

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20210148

银条菜粗多糖脱蛋白的方法研究

李洁¹, 陈琳¹, 刘海棠^{1,2}, 刘锐², 朱铭强³

(1. 中国轻工业造纸与生物质精炼重点实验室, 天津市制浆造纸重点实验室,
天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津 300457;

2. 食品营养与安全国家重点实验室, 天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457;

3. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 咸阳 712100)

摘要: 实验从银条菜中提取银条多糖, 选用三氯乙酸法(TCA法)、盐析法以及盐酸法对银条菜进行脱蛋白处理, 以多糖中蛋白去除率、多糖保留率以及糖醛酸保留率作为衡量指标优化脱蛋白最佳条件。实验结果表明: TCA法在三氯乙酸体积分数为5.00%时, 蛋白去除率为97.25%, 多糖保留率为86.89%, 糖醛酸保留率为98.67%; 盐析法中无水氯化钙添加量为0.30g时, 蛋白去除率为90.61%, 多糖保留率为83.59%, 糖醛酸保留率为88.67%; 盐酸法调节pH为3时, 蛋白去除率为95.92%, 多糖保留率为86.31%, 糖醛酸保留率为95.03%。TCA法是能够有效去除银条菜粗多糖中蛋白且多糖和糖醛酸保留较好的一种方法。

关键词: 银条菜; 多糖; 脱蛋白

中图分类号: TQ281

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2022)01-0018-05

Study of Deproteinization Method of Crude Polysaccharides from *Stachys floridana* Schuttl. ex Benth

LI Jie¹, CHEN Lin¹, LIU Haitang^{1,2}, LIU Rui², ZHU Mingqiang³

(1. China Light Industry Key Laboratory of Papermaking and Biorefinery, Tianjin Key Laboratory of Pulp and Paper,
College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology,
Tianjin 300457, China;

2. State Key Laboratory of Food Nutrition and Safety, College of Food Science and Engineering,
Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;

3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Xianyang 712100, China)

Abstract: In our experiment, the *Stachys floridana* Schuttl. ex Benth polysaccharide was extracted from the *Stachys floridana* Schuttl. ex Benth vegetable, and the trichloroacetic acid method (TCA method), the salting-out method and the hydrochloric acid method were used to deproteinize the *Stachys floridana* Schuttl. ex Benth vegetable. Protein removal rate, polysaccharide retention rate and uronic acid retention rate were used as the measurable indicators to optimize the best conditions for deproteinization. The results showed that when the volume fraction of TCA in the TCA method was 5.00%, the protein removal rate was 97.25%, the polysaccharide retention rate was 86.89%, and the uronic acid retention rate was 98.67%; the addition amount of anhydrous calcium chloride in the salting-out method was at 0.30g, the protein removal rate was 90.61%, the polysaccharide retention rate was 83.59%, and the uronic acid retention rate was 88.67%; when the pH was adjusted to 3 by the hydrochloric acid method, the protein removal rate was 95.92%, and the polysaccharide retention rate was 86.31%, and the retention rate of uronic acid was 95.03%. The results of our experiment indicate that the TCA method

收稿日期: 2021-06-24; 修回日期: 2021-10-24

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(31700516); 食品营养与安全教育部重点实验室暨天津市食品营养与安全重点实验室开放课题(TJS202001)

作者简介: 李洁(1994—), 女, 河南人, 硕士研究生; 通信作者: 刘海棠, 副教授, liuhaitang@tust.edu.cn

can effectively remove the protein in the polysaccharides of *Stachys floridana* Schuttl. ex Benth and retain the polysaccharides and uronic acid.

Key words: *Stachys floridana* Schuttl. ex Benth; polysaccharides; deproteinization

银条菜属唇形科水苏属多年生草本植物,主要分布于中国河南省偃师市.银条菜中富含蛋白、碳水化合物和脂肪,经常食用对人体有多种保健效果,延年益寿作用明显,并且具有增强免疫能力、软化血管、降血脂、改善血液循环等功能^[1].银条多糖具有多种生物活性,如免疫调节^[2]、肠道益生^[3]、降血糖^[4]、抑菌^[5]、解酒护肝、抗肿瘤等^[6].以银条菜作为原料提取的水苏糖,具有重要的药用及医用价值,这也为银条菜的综合利用开辟了新途径^[7].

