

不同干燥方式对火龙果茎多糖理化特性及功能活性的影响

苏敬红,牛格格,吴佳琦,武彬*

(山东职业学院 生物工程学院,山东 济南 250104)

摘要:以新鲜火龙果茎为原材料,研究真空干燥、热风干燥、自然晒干、真空冷冻干燥4种干燥方式对火龙果茎多糖的理化特性和功能活性的影响。结果表明:4种干燥方式对火龙果茎多糖得率均有显著影响($P<0.05$),其中真空冷冻干燥处理后的火龙果茎多糖得率最高,为 $(19.75\pm 0.21)\%$ 。此外,4种干燥方式均显著影响了火龙果茎多糖的持水力和持油力,其中真空冷冻干燥和热风干燥处理后火龙果茎多糖具有较高的持水和持油力($P<0.05$)。体外抗氧化和功能活性试验表明真空冷冻干燥后的火龙果茎多糖具有较好的DPPH·和·OH的清除能力以及较好的葡萄糖束缚能力和 α -淀粉酶活力抑制力。因此,真空冷冻干燥方式是获得高品质和高活性火龙果茎多糖的较好处理方式。

关键词:火龙果茎;干燥方式;多糖;理化特性;功能活性

Effects of Different Drying Methods on Physicochemical Properties and Functional Activities of Polysaccharides from *Hylocereus undatus* Stem

SU Jing-hong, NIU Ge-ge, WU Jia-qi, WU Bin*

(Bioengineering Department, Shandong Polytechnic, Jinan 250104, Shandong, China)

Abstract: The effects of vacuum drying, hot air drying, flat drying and vacuum freeze drying on the physicochemical properties and *in vitro* hypoglycemic activity of *Hylocereus undatus* stem polysaccharides were studied. The four drying methods had significant effects on the pitaya stem polysaccharides. The highest yield of pitaya stem polysaccharides treated by vacuum freeze drying was $(19.75\pm 0.21)\%$. The four drying methods significantly affected the water and oil holding capacity of the pitaya stem polysaccharides ($P<0.05$). The pitaya stem polysaccharides after vacuum freeze drying and hot air drying had higher water and oil holding capacities than those after other methods. *In vitro* antioxidant and functional activity experiments showed that the freeze-dried pitaya stem polysaccharide had a better ability to scavenge DPPH·, ·OH, as well as good glucose binding ability and α -amylase activity inhibitory activity. Among the drying methods, freeze drying is better to obtain high quality and high activity pitaya stem polysaccharides.

Key words: pitaya stem; drying method; polysaccharide; physical and chemical properties; functional activity

引文格式:

苏敬红,牛格格,吴佳琦,等. 不同干燥方式对火龙果茎多糖理化特性及功能活性的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(15): 34-39.

SU Jinghong, NIU Gege, WU Jiaqi, et al. Effects of Different Drying Methods on Physicochemical Properties and Functional Activities of Polysaccharides from *Hylocereus undatus* Stem[J]. Food Research and Development, 2021, 42(15): 34-39.

火龙果(pitaya),别名仙人掌蜜果、红龙果、芝麻

作者简介:苏敬红(1978—),女(汉),讲师,硕士,研究方向:生物分离纯化技术。

*通信作者:武彬(1979—),男(汉),副教授,博士,研究方向:微生物应用技术。

果、仙蜜果,为仙人掌科三角柱属植物,是集水果、花卉、蔬菜于一体的“果中之王”^[1-3]。火龙果的品种依果肉颜色有红皮白肉、红肉、黄肉3种,其中以红心火龙果最佳。目前针对火龙果果实以及火龙果果皮进行的研究较多,有关火龙果茎研究的较少。火龙果茎中富

含多糖,用热回流提取法(heat reflux extraction,HRE)提取的火龙果茎多糖大约占干燥茎叶的8%^[2]。在农业生产加工过程中,火龙果茎往往作为废物被丢弃,不仅造成了自然资源的极大浪费,又给环境带来了不利影响。若能将其充分利用,不仅可提高其经济附加值,也可提高果农收入。

