

金瓜多糖不同分级组分的抗氧化和降血糖活性

Antioxidant and hypoglycemic activities of different graded fractions of polysaccharide from goldenmelon

陈冰洁^{1,2}乔勇进^{1,2}王 晓^{1,2}王春芳^{1,2}刘贵阁^{1,2}CHEN Bing-jie^{1,2}QIAO Yong-jin^{1,2}WANG Xiao^{1,2}WANG Chun-fang^{1,2}LIU Gui-ge^{1,2}

(1. 上海市农业科学院作物育种栽培研究所, 上海 201403;

2. 上海农产品保鲜加工工程技术研究中心, 上海 201403)

(1. Institute of Crop Breeding and Cultivation, Shanghai Academy of Agriculture Sciences, Shanghai 201403, China; 2. Agri-Food Storage and Processing Engineering Technology Research Center of Shanghai, Shanghai 201403, China)

摘要:目的:研究金瓜多糖不同分级组分的理化特性、结构、抗氧化性和降血糖活性。方法:采用水提醇沉法分级纯化得到 4 种金瓜多糖(CP-40、CP-60、CP-70、CP-80),通过高效液相色谱、傅里叶变换红外光谱等对其分子量、单糖组成、基团构成、抗氧化和降血糖活性进行研究。结果:金瓜多糖组分随着乙醇体积分数的增加,总糖含量升高,糖醛酸含量降低。4 种多糖分子量不同,单糖组成相同但组成比例不同,且均具有多糖类物质的特征吸收峰。金瓜多糖体外抗氧化能力和降血糖活性存在明显的量—效关系,CP-70 对 DPPH 自由基、羟自由基和超氧阴离子自由基清除作用高于其他组,抗氧化性最强,CP-80 对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶抑制作用最强,降血糖活性最佳。结论:金瓜多糖具有良好的抗氧化性和降血糖活性。关键词:金瓜;多糖;体外抗氧化性;降血糖活性

Abstract: Objective: The study aimed to research the physicochemical properties, structure, antioxidant activity and hypoglycemic activity of different fractions of polysaccharide of goldenmelon. Methods: Four kinds of goldenmelon polysaccharides (CP-40, CP-60, CP-70, CP-80) were obtained by graded purification of water extraction and alcoholic precipitation. Their molecular weight, monosaccharide composition, group composition, antioxidant and hypoglycemic activities were investigated by high performance liquid chromatography and fourier transform infrared spectroscopy.

基金项目:上海市农业科学院作物所创新基金(编号:作创字[2021]CX-04);上海市农产品保鲜加工专业技术服务平台(编号:21 DZ2292200)

作者简介:陈冰洁,女,上海市农业科学院助理研究员,硕士。

通信作者:乔勇进(1967—),男,上海市农业科学院研究员,博士。

E-mail: yjqiao2002@126.com

收稿日期:2022-11-23

改回日期:2023-05-02

Results: With the increase of ethanol volume fraction, the total sugar content increased and the glucuronic acid content decreased. The molecular weights of these four polysaccharides were different, which indicated by the same composition of monosaccharides but different composition ratios, and they all had the characteristic absorption peaks of polysaccharides. The antioxidant capacity and hypoglycemic activity of the polysaccharides in vitro had obvious quantity-effect relationships, CP-70 had the strongest antioxidant effect on DPPH radicals, hydroxyl radicals and superoxide anions scavenging than other groups, while CP-80 had the best hypoglycemic activity since it had the strongest inhibitory effects on α -glucosidase and α -amylase. **Conclusion:** The polysaccharide of goldenmelon had good antioxidant properties and hypoglycemic activity.

Keywords: goldenmelon; polysaccharide; antioxidant activity; hypoglycemic activity

金瓜(*Cucurbita pepo* L. var. *medullosa* Alef.)又名金丝瓜、搅瓜和面条瓜,是葫芦科南瓜属美洲南瓜(*Cucurbita pepo* L.)的一个变种,因果皮呈金黄色而得名^[1]。金丝瓜在欧美地区及东南亚地区均有栽培,目前中国南北各地均广泛种植,其中以上海市崇明县的金瓜最著名^[2]。

金瓜和中国南瓜同为南瓜属,南瓜(*Cucurbita moschata*)多糖是公认的降糖活性物质且具有较好的抗氧化功能^[3-4],但目前并未针对性地对金瓜多糖及其相关功能特性进行研究,不利于金瓜的开发利用。乙醇体积分数会直接影响所获得多糖的结构及其性质。研究拟采用梯度醇沉的方法对金瓜多糖进行分级处理,考察乙醇体积分数对多糖理化性质、分子量、单糖组成、基团构成、抗氧化和降血糖活性等的影响,阐释金瓜多糖的结构

特征与活性之间的相关性,旨在为制备具有特定营养活性的金瓜多糖提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

金瓜:崇金 3 号,上海崇明生产基地;