通常情况下,水提或者醇提获得的多糖往往含有蛋白^[8],而蛋白的存在可能会影响多糖的生物活性.因此,如何有效去除蛋白且同时避免多糖生物活性降低,成为一个非常有意义的研究课题.不同来源的多糖有各自适宜的脱蛋白方法.初雅洁^[9]通过对辣木多糖除蛋白的研究,发现酶法除蛋白对辣木多糖的蛋白脱除率和多糖保留率最好.王新嘉等^[10]研究发现三氯乙酸法(TCA法)除蛋白对平菇多糖中蛋白的脱除率最高,多糖保留率最好.而对银条菜多糖目前尚未见其脱蛋白的相关研究报道.

本文采用TCA法、盐析法以及盐酸法对银条菜粗多糖进行脱蛋白方法研究,为后续银条菜多糖的分离纯化以及生物活性的探究提供依据.

1 材料与方法

1.1 原料与仪器

银条菜购于河南省偃师市农贸市场.三氯乙酸,天津市大茂化学试剂厂;硫酸,国药集团化学试剂有限公司;牛血清蛋白、苯酚,北京索莱宝科技有限公司;氢氧化钠,天津市津东天正精细化学试剂厂;考马斯亮蓝 G250、无水氯化钙,福晨(天津)化学试剂有限公司;葡萄糖,阿拉丁(上海)试剂有限公司;无水乙醇,天津市江天化工技术股份有限公司;盐酸,天津市风船化学试剂科技有限公司;半乳糖醛酸,上海瑞永生物科技有限公司;萘酮,北京博奥拓达科技有限公司.本实验所用试剂纯度均为分析纯.

TU-1810型紫外分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;XMTD-4000型电热恒温水浴锅,北京市永光明医疗仪器有限公司;BAO-150A型精密鼓风干燥箱,施都凯仪器设备(上海)有限公司;

DFT-50A型50克手提式高速粉碎机,温岭市林大机械有限公司.

1.2 实验方法

1.2.1 粗多糖的提取^[11]

银条菜清洗干净后,于60℃恒温干燥箱中烘至质量恒定,粉碎机中磨碎,过80目筛,装入聚乙烯瓶中,放入干燥器中备用.取处理好的样品与蒸馏水按质量比1:30混合,放入超声清洗机中超声处理30min,抽滤;收集滤液,旋转蒸发浓缩至原体积的五分之一,加入4倍体积无水乙醇,4℃放置24h,离心收集沉淀;将沉淀依次用无水乙醇、乙醚洗涤,再于60℃烘箱中烘至质量恒定,得到银条菜粗多糖.

1.2.2 多糖含量的测定

通过苯酚-硫酸法^[12]测定银条菜粗多糖中的多糖含量.用电子天平称量烘至质量恒定的葡萄糖标准样品100.00mg,用蒸馏水定容至100.00mL,配制成1.00mg/mL的标准储备液备用.取1mL储备液定容至10mL,得到100μg/mL的葡萄糖标准溶液.分别取0.00、0.20、0.40、0.60、0.80、1.00mL标准液置于10mL具塞试管中,再分别加蒸馏水将体积补至1.00mL.向各试管中加入1.00mL的6.00%苯酚溶液(体积分数),再加入5.00mL浓硫酸,混合均匀.于沸水浴中加热30min,取出后冷却,用紫外分光光度计在490nm处以蒸馏水为参比测定吸光度,测3组平行样,取平均值.以葡萄糖质量浓度(μg/mL)为横坐标,吸光度为纵坐标,绘制标准曲线.所得曲线为 $y = 0.0072x - 0.0066$, $R^2 = 0.9997$.

取粗多糖用蒸馏水配制成10.00mg/mL的溶液,再用蒸馏水稀释100倍,量取1.00mL稀释液于试管中,测定吸光度,将吸光度代入标准曲线中计算葡萄糖质量浓度(μg/mL).按照式(1)计算多糖保留率.

$$\text{多糖保留率} = \frac{\rho_1}{\rho_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ρ_0 为样品脱除蛋白前所配制溶液中多糖的质量浓度, ρ_1 为样品脱除蛋白后所配制溶液中多糖的质量浓度.

