31] 席利莎, 孙红男, 木泰华, 等. 甘薯茎叶多酚的体外抗氧化活性与加工稳定性研究[J]. 中国食品学报, 2015, 15(10): 147-156.
XI L S, SUN H N, MU T H, et al. The antioxidant activity *in vitro* and processing stability of sweet potato leaf polyphenols[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15 (10): 147-156.
- [32] 陈欢欢. 藕节改性可溶性膳食纤维对脂肪酶和胆固醇的吸附作用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
CHEN H H. Study on adsorption of pancreatic lipase and cholesterol by soluble dietary fiber of modified lotus root nodes[D]. Wuhan: Huazhong Agriculture University, 2019.
- [33] RAGHAVENDRA S N, SWAMY S R R, RASTOGI N K, et al. Grinding characteristics and hydration properties of coconut residue: A source of dietary fiber[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 72(3): 281-286.
- [34] 刘山, 李冬梅, 许喆, 等. 裙带菜孢子叶多糖体外降血脂活性的研究[J]. 食品工业, 2016, 37(11): 177-179.
LIU S, LI D M, XU Z, et al. Hypolipidemic activity *in vitro* of polysaccharide from the sporophyll of *Undaria pinnatifida*[J]. The Food Industry, 2016, 37(11): 177-179.
- [35] 邓志汇, 黄惠华. 茶鲜叶和茶花水提液对胆酸盐的结合及其降血脂机理的研究[J]. 食品科学, 2011, 32(19): 96-99.
DENG Z H, HUANG H H. Bile salt-binding capacity and lipid-lowering mechanisms of water extracts from fresh tea leaves and tea flowers[J]. Food Science, 2011, 32(19): 96-99.
- [36] 周笑犁, 卢颖, 朱坤珑, 等. 刺梨果渣多糖的发酵制备工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(14): 24-29.
ZHOU X L, LU Y, ZHU K L, et al. Optimization of polysaccharide from *Rosa roxburghii* Tratt pomace by fermentation and its antioxidant activity[J]. Food Research and Development, 2019, 40(14): 24-29.

- [37] 杨振寰. 雷笋膳食纤维改性及性能研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
YANG Z H. Study on modification and properties of dietary fiber from bamboo shoots [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.
- [38] 胡凯, 黄惠华. 不同茶叶对胆酸盐的结合及其降血脂机理的研究[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(9): 42-45.
HU K, HUANG H H. A study *in vitro* on the ability of bile salt-binding among different tea [J]. Food and Fermentation Industries, 2010, 36(9): 42-45.
- [39] 刘淑敏, 王娟, 黄惠华. 影响绿茶浸提液与胆酸盐结合的因素研究[J]. 食品科学, 2012, 33(5): 29-32.
LIU S M, WANG J, HUANG H H. Factors influencing the binding between green tea extract and bile salt[J]. Food Science, 2012, 33(5): 29-32.
- [40] 黄萍, 林亲录, 朱凤霞, 等. 米糠水溶性膳食纤维理化特性及抗氧化性[J]. 食品科学, 2017, 38(23): 14-19.
HUANG P, LIN Q L, ZHU F X, et al. Physicochemical properties and antioxidant activity of water-soluble dietary fiber from rice bran[J]. Food Science, 2017, 38(23): 14-19.
- [39] 刘淑敏, 王娟, 黄惠华. 影响绿茶浸提液与胆酸盐

Stability and Fat Adsorption Activity of the Complex of Soluble Dietary Fiber and Polyphenols from Lotus Root

Lei Dan^{1,2}, Li Junsheng^{1,2}, Li Shuyi^{1,2,3*}, Zhu Zhenzhou^{1,2,3}, He Jingren^{1,2,3}

¹College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023

²Hubei Provincial Key Laboratory of Agricultural Processing and Transformation, Wuhan 430023

³School of Modern Industry for Selenium Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023

Abstract The stability in different temperature and pH value of soluble dietary fiber-polyphenol complexes and their functions on lipids, cholesterol, cholesterol decreases, adsorption capacity and cation exchange capacity of bile salts, also the potential lipid-lowering activity *in vitro* experiments were explored, which aimed at providing a reference for the preparation of functional foods with lipid-lowering function. The datas showed that the stability of the compound decreased with the increase of temperature and pH value. The adsorption capacity of soluble dietary fiber-polyphenol complex to oil was better than that of soluble dietary fiber and physical mixture, whose results were significant ($P<0.01$) different and the adsorption of lard and peanut oil showed the same tendency. The adsorption effect of the complex on cholesterol was significantly better than that of soluble dietary fiber ($P<0.05$) the simulated environment solution (pH 7.0) and the adsorption capacity of the complex on cholesterol in the simulated intestinal environment (pH=7.0) was significantly higher in a simulated stomach environment (pH=2.0). In addition, the interaction between soluble dietary fiber and polyphenols significantly promoted the adsorption effect of soluble dietary fiber on cholate ($P<0.01$) and improved the cation exchange capacity of soluble dietary fiber.

Keywords soluble dietary fiber-polyphenol complex; stability; adsorption capacity