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、甘露糖、鼠李糖、葡萄糖醛酸、葡萄糖和半乳糖:光谱级,美国 Sigma 公司;透析袋:3 500 D,上海源叶生物科技有限公司;其他试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

电热恒温鼓风干燥箱:LD0O-101-3 型,上海龙跃仪器设备有限公司;

冷冻干燥机:Telstar(LyoQuest)型,西班牙 Telstar 公司;

酶标仪:MQX200 型,美国百特仪器有限公司;

高效液相色谱:Agilent1100 型,美国安捷伦公司;

傅里叶红外光谱仪:NICOLET-380 型,美国 Nicolet 公司。

1.3 方法

1.3.1 金瓜多糖的提取及分级醇沉 根据刘继攀等^[5]的方法修改,选取肉质呈橘黄色的金瓜,除去果皮和籽粒后将果肉切成薄片,50℃烘干 12 h,粉碎机粉碎成粉末。称取 500 g 的金瓜粉加入 20 倍的蒸馏水,于 85℃提取 3 次,提取时间分别为 3,2,2 h。收集滤液,8 000 r/min 离心 5 min,收集上清液,真空浓缩,加入 95%的乙醇醇沉 12 h 以上,离心得沉淀物并透析(M_w cut-off 3 500 Da)3 d,浓缩,冷冻干燥得粗多糖。粗多糖配成 10%的多糖溶液后,与无水乙醇混合使乙醇体积分数达到 40%,醇沉 12 h,离心、沉淀冷冻干燥得到 40%醇沉组分,上述上清液与乙醇溶液混合使乙醇体积分数达到 50%,重复醇沉干燥过程得到 50%醇沉多糖,以此类推得到 60%,70%,80%醇沉多糖,得到金瓜多糖的 5 种组分分别命名为:CP-40、CP-50、CP-60、CP-70、CP-80。称重并按式(1)计算其得率。

$$y = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

c ——得率,%;

m_1 ——各组分质量,g;

m_2 ——粗多糖质量,g。

1.3.2 金瓜多糖理化性质测定

(1) 总糖含量:采用苯酚—硫酸法^[6],以葡萄糖为标准品。

(2) 蛋白质含量:采用考马斯亮蓝法^[7],以牛血清白蛋白为标准品。

(3) 葡萄糖醛酸含量:采用硫酸—咔唑法^[8],以葡萄糖醛酸为标准品。

1.3.3 金瓜多糖分子量测定 采用 HPGPC 法^[9]。

1.3.4 金瓜多糖的单糖组成分析 采用高效液相色谱法。根据文献^[10],修改如下:多糖样品(10 mg)与三氯乙酸(4 mL,2 mol/L,TFA)混匀后加入密封管 90℃下水解 4 h,用氮吹仪吹干 TFA 后加入甲醇溶液重复操作 2~3 次。NaOH 溶液调节至中性,进行 1-苯基-3-甲基-5-吡啶酮(PMP)衍生。

1.3.5 金瓜多糖红外光谱(FT-IR)分析 将样品与 KBr 按 $m_{\text{样品}}:m_{\text{KBr}}=1:100$ 的比例混合,研磨均匀,压成薄片后在 4 000~500 cm^{-1} 范围内用 FT-IR 仪扫描。

1.3.6 体外抗氧化能力测定

(1) DPPH 自由基清除能力:根据文献^[11]。

(2) 羟自由基清除能力:根据文献^[12]。

(3) 超氧阴离子自由基清除能力:根据文献^[13]。

(4) 还原力:根据文献^[14]。

1.3.7 降血糖活性测定 根据文献^[15]。

1.4 数据处理

所有数据均以 3 次重复后的平均值±标准差(SD)表示。样品间差异的显著性通过单因素方差分析(Origin Pro 8.5)进行。由 Origin 软件制作图表。

2 结果与分析

2.1 理化性质

金瓜粗多糖分别经体积分数 40%,50%,60%,70%,80%的乙醇醇沉后得到 5 种多糖组分:CP-40、CP-50、CP-60、CP-70、CP-80。由于 CP-50 提取率极低,故不做后续研究。由表 1 得出,多糖的得率和组成随醇沉时乙醇体积分数的不同而变化。各组分多糖的提取率存在显著差异($P<0.05$),CP-40 的提取率较高,达 51.1%,远远高于其他组分。随着乙醇体积分数的增加,金瓜多糖的总糖含量升高,说明多糖含量随乙醇体积分数的升高而增加,

表 1 多糖的理化性质[†]

Table 1 Physicochemical properties of polysaccharides				%
组分	提取率	总糖含量	葡萄糖醛酸含量	蛋白质含量
CP-40	51.10±0.11 ^d	45.08±0.21 ^a	21.26±0.33 ^d	1.22±0.06
CP-60	4.90±0.08 ^a	45.99±0.17 ^b	16.12±0.11 ^c	1.03±0.04
CP-70	5.80±0.07 ^b	57.42±0.22 ^c	14.16±0.09 ^b	1.06±0.03
CP-80	13.80±0.09 ^c	61.52±0.08 ^d	10.14±0.14 ^a	1.14±0.09