1.2.3 蛋白含量的测定

采用考马斯亮蓝G250法对银条菜粗多糖中的蛋白进行测定.取10.00mg牛血清蛋白用蒸馏水定容至100mL,得到100μg/mL蛋白标准溶液.称量

25 mg 的考马斯亮蓝 G250 试剂溶解于 12.50 mL 体积分数为 95% 的乙醇溶液, 加入 25.00 mL 质量分数为 85% 的磷酸溶液, 用蒸馏水定容至 250 mL, 得到考马斯亮蓝 G250 工作液. 分别取 0.00、0.20、0.40、0.60、0.80、1.00 mL 蛋白标准溶液于试管内, 用蒸馏水将体积补至 1 mL, 分别加入 5.00 mL 考马斯亮蓝 G250 工作液, 混合均匀, 放置反应 2 min, 用紫外分光光度计在 595 nm 波长下测定吸光度, 测 3 组平行样, 取平均值. 以蛋白溶液质量浓度 ($\mu\text{g}/\text{mL}$) 为横坐标, 吸光度为纵坐标, 绘制标准曲线. 所得曲线为 $y = 0.0063x - 0.0113$, $R^2 = 0.9977$.

称量粗多糖样品, 用蒸馏水配制成 10.00 mg/mL 的溶液, 量取 1.00 mL, 按照上文所述方法进行的操作, 对样品中的蛋白质量浓度 ($\mu\text{g}/\text{mL}$) 进行测定. 按照式 (2) 计算蛋白去除率.

$$\text{蛋白去除率} = \frac{\rho_2 - \rho_3}{\rho_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: ρ_2 为样品脱除蛋白前所配制溶液中蛋白的质量浓度, ρ_3 为样品脱除蛋白后所配制溶液中蛋白的质量浓度.

1.2.4 糖醛酸含量的测定

采用咪唑硫酸改良法^[13]测定糖醛酸的含量. 精确称量 10.00 mg 半乳糖醛酸, 用蒸馏水定容至 100 mL, 得到质量浓度为 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的标准溶液, 备用. 配制四硼酸钠-硫酸溶液, 称取 0.956 g 四硼酸钠溶于 200 mL 浓硫酸中. 分别取标准溶液 0.00、0.10、0.20、0.30、0.40、0.50 mL 置于具塞试管中, 加蒸馏水将体积补至 0.50 mL; 将试管放入冰水浴中, 分别加入 3.0 mL 四硼酸钠-硫酸溶液, 混匀后于 85 $^{\circ}\text{C}$ 的水浴中加热 20 min, 取出冷却后, 加入 0.10 mL 0.10% 的咪唑-无水乙醇溶液 (质量分数), 混合均匀后, 室温下反应 2 h. 用紫外分光光度计在 530 nm 处测吸光度, 测 3 组平行样, 取平均值. 以半乳糖醛酸质量浓度为横坐标, 吸光度为纵坐标, 绘制标准曲线. 所得曲线为 $y = 0.006x - 0.0158$, $R^2 = 0.9913$.

称取粗多糖样品配制成 10.00 mg/mL 溶液, 稀释 5 倍, 取 0.50 mL 于试管中, 按上文所述方法, 对样品中糖醛酸质量浓度 ($\mu\text{g}/\text{mL}$) 进行测定. 按照式 (3) 计算糖醛酸保留率.

$$\text{糖醛酸保留率} = \frac{\rho_5}{\rho_4} \times 100\% \quad (3)$$

式中: ρ_4 为样品脱除蛋白前所配制溶液中糖醛酸的质量浓度, ρ_5 为样品脱除蛋白后所配制溶液中糖醛酸的

质量浓度.

1.3 脱蛋白方法

1.3.1 TCA 法^[14-15]

取 1.2.1 节中提取到的粗多糖配制成 10.00 mg/mL 的溶液 50 mL, 在溶液中分别加入相等体积的体积分数分别为 2.00%、5.00%、10.00%、15.00%、20.00% 的三氯乙酸溶液, 混合均匀后于 4 $^{\circ}\text{C}$ 放置 12 h, 抽滤去除沉淀, 得到脱蛋白溶液.

1.3.2 盐析法^[16]

取 1.2.1 节中提取到的粗多糖配制成 10.00 mg/mL 溶液 50 mL, 用 NaOH 溶液调节粗多糖溶液 pH 为 8.0, 水浴加热至 85 $^{\circ}\text{C}$, 分别加入 0.10、0.30、0.50、0.70、0.90 g 无水 CaCl_2 , 混匀后沸水浴 30 min; 取出后冷却至室温, 抽滤去除沉淀, 得到脱蛋白溶液.

