

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90063

分级醇沉紫薯多糖抗氧化活性与稳定性

Antioxidant and stability of polysaccharides from purple sweet potato
by fractional alcohol precipitation

林 军^{1,2,3,4} 李高阳^{2,3,4} 黄 帆^{1,2,3,4} 谢秋涛^{2,3,4} 袁洪燕^{2,3,4}
LIN Jun^{1,2,3,4} LI Gao-yang^{2,3,4} HUANG Fan^{1,2,3,4} XIE Qiu-tao^{2,3,4} YUAN Hong-yan^{2,3,4}

(1. 湖南大学隆平分院, 湖南 长沙 410125; 2. 湖南省农业科学院农产品加工研究所,
湖南 长沙 410125; 3. 果蔬贮藏加工与质量安全湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410125;
4. 湖南省果蔬加工与质量安全国际科技创新合作基地, 湖南 长沙 410125)

(1. Longping Branch Graduate School, Hunan University, Changsha, Hunan 410125, China; 2. Hunan
Agricultural Products Processing Institute, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha, Hunan
410125, China; 3. Hunan Province Key Lab of Fruits & Vegetables Storage, Processing, Quality and Safety,
Changsha, Hunan 410125, China; 4. Hunan Province International Joint Lab on Fruits & Vegetables
Processing, Quality and Safety, Changsha, Hunan 410125, China)

摘要:目的:探究紫薯多糖的组成成分、抗氧化活性及稳定性,提高分离纯化的效率。方法:对紫薯粗多糖进行分级醇沉,对比分析各醇沉组分的自由基清除能力、对菜籽油的抗氧化能力以及化学稳定性。结果:通过分级醇沉得到了 PPSP-40%、PPSP-60%、PPSP-80% 3 种组分,三者多糖、蛋白质、硫酸基、糖醛酸含量高低顺序为 PPSP-80% > PPSP-60% > PPSP-40%。其中,PPSP-80% 对 DP-PH 自由基、ABTS 自由基、超氧阴离子自由基的清除能力最强,PPSP-60% 对羟基自由基的清除能力最强,而 PPSP-40% 对自由基的清除能力最差;对菜籽油抗氧化效果强弱顺序为 PPSP-80% > PPSP-60% > PPSP-40%。PPSP-40% 的稳定性最差,PPSP-60% 在极端碱性条件下稳定性最好,而 PPSP-80% 在 121 ℃ 高温条件下稳定性最好。结论:分级醇沉对紫薯粗多糖具有一定的分离效果,不同醇沉组分抗氧化效果及稳定性具有明显差异,且高浓度醇沉组分的抗氧化效果和稳定性较好。

关键词:紫薯多糖;醇沉;抗氧化作用;自由基清除;稳定性

Abstract: Objective: This study aimed to explore the composition, antioxidant activity and stability of purple potato polysaccharides and improve the efficiency of separation purification. Methods: The free radical scavenging capacity, antioxidant capacity

and chemical stability of the crude polysaccharides from purple sweet potato were compared and analyzed by fractional alcohol precipitation. Results: The contents of polysaccharide, protein, sulfate group and uronic acid in the three fractions were in the order of PPSP-80% > PPSP-60% > PPSP-40%. Among them, PPSP-80% fraction had the strongest scavenging ability on DP-PH, ABTS and superoxide anion free radicals, while PPSP-60% fraction had the strongest scavenging ability on hydroxyl free radicals. Whereas, PPSP-40% fraction had the worst scavenging ability on free radicals. The order of antioxidant effect on rapeseed oil was PPSP-80% > PPSP-60% > PPSP-40%, and PPSP-40% fraction had the worst stability, PPSP-60% had the best stability under extreme alkaline conditions, and PPSP-80% had the best stability at 121 ℃. Conclusion: Fractional alcohol precipitation has certain separation effect on purple sweet potato crude polysaccharides, and different alcohol precipitation components have obvious differences in antioxidant effect and stability. Therefore, the high concentration alcohol precipitated component had better antioxidant effect and stability.

Keywords: purple potato polysaccharide; alcohol precipitation; antioxidation; free radical clearance; stability

基金项目:湖南省现代农业产业技术体系—早粮产业技术体系项目;湖南省重点研发计划(编号:2021NK2014)

作者简介:林军,男,湖南大学在读硕士研究生。

通信作者:李高阳(1971—),男,湖南大学研究员,博士生导师,博士。E-mail: lgy7102@163.com

收稿日期:2021-11-10

紫薯,又名紫甘薯,因其花青素含量高而呈紫色^[1],除花青素外,紫薯中多糖含量较高,据相关研究^[2]报道,紫薯中含有约 5.42% 的多糖,与鹰嘴豆粉多糖的含量(5.56%)接近。多糖具有抗氧化、免疫调节、抗肿瘤、抗炎和增殖双歧杆菌^[3-6]等作用,研究^[7-8]表明,对植物多糖进行分级醇沉,可以达到一定的分离纯化效果,且有利于

多糖的进一步开发利用。同时,植物多糖作为一种纯天然的抗氧化剂,可捕捉油脂氧化反应中产生的活性氧,从而对油脂起到一定的抗氧化效果。近年来,关于紫薯多糖的抗氧化作用,集中在其对自由基清除效果的研究上,而对油脂的抗氧化作用还少有相关研究报道,也未见采用分级醇沉方法对紫薯多糖进行分离纯化的相关报道。

研究拟采用 40%,60%,80% 3 个梯度的乙醇对紫薯多糖进行分级醇沉,并测定 3 种不同醇沉组分的组成、抗氧化活性以及其化学稳定性,从而筛选出抗氧化活性及稳定性较好的醇沉组分,以期对紫薯多糖的开发利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

紫薯:紫罗兰,湖南省售;

Tris-HCl 缓冲液:雷根生物技术有限公司;

DPPH:纯度 $\geq 97.0\%$,上海化成工业发展有限公司;

ABTS:纯度 $\geq 98.0\%$,上海瑞永生物科技有限公司;

