

芋头多糖提取工艺优化及其体外结合 脂类和胆酸盐能力研究

Optimization of polysaccharide extraction from taro and its binding
capacities of lipid and bile salts *in vitro*

刘萍 祁兴普 刘靖 姚芳 李志方

LIU Ping QI Xing-pu LIU Jing YAO Fang LI Zhi-fang

(江苏农牧科技职业学院食品科技学院, 江苏 泰州 225300)

(School of Food Science and Technology, Jiangsu Agri-Animal Husbandry Vocational
College, Taizhou, Jiangsu 225300, China)

摘要:以新鲜龙香芋为原料,对其水溶性多糖的水溶醇沉提取工艺进行优化,并通过体外模拟人体胃肠消化环境,测定其对脂肪、胆固醇、胆酸盐的结合能力,考察芋头多糖的体外降脂效果。结果表明,当提取温度 80 °C、提取时间 6 h、料液比 1:6(g/mL)、乙醇体积分数 85% 时,芋头多糖提取效果最好,提取率达(4.92±0.18)%。芋头多糖经过胃肠消化系统后,对脂肪和胆酸盐的吸附效果优于对照纤维素,对两者的结合能力与其质量浓度呈现显著相关性;对胆固醇的吸附效果低于纤维素,表明芋头多糖具有一定的降脂功能,降脂机理与纤维素不同。

关键词:芋头;多糖;体外降脂;胆酸;胆固醇

Abstract: The extraction technology of water - soluble polysaccharides in fresh taro was investigated in this paper. Using simulated conditions of human digestion *in vitro*, its fat-binding, cholesterol-binding and bile salts-binding capacities were studied in order to evaluate its potential hypocholesterolemic activity *in vitro*. The results showed that the highest extraction efficiency of taro polysaccharide could be obtain under the conditon of using solid-liquid ratio at 1:6, reacting at 80 °C for 6 h with 85% ethanol, and the extraction ratio reaches (4.92±0.18)%. Taro water - soluble polysaccharides exhibited much higher binding capacities of both fat and bile acid, while much lower one of cholesterol, compared to cellulose. The above results revealed that taro water - soluble polysaccharides could potentially alleviate the hyperlipidemia.

Keywords: Taro; polysaccharide; lipid-lowering *in vitro*; bile acid;

基金项目:泰州市农业科技支撑项目(编号:TN2013001);江苏省青蓝工程科技创新团队培养对象

作者简介:刘萍,女,江苏农牧科技职业学院副教授,博士。

通讯作者:李志方(1972—),男,江苏农牧科技职业学院副教授,硕士。E-mail:292510731@qq.com

收稿日期:2016-08-29

cholesterol

目前肉类、乳制品等脂肪含量较高的食品已成为日常膳食的主要来源,脂肪的过多摄入可能导致肥胖、脂肪肝、高血脂症等。高血脂症常继发于糖尿病、肾病综合症等疾病,是动脉粥样硬化、冠心病等心脑血管疾病的危险因素之一^[1]。有研究^[2]显示,机体内血脂变化与体内总胆固醇含量变化呈正相关。因此,开发降胆固醇的药物或营养膳食以降血脂、减少心脑血管疾病的发病危险性是目前医药及膳食营养领域研究方向之一。大量研究表明植物活性多糖具有降血脂等生理活性,已证实的有银杏多糖^[2]、杏鲍菇多糖^[3]、何首乌多糖^[4]、黑木耳多糖^[5]、南瓜多糖^[6]等,且几乎无副作用,部分植物多糖已用于保健食品、医药等方面^[7-8]。

芋头俗称芋艿,属天南星科,是多年生块茎植物,产地遍布中国大部分地区,长江流域主要分布在泰州靖江、泰兴、兴化等地。芋头营养物质含量高,除了富含蛋白质、钙、磷、铁、钾、镁、钠、胡萝卜素、烟酸、B 族维生素等多种成分外,还含有黏液多糖、黏液皂素、碱性物质等^[9]生理活性物质,兼具营养和保健作用。相关研究发现芋头多糖具有一定的降脂作用,但主要集中在芋头淀粉上,如 Sebnem 等^[10]从芋头中分离得到纯度为 98% 的淀粉,并进一步制备出抗性淀粉,通过体外试验得出抗性淀粉的血糖生成指数(eGI)与正常淀粉相比有显著性的下降,且两种淀粉均具有一定的胆酸结合能力,由此推测其具有潜在的降胆固醇作用。除淀粉外,芋头中的水溶性多糖也是其活性功能的关键组分,已报道有免疫调节^[11]、抗氧化^[12]等功能,但是尚未见有关其降脂方面的研究报道。因此,本研究拟以泰州市兴化的龙香芋为原料,优化龙香芋头中水溶性多糖的提取工艺,得到芋头粗多糖,同时通过模拟其在人体胃肠消化环境中与脂肪、胆固醇和胆酸盐结合能力,探讨芋头粗多糖的降脂效果,旨在从营养保健