1.3.3 盐酸法^[17]

取 1.2.1 节中提取到的粗多糖配制成 10 mg/mL 溶液 50 mL, 用 2 mol/L 盐酸分别调节粗多糖溶液 pH 为 1、2、3、4、5, 4 $^{\circ}\text{C}$ 保存 12 h, 抽滤去除沉淀, 得到脱蛋白溶液.

1.4 紫外光谱分析

将未脱蛋白溶液和已脱蛋白溶液均稀释 10 倍, 用紫外分光光度计于 200 ~ 400 nm 进行光谱扫描.

2 结果与讨论

2.1 TCA 法

TCA 溶液的体积分数对溶液中蛋白去除率、多糖保留率、糖醛酸保留率的影响如图 1 所示.

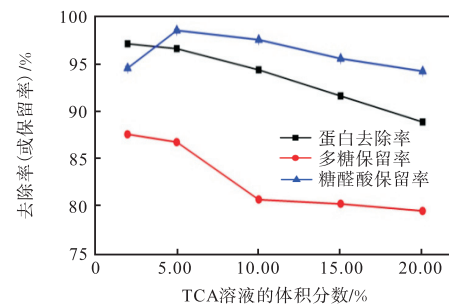


图 1 TCA 溶液的体积分数对蛋白去除率、多糖保留率、糖醛酸保留率的影响

Fig. 1 Effect of the volume fraction of TCA solution on protein removal rate, polysaccharide retention rate and uronic acid retention rate

由图 1 可知: 蛋白去除率随着 TCA 溶液体积分数的增大而降低. 在 TCA 溶液的体积分数为 5.00% 时, 蛋白去除率达到 97.25%, 随着 TCA 溶液体积分

数的增大,去除率略微下降.多糖保留率随 TCA 体积分数的增大而明显降低,在 TCA 溶液体积分数为 5.00% 时达到 86.89%. 这可能是由于多糖中蛋白的等电点对应 pH 与溶液的 pH 接近,而且 TCA 作为变性剂使蛋白的构象发生变化,暴露出更多的疏水基团而聚集沉淀,而蛋白沉淀的同时,吸附了一定量的多糖造成损失^[18]. 高浓度的 TCA 可以在一定的程度上造成银条菜多糖水解,进而引起多糖结构发生变化^[19-20]. 糖醛酸保留率呈先增后减的趋势,在 TCA 溶液体积分数为 5.00% 时达到最大(98.67%),这可能是由于糖醛酸在酸性条件下发生水解. 虽然 TCA 体积分数为 2.00% 时多糖保留率是最大的,但是 2.00% 和 5.00% 时两者的多糖保留率相差不到 1.00%,而糖醛酸保留率差距较大. 综合考虑糖醛酸保留率、多糖保留率以及蛋白去除率等指标, TCA 溶液的体积分数为 5.00% 时综合效果最好,所以, TCA 法除蛋白时, TCA 溶液的最佳体积分数为 5.00%.

2.2 盐析法

无水 CaCl_2 添加量对蛋白去除率、多糖保留率、糖醛酸保留率的影响如图 2 所示.

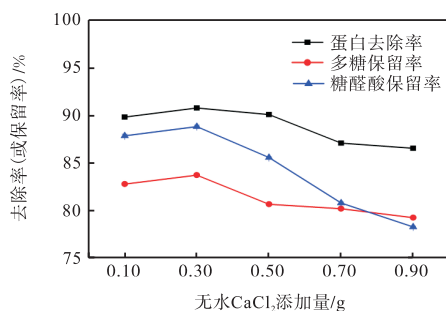


图 2 无水 CaCl_2 添加量对蛋白去除率、多糖保留率、糖醛酸保留率的影响

Fig. 2 Effect of addition to anhydrous CaCl_2 on protein removal rate, polysaccharide retention rate and uronic acid retention rate

由图 2 可知:样品中蛋白去除率随着无水氯化钙添加量的增大而呈现先增后减的趋势,无水 CaCl_2 添加量为 0.30 g 时达到最大(90.61%),此后随着无水氯化钙添加量的增加而逐渐降低. 溶液中多糖和糖醛酸的含量随着无水 CaCl_2 的添加呈现先升高后降低的趋势,在无水 CaCl_2 添加量为 0.30 g 时保留率最大,分别为 83.59%、88.67%. 这可能是由于随着中性盐浓度的增加,蛋白表面的水化膜和电性被破坏而发生沉降^[21],但其沉降的蛋白会对多糖溶液中的多糖和糖醛酸产生吸附作用,进而造成多糖和糖醛酸的损

失^[22]. 选择无水 CaCl_2 的添加量为 0.30 g 作为最佳处理条件.