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

可能与高浓度的乙醇能沉淀更多小分子的多糖有关。葡萄糖醛酸含量随醇沉浓度的增大而降低,4种多糖中均含有一定量的糖醛酸,说明金瓜多糖各组分均是酸性多糖。同时,各醇沉组分均含有少量蛋白质,推测金瓜多糖中可能含有部分糖蛋白。

2.2 分子量

如图1所示,CP-40、CP-60为单一对称峰(其中21.575处为溶剂峰),说明在乙醇体积分数为40%和60%的条件下沉淀所得的金瓜多糖纯度较高,根据葡聚糖标准曲线 $y = -0.341x + 10.685 (R^2 = 0.996)$,得出CP-40和CP-60的相对分子量分别为26.8,11.5 kDa。而CP-70、CP-80除了溶剂峰外,还有1个不对称的峰,说明存在不同相对分子量的金瓜多糖组分,其中CP-70、CP-80中占比较大的多糖的分子量为10.0,8.1 kDa,表明体积分数较低的乙醇醇沉的是大分子量的多糖,而体积分数较

高的乙醇醇沉的主要是小分子量的多糖,与蔡冰洁等^[16]的研究结果一致。

2.3 单糖组成

由表2和图2可知,CP-40、CP-60、CP-70、CP-80的单糖组成一样,均含有甘露糖、鼠李糖、葡萄糖醛酸、葡萄糖和半乳糖,但组成比例不同。

2.4 红外分析

如图3所示,3 400 cm^{-1} 处较宽的吸收峰(O—H键伸缩振动)和2 900 cm^{-1} 处的吸收峰(C—H键伸缩振动)被认为是多糖的特征吸收峰。1 732 cm^{-1} 处的吸收峰为果胶类多糖中甲氧基的特征吸收峰^[17],证明了多糖中甲氧基的存在。1 600,1 415 cm^{-1} 处的两个吸收峰来自于羧基的不对称和对称伸缩振动,证明多糖中糖醛酸的存在^[18],与表1测定结果一致。1 013 cm^{-1} 处的吸收峰可能是由吡喃环伸缩振动引起的,这也是多糖的典型吸收