方面,为预防高血脂功能性芋头产品的研发提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

新鲜龙香芋及豆油:食品级,泰州世纪联华超市;
透析袋:截留分子量 3.5 kDa,上海国药集团;
 α -淀粉酶:BR 级,上海国药集团;
胆固醇测定试剂盒:BR 级,南京建成生物工程研究所;
牛磺胆酸钠、牛胆盐:BR 级,上海瑞永生物科技有限公司;
胆固醇、油酸:AR 级,上海瑞永生物科技有限公司;
其他试剂:AR 级,上海国药集团。

1.1.2 主要仪器

分光光度计:722 型,上海棱光技术有限公司;
旋转蒸发仪:RE-52D 型,上海青浦浦西仪器厂;
高速冷冻离心机:Heraeus PRIMO-R 型,美国 Thermo Fisher 公司;
冻干机:Labconco 6L 型,照生有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 芋头粗多糖提取工艺 在文献[12]的基础上略有修改。称取适量芋头丁(1 cm³)按料液比 1:6(g/mL)加入水,进行组织捣碎后全部转移至烧杯中,80 ℃水浴提取 6 h;提取结束后多次 4 000×g 离心 15 min 去渣,合并上清液,用 0.1 mol/L NaOH 溶液调整 pH 为 6.0,按照 18 U/g 比例加入耐高温 α -淀粉酶,85 ℃酶解 1.5 h,I₂/KI 检验直至碘液不变色。用旋转蒸发仪将水解液浓缩至约原体积的 1/5。加 4 倍于浓缩液体积的无水乙醇,搅拌均匀后 4 ℃条件下静置过夜。将静置液 4 000×g 离心 15 min 所得沉淀用 Sevage 法(氯仿:正丁醇=5:1)^[13]脱蛋白,滤液经流水透析(截留分子量 3.5 kDa)后冻干,制成芋头粗多糖备用。

1.2.2 芋头水分含量的测定 按 GB 5009.3—2010 常压干燥法执行。

1.2.3 芋头中多糖含量的测定

(1) 标准曲线的绘制:采用苯酚硫酸法^[14],以葡萄糖标准溶液的浓度($\mu\text{g/mL}$)为横坐标,吸光度 A 为纵坐标,测得标准曲线为 $y = 0.079 4x + 0.032 4, R^2 = 0.999 6$ 。

(2) 芋头粗多糖含量的测定:在文献[15]和[16]的基础上略作改动。精密称取芋头粗多糖冻干粉末 10 mg,加适量水溶解,室温下超声 15 min,转移至 10 mL 容量瓶中,用水定容,作为粗多糖供试品溶液。稀释粗多糖供试品溶液至适当浓度,准确吸取 1 mL 稀释液于具塞量筒中,取超纯水 1 mL 作空白对照,按 1.2.3(1)方法测定,测定芋头多糖的含量(以芋头干重计)。

1.2.4 芋头多糖得率 按式(1)计算:

$$Y = \frac{C \times V \times D \times M_1 \times 10^{-3}}{m \times M_0 (1 - w)} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

Y ——多糖得率,%;

C ——测量用粗多糖溶液中葡萄糖的浓度, $\mu\text{g/mL}$;

V ——测量用粗多糖溶液的体积,mL;

D ——稀释倍数;

m ——粗多糖供试品的质量,mg;

M_1 ——提取所得粗多糖冻干粉的质量,g;

M_0 ——提取用新鲜芋头的质量,g;

w ——新鲜芋头水分含量,g/100 g。

1.2.5 胆酸盐含量测定 参考文献[17]。

1.2.6 芋头粗多糖提取单因素试验设计 根据已报道文献^[12,15,18],料液比、乙醇浓度、提取温度和提取时间是影响多糖提取率的主要因素,因此本研究以多糖得率为指标,选择以上参数对龙香芋多糖的提取工艺进行优化;所有试验都平行测定 3 次,取平均值。

(1) 料液比对芋头粗多糖提取率的影响:固定 1.2.1 方法中其他因素不变,改变料液比为 1:2,1:4,1:6,1:8,1:10(g/mL),筛选合适的料液比。

(2) 提取温度和提取时间对芋头粗多糖提取率的影响:将芋头切成小丁,按照料液比 1:8(g/mL)进行组织捣碎,其他因素同 1.2.1,分别于不同提取温度(70,75,80,85,90 ℃)下提取不同时间(4,5,6,7,8 h),筛选合适的提取温度和提取时间。