国内外研究发现,植物多糖的生物功能与其理化组成、水溶性、分子质量大小、分支度、黏度和高级螺旋结构等紧密相关,主要受到样品处理方法、提取工艺参数和干燥方法三大类因素的影响^[4]。FAN等^[5]考察了不同干燥方式对灵芝多糖抗氧化活性的影响,结果发现,不同干燥方式对多糖的理化特性和生物活性均有显著的影响。陈欢等^[6]研究了不同干燥方式对川芎多糖理化性质及抗氧化活性的影响,结果表明真空冷冻干燥制备优质功能性川芎多糖效果较佳。胡安阳等^[7]研究表明,不同干燥方式制得的柚子皮粉在加工特性和功能成分含量等方面都存在显著差异。张存艳等^[8]研究了不同干燥处理对松露多糖含量及其抗氧化活性的影响。目前关于不同干燥方式对火龙果茎多糖含量及理化特性和功能特性的影响研究较少。因此,本试验考察了4种干燥方式(真空干燥、热风干燥、自然晒干和真空冷冻干燥)对火龙果茎多糖的得率、理化特性和功能活性的影响,旨在为筛选出最适宜火龙果茎的干燥方法提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜红心火龙果茎:海南省东方市北纬十八度有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl,DPPH);美国Sigma-Aldrich公司;葡萄糖标准品、抗坏血酸标准品:成都曼思特生物科技有限公司;盐酸、硫酸、苯酚、无水乙醇、过硫酸钾、氯仿、正丁醇:广州试剂化学厂; α -淀粉酶(10 000 U/g):山东隆科特酶制剂有限公司;以上试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

EL204 电子天平:梅特勒托利多仪器有限公司;LD-300 粉碎机:长沙市宏精机械设备有限公司;HH-s4 恒温水浴锅:济南欧莱博科学仪器有限公司;GL-10MC 高速冷冻离心机:长沙湘锐离心机有限公司;UV-2450 紫外可见分光光度计:日本岛津公司;DYJG-9023A 台式鼓风干燥箱:杭州亿捷有限公司;RE52CS 旋转蒸发仪:上海耀特仪器设备有限公司;FD-1B-50B 压盖型真空冷冻干燥机:上海准宇仪器设备有限公司;KU-3 斯托墨黏度计:上海微川精密仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 火龙果茎干燥工艺处理

1.3.1.1 真空干燥处理

新鲜的红心火龙果茎洗净,置于真空度为0.09 MPa,温度为70℃的真空干燥箱中,同时开启真空泵,将真空干燥箱内原料含水量为5%视为干燥终点,然后进行粉碎并过80目筛。

1.3.1.2 热风干燥处理

新鲜的红心火龙果茎洗净,将待干燥的火龙果茎置于鼓风干燥箱内,在70℃条件下烘干16 h~24 h至原料含水量为5%,即为干燥终点,记录干燥时间。

1.3.1.3 自然晒干处理

新鲜的火龙果茎洗净,擦干,置于阳光下直接晒干至完全干燥,即为干燥终点。

1.3.1.4 真空冷冻干燥处理

新鲜的火龙果茎洗净,擦干切块,将切好的原料放在超低温冰箱预冻48 h,然后放置于真空冷冻干燥机的置物架上,在-80℃条件下冻干2 d至原料含水量为5%。

1.3.2 火龙果茎粗多糖提取

取一定量干燥后的火龙果茎粉,按照1:30(g/mL)加入去离子水,在提取功率500 W、提取时间为200 s条件下进行超声-微波协同辅助提取,提取液于6 000 r/min离心12 min,取上清液浓缩后,加入4倍体积的乙醇进行醇沉12 h过夜,沉淀物冷冻干燥即为火龙果茎粗多糖。

1.3.3 火龙果茎粗多糖纯化

准确称取1 g火龙果茎粗多糖,依次加入10 mL 30%的 H_2O_2 ,调pH值为9.0后定容至250 mL,混匀,置于40℃下搅拌1 h后于5 000 r/min离心8 min,取上清液,加入100 mL Seavage试剂(氯仿:正丁醇=4:1,体积比),混匀振荡30 min后移入分液漏斗中至少静置20 min,重复上述操作4次,将最终得到的上清液浓缩后透析48 h去除小分子杂质和盐,冻干即可获得火龙果茎多糖^[9]。

1.3.4 理化性质的测定

1.3.4.1 持水力的测定

准确称取1 g不同干燥方式得到的火龙果茎多糖,加入30 mL去离子水后于25℃恒温水浴锅中振荡60 min使其充分混匀,结束后于5 000 r/min离心15 min,记录离心后沉淀物的质量。持水力(water holding capacity,WHC)计算公式如下^[10]。

$$WHC/(g/g)=(m_1-m)/m$$

式中: m_1 为样品吸水后质量,g; m 为干样品质量,g。

1.3.4.2 持油力的测定

准确称取 1 g 不同干燥方式得到的火龙果茎多糖,加入 15 g 大豆油于 25 ℃ 恒温水浴锅中振荡 40 min,使其充分混匀,结束后于 5 000 r/min 离心 15 min,记录离心后沉淀物的质量^[1],持油力(oil holding capacity, OHC)计算公式如下。