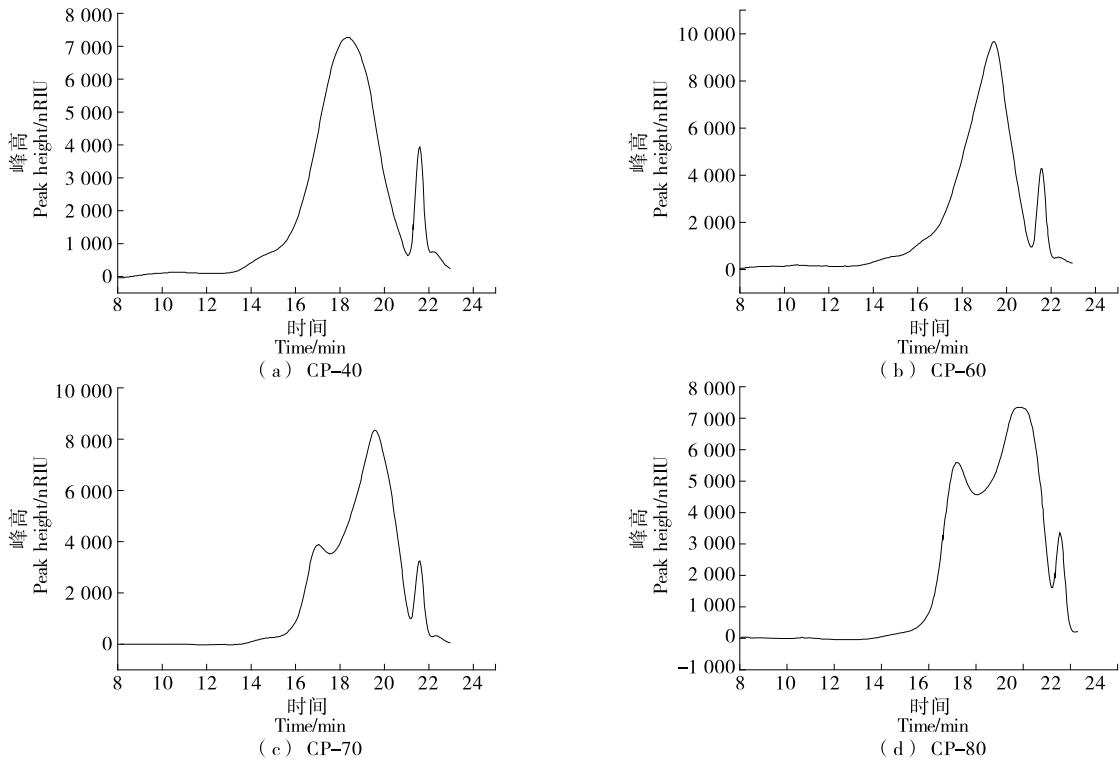


图1 多糖分子量检测

Figure 1 Determination of molecular weight of polysaccharide

表2 多糖单糖组成

Table 2 Monosaccharide composition of polysaccharides %

组分	单糖组成(以摩尔百分比表示)				
	甘露糖	鼠李糖	葡萄糖醛酸	葡萄糖	半乳糖
CP-40	10.84	8.12	20.36	7.53	8.81
CP-60	7.86	5.34	11.93	22.47	16.94
CP-70	11.78	8.16	18.21	12.30	8.26
CP-80	4.71	3.56	8.28	32.58	30.40

峰^[19]。推测出不同浓度乙醇沉淀所得4种金瓜多糖都具有多糖的典型基团,且所含基团无明显差异,与周慧吉等^[20]研究的结果相似,分级醇沉对多糖红外光谱影响较小。

2.5 多糖的抗氧化活性

如图4(a)所示,随着多糖质量浓度的增加,DPPH自由基的清除活性逐渐增加,表现出良好的剂量依赖关系。其中CP-70的DPPH自由基清除作用最强,明显高于其他组分,当多糖质量浓度为0.90 mg/mL时,CP-70对

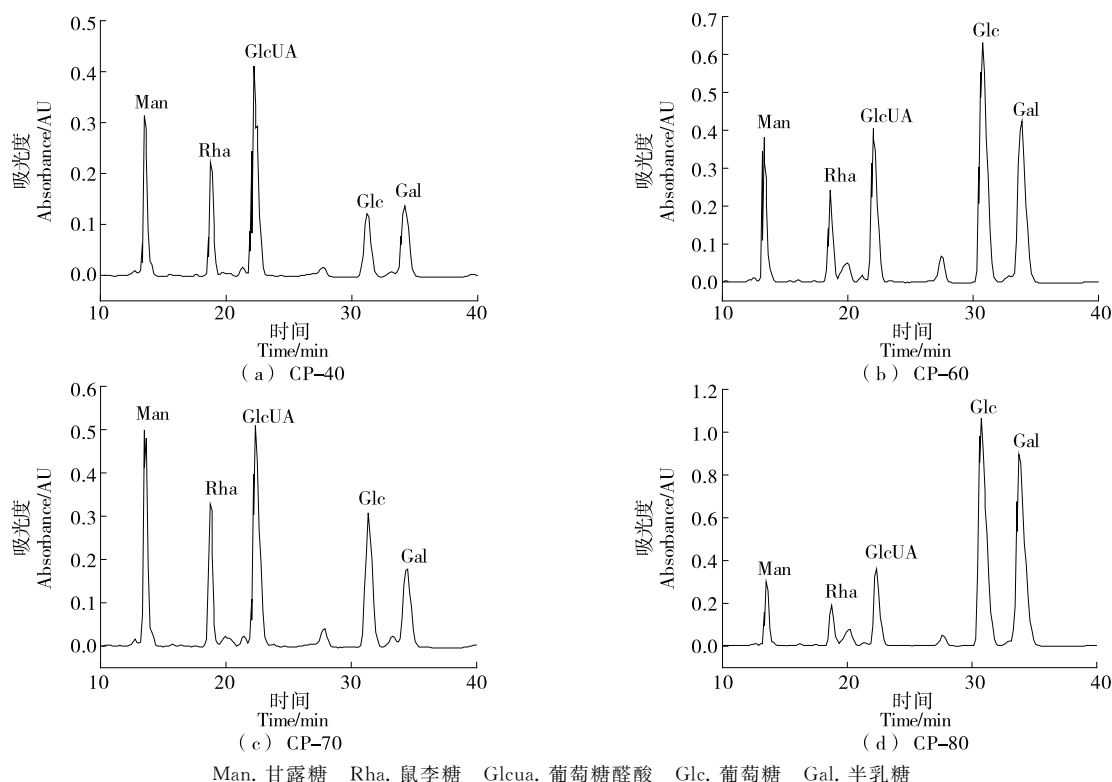


图 2 单糖组成色谱图

Figure 2 Chromatogram of monosaccharide composition

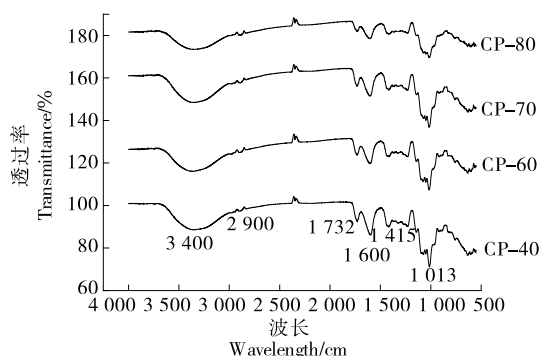


图 3 多糖红外光谱扫描图

Figure 3 Infrared spectrum of polysaccharides

DPPH 自由基的清除能力达 76.47%，低于阳性对照 V_C (97.44%)，可见金瓜多糖 CP-70 具有明显清除 DPPH 自由基的能力。CP-70 和 V_C 的 IC_{50} 分别是 0.118, 0.482 mg/mL。