(3) 乙醇体积分数对芋头粗多糖提取率的影响:将芋头切成小丁,按照料液比 1:8(g/mL)进行组织捣碎,在 80 ℃水浴中提取 6 h,其他因素同 1.2.1,改变乙醇体积分数为 75%,80%,85%,90%,95%,筛选合适的乙醇体积分数。

1.3 芋头多糖体外降脂试验

1.3.1 芋头多糖与油脂的结合 参考文献[19]。分别称取一定质量的芋头多糖样品和纤维素于 50 mL 具塞量筒中,经 10 mL 蒸馏水溶解后,用 0.1 mol/L 盐酸溶液调 pH 至 2.0,加入 10 g 豆油,充分混匀,在 37 ℃恒温水浴中培养 2 h,取出,冷却至室温后,用 0.1 mol/L 氢氧化钠溶液将样品 pH 调至 7.6,37 ℃继续恒温孵育 2 h 后,4 ℃ 4 000 r/min 离心 20 min,小心移除上层未结合的油,并称取其重量,实际用油量减去剩余油量即为样品中所结合油的重量。多糖样品结合油质量减去空白对照中结合油质量即为多糖/纤维素结合脂肪量。以每克多糖结合豆油的克数表示(g/g)。同时做 3 组平行试验,取其平均值。

1.3.2 芋头多糖与胆固醇的结合 参考文献[20]。将不同质量的芋头多糖在胆固醇的胶束溶液中进行结合,其中 1 mL 胶束溶液中含有 100 mmol/L 牛磺胆酸钠、20 mmol/L 胆固醇、50 mmol/L 油酸、1 320 mmol/L 氯化钠、150 mmol/L 磷酸缓冲液(pH 7.4)。将空白对照、芋头多糖样品以及纤维素分别加入到胶束溶液中,然后将混合溶液在 37 ℃恒温振荡水浴中培养 2 h,并在 10 000 r/min 离心 20 min,收集上清液用试剂盒测定其中胆固醇含量即为结合的胆固醇的量。以每克芋头多糖结合胆固醇的毫克数表示(mg/g)。做 3 次平行试验,取平均值。

1.3.3 芋头多糖与胆酸盐的结合 参考文献[20]。称取一定质量的芋头多糖样品及纤维素分别置于 50 mL 具塞试管中,加入 5 mL 0.1 mol/L 盐酸溶液在 37 ℃恒温水浴中培养 2 h,用 0.1 mol/L 氢氧化钠溶液将样品 pH 调至 7.6,分别加

入含 0.5 mg/mL 胆酸盐的 pH 7.6、0.1 mol/L 磷酸缓冲液 10 mL, 37 °C 恒温振荡水浴中消化 2 h。同时做底物空白和胆盐空白。对上清液中的胆酸盐进行分析。由胆酸盐总量与未结合的胆盐量的差值计算芋头多糖结合胆盐的量, 以每克芋头多糖结合胆盐的毫克数表示 (mg/g)。做 3 次平行试验, 取平均值。

2 结果与讨论

2.1 芋头多糖的提取条件优化

2.1.1 料液比对芋头多糖提取率的影响 提取温度和提取时间一定时, 多糖的提取量与料液比直接相关。料液比对芋头粗多糖提取率的影响见图 1。

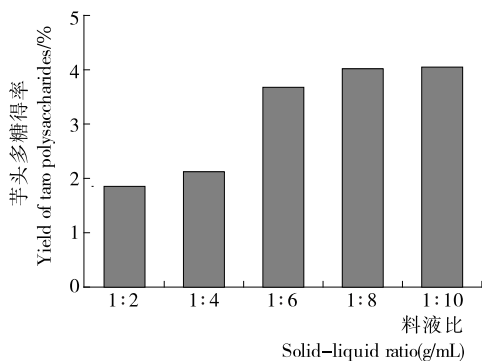


图 1 料液比对多糖提取率的影响

Figure 1 Effects of solid-liquid ratio on the extraction of taro polysaccharides

由图 1 可知, 芋头多糖提取率随料液比例的增大呈现上升趋势; 但当料液比大于 1:6 (g/mL) 时, 芋头多糖得率增加趋势变缓, 当料液比大于 1:8 (g/mL) 时, 多糖得率基本不变。液料比过小, 溶剂量少导致溶液的黏度大, 阻止多糖的有效溶出, 故提取率较低^[16]; 当料液比增加到一定程度, 即体系内溶质扩散和溶剂渗透达到动态平衡状态时, 所有多糖都已全部溶出, 再增加溶剂的量, 多糖的溶出率基本保持不变, 还会导致芋头中蛋白质等水溶性成分的溶出, 导致后续多糖提取中蛋白质去除困难^[15]。因此料液比取 1:8 (g/mL) 较适合, 这与杨秀芳等^[15]对陕西芋头多糖的提取结果基本一致。