某品牌菜籽油:湖南岳阳;

无水乙醇:分析纯,郑州派尼化学试剂厂;

果胶酶:酶活 ≥ 500 U/mg,上海瑞永生物科技有限公司;

过硫酸钾、抗坏血酸、考马斯亮蓝、葡萄糖醛酸、吡啶、邻苯三酚、水杨酸:分析纯,天津市恒兴化学试剂制造有限公司;

明胶、硫酸钾、葡萄糖、三氯乙酸:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

氯化钡、硫酸亚铁:分析纯,西陇科学股份有限公司;

所有用水为超纯水。

1.1.2 主要仪器设备

紫外—可见分光光度计:UV-1800 型,岛津仪器(苏州)有限公司;

高速离心机:vanfij-26xp 型,美国 Beckman 公司;

数控超声波清洗器:KQ-700DE 型,昆山市超声仪器有限公司;

精密分析天平:BSA124S 型,广州市授科仪器科技有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9053A 型,上海精宏实验设备有限公司;

电热恒温水浴锅:XMTD-702 型,北京三二八科学仪器有限公司;

多功能粉碎机:RS-FS1401 型,合肥荣事达小家电有限公司;

旋转蒸发仪:GG17 型,上海申顺生物科技有限公司;

冷冻干燥机:LGJ-25C 型,四环福瑞科仪科技发展有限公司。

1.2 方法

1.2.1 紫薯多糖提取 根据文献[9]修改如下:采用果胶酶提法提取紫薯多糖,以蒸馏水为提取溶剂,提取条件为提取温度 50 ℃、酶添加量 2.5%、pH 3.5、酶解时间 180 min、料液比($m_{\text{紫薯粉}} : V_{\text{蒸馏水}}$) 1 : 35 (g/mL),经 5 300 r/min 离心 20 min,收集上清液;沉淀重复提取 1 次,合并上清液,经旋转蒸发仪浓缩之后,在溶液中加入一定量无水乙醇,使乙醇体积分数达到 80%,于 4 ℃冰箱中醇沉过夜,经 5 300 r/min 离心 20 min,收集沉淀冻干,得紫薯粗多糖,真空包装后,置于干燥器中在室温下贮存备用。

1.2.2 不同浓度乙醇沉淀多糖 根据文献[10]修改如下:将得到的紫薯粗多糖配制成 10%的多糖溶液,离心去除不溶性杂质,在溶液中加入无水乙醇使乙醇体积分数达到 40%,于 4 ℃冰箱中醇沉过夜,离心分离收集多糖获得 40%醇沉组分(PPSP-40%)。在上清液中再加入一定量无水乙醇,使乙醇体积分数达到 60%(PPSP-60%),醇沉过夜,收集多糖获得 60%醇沉组分。按同样的方法,获得 80%醇沉组分(PPSP-80%)。

1.2.3 多糖含量测定 根据文献[11]。

1.2.4 蛋白含量测定 根据文献[12]。

1.2.5 糖醛酸含量测定 根据文献[13]修改如下:吸取 1.0 mL 多糖溶液于试管中,加入 5 mL 浓硫酸,85 ℃水浴加热 20 min,室温下冷却加入 1.0 mL 吡啶(1.5 mg/mL),摇晃均匀,室温下反应 2 h,于 530 nm 处测吸光值。

1.2.6 硫酸基含量测定 根据文献[14]。

1.2.7 醇沉多糖抗氧化活性研究

(1) DPPH 自由基清除能力:根据文献[15]。

(2) ABTS 自由基清除能力:根据文献[16]修改如下:取 0.8 mL 用乙醇稀释过的样品溶液与 7.2 mL 的 ABTS 工作液混合均匀,静置 6 min 后,于 734 nm 处测定其吸光值,根据吸光值计算 ABTS 自由基清除率。

(3) 羟基自由基清除能力:根据文献[17]修改如下:取 25 mL 洁净试管,分别加入 5 mL 硫酸亚铁溶液(1 mmol/L)、5 mL 过氧化氢溶液(3 mmol/L),再加入 1 mL 样品溶液,空白管加入 1 mL 蒸馏水,混合均匀后用 3 mmol/L 的水杨酸溶液定容至 25 mL,37 ℃水浴反应 15 min,在 510 nm 处测定吸光值,按式(1)计算羟基自由基清除率。

$$R = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

R——DPPH 自由基清除率,%;

A_0 ——空白溶液吸光值;

A_1 ——样品溶液吸光值。

(4) 超氧阴离子自由基清除能力:根据文献[18]。

(5) 对菜籽油的抗氧化作用:根据文献[19—20]修改

如下:准确称取 30.0 g 菜籽油,置于 250 mL 锥形瓶中,分别加入含量为 0.01%,0.02%,0.04%的醇沉组分;以不添加任何物质的菜籽油为空白对照;以添加 0.04%抗坏血酸的菜籽油为阳性对照,同时做平行试样。将全部样品混合均匀后置于 60 ℃恒温干燥箱中强化贮存,定时振荡混匀并改变样品在干燥箱中的相对位置,每隔 2 d 取样,按照 GB/T 5009.37—2003 中的方法测定氢过氧化物含量和丙二醛含量。

(6) 稳定性试验:根据文献[9]修改如下:

高温稳定性试验:① 量取 1.00 mL 多糖溶液样品,加入 4.00 mL 超纯水;② 量取 1.00 mL 多糖溶液样品,加入 4.00 mL 4 mol/L 三氟乙酸溶液;③ 量取 1.00 mL 多糖溶液样品,加入 4.00 mL 4 mol/L 氢氧化钠溶液。将上述 3 种溶液于 121 ℃高温处理 20 min 后,中和②号和③号样品至中性,并将 3 种样品定容至 10.00 mL,测定粗多糖含量。

酸稳定性试验:量取 1.00 mL 多糖溶液样品,加入 4.00 mL 4 mol/L 三氟乙酸溶液于 60 ℃保温 6 h,冷却后用氢氧化钠溶液中和至中性,定容至 10.00 mL,测定粗多糖含量。