2.3 盐酸法

pH 对蛋白去除率、多糖保留率、糖醛酸保留率的影响如图 3 所示. 由图 3 可知:随着 pH 的升高,蛋白去除率略有波动,但均较高,在 pH=3 时,蛋白去除率最大,为 95.92%;随着 pH 的增大,多糖保留率先增加后减小,在 pH=3 时,多糖保留率最高,为 86.31%,这可能是由于多糖在强酸条件下发生了水解^[23]. 糖醛酸保留率受 pH 的影响较大,在 pH=1 时,糖醛酸保留率为 59.27%,但在 pH=3 时,糖醛酸保留率达到了 95.03%,这可能是由于糖醛酸在剧烈的水解条件下很容易发生脱羧反应. 故盐酸法除蛋白的最适 pH 为 3.

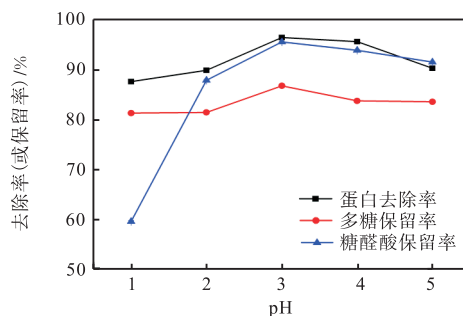


图 3 pH 对蛋白去除率、多糖保留率、糖醛酸保留率的影响

Fig. 3 Effect of pH on protein removal rate, polysaccharide retention rate and uronic acid retention rate

2.4 3种脱蛋白方法的比较

将 3 种脱蛋白方法在各自最优条件下获得的数据进行对比,结果如图 4 所示.

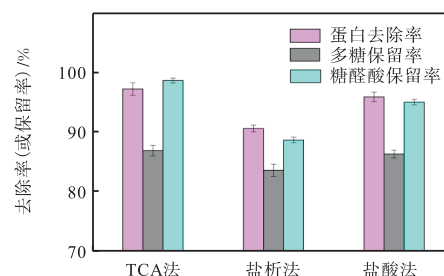


图 4 TCA 法、盐析法、盐酸法脱蛋白结果比较

Fig. 4 Comparison of the results of deproteinization by TCA method, salting out method and hydrochloric acid method

从图 4 中可以看出:用无水氯化钙盐析脱蛋白的效果最差,它对蛋白的去除率低,对多糖和糖醛酸的

保留率差;TCA法和盐酸法脱蛋白的效果都较好,在最优条件下蛋白去除率都达到95.00%以上,两种方法对多糖都有较好的保留效果,TCA法中糖醛酸保留率更高一些,最优条件下达到98.67%。

2.5 紫外光谱分析

不同样品的紫外光谱如图5所示。从图5中可以看出:脱蛋白样品和未脱蛋白样品的紫外光谱有明显的区别。蛋白因氨基酸残基中的苯环上有共轭双键而在280 nm处对紫外光有吸收^[24],故而样品扫描光谱在280 nm处有吸收峰。扫描曲线的结果显示,在280 nm前后,3种脱蛋白方法处理的样品相对于未脱蛋白的样品没有明显吸收峰,表明这3种脱蛋白方法都有明显脱除蛋白的效果。

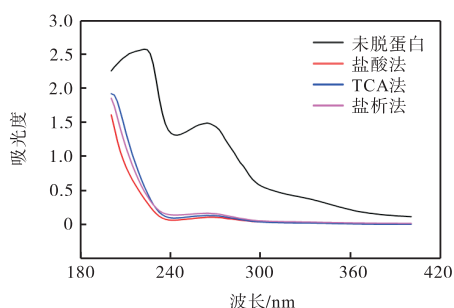


图5 不同样品的紫外光谱

Fig. 5 UV spectra of different samples

3 结论

TCA法、盐析法、盐酸法对银条菜粗多糖都有较好的脱蛋白效果。TCA法在TCA溶液体积分数为5.00%时,蛋白去除率为97.25%;盐析法中无水氯化钙的添加量为0.30 g时,蛋白去除率为90.61%;盐酸法调节pH为3时,蛋白去除率为95.92%;3种方法相应的多糖保留率分别为86.89%、83.59%、86.31%,糖醛酸保留率分别为98.67%、88.67%、95.03%。故而在这3种脱蛋白方法中TCA法的效果最好,盐酸法次之,盐析法的效果最不理想。由此证明TCA法是一种能够相对有效去除银条菜多糖中蛋白且多糖和糖醛酸保留较好的一种方法。