2.1.2 提取温度和提取时间对芋头多糖提取率的影响 提取温度和提取时间对芋头多糖提取率的影响见图 2。

由图 2 可知, 料液比不变时, 当温度低于 80 °C, 提取时间小于 6 h 时, 随着提取温度的升高和提取时间的增长, 芋头多糖提取率急剧增加, 但当提取温度超过 80 °C 时, 不同温度条件下芋头多糖的提取率变化差异不大, 且提取时间超过 6 h 之后, 随提取时间的延长, 提取率基本不变。这可能因为溶剂的渗透速率以及溶质的扩散速率均随温度的升高而增大, 一定温度下, 扩散渗透达到动态平衡, 再次升高温度对多糖提取率影响不大。考虑到温度过高可能对多糖结构及活性造成不利影响, 此外, 在实际生产过程中长时间和高温会导致能耗增大。因此, 综合考虑能耗及多糖稳定性, 提取温度取 80 °C, 提取时间取 6 h。

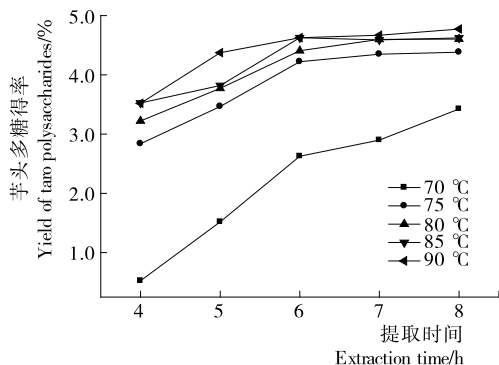


图 2 提取温度和提取时间对多糖提取率的影响

Figure 2 Effects of extracting temperature and time on the extraction of taro polysaccharides

2.1.3 乙醇体积分数对芋头多糖提取率的影响 乙醇体积分数也是影响多糖提取率的重要因素之一。乙醇体积分数对芋头多糖提取率的影响见图 3。由图 3 可知, 多糖提取率与乙醇体积分数基本呈正相关, 但当乙醇体积分数达 85% 后, 随着乙醇浓度增加, 多糖提取率基本维持不变, 而且乙醇浓度高, 更多的醇溶性杂质会析出, 造成后续提纯困难。因此, 芋头粗多糖提取较适的乙醇体积分数为 85%。

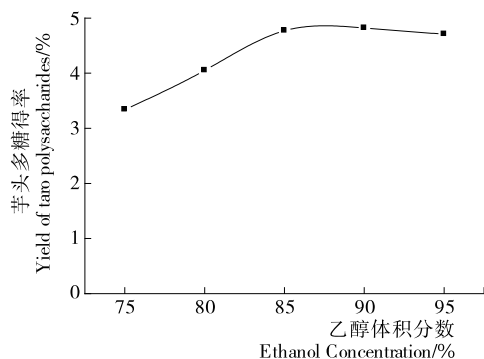


图 3 乙醇体积分数对多糖提取率的影响

Figure 3 Effects of alcohol concentration on the extraction of taro polysaccharides

2.2.4 芋头粗多糖的提取工艺优化 在以上单因素试验的基础上对提取时间、提取温度、料液比和乙醇浓度 4 个因素进行 $L_9(3^4)$ 正交试验设计, 优化芋头多糖的提取工艺。各因素和水平见表 1, 芋头粗多糖提取工艺的正交试验优化及方差分析结果见表 2、3。

由表 2 可知, 影响芋头多糖提取率的各因素的主次顺序依次为 $B > A > D > C$, 即提取时间影响最显著, 提取温度其

表 1 芋头多糖提取正交试验的因素和水平

Table 1 Factors and level of extraction of taro polysaccharides by orthogonal test

| 水平 | A 提取温度/°C | B 提取时间/h | C 料液比 (g/mL) | D 乙醇含量/% |
|----|-----------|----------|--------------|----------|
| 1 | 75 | 4 | 1:6 | 80 |
| 2 | 80 | 6 | 1:8 | 85 |
| 3 | 85 | 8 | 1:10 | 90 |

表2 芋头多糖提取正交试验结果

Table 2 Orthogonal test of extraction on taro polysaccharides

| 试验号 | A | B | C | D | 提取率/% |
|-------------|------|------|------|------|-------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3.23 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 4.63 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 4.44 |
| 4 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4.12 |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 1 | 4.62 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2 | 4.78 |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3.78 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 3 | 4.53 |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 1 | 4.45 |
| <i>k</i> 1 | 4.10 | 3.71 | 4.18 | 4.10 | |
| <i>k</i> 2 | 4.51 | 4.59 | 4.40 | 4.40 | |
| <i>k</i> 3 | 4.29 | 4.56 | 4.28 | 4.36 | |
| 极差 <i>R</i> | 0.41 | 0.87 | 0.22 | 0.30 | |