碱稳定性试验:量取 1.00 mL 多糖溶液样品,加入 4.00 mL 4 mol/L 氢氧化钠溶液于 60 ℃保温 6 h,冷却后用三氟乙酸溶液中和至中性,定容至 10.00 mL,测定粗多糖含量。

对照样品多糖含量测定:量取 1.00 mL 多糖溶液样品,不进行任何处理,直接用水定容至 10.00 mL,测定粗多糖含量。

1.3 数据处理

采用 Origin 2019 对试验结果进行作图分析,采用 SPSS 26 统计学软件进行数据统计分析。 $P<0.05$ 时有显著性差异, $P<0.01$ 时有极显著差异。

2 结果与讨论

2.1 紫薯多糖各物质含量

由表 1 可以看出,3 种醇沉组分总质量占比为 82.96%,得率较高,其中 $m_{PPSP-40\%}:m_{PPSP-60\%}:m_{PPSP-80\%}=17.33:27.16:38.47$ 。当乙醇体积分数为 80%时,多糖含量较高。当乙醇体积分数为 40%时,多糖含量较低,3 种组分的多糖含量随乙醇体积分数的升高而增加,与田冰梅等^[21]对宣木瓜多糖进行分级醇沉所得的结果相似,一般来说,小分子的多糖极性更高,需要更高浓度的乙醇才能沉淀下来,因此 PPSP-80%中的多糖种类可能更多,多糖含量更高;并且 PPSP-80%的蛋白质、葡萄糖醛酸和硫酸基含量也最高,其次为 PPSP-60%,而 PPSP-40%所得的含量最低。以多糖含量为参考指标,乙醇体积分数选择 80%为宜。

2.2 紫薯多糖清除 DPPH 自由基能力

由表 2 和图 1 可知,PPSP-40%、PPSP-60%、PPSP-80% 3 种醇沉组分对 DPPH 自由基都具有一定的清除能力,其 IC_{50} 值大小顺序为:PPSP-40% > PPSP-60% > PPSP-80%,说明 PPSP-80%对 DPPH 自由基清除能力最强,PPSP-60%次之,清除能力最弱的为 PPSP-40%,但 3 种醇沉组分清除 DPPH 自由基的能力与维生素 C 相比还有差距。当质量浓度升高时,各醇沉组分对自由基的清除率也逐渐上升,质量浓度达到 0.8 mg/mL 时,PPSP-60%和 PPSP-80%对自由基的清除增长率明显降低,而 PPSP-40%对自由基的清除增长率无明显变化,说明要达到较好的清除效果,需要更高浓度的 PPSP-40%,且各组分对 DPPH 自由基的清除能力呈量效关系。

2.3 紫薯多糖清除 ABTS 自由基能力

由图 2 可知,当 PPSP-40%和 PPSP-60%两种醇沉组

表 1 分级醇沉紫薯多糖各组分物质含量[†]

Table 1 Gradient alcohol-sinking purple potato polysaccharide components of the substance content

醇沉组分	得率	多糖	蛋白质	葡萄糖醛酸	g/100 g
					硫酸基
PPSP-40%	17.33±0.22 ^c	17.09±0.23 ^c	1.05±0.02 ^c	4.05±0.27 ^c	3.37±0.18 ^c
PPSP-60%	27.16±0.34 ^b	37.74±1.44 ^b	1.39±0.01 ^b	8.22±0.21 ^b	4.61±0.13 ^b
PPSP-80%	38.47±0.12 ^a	47.90±0.13 ^a	1.67±0.05 ^a	10.26±0.27 ^a	5.88±0.10 ^a

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

表 2 分级醇沉紫薯多糖及维生素 C 抗氧化活性 IC_{50} 值[†]

Table 2 Gradient alcohol-sinking purple potato polysaccharide antioxidant activity IC_{50} value

醇沉组分	DPPH 自由基	ABTS 自由基	羟基自由基	超氧阴离子
PPSP-40%	1.005±0.007 ^a	1.233±0.015 ^a	0.985±0.018 ^a	0.916±0.032 ^a
PPSP-60%	0.727±0.004 ^b	0.792±0.004 ^b	0.318±0.007 ^b	0.848±0.019 ^b
PPSP-80%	0.343±0.004 ^c	0.343±0.001 ^c	0.353±0.005 ^b	0.321±0.003 ^c
维生素 C	0.017±0.002 ^d	0.023±0.007 ^d	0.077±0.005 ^c	0.051±0.001 ^d

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

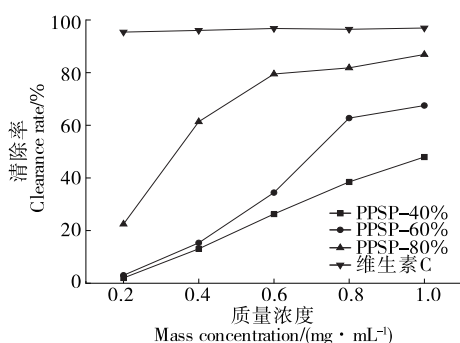


图1 紫薯多糖对DPPH自由基的清除能力

Figure 1 Purple potato polysaccharides on DPPH free radical removal capacity

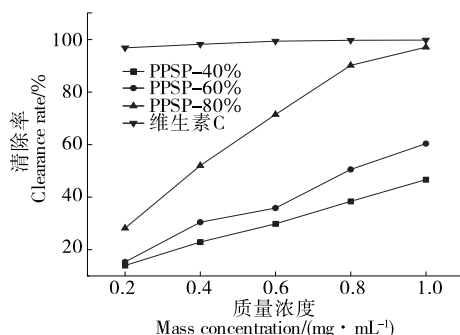


图2 紫薯多糖对ABTS自由基的清除能力

Figure 2 Purple potato polysaccharides on ABTS free radical removal capacity

分浓度较低时,对ABTS自由基的清除能力接近,当浓度升高时,PPSP-60%的清除能力优于PPSP-40%,但均不及PPSP-80%和维生素C,浓度较低时,PPSP-80%对自由基的清除能力与维生素C相比差距较大,但随着浓度的增加,PPSP-80%的清除能力逐渐与维生素C持平,说明要达到较好的清除效果,需要的样品浓度比较大。由表2可知,PPSP-40%的 IC_{50} 值最大,为1.233 mg/mL,其次为PPSP-60%,而PPSP-80%的 IC_{50} 值相对较小,为0.343 mg/mL,说明PPSP-80%对ABTS自由基的清除能力最强,PPSP-60%次之,PPSP-40%清除能力最弱。