参考文献:

- [1] 李素云,梁中丽,董铁有. 调压法冻干银条工艺研究[J]. 粮食流通技术,2010(2):40-42.
- [2] 马丽苹,秦翠丽,邱智军,等. 银条 α -低聚半乳糖的免疫调节作用研究[J]. 食品工业科技,2013,34(9):356-358.
- [3] 马丽苹,赵君锋,汪伦记,等. 银条 α -低聚半乳糖体外肠道益生功能研究[J]. 食品科技,2013,38(5):217-223.
- [4] 李向阳,齐鹏博,龚其海,等. 银条多糖对链脲佐菌素致糖尿病小鼠血糖的药效学观察[J]. 蚌埠医学院学报,2012,37(3):254-255.
- [5] 张晓伟,王淑敏,王德国,等. 银条多糖的提取工艺及其抑菌性研究[J]. 食品研究与开发,2011,32(7):25-28.
- [6] 马丽苹,尤晓颜,原江锋,等. 银条多糖 SFPSA 的单糖组成及抗肿瘤活性研究[J]. 天然产物研究与开发,2013,25(10):1411-1415.
- [7] 钟先锋,黄桂东,张继如,等. 银条水苏糖抑制人结肠癌 Caco-2 细胞增殖的作用及机制[J]. 食品与机械,2015,31(6):156-159.
- [8] 阿吾提·艾买尔,古力齐曼·阿布力孜,迪丽努尔·马里克. 响应曲面法优化野蔷薇根多糖脱蛋白工艺的研究[J]. 应用化工,2015,44(11):2006-2010.
- [9] 初雅洁. 辣木多糖除蛋白的工艺技术研究[J]. 现代食品,2020(19):86-89.
- [10] 王新嘉,雷国风,翟志军,等. 平菇多糖中蛋白质脱除方法的比较[J]. 食品研究与开发,2017,38(5):111-118.
- [11] 马丽苹. 银条多糖分离纯化、抗肿瘤和免疫调节活性研究[D]. 南京:南京农业大学,2012.
- [12] 郭慧静,张伟达,陈国刚. 蒲公英多糖脱色脱蛋白方法及其降血糖活性研究[J]. 食品研究与开发,2020,41(3):24-28.
- [13] 陈小蒙. 水溶性龙牙百合多糖的纯化、一级结构及其生物活性研究[D]. 南昌:南昌大学,2008.
- [14] ZHANG S J, HU T T, CHEN Y Y, et al. Analysis of the polysaccharide fractions isolated from pea (*Pisum sativum* L.) at different levels of purification[J]. Journal of food biochemistry, 2020, 44(8): e13248.
- [15] ZENG X T, LI P Y, CHEN X, et al. Effects of deproteinization methods on primary structure and antioxidant activity of *Ganoderma lucidum* polysaccharides[J]. International journal of biological macromolecules, 2019, 126: 867-876.
- [16] CHEN L, HUANG G L, HU J C. Preparation, deproteinization, characterisation, and antioxidant activity of polysaccharide from cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J]. International journal of biological macromolecules, 2018, 108: 408-411.