表3 方差分析表

Table 3 Analysis of Variance

| 变异来源 | 偏差平方和 | 自由度 | 均方和 | <i>F</i> 值 |
|------|-------|-----|-------|------------|
| A | 0.25 | 2 | 0.125 | 14.46 |
| B | 1.50 | 2 | 0.750 | 85.63 |
| C | 0.07 | 2 | 0.035 | 4.16 |
| D | 0.16 | 2 | 0.080 | 9.06 |
| 误差 | 0.07 | 8 | 0.009 | |
| 总和 | 2.05 | 16 | | |

† $F_{0.05(2,8)}=4.46, F_{0.1(2,8)}=8.64$ 。

次,乙醇体积分数再次之,料液比影响最小。方差分析结果(表3)显示四因素中不同提取时间、提取温度和乙醇体积分数在0.1和0.05显著性水平下对芋头粗多糖得率的影响差异显著,不同料液比对多糖得率的影响不存在显著差异。即当料液比高于1:6(g/mL)时,料液比增加基本不影响芋头得率,考虑成本,选择料液比1:6(g/mL)为宜。这与文献[12,15]报道其它芋头品种的多糖提取料液比基本一致,可见不同品种不同地区芋头多糖水溶性差异不显著。因此提取龙香芋粗多糖的最佳组合为:A₂B₂C₁D₂,即提取温度80℃、提取时间6h、料液比1:6(g/mL)、乙醇体积分数85%。以此最佳工艺条件进行芋头多糖提取的放大验证实验,平行3次,芋头多糖的平均提取率为(4.92±0.18)%,结果显示A₂B₂C₁D₂为最佳提取工艺组合。

2.2 芋头多糖的体外降脂效果

2.2.1 芋头多糖与油脂的结合能力分析 以纤维素为对照,芋头多糖不同添加量对油脂的结合效果见图4和表4。

由图4可知,在体外模拟人体胃肠消化道环境中,芋头多糖对豆油的结合量随加入量的增加而增加,当加入的芋头

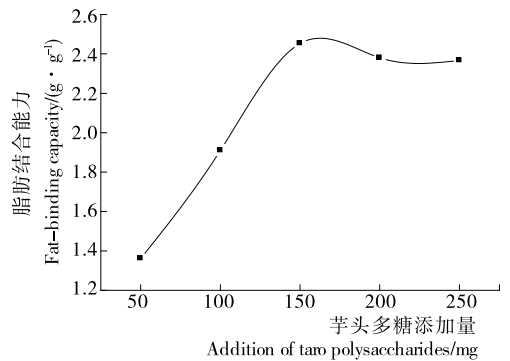


图4 芋头多糖添加量对脂肪结合效果的影响

Figure 4 Changes of fat-binding capacity of taro polysaccharides with different additions

表4 芋头多糖与纤维素结合脂肪能力比较

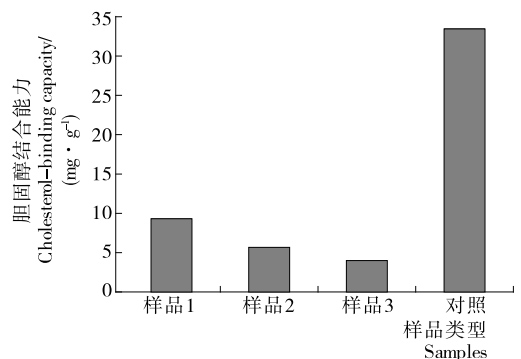
Table 4 Comparison of fat-binding capacity of taro polysaccharides and cellulose

| 多糖类型 | 添加量/mg | 结合脂肪能力/(g·g ⁻¹) |
|-------|--------|-----------------------------|
| 芋头粗多糖 | 150 | 2.45±0.09 |
| 纤维素对照 | 150 | 0.76±0.05 |

多糖大于150mg时,结合脂肪的量达到最大量(2.45±0.09)g/g,随后变化不大。因此,研究芋头多糖降脂活性的推荐添加量为150mg。由表4可知,芋头多糖结合脂肪能力强于纤维素,后者结合脂肪能力仅为(0.76±0.05)g/g。由此推测,芋头多糖可以通过与脂肪的结合来减少脂肪在胃肠内的消化吸收,具有一定的降脂功能。这与刘静娜等^[20]和王凯等^[21]分别报道的壳聚糖、孔石莼多糖与脂肪的结合能力研究结果基本一致。