2.4 紫薯多糖清除羟基自由基能力

由图3可知,3种醇沉组分对羟基自由基都具有一定的清除能力,PPSP-40%对羟基自由基的清除能力最弱,PPSP-80%次之,PPSP-60%清除能力最强,且这两种醇沉组分的清除能力接近,在质量浓度为1.0 mg/mL时,PPSP-60%的清除能力稍强于维生素C,清除能力随浓度的增加而增强。由表2可知,PPSP-60%的 IC_{50} 值最小,为0.318 mg/mL,PPSP-80%的 IC_{50} 值为0.353 mg/mL,两种醇沉组分之间的 IC_{50} 值无显著性差异,而PPSP-40%的 IC_{50} 值最大,为0.985 mg/mL,说明其对羟基自由基的清除能力最弱。

2.5 紫薯多糖清除超氧阴离子自由基能力

由图4可知,采用不同浓度的醇沉组分进行超氧阴

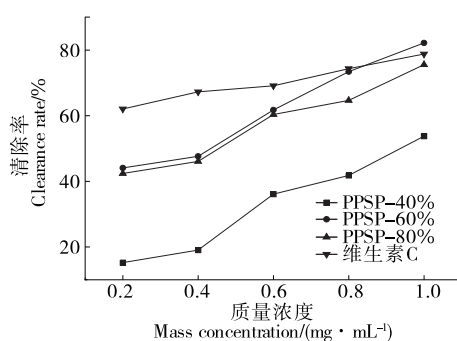


图3 紫薯多糖对羟基自由基的清除能力

Figure 3 Purple potato polysaccharide hydroxyl free radical removal capacity

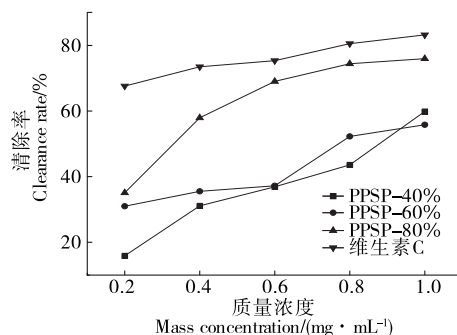


图4 紫薯多糖对超氧阴离子自由基的清除能力

Figure 4 Purple potato polysaccharides on superoxy anion free radical removal capacity

离子自由基清除试验,随着醇沉组分质量浓度的升高,对自由基的清除效果也越好,在质量浓度较低时,PPSP-60%的清除效果强于PPSP-40%,当质量浓度达到1 mg/mL时,PPSP-40%的清除效果稍强于PPSP-60%,但均不及PPSP-80%和维生素C。由表2可知,PPSP-80%的 IC_{50} 值最小,为0.321 mg/mL,说明其对超氧阴离子自由基的清除效果最好,PPSP-60%的 IC_{50} 值为0.848 mg/mL,PPSP-40%的 IC_{50} 值最大,为0.916 mg/mL,说明其对超氧阴离子自由基的清除能力最弱。

与紫薯中其他活性物质相比,3种醇沉组分对DPPH自由基清除能力均不如紫薯茎叶中的黄酮类化合物^[22],但PPSP-80%对自由基的清除能力与紫薯花色苷接近,而花色苷具有很强的抗氧化活性^[23],说明PPSP-80%的抗氧化能力较强。

2.6 对菜籽油的抗氧化效果

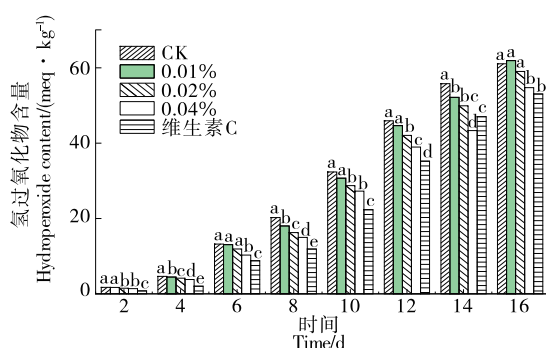
由图5可知,随着试验时长的增加,菜籽油氢过氧化物和丙二醛含量都呈升高的趋势,与空白菜籽油相比,添加PPSP-40%可以降低其氢过氧化物和丙二醛含量,并且随着PPSP-40%添加量的增加,降低的幅度也越大,在试验时间为14 d时,空白菜籽油的氢过氧化物和丙二醛含量分别为55.78 mg/kg和111.11 mg/kg,而PPSP-40%添加量为0.01%,0.02%,0.04%时,菜籽油的氢过氧化物

含量分别达到 52.15, 49.91, 43.34 meq/kg, 而丙二醛含量分别达到 97.98, 84.60, 78.03 mg/kg。说明不同添加量的 PPSP-40% 都可以提高菜籽油的抗氧化能力, 并且随着多糖添加量的增加, 抗氧化效果更好。当试验时间为 16 d 时, 空白菜籽油的氢过氧化物和丙二醛含量分别为 64.06 meq/kg 和 124.09 mg/kg, 而 PPSP-40% 添加量为 0.01% 时, 菜籽油的氢过氧化物和丙二醛含量分别达到 61.90 meq/kg 和 115.81 mg/kg, 其氢过氧化物含量稍高于空白组, 但两者并无显著性差异, 可能是因为所添加的样品含量有限, 随着试验时间的延长, 抗氧化剂被消耗完全, 导致菜籽油的氧化速率加快, 但添加量为 0.02% 和 0.04% 的试验组仍具备抗氧化效果, 因此, PPSP-40% 要对菜籽油达到较好的抗氧化效果, 需要增加其添加量, 其抗氧化效果呈剂量一效应关系。