$$\text{OHC}/(\text{g/g})=(m_0-m)/m$$

式中: m_0 为样品吸油后的质量,g; m 为干样品质量,g。

1.3.5 不同干燥方式的火龙果茎多糖抗氧化活性研究

1.3.5.1 DPPH·清除率测定

准确吸取质量浓度为 0、0.1、0.2、0.25、0.5、1、2 mg/mL 的多糖待测液 1 mL、分别加入 3 mL 0.2 mmol/L DPPH·无水乙醇溶液,混匀后于暗处反应 30 min,反应结束后于 517 nm 处测吸光度值^[3]。DPPH·清除率计算方式如下。

$$\text{DPPH}\cdot\text{清除率}/\%=[(D_1-D_0)/D_0]\times 100$$

式中: D_1 为样品的吸光值; D_0 为蒸馏水代替多糖待测液的(空白对照)吸光值。

1.3.5.2 ·OH 清除率测定

准确吸取不同干燥处理后的多糖待测液 1 mL,依次加入 20 mmol/L 的过氧化氢 0.5 mL、2.5 mmol/L 的邻菲罗啉 1.0 mL、2.5 mmol/L 的 1.0 mL 硫酸亚铁,用磷酸缓冲液调 pH 7.0,室温(25 ℃)静置 1 h 后于 536 nm 处测吸光值^[3]。·OH 清除率计算方式如下。

$$\cdot\text{OH}\text{清除率}/\%=[(A_2-A_0)/(A_1-A_0)]\times 100$$

式中: A_2 为样品组吸光度值; A_1 为蒸馏水代替过氧化氢溶液的吸光度值(对照组); A_0 为蒸馏水代替多糖待测液的吸光度值(空白组)。

1.3.5.3 $\text{O}_2\cdot$ 氧化速率测定

准确吸取 50 mmol/L pH 8.2 的 Tris-HCl 缓冲溶液 4.5 mL 于试管中,于 25 ℃ 水浴中保持 20 min,加 0.4 mL 多糖待测液和 25 mmol/L 邻苯三酚(用 10 mmol/L HCl 配制)0.08 mL,封口混匀后于 325 nm 波长下测定吸光值,每隔 0.5 min 记录一次吸光值,共记录 4 min。10 mmol/L HCl 代替邻苯三酚溶液,蒸馏水代替样液作为自氧化管^[13]。 $\text{O}_2\cdot$ 氧化速率公式如下。

$$\text{氧化速率}/(\Delta A/\text{min})=(D_1-D_2)/T$$

$$\text{O}_2\cdot\text{氧化速率}/\%=[(V_1-V_2)/V_1]\times 100$$

式中: D_1 是样品 4 min 记录的吸光度值; D_2 是样品 0 min 记录的吸光度值; T 为每隔 0.5 min 记录一次吸光值,共计 4 min; V_1 是自氧化管氧化速率, $\Delta A/\text{min}$; V_2 是样品管氧化速率, $\Delta A/\text{min}$ 。

1.3.6 火龙果茎多糖功能活性测定

1.3.6.1 葡萄糖束缚能力测定

准确称取 1 g 不同干燥方式得到的火龙果茎多糖,分别加入 50 mL 质量浓度分别为 5、10、50、100 mmol/L 的葡萄糖溶液,混匀后于 37 ℃ 恒温水浴锅反应 6 h,反应结束后于 6 000 r/min 离心 10 min,离心结束后,测定上清液中的葡萄糖浓度^[14]。

$$\text{葡萄糖束缚量}/(\text{mmol/g})=[(C_0-C)\times 0.1]/m$$

式中: C_0 为葡萄糖溶液浓度,mmol/L; C 为上清液中葡萄糖浓度,mmol/L; m 为样品质量,g。

1.3.6.2 α -淀粉酶活力抑制力测定

准确称取 1 g 不同干燥方式得到的火龙果茎多糖,分别加入 20 g 糊化好的马铃薯淀粉及 0.2 mL 0.1% 的 α -淀粉酶溶液,混匀后于 95 ℃ 恒温水浴锅反应 0.5 h,反应结束后于 5 000 r/min 离心 8 min,离心结束后,测定上清液中的还原糖含量^[15],空白对照为不加样品处理组。

$$\alpha\text{-淀粉酶活力抑制力}/\%=(A_t-A)/A_t\times 100$$

式中: A_t 为空白组还原糖含量,g/100 g; A 为样品组还原糖含量,g/100 g。

1.4 统计学分析

所有试验均重复 3 次,结果用平均值 $\pm$ 标准差($\bar{x}\pm s$)表示,用 SPSS11.5 统计软件进行方差分析,数据处理采用 Origin Pro 9.0。