2.2.2 芋头多糖与胆固醇的结合能力分析 以纤维素为对照,不同含量的芋头多糖样品(1~3)结合胆固醇的效果见图5。

由图5可知,与对照相比,芋头多糖与胆固醇的结合能力非常小,且随含量的增加而略有下降。由此可见,芋头多



样品1. 芋头多糖7.5mg 样品2. 芋头多糖15mg 样品3. 芋头多糖20mg 对照. 纤维素20mg

图5 芋头多糖与纤维素对胆固醇结合能力的影响

Figure 5 Effects of cellulose and taro polysaccharides on cholesterol-binding capacity

糖的降脂机理与纤维素并不相同。已知纤维素作为一种不溶性膳食纤维,主要通过吸附胆固醇,形成一些不能被人体消化吸收的沉淀物,使胆固醇不易透过肠黏膜吸收进入血液而实现降低血胆固醇效果^[20-21]。芋头多糖对胆固醇的结合能力很弱,说明芋头多糖不能抑制胆固醇胶束化的形成。其降脂的具体机制还需要进一步研究。

2.2.3 芋头多糖与胆酸盐的体外结合能力分析 胆酸盐是一类具有甾核结构胆固醇衍生物,在机体对脂肪和胆固醇的消化吸收、脂溶性维生素的代谢中起重要作用^[22-23]。不同添加量的芋头多糖样品对胆酸盐结合能力影响以及与对照纤维素结合胆酸盐能力的比较结果见图 6 和表 5。

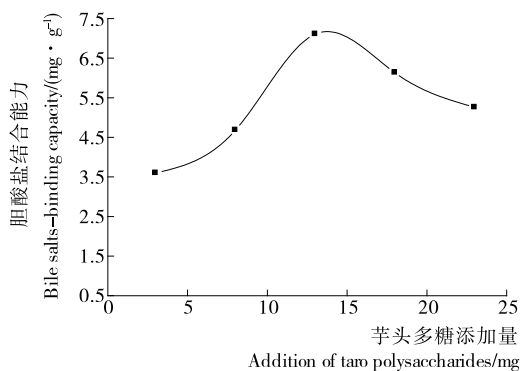


图 6 芋头多糖添加量对胆酸盐结合能力的影响

Figure 6 Changes of bile salts-binding capacity of taro polysaccharides with different additions

表 5 芋头多糖与纤维素结合胆酸盐能力比较

Table 5 Comparison of bile salts-binding of taro polysaccharides and cellulose

| 多糖类型 | 添加量/mg | 结合胆酸盐能力/(mg · g ⁻¹) |
|-------|--------|---------------------------------|
| 芋头粗多糖 | 12.5 | 7.11 ± 0.36 |
| 纤维素对照 | 12.5 | 0.56 ± 0.03 |

由图 6 可知,在模拟胃肠环境中,芋头多糖与胆酸盐的结合能力随含量的增加呈现先增后减的趋势,此时芋头多糖对胆酸盐的最大结合能力为(7.11 ± 0.36) mg/g。说明芋头多糖对胆酸盐具有良好的结合能力,且最适宜添加量为 12.5 mg,添加过多会因多糖黏度大使得结合能力有所下降。表 5 表明芋头多糖对胆酸盐的结合能力远高于纤维素,由此可推测:与纤维素吸附胆固醇不同,芋头多糖通过吸附胆酸盐,抑制其在肠道的吸收并将其排出体外,从而促进胆固醇在体内代谢转化成胆汁酸,降低了血中的胆固醇,达到降脂效果。此外,有研究^[24]显示,一些多糖可能通过抑制脂肪酶和胆固醇酯酶的活性,从而抑制甘油三酯和胆固醇酯的水解,在一定程度上抑制脂肪和胆固醇的吸收。芋头多糖除结合胆酸盐外,是否也可通过抑制脂肪酶和胆固醇酯酶活性实现降脂活性,以及体内降血脂活性及其具体降脂的分子机制还不清楚,尚待进一步研究。

3 结论

(1) 在单因素基础上,通过正交试验设计优化了龙香芋

多糖提取的最佳工艺条件:当提取温度 80 °C、提取时间 6 h、料液比 1 : 6(g/mL)、乙醇体积分数 85% 时,芋头多糖的提取率达(4.92 ± 0.18)%。

(2) 以不溶性膳食纤维纤维素为对照,对提取的芋头多糖在体外模拟胃肠环境下结合脂类、胆盐、胆固醇的能力进行了比较,发现多糖与脂肪、胆酸盐、胆固醇均具有一定结合能力,对脂肪和胆酸盐的结合能力高于纤维素,而对胆固醇的结合能力却远低于纤维素。表明芋头多糖具有一定的体外降脂效果,为开发高附加值营养保健芋头产品提供了一定的理论依据。