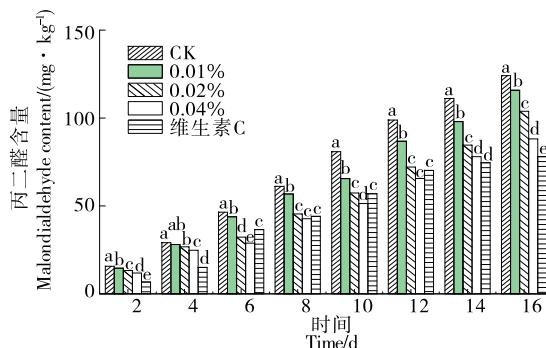
如图 6 可知, PPSP-60% 对菜籽油具有一定的抗氧化效果, 且抗氧化的效果随其添加量的增多而增强, 0.04% 添加量的菜籽油抗氧化效果最好, 试验 2 d 时, 空白菜籽油的氢过氧化物和丙二醛含量分别为 1.72 meq/kg 和 15.69 mg/kg, 而 PPSP-60% 添加量为 0.01%, 0.02%, 0.04% 时, 菜籽油的氢过氧化物含量分别达到 1.75, 1.36,

1.24 meq/kg, 而丙二醛含量分别达到 12.86, 11.46, 10.90 mg/kg, 表明在试验初期, PPSP-60% 就具有增强菜籽油抗氧化效果的作用, 但各处理组氢过氧化物和丙二醛的含量差值并不大, 可能是油脂贮藏初期氧化速率还比较慢, 试验 16 d 时, 空白组的氢过氧化物含量增加至 64.06 meq/kg, 而 PPSP-60% 添加量为 0.01%, 0.02%, 0.04% 的处理组分别为 59.91, 56.77, 55.29 meq/kg, 结果表明添加的 PPSP-60% 越多, 氢过氧化物和丙二醛含量越低。证明 PPSP-60% 对菜籽油具有一定的抗氧化效果。

由图 7 可知, 0.02% PPSP-80% 对菜籽油的抗氧化效果与维生素 C 相当, 添加 0.04% PPSP-80% 的抗氧化效果最好, 0.01% PPSP-80% 效果最差, 表现出剂量效应, 在试验 4 d 时, 空白对照组氢过氧化物和丙二醛含量分别为 4.65 meq/kg 和 29.12 mg/kg, 而添加 0.02% PPSP-80% 试验组氢过氧化物和丙二醛含量分别为 3.22 meq/kg 和 19.24 mg/kg, 维生素 C 阳性对照组氢过氧化物和丙二醛含量分别为 2.05 meq/kg 和 15.06 mg/kg, 表明二者对菜籽油均具有抗氧化效果, 且维生素 C 的抗氧化效果要稍好于 0.02% PPSP-80%, 但随着试验时间的延长, 在试验 2~12 d 时, 维生素 C 的效果比 0.02% PPSP-80% 要好,



(a) 氢过氧化物含量

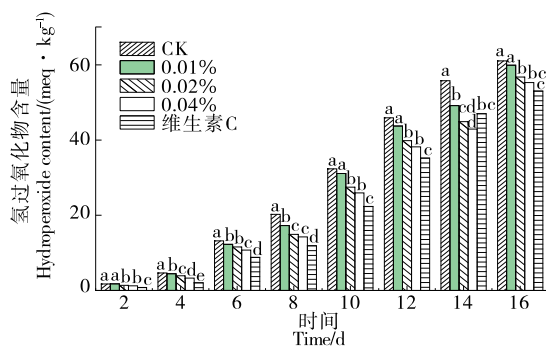


(b) 丙二醛含量

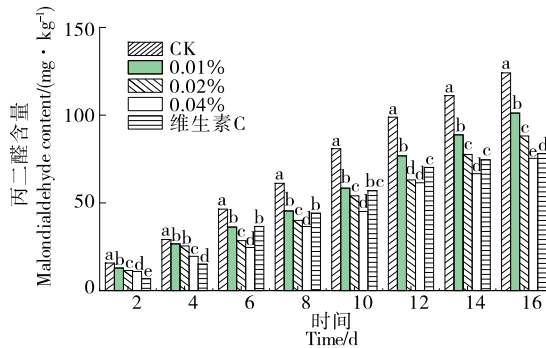
小写字母不同表示在相同时间不同处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$)

图 5 PPSP-40% 对菜籽油的抗氧化作用

Figure 5 PPSP-40% antioxidant effect on rapeseed oil



(a) 氢过氧化物含量



(b) 丙二醛含量

小写字母不同表示在相同时间不同处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$)