- turation kinetics of highly concentrated whey protein isolate[J]. Journal of food engineering, 2021, 292: 110294.
- [5] 晋迎申. 丹酚酸 B 热稳定性研究[J]. 上海医药, 2014, 35(21): 78-80.
- [6] 雷文芳, 谢继红, 陈东, 等. 基于膜蒸馏的热敏料液常压低温浓缩装置性能模拟[J]. 天津科技大学学报, 2020, 35(6): 25-28.
- [7] SERDAL S, MUTLU C, OMER C, et al. Quality characteristics of pomegranate juice concentrates produced by ohmic heating assisted vacuum evaporation[J]. Journal of the science of food and agriculture, 2019, 99(5): 2589-2595.
- [8] 王文成, 陈梅英, 陈锦权. 金线莲根茎提取液冷冻浓缩工艺优化[J]. 食品与机械, 2016, 32(5): 168-172.
- [9] 秦贯丰, 丁中祥, 原姣姣, 等. 苹果汁冷冻浓缩与真空蒸发浓缩效果的对比[J]. 食品科学, 2020, 41(7): 102-109.
- [10] BAGCI P O. Potential of membrane distillation for production of high quality fruit juice concentrate[J]. Critical reviews in food science and nutrition, 2015, 55(8): 1098-1113.
- [11] 金程, 陈东, 彭跃莲, 等. 套管型气隙式膜蒸馏组件性能模拟及优化[J]. 天津科技大学学报, 2019, 34(5): 51-56.
- [12] ALKHUHDHIRI A, DARWISH N, HILAL N. Membrane distillation: a comprehensive review[J]. Desalination, 2012, 287: 2-18.
- [13] LOUSSIF N, ORFI J. Comparative study of air gap, direct contact and sweeping gas membrane distillation configurations[J]. Membrane water treatment, 2016, 7(1): 71-86.
- [14] 陈华艳, 李欢, 吕晓龙. 气扫式膜蒸馏传质传热过程[J]. 化工学报, 2009, 60(2): 304-309.
- [15] TAN Y Z, HAN L, CHEW N G P, et al. Membrane distillation hybridized with a thermoelectric heat pump for energy-efficient water treatment and space cooling[J]. Applied energy, 2018, 231: 1079-1088.
- [16] 杨丹, 高启君, 吕晓龙, 等. 气扫式多效膜蒸馏过程数学模型研究[J]. 膜科学与技术, 2014, 34(5): 58-64.

责任编辑: 周建军

(上接第 17 页)

- 2020, 39(9): 2015-2025.
- [33] 刘洪艳, 王珊. 异化铁还原细菌 *Klebsiella* sp. KB52 还原重金属 Cr(VI) [J]. 环境工程学报, 2019, 13(5): 1113-1118.
- [34] DEREVEN'KOV I A, HANNIBAL L, MAKAROV S V, et al. Catalytic effect of riboflavin on electron transfer from NADH to aquacobalamin[J]. JBIC Journal of biological inorganic chemistry, 2020, 25(97): 125-133.
- [35] ZHOU C, WANG H, SI Y, et al. Electron shuttles enhance the degradation of sulfamethoxazole coupled with Fe(III) reduction by *Shewanella oneidensis* MR-1[J]. Environmental toxicology and pharmacology, 2018, 62: 156-163.
- [36] YARLAGADDA V N, GUPTA A, DODGE C J, et al. Effect of exogenous electron shuttles on growth and fermentative metabolism in *Clostridium* sp. BC1[J]. Bioresource technology, 2012, 108: 295-299.
- [37] LIST C, HOSSEINI Z, MEIBOM K L, et al. Impact of iron reduction on the metabolism of *Clostridium acetobutylicum* [J]. Environmental microbiology, 2019, 21(10): 3548-3563.

责任编辑: 郎婧

(上接第 22 页)

- [17] MOHAMMED J K, MAHDI A A, AHMED M I, et al. Preparation, deproteinization, characterization, and antioxidant activity of polysaccharide from *Medemia argun* fruit[J]. International journal of biological macromolecules, 2020, 155: 919-926.
- [18] 秦卫东, 马利华, 陈学红, 等. 生姜多糖的提取及脱蛋白研究[J]. 食品科学, 2008, 29(4): 218-220.
- [19] 赵师师, 高旭红, 常君, 等. 石榴皮多糖的三氯乙酸法脱蛋白工艺研究[J]. 广州化工, 2015, 43(17): 64-66.
- [20] 董英, 张艳芳, 孙艳辉. 水飞蓟粗多糖脱蛋白方法的比较[J]. 食品科学, 2007, 28(12): 82-84.
- [21] YANG H H, WU Y J, GAN C J, et al. Characterization and antioxidant activity of a novel polysaccharide from *Pholidota chinensis* Lindl. [J]. Carbohydrate polymers, 2016, 138: 327-334.
- [22] 李月, 何杰, 王昀, 等. 云南野生玛卡多糖脱蛋白工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2018(9): 149-157.
- [23] 曹红阳, 徐海洋, 陈云美. 多糖去蛋白技术概况[J]. 生物技术世界, 2013(5): 8.
- [24] 张发宇, 余金卫, 张浏, 等. 巢湖蓝藻藻蓝蛋白纯化过程中紫外-可见吸收光谱特征分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(3): 806-810.

责任编辑: 周建军