从图 4(b)可以看出，4 种多糖对羟自由基的清除能力呈一定的剂量依赖性，当多糖质量浓度为 0.9 mg/mL 时，CP-40、CP-60、CP-70 和 CP-80 的羟自由基清除率分别为 28.02%、32.74%、35.65%、26.66%，明显小于阳性对照 V_C 的，说明金瓜多糖有一定的羟自由基清除作用，且 CP-70 的清除能力略高于其他组分。

由图 4(c)可得出，金瓜多糖的还原能力低于 V_C ，随着多糖质量浓度的增加，其相应的还原力逐渐增加，但不

同醇组分还原力不同，CP-70 的还原力高于其他组分，当多糖质量浓度为 0.9 mg/mL 时，还原力表现为 CP-70 > CP-60 > CP-80 > CP-40。这与王佳等^[21]报道指出的不同体积分数乙醇(30%，50%，70%，90%)分级沉淀得到虎杖多糖(PCP-30、PCP-50、PCP-70、PCP-90)中 PCP-70 还原力最强的结果相似。

从图 4(d)可以看出，4 种多糖和 V_C 清除超氧阴离子自由基能力具有浓度依赖性，且清除作用大小为： V_C > CP-70 > CP-80 > CP-40 > CP-60， V_C 清除超氧阴离子自由基能力显著高于各组分多糖，且金瓜多糖醇组分间抑制作用差异不显著。

多糖的分子量和多糖理化性质是影响多糖抗氧化活性的重要因素，研究^[22]表明，低分子量的多糖具有更好的抗氧化活性；也有研究^[23]证实，糖醛酸含量越高的多糖表现出越强的抗氧化活性，由此得出金瓜多糖 CP-70 较强的抗氧化性与其分子量和糖醛酸含量密切相关，但可能还受多糖结构和构象的影响，这有待后续的深入研究。

综合以上抗氧化性指标可知，金瓜多糖具有较好的清除 DPPH 自由基能力和还原能力，以及一定的清除羟自由基及超氧阴离子自由基的能力。通过对比发现，金瓜多糖的抗氧化性高于南瓜多糖，金瓜多糖(CP-70)质量浓度为 0.9 mg/mL 时，DPPH 自由基清除率为 76.47%，而南瓜纯化组分 SLWPP-3 质量浓度为 1.0 mg/mL 时，