图 6 PPSP-60% 对菜籽油的抗氧化作用

Figure 6 PPSP-60% antioxidant effect on rapeseed oil

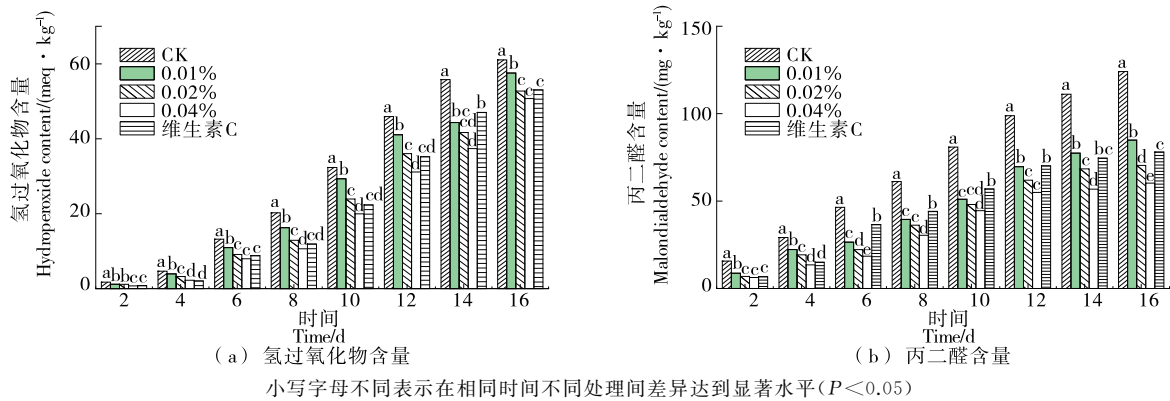


图 7 PPSP-80%对菜籽油的抗氧化作用
Figure 7 PPSP-80% antioxidant effect on rapeseed oil

在试验 12~16 d 时,维生素 C 的抗氧化效果不如 0.02% PPSP-80%,可能是维生素 C 作为天然的抗氧化剂,其化学性质极不稳定,在试验过程中容易分解,从而导致抗氧化效果降低,而多糖具有更高的稳定性,长期贮藏对菜籽油的抗氧化效果要优于维生素 C。

由图 5~图 7 可知,与空白菜籽油相比,PPSP-40%、PPSP-60%和 PPSP-80% 3 种醇沉组分对菜籽油均具有一定的抗氧化效果,可降低菜籽油的氢过氧化物和丙二醛含量,且抗氧化效果都随添加量的增加而逐渐增强,3 种醇沉组分对菜籽油的抗氧化作用存在差异,且在添加量为 0.01% 时,PPSP-80% 对菜籽油的抗氧化效果最好,PPSP-60% 抗氧化效果次之,PPSP-40% 抗氧化效果最差,但抗氧化的效果与空白对照组相比并不明显,可能是因为醇沉组分添加量较少所致;当多糖添加量为 0.02%,随着多糖添加量的增加,在试验初期对菜籽油已经具备明显的抗氧化效果;当多糖添加量达到 0.04% 时,添加 PPSP-40% 和添加 PPSP-60% 的菜籽油氢过氧化物含量相近,但二者的丙二醛含量仍然存在差异,试验 16 d 时,分别为 88.16,75.40 mg/kg,可能是在试验后期,菜籽油

以二次氧化为主,产生大量的丙二醛,而不同醇沉组分的抗氧化能力不同,抗氧化能力最差的为 PPSP-40%,在试验后期抗氧化能力逐渐减弱,对丙二醛的清除能力有限,而 PPSP-60% 可能仍然具备一定的抗氧化能力,因此各试验组之间丙二醛含量差值较大。试验结果表明,各醇沉组分对菜籽油的抗氧化效果呈剂量效应,且 PPSP-80% 效果最好,PPSP-60% 次之,PPSP-40% 效果最差,可能是因为乙醇浓度越高,所沉淀出的组分分子量越小,而多糖发挥生理活性需要将其分子量控制在一定范围内^[7],PPSP-80% 中可能含有许多抗氧化性能较好的小分子组分,因此抗氧化活性最强,可以成为很好的油脂纯天然抗氧化剂。目前,许多植物多糖,如油樟叶多糖^[24]也对菜籽油具有一定的抗氧化效果,且 BHT 对其有一定的协同增效作用,3 种醇沉组分与油樟叶多糖都能降低菜籽油中的氢过氧化物含量,作用的原理相似,但其他抗氧化剂对醇沉组分抗氧化效果的协同作用还有待进一步研究。

2.7 紫薯多糖化学稳定性

由表 3 可知,PPSP-40% 的稳定性最差,相对于未处理的对照样品,稳定性都在 50% 以下,其中,在极端碱性

表 3 3 种醇沉组分化学稳定性结果

Table 3 The chemical stability results of the three alcohol sink components

处理方式	PPSP-40%		PPSP-60%		PPSP-80%	
	多糖含量/(g · kg ⁻¹)	稳定率/%	多糖含量/(g · kg ⁻¹)	稳定率/%	多糖含量/(g · kg ⁻¹)	稳定率/%
121 °C 处理 20 min	75.79±1.34	36.10	89.47±2.44	79.44	283.61±1.62	97.65
于 4 mol/L 三氟乙酸溶液,121 °C 处理 20 min	61.85±1.34	29.46	82.89±0.98	73.60	123.37±1.70	42.58
于 4 mol/L 氢氧化钠溶液,121 °C 处理 20 min	53.96±2.63	25.70	59.22±1.34	52.58	117.09±2.07	40.31
于 4 mol/L 三氟乙酸溶液,60 °C 处理 6 h	75.26±1.62	35.85	74.74±1.70	66.36	114.46±3.94	39.41
于 4 mol/L 氢氧化钠溶液,60 °C 处理 6 h	60.01±2.26	28.58	94.73±3.55	84.12	108.94±2.26	37.51
未处理(对照)	209.95±2.26	100.00	112.62±1.29	100.00	290.45±2.68	100.00

和高温条件下,稳定性最差;PPSP-60%的稳定性较好,各种环境下稳定率均可达50%以上,在极端碱性条件下稳定性最好,为84.12%,但随着温度逐渐升高,PPSP-60%的化学稳定性逐渐下降,在极端碱性和高温条件下,稳定率下降至52.58%;而PPSP-80%在121℃高温条件下稳定性最好,为97.65%,而在其他条件下稳定率都低于50%,说明PPSP-80%在酸性和碱性条件下都不稳定。结果表明在PPSP-80%可以在高温条件下稳定贮藏,但在加工利用中要严格控制环境的pH,而PPSP-60%在碱性条件下的比较稳定,但在高温下容易发生变性,因此要注意环境的温度,而PPSP-40%在酸性、碱性及高温条件下稳定性都较差,对贮藏和加工的条件要求比较高。