参考文献

- [1] 刘静娜. 壳聚糖降脂作用机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008: 1-8.
- [2] 杨强, 李新华, 张振, 等. 银杏果精多糖的降血脂作用[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(5): 62-65.
- [3] 毛栋. 杏鲍菇多糖提取条件优化及其抗氧化、降血脂功能研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2010: 1-5
- [4] 翟蓉, 吕丽爽, 金邦荃. 何首乌多糖降血脂作用的研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(5): 87-90, 101.
- [5] 唐娟, 马永强. 超声波技术在黑木耳多糖提取中的应用[J]. 食品与机械, 2005, 21(1): 28-29.
- [6] 孔庆胜, 王彦英, 蒋滢. 南瓜多糖的分离、纯化及其降血脂作用[J]. 中国生化药物志, 2000, 21(3): 130-131.
- [7] 何余堂, 潘孝明. 植物多糖的结构与活性研究进展[J]. 食品科学, 2010, 31(17): 78-78.
- [8] 郑永飞. 活性多糖的保健功能及其应用[J]. 粮食与食品工业, 2009, 16(4): 22-25.
- [9] 贺星成. 低压过热蒸汽干燥芋头片加工过程的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2011: 17.
- [10] SIMSEK S, EL S N. Production of resistant starch from taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) corm and determination of its effects on health by in vitro methods[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 90(3): 1 204-1 209.
- [11] 赵国华, 陈宗道, 王资. 芋头多糖的理化性质及体内免疫调节活性研究[J]. 中国食品学报, 2002, 2(3): 21-25.
- [12] 王喻, 高畅, 张娜, 等. 芋头多糖的提取及生物活性的研究[J]. 食品工业科技, 2006, 27(6): 73-75.
- [13] 解耸林, 王志兵, 刘洪霞. 粪鬼伞多糖脱蛋白方法的研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(2): 5-7, 12.
- [14] 佟海菊, 张志胜, 孙克岩, 等. 苯酚-硫酸法测定海湾扇贝多糖方法的研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(10): 447-448.
- [15] 杨秀芳, 伍发云. 芋头多糖提取工艺参数的优化[J]. 陕西科技大学学报, 2009, 27(1): 61-64.
- [16] 程素娇, 邓璐璐, 章海燕, 等. 乌饭树叶多糖提取及纯化工艺优化研究[J]. 食品与机械, 2012, 28(6): 142-189.
- [17] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[S]. 2010 版. 北京: 中国医药科技出版社, 2009: 12.
- [18] 姜绍通, 汪洪普, 潘丽军. 响应面法优化微波辅助提取芋头多糖工艺研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(3): 215-219.

(下转第 199 页)