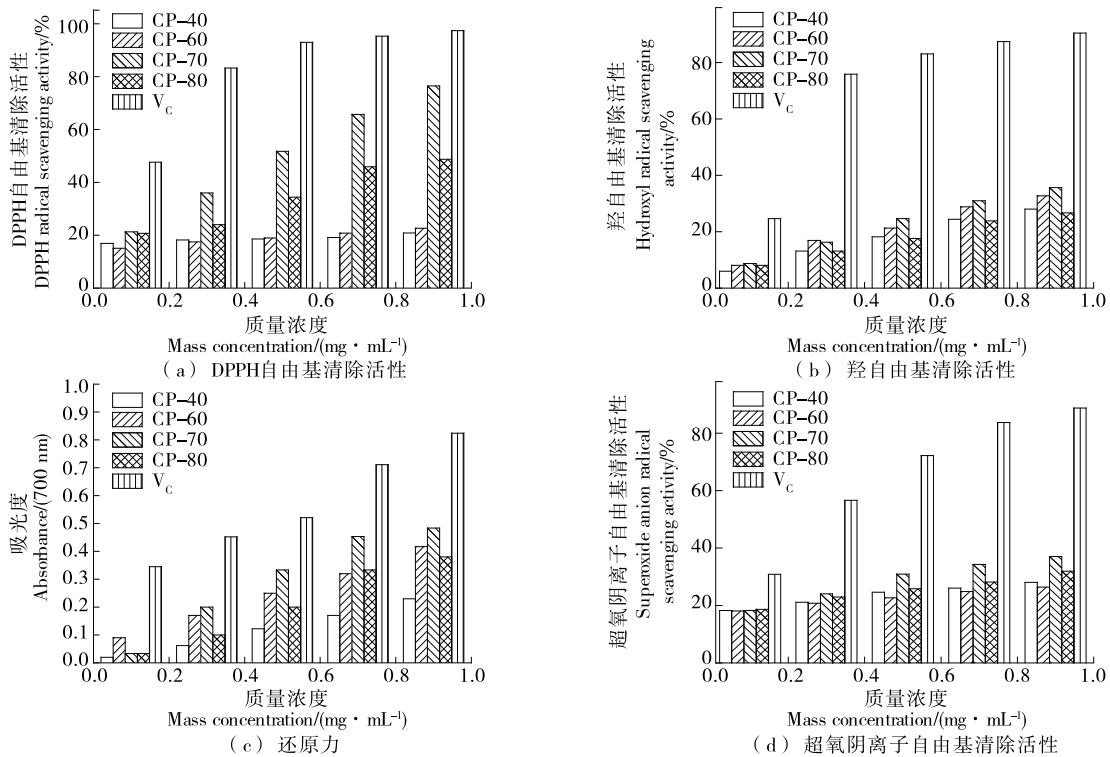


图4 多糖的抗氧化能力

Figure 4 Antioxidant capacity of polysaccharide

DPPH 自由基清除率为 43.7%^[24]。同时,金瓜清除超氧阴离子自由基能力^[25]及还原力^[26]也高于南瓜多糖。说明金瓜多糖具有良好的抗氧化活性,可作为一种天然的抗氧化剂。

2.6 多糖的降血糖活性

如图5所示,各组多糖在试验浓度范围内对 α -葡萄糖苷酶、 α -淀粉酶均有显著的抑制作用($P < 0.05$),且随着乙醇体积分数的增加,抑制能力增强,即 CP-80 > CP-70 > CP-60 > CP-40,但阿卡波糖的降血糖作用优于金瓜多糖。此外,在试验浓度范围内,4种多糖组分对 α -葡

萄糖苷酶的抑制作用优于 α -淀粉酶。通过比较得出:当多糖质量浓度为 2 mg/mL 时,CP-80 的 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶抑制率分别为 47.11%,44.02%,而南瓜多糖对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶抑制率分别为 17.8%,30.4%,证实金瓜多糖的降血糖活性优于南瓜多糖的降血糖活性^[4]。

魏鑫悦等^[15]研究证实,多糖的降血糖活性与其分子量相关,在合适的范围内,分子量越低的多糖组分对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶抑制活性的抑制效果越高,这与 CP-80 具有较小分子量且具有较高的降血糖活性结果一

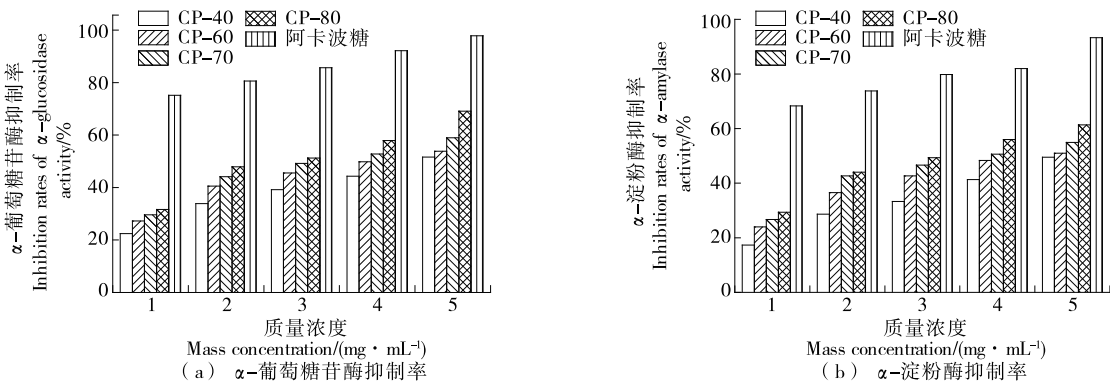


图5 多糖的降血糖能力

Figure 5 Hypoglycemic effect of polysaccharide

致。同时,有研究^[27]证明,多糖抑制 α -葡萄糖苷酶的活性与多糖的组成有关,当多糖主要单糖组成由 Gal、Glc、Man 构成时,具有较强的 α -葡萄糖苷酶抑制活性。试验中 CP-80 的 Gal、Glc 和 Man 所占比例高于其他组分,因此对 α -葡萄糖苷酶的抑制活性最强。

3 结论

试验研究了不同体积分数乙醇沉淀对金瓜多糖理化性质、结构和活性的影响,发现随着乙醇体积分数的增加,多糖的总糖含量升高,糖醛酸含量降低;不同醇沉组分的分子量不同,单糖组成(组成比例存在差异)及所含基团相同;金瓜多糖组分 CP-70 具有较好的抗氧化作用,金瓜多糖组分 CP-80 具有较好的降血糖作用。金瓜多糖优良的抗氧化和降血糖活性有助于其在医药、保健品及化妆品中发挥作用,筛选出活性较高的组分。研究对多糖的理化性质、抗氧化和降血糖活性进行了分析,但是对其结构表征较少,后续研究可在多糖分离纯化的基础上采用核磁、甲基化、圆二色谱技术等对多糖结构进行分析。同时,可以通过细胞及动物模型深入研究金瓜多糖的抗氧化及降血糖的作用机理。