3 结论

通过对紫薯粗多糖进行分级醇沉,得到3种醇沉组分(PPSP-40%、PPSP-60%、PPSP-80%),3种醇沉组分对DPPH自由基、ABTS自由基、羟基自由基、超氧阴离子自由基都具有一定的清除能力,但清除效果都不及维生素C。其中,PPSP-80%对DPPH自由基、ABTS自由基、超氧阴离子自由基清除能力最强,PPSP-60%对羟基自由基清除能力最强,而PPSP-40%的清除能力最差。3种醇沉组分对菜籽油也具有一定的抗氧化效果,并且随着醇沉组分添加量的增加,对菜籽油的抗氧化效果越好,对菜籽油抗氧化效果最好的是PPSP-80%,其次为PPSP-60%,效果最差的为PPSP-40%,且抗氧化效果呈剂量效应。通过稳定性试验,结果表明PPSP-40%的稳定性最差,PPSP-60%在极端碱性条件(4 mol/L 氢氧化钠溶液)下稳定性最好,而PPSP-80%在121℃高温条件下稳定性最好。

紫薯多糖不同醇沉组分都具有一定的抗氧化效果,且不同组分抗氧化效果和化学稳定性具有明显差异,但抗氧化效果主要是通过体外抗氧化试验来对比研究,后续将对紫薯多糖的体内抗氧化效果进行进一步的研究与分析。

参考文献

- [1] 张婷, 陈小伟, 张琪, 等. 紫薯功能性与其食品开发研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(13): 315-319.
ZHANG Ting, CHEN Xiao-wei, ZHANG Qi, et al. Research progress on purple potato function and food development [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(13): 315-319.
- [2] WU Qiong-ying, QU Hong-sen, JIA Jun-qiang, et al. Characterization, antioxidant and antitumor activities of polysaccharides from purple sweet potato[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 132: 31-40.
- [3] 吴双双, 王娇, 张大强. 紫薯多糖超声提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 农产品加工, 2019, 4(11): 40-41, 45.
WU Shuang-shuang, WANG Jiao, ZHANG Da-qiang. Study on the optimization and antioxidant activity of polysaccharide ultrasonic extraction process of purple potato[J]. Farm Products Processing,

- 2019, 4(11): 40-41, 45.
- [4] CHEN Hong, SUN Jian, LIU Jun, et al. Structural characterization and anti-inflammatory activity of alkali-soluble polysaccharides from purple sweet potato [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 131: 484-494.
- [5] SUN Jian, GOU Ya-run, LIU Jun, et al. Anti-inflammatory activity of a water-soluble polysaccharide from the roots of purple sweet potato[J]. RSC Advances, 2020, 10(65): 39 673-39 686.
- [6] 林翔凯. 紫薯多糖的提取及功能特性的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014: 47-51.
LIN Xiang-kai. Study on the extraction and functional characteristics of polysaccharides in purple potatoes[D]. Fuzhou: Fujian Agricultural and Forestry University, 2014: 47-51.
- [7] 王晓静, 陈莉华, 向明芳. 火棘果多糖抗油脂氧化酸败分析[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(5): 175-179.
WANG Xiao-jing, CHEN Li-hua, XIANG Ming-fang. Analysis of oil-resistant oxidative acid failure of fire-echidna polysaccharides[J]. Food and Fermentation Industry, 2016, 42(5): 175-179.
- [8] 李顺峰, 刘丽娜, 王安建, 等. 分级醇沉香菇柄多糖及其抗氧化活性研究[J]. 包装与食品机械, 2020, 38(4): 10-15.
LI Shun-feng, LIU Li-na, WANG An-jian, et al. Graded alcohol-scented mushroom handle polysaccharides and their antioxidant activity study[J]. Packaging and Food Machinery, 2020, 38(4): 10-15.
- [9] 何粉霞, 聂小伟, 陈志兵. 海带多糖酶解辅助提取工艺的响应面优化及其稳定性研究[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(5): 167-173, 181.
HE Fen-xia, NIE Xiao-wei, CHEN Zhi-bing, et al. Study on the response surface optimization and stability of kelp polysaccharide solution-assisted extraction process [J]. Preservation and Processing, 2020, 20(5): 167-173, 181.
- [10] ZHANG Xue-jiao, HU Yi-hong, JIN Chen-zhong, et al. Extraction and hypolipidemic activity of low molecular weight polysaccharides isolated from rosa laevigata fruits[J]. Bio Med Research International, 2020, 2 020: 2043785.
- [11] 王庆, 李丹丹, 潘芸芸, 等. 提取方法对天麻多糖提取率及其抗氧化活性的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 146-150.
WANG Qin, LI Dan-dan, PAN Yun-yun, et al. Effect of extraction method on the extraction rate of hemp polysaccharides and their antioxidant activity[J]. Food & Machinery, 2017, 33(9): 146-150.
- [12] 林翔凯, 张龙涛, 陈洁, 等. 紫薯多糖脱蛋白工艺的研究[J]. 热带作物学报, 2014(2): 381-386.
LIN Xiang-kai, ZHANG Long-tao, CHEN Jie, et al. Study on the polysaccharide deproteinization process of purple potatoes [J]. Journal of Tropical Crops, 2014(2): 381-386.
- [13] 杨钊, 周星彤, 于甜甜, 等. 海藻酸钠中糖醛酸含量测定方法的研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2018, 28(9): 1 049-1 050, 1 053.
YANG Zhao, ZHOU Xing-tong, YU Tian-tian, et al. Study on the determination of glycoalic acid content in sodium alginate [J]. China Journal of Health Inspection, 2018, 28(9): 1 049-1 050, 1 053.
- [14] 周林林. 海带渣中岩藻聚糖硫酸酯提取条件和硫酸基含量测