- 立[D]. 重庆: 第三军医大学, 2004: 12-19.
- [36] MENDONSA S D, BOWSER M T. In vitro evolution of functional DNA using capillary electrophoresis[J]. Journal of the American Chemical Society, 2004, 126(1): 20-21.
- [37] GU Hua-jie, DUAN Nuo, WU Shi-jia, et al. Graphene oxide-assisted non-immobilized SELEX of okadaic acid aptamer and the analytical application of aptasensor [J]. Scientific Reports, 2016, 6; doi:10.1038/srep21665.
- [38] BENNER S A. Understanding nucleic acids using synthetic chemistry[J]. Accounts of Chemical Research, 2004, 37(10): 784-797.
- [39] SEFAH K, YANG Zun-yi, BRADLEY K M, et al. In vitro selection with artificial expanded genetic information systems[J]. PNAS, 2014, 111(4): 1 449-1 454.
- [40] JOSHI R, JANAGAMA H, DWIVEDI HP, et al. Selection, characterization, and application of DNA aptamers for the capture and detection of Salmonella enterica serovars [J]. Molecular and Cellular Probes, 2009, 23(1): 20-28.
- [41] DUAN Nuo, WU Shi-jia, CHEN Xiu-juan, et al. Selection and characterization of aptamers against Salmonella typhimurium using whole-bacterium systemic evolution of ligands by exponential enrichment(SELEX) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61: 3 229-3 234.
- [42] DUAN Nuo, YAN Yi-ling, WU Shi-jia, et al. Vibrio parahaemolyticus detection aptasensor using surface-enhanced Raman scattering[J]. Food Control, 2016, 63: 122-127.
- [43] CRUZ-AGUADO JA, PENNER G. Determination of Ochratoxin A with a DNA aptamer[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(22): 10 456-10 461.
- [44] 段诺, 吴世嘉, 王周平. 核酸适配体识别荧光法检测赭曲霉毒素 A[J]. 分析化学, 2011, 39(3): 300-304.
- [45] PARK J H, BYUN J Y, MUN H, et al. A regeneratable, label-free, localized surface Plasmon resonance (LSPR) aptasensor for the detection of ochratoxin A[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2014, 59: 321-327.
- [46] HUANG Yu-kun, CHEN Xiu-juan, XIA Yu, et al. Selection, identification and application of a DNA aptamer against staphylococcus aureus enterotoxin A[J]. Analytical Methods, 2014, 6(3): 690-697.
- [47] HUANG Yu-kun, CHEN Xiu-juan, DUAN Nuo, et al. Selection and characterization of DNA aptamers against staphylococcus aureus enterotoxin C1 [J]. Food Chemistry, 2015, 166: 623-629.
- [48] BRUNO J G, KIEL J L. Use of magnetic beads in selection and detection of biotoxin aptamers by electrochemiluminescence and enzymatic methods[J]. Biotechniques, 2002, 32(1): 178-180, 182-183.
- [49] HAES A J, GIORDANO B C, COLLINS G E. Aptamer-based detection and quantitative analysis of ricin using affinity probe capillary electrophoresis[J]. Analytical Chemistry, 2006, 78(11): 3 758-3 764.
- [50] MIYAKE Y, TOGASHI H, TASHIRO M, et al. Mercury II-mediated formation of thymine-Hg II-Thymine base pairs in DNA duplexes[J]. Journal of the American Chemical Society, 2006, 128(7): 2 172-2 173.
- [51] TANAKA Y, ODA S, YAMAGUCHI H, et al. 15N-15N J-coupling across Hg II: Direct observation of Hg II-Mediated T-T base pairs in a DNA duplex[J]. Journal of the American Chemical Society, 2006, 129(2): 244-245.
- [52] WANG Yong, YANG Fan, YANG Xiu-rong. Colorimetric biosensing of mercury II ion using unmodified gold nanoparticle probes and thrombin-binding aptamer[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2010, 25(8): 1 994-1 998.
- [53] 凌绍明, 范燕燕, 蒋治良, 等. 核酸适配体修饰纳米金共振散射光谱探针快速检测痕量 Pb²⁺ [J]. 化学学报, 2010, 68(4): 339-344.
- [54] KIM M, UM H J, BANG S, et al. Arsenic removal from Vietnamese groundwater using the arsenic-binding DNA aptamer [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(24): 9 335-9 340.
- [55] WU Shi-jia, DUAN Nuo, SHI Zhao, et al. Dual fluorescence resonance energy transfer assay between tunable upconversion nanoparticles and controlled gold nanoparticles for the simultaneous detection of Pb²⁺ and Hg²⁺ [J]. Chemistry Analytical, 2014, 128: 327-336.
- [56] 廖且根, 李伟红, 张金艳, 等. 基于核酸适配体与银纳米粒子探针共振光散射技术检测卡那霉素[J]. 农产品质量与安全, 2012(S1): 17-19.
- [57] YADAV S K, AGRAWAL B, CHANDRA P, et al. In vitro chloramphenicol detection in a Haemophilus influenza model using an aptamer-polymer based electrochemical biosensor[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2014, 55: 337-342.
- [58] WANG Li, LIU Xian-jin, ZHANG Qiang, et al. Selection of DNA aptamers that bind to four organophosphorus pesticides [J]. Biotechnology Letters, 2012, 34(5): 869-874.

(上接第 136 页)

- [19] 黄才欢, 欧仕益, 张宁, 等. 膳食纤维吸附脂肪、胆固醇和胆酸盐的研究[J]. 食品科技, 2006(5): 133-136.
- [20] 刘静娜, 夏文水, 张家骊. 壳聚糖物化性质对其体外结合脂类和胆酸盐能力的影响[J]. 食品科学, 2008, 29(1): 45-49.
- [21] 王凯, 李敏, 张言捷, 等. 孔石莼多糖及其磺化衍生物 HU 体外结合脂类和胆固醇的研究[J]. 药学研究, 2013, 32(7): 379-383.
- [22] KAHN T-S, SMITH G-E, SHAO Qiang. In vitro binding of bile acids by kidney bean (Phaseolus vulgaris), black gram (Vigna mungo), bengal gram (Cicer arietinum) and moth bean (Phaseolus aconitifolius) [J]. Food Chemistry, 2005, 90(1/2): 241-246.
- [23] 张慧娟, 王静, 张辉. 大米、糙米蛋白及其酶解产物的体外降脂研究[J]. 中国食品学报, 2013, 13(12): 28-33.
- [24] 王文君, 欧阳克蕙, 许文凤, 等. 9 种植物粗多糖体外降脂及抑制非酶糖基化活性的研究[J]. 江西农业大学学报, 2013, 35(3): 593-597.