参考文献

- [1] 刘晨霞, 乔勇进, 王晓, 等. 崇明金瓜贮藏保鲜技术研究进展[J]. 农产品加工, 2020(3): 69-72, 78.
LIU C X, QIAO Y J, WANG X, et al. Advances in research on quality changes and storage and preservation techniques of postharvest Chongming Goldenmelon[J]. Farm Products Processing, 2020(3): 69-72, 78.
- [2] 沙勤, 朱爱萍, 乔勇进, 等. 金瓜果实贮藏特性评价指标的确定与应用[J]. 中国瓜菜, 2020(6): 46-49.
SHA Q, ZHU A P, QIAO Y J, et al. Determination and application of evaluation indexes for storage characteristics of golden-melon[J]. Chinese Melon and Vegetable, 2020(6): 46-49.
- [3] WANG S, LU A, ZHANG L, et al. Extraction and purification of pumpkin polysaccharides and their hypoglycemic effect [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 98: 182-187.
- [4] LI F, WEI Y L, LIANG L, et al. A novel low-molecular-mass pumpkin polysaccharide: Structural characterization, antioxidant activity, and hypoglycemic potential [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 251: 117090.
- [5] 刘继攀, 李佳欢, 张紫华, 等. 分级醇沉对真姬菇多糖抗氧化活性的影响[J]. 食品科技, 2018, 43(1): 210-214, 221.
LIU J P, LI J H, ZHANG Z H, et al. Effect of step alcohol precipitation on antioxidant properties of *Hypsizygus marmoreus* polysaccharides[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(1): 210-214, 221.
- [6] DUBOIS M, GILLES K A, HAMILTON J K, et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances [J]. Analytical Chemistry, 1956, 28(3): 350-356.
- [7] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72(1/2): 248-254.
- [8] 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 Z, ZHOU X T, YU T T, et al. Study on determination method of uronic acid content in sodium alginate[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2018, 28(9): 1 049-1 050, 1 053.
- [9] 蒋茂婷, 冉艳红, 刘娜, 等. 蒜皮水溶性多糖的制备及结构表征[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 57-65.
JIANG M T, RAN Y H, LIU N, et al. Preparation and structural characterization of water-soluble polysaccharide from Garlic skin[J]. Food Science, 2022, 43(6): 57-65.
- [10] 戴军, 朱松, 汤坚, 等. PMP 柱前衍生高效液相色谱法分析杜氏盐藻多糖的单糖组成[J]. 分析测试学报, 2007, 26(2): 206-210.
DAI J, ZHU S, TANG J, et al. Analysis of monosaccharide compositions in polysaccharides from *D. Salina* by pre-column derivatization high performance liquid chromatography[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2007, 26(2): 206-210.
- [11] HU X Q, WANG J L, JING Y S, et al. Structural elucidation and in vitro antioxidant activities of a new heteropolysaccharide from *Litchi chinensis*[J]. Drug Discoveries & Therapeutics, 2015, 9(2): 116-122.
- [12] CHEN Y X, LIU X Y, XIAO Z, et al. Antioxidant activities of polysaccharides obtained from *Chlorella pyrenoidosa* via different ethanol concentrations [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 430(22): 29-38.
- [13] CHEN B J, SHI M J, CUI S, et al. Improved antioxidant and anti-tyrosinase activity of polysaccharide from *Sargassum fusiforme* by degradation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 92: 715-722.
- [14] KUMARAN A, JOEL KARUNAKRAN R. Antioxidant and free radical scavenging activity of an aqueous extract of *Coleus aromaticus*[J]. Food Chemistry, 2006, 97(1): 109-114.
- [15] 魏鑫悦, 陈克保, 关统伟. 攀枝花黑松露多糖的抗氧化和降血糖活性[J]. 现代食品科技, 2022, 38(3): 1-7.
WEI X Y, CHEN K B, GUAN T W. Antioxidant and hypoglycemic activity of polysaccharide from *Panzhihua Black Truffle* [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(3): 1-7.
- [16] 蔡冰洁, 汪苗苗, 刘咏. 枳椇多糖的分级醇沉及其免疫调节活性的研究[J]. 合肥工业大学学报, 2018, 41(6): 708-714.
CAI B J, WANG M M, LIU Y. Graded ethanol precipitation and immunoregulatory activity of polysaccharide from *Hovenia dulcis* peduncles[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2018, 41(6): 708-714.