- 定方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013: 31-32.
- ZHOU Lin-lin. Study on the extraction conditions and sulfate content determination of rock algae polysaccharide in kelpard slag[D]. Qingdao: China Ocean University, 2013: 31-32.
- [15] 赵琪, 赵利, 杨玉雯, 等. 河蚬多糖分离纯化及抗氧化、抗肿瘤活性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(4): 127-132, 138.
- ZHAO Qi, ZHAO Li, YANG Yu-luan, et al. Study on the purification and antioxidant and antitumor activity of hexa polysaccharide separation[J]. Food & Machinery, 2017, 33(4): 127-132, 138.
- [16] 魏晨业, 包晓玮, 王娟, 等. 沙棘多糖分离纯化及抗氧化活性[J]. 食品科学, 2021, 42(4): 227-232.
- WEI Chen-ye, BAO Xiao-wei, WANG Juan, et al. Sea buckthorn polysaccharide separation purification and antioxidant activity[J]. Food Science, 2021, 42(4): 227-232.
- [17] 顾欣, 高涛, 刘梦雅, 等. 梁平柚柚皮多糖的提取、结构解析及抗氧化能力研究[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(7): 137-145.
- GU Xin, GAO Tao, LIU Meng-ya, et al. Liang Ping grapefruit skin polysaccharide extraction, structural analysis and antioxidant capacity research[J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(7): 137-145.
- [18] 程金生, 韦卓恒, 陈信炎, 等. 金花茶花朵总皂苷体外抗氧化实验研究[J]. 中国民族民间医药, 2016, 25(10): 27-30.
- CHENG Jin-sheng, WEI Zhuo-heng, CHEN Xin-yan, et al. Experimental study on antioxidant activity of total saponins from flowers of *Camellia chrysantha*[J]. Chinese folk medicine, 2016, 25(10): 27-30.
- [19] 周丽明, 张勇. 茶籽多糖羧甲基化修饰及其对油脂抗氧化作用研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(7): 45-49, 72.
- ZHOU Li-ming, ZHANG Yong. Study on the modification of teaseed polysaccharide methylation and its antioxidant effect on grease[J]. Chinese Grease, 45(7): 45-49, 72.
- [20] 林洁. 柚子皮总黄酮对食用油脂的抗氧化作用[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(4): 1 054-1 059.
- LIN Jie. Antioxidant effect of grapefruit skin total flavonoids on edible oils[J]. Jiangsu Agricultural Journal, 2020, 36(4): 1 054-1 059.
- [21] 田冰梅, 谢晓梅, 沈盼盼. 分级醇沉宣木瓜多糖含量、分子量测定和活性初步研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(5): 1 331-1 334.
- TIAN Bing-mei, XIE Xiao-mei, SHEN Pan-pan, et al. Preliminary study on the content, molecular weight determination and activity of graded alcohols in papaya polysaccharides[J]. Spectroscopy and Spectroscopy, 2015, 35(5): 1 331-1 334.
- [22] 郑丽. 紫薯茎叶中黄酮类化合物提取纯化及抗氧化性研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2018: 38-39.
- ZHENG Li. Study on the extraction of flavonoids in the leaves of purple potatoes for purification and antioxidant properties [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2018: 38-39.
- [23] 曾繁森, 叶妍琦, 张美清, 等. 紫薯花色苷的抗氧化活性及其稳定性研究[J]. 闽南师范大学学报(自然科学版), 2019, 32(3): 60-67.
- ZENG Fan-seng, YE Yan-qi, ZHANG Mei-qing, et al. Study on the antioxidant activity and stability of alfalfa chromosides[J]. Journal of Minnan Normal University (Natural Science Edition), 2019, 32(3): 60-67.
- [24] 敖光辉, 杜永华, 魏琴, 等. 油樟叶多糖抗油脂氧化作用的研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(7): 14-17.
- AO Guang-hui, DU Yong-hua, WEI Qin, et al. Study on the antioxidant effect of oil camphor polysaccharides[J]. Food Research and Development, 2015, 36(7): 14-17.
-
- (上接第 188 页)
- [13] 支雅婧, 王梦, 甄亚钦, 等. 淡豆豉活性成分一测多评检测方法建立[J]. 大豆科学, 2021, 40(5): 696-702.
- ZHI Ya-jing, WANG Meng, ZHEN Ya-qin, et al. Determination of active ingredients of sojase semen praeparatum by multi-components with single marker[J]. Soybean Science, 2021, 40(5): 696-702.
- [14] 吴进东, 董欣华, 朱旺生, 等. 霍山石斛花总黄酮微波辅助提取工艺的优化[J]. 中成药, 2021, 43(7): 1 704-1 707.
- WU Jin-dong, DONG Xin-hua, ZHU Wang-sheng, et al. Optimization of microwave-assisted extraction process for total flavonoids from *Dendrobidiumhuoshanense* flowers[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2021, 43(7): 1 704-1 707.
- [15] 师聪, 解春芝, 张建萍, 等. 覆盆子不同极性溶剂提取物的抗氧化活性比较[J]. 食品科技, 2021, 46(1): 220-224.
- SHI Cong, XIE Chun-zhi, ZHANG Jian-ping, et al. Comparison of antioxidant activity of raspberry extracts with different polar solvents[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(1): 220-224.
- [16] 邵佩, 庄虎, 谢超, 等. 超声辅助提取红豆多糖及其生物活性研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 173-178.
- SHAO Pei, ZHUANG Hu, XIE Chao, et al. Study on ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from red bean polysaccharides and its biological activity[J]. Food & Machinery, 2021, 37(2): 173-178.
- [17] VAZ J A, BARROS L, MARTINS A, et al. Chemical composition of wild edible mushrooms and antioxidant properties of their water soluble polysaccharidic and ethanolic fractions[J]. Food Chemistry, 2011, 126(2): 610-616.
- [18] ZHENG Lin, ZHAO Mou-ming, XIAO Chu-qiao, et al. Practical problems when using ABTS assay to assess the radical-scavenging activity of peptides: Importance of controlling reaction pH and time[J]. Food Chemistry, 2016, 192: 288-294.
- [19] 黄秋萍, 韦友欢, 黄秋婵, 等. 薛荔藤总黄酮的超声辅助法提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2021, 46(5): 193-198.
- HUANG Qiu-ping, WEI You-huan, HUANG Qiu-chan, et al. Ultrasound-assisted extraction technology optimization and antioxidant activities of total flavonoids from *Ficus pumila* cane[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(5): 193-198.