- [17] CHYLINSKA M, SZYMANSKA-CHARGOT M, ZDUNEK A. FT-IR and FT-Raman characterization of non-cellulosic polysaccharides fractions isolated from plant cell wall [J]. Carbohydrate polymers, 2016, 154: 48-54.
- [18] 赵婧. 南瓜酸性多糖的结构解析及其与功能蛋白的相互作用[D]. 北京: 中国农业大学, 2017: 20-21.
- ZHAO J. Structural elucidation of pumpkin acidic polysaccharides and their interactions with functional proteins[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017: 20-21.
- [19] COBS-ROSAS M, CONCHA-OLMOS J, WEINSTEIN-OPPENHEIMER C, et al. Assessment of antiproliferative activity of pectic substances obtained by different extraction methods from rapeseed cake on cancer cell lines [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 117: 923-932.
- [20] 周慧吉, 马海乐, 郭丹钊, 等. 不同体积分数乙醇沉淀桑黄胞内多糖的理化性质及抗氧化活性[J]. 食品科学, 2015, 36(19): 34-38.
- ZHOU H J, MA H L, GUO D Z, et al. Physicochemical properties and antioxidant activity of intracellular polysaccharides from *Phellinus igniarius* precipitated by different ethanol concentrations [J]. Food Sciences, 2015, 36(19): 34-38.
- [21] 王佳, 李进霞, 张慧芝, 等. 虎杖多糖乙醇分级纯化及其抗氧化性[J]. 食品工业科技, 2019, 40(1): 92-95.
- WANG J, LI J X, ZHANG H Z, et al. Ethanol fractional purification and antioxidant activities of polysaccharides from *Polygonum cuspidatum* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(1): 92-95.
- [22] 张梦洁, 易阳, 闵婷, 等. 不同浓度醇沉级分的莲藕多糖成分分析与对 RAW264.7 细胞免疫活性的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(8): 162-170.
- ZHANG M J, YI Y, MIN T, et al. Composition analysis and in vitro evaluation of some activities of RAW264.7 of Lotus Root polysaccharide extracted by ethanol precipitation with different concentrations[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(8): 162-170.
- [23] 康文艺, 蒙丽君, 王莉, 等. 花中多糖化学组成与生物活性研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(1): 1-13.
- KANG W Y, MENG L J, WANG L, et al. Chemical composition and biological activity of polysaccharides from flowers: A review [J]. Food Science, 2022, 43(1): 1-13.
- [24] CHEN L, HUANG G L. Antioxidant activities of sulfated pumpkin polysaccharides [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 126: 743-746.
- [25] SONG Y, NI Y Y, HU X S, et al. Effect of phosphorylation on antioxidant activities of pumpkin (*Cucurbita pepo*, Lady godiva) polysaccharide [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 81: 41-48.
- [26] ZHANG H X, ZHAO J C, SHANG H M, et al. Extraction, purification, hypoglycemic and antioxidant activities of red clover (*Trifolium pratense* L.) polysaccharides[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 148: 750-760.
- [27] 赵婧, 袁驰, 周春丽, 等. 南瓜多糖降血糖作用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(7): 108-110.
- ZHAO J, YUAN C, ZHOU C L, et al. Research advance in hypoglycemic effects of pumpkin polysaccharides [J]. Food Research and Development, 2014, 35(7): 108-110.

(上接第 28 页)

- [20] 张健, 颜伟, 王佳晨, 等. 探讨血糖代谢障碍对心率变异性的影响[J]. 解放军医学院学报, 2022, 43(3): 277-283, 353.
- ZHANG J, YAN W, WANG J C, et al. Exploring the effect of impaired glucose metabolism on heart rate variability [J]. Academic Journal of Chinese PLA Medical School, 2022, 43(3): 277-283, 353.
- [21] 孔令琴, 陈飞, 赵跃进, 等. 融合心率变异性与表情的非接触心理压力检测[J]. 光学学报, 2021, 41(3): 68-77.
- KONG L Q, CHEN F, ZHAO Y J, et al. Non-contact psychological stress detection by fusing heart rate variability with expression[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 68-77.
- [22] 史波林, 赵镭, 汪厚银, 等. 智能感官分析技术在茶叶品质检测中的应用[J]. 食品科学, 2009, 30(19): 351-355.
- SHI B L, ZHAO L, WANG H Y, et al. Application of intelligent sensory analysis technology in tea quality testing[J]. Food Science, 2009, 30(19): 351-355.
- [23] 余顺园. 信号与系统中时域频域的对称性[J]. 科技视界, 2012(25): 192-193.
- YU S Y. Symmetry in the time and frequency domains of signals and systems[J]. Science & Technology Vision, 2012(25): 192-193.

(上接第 156 页)

- [31] TANG Y, FAN Z, YANGM, et al. Low concentrations of the antidepressant venlafaxine affect courtship behaviour and alter serotonin and dopamine systems in zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Aquatic Toxicology, 2022, 244(10): 60-82.
- [32] KOPSCHINA FELTES P, DOORDUIN J, KLEIN HC, et al. Anti-inflammatory treatment for major depressive disorder: Implications for patients with an elevated immune profile and non-responders to standard antidepressant therapy [J]. Journal of Psychopharmacology, 2017, 31(9): 1 149-1 165.
- [33] NGUYEN M, STEWART A M, KALUEFF A V. Aquatic blues: Modeling depression and antidepressant action in zebrafish [J]. Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry, 2014, 55(12): 26-39.