2 结果与分析

2.1 不同干燥方式对火龙果茎多糖理化特性的影响

不同干燥方式对火龙果茎多糖理化特性的影响见表 1。

不同干燥方式处理后的火龙果茎的总糖含量有

表 1 不同干燥方式对火龙果茎多糖理化特性的影响

Table 1 Effects of different drying methods on physicochemical properties of pitaya stem polysaccharide

项目	多糖得率/%	总糖含量/%	相对黏度	持水力/(g/g)	持油力/(g/g)
真空干燥	15.56 $\pm$ 0.27 ^b	68.22 $\pm$ 0.27 ^b	2.35 $\pm$ 0.26 ^c	1.38 $\pm$ 0.15 ^c	2.11 $\pm$ 0.03 ^c
热风干燥	10.56 $\pm$ 0.27 ^c	65.35 $\pm$ 0.11 ^c	3.07 $\pm$ 0.33 ^a	1.72 $\pm$ 0.11 ^b	2.63 $\pm$ 0.14 ^b
自然晒干	8.93 $\pm$ 0.43 ^d	63.25 $\pm$ 0.41 ^d	2.47 $\pm$ 0.23 ^b	1.18 $\pm$ 0.05 ^d	2.23 $\pm$ 0.34 ^c
真空冷冻干燥	19.75 $\pm$ 0.21 ^a	72.13 $\pm$ 0.22 ^a	2.43 $\pm$ 0.51 ^b	1.86 $\pm$ 0.15 ^a	3.26 $\pm$ 0.12 ^a

注:相对黏度为溶液黏度与水黏度之比;同列不同小写字母表示不同干燥处理之间的差异显著($P<0.05$)。

所差异,说明不同干燥方式会对火龙果茎多糖含量造成影响。其中自然晒干法处理的火龙果茎总糖含量最低,真空冷冻干燥处理后的总糖含量最高,为 $(72.13 \pm 0.22)\%$ 。热风干燥后的多糖相对黏度最大 (3.07 ± 0.33) ,这可能是因为真空干燥和热风干燥使多糖发生了降解。吴振等^[16]研究了热风干燥、冷冻干燥和抽真空干燥等不同干燥处理银耳多糖理化特性和体外抗氧化活性的影响,结果发现不同干燥方式对银耳多糖含量和抗氧化活性均有显著影响,其中冷冻干燥法处理的银耳多糖的得率、总糖含量、总黏度和抗氧化活性均高于其它干燥方式。

真空冷冻干燥处理得到的火龙果茎多糖持水力最高 $(1.86 \pm 0.15) \text{ g/g}$,显著高于热风干燥 $(1.72 \pm 0.11) \text{ g/g}$ 、真空干燥 $(1.38 \pm 0.15) \text{ g/g}$ 和自然晒干 $(1.18 \pm 0.05) \text{ g/g}$ ($P < 0.05$),但4种干燥方式均高于刺梨果实多糖 $[(0.25 \pm 0.04) \text{ g/g}]^{[17]}$ 和蓝靛果多糖的持水性 $[(0.37 \pm 0.05) \text{ g/g}]^{[18]}$ 。真空冷冻干燥的火龙果茎多糖持油力最强,由此表明此干燥方法得到的多糖与油脂间的相互作用较强。

2.2 不同干燥方式对火龙果茎多糖抗氧化活性的影响

2.2.1 不同干燥方式的火龙果茎多糖 DPPH·清除率的影响

不同干燥方式对火龙果茎多糖 DPPH·清除率见图1。

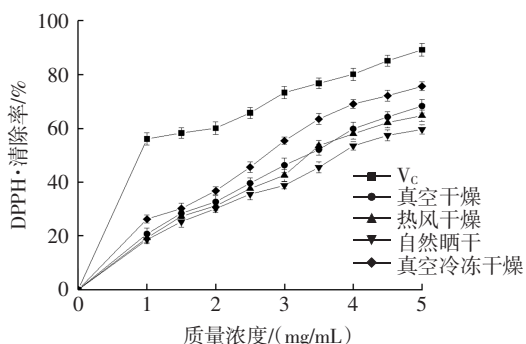


图1 不同干燥方式火龙果茎多糖 DPPH·清除率

Fig.1 Effects of different drying methods on DPPH· scavenging rate of pitaya stem polysaccharide

由图1可知,不同干燥方式得到的火龙果茎多糖的 DPPH·清除率有所不同,4种干燥方式在试验浓度范围内整体呈上升趋势,但均低于 V_c 阳性对照组。当质量浓度达到 5 mg/mL 时, V_c 、真空干燥、热风干燥、自然晒干和真空冷冻干燥处理的火龙果茎多糖对 DPPH·清除率分别为 $(89.35 \pm 2.21)\%$ 、 $(68.31 \pm 1.83)\%$ 、 $(62.44 \pm 2.11)\%$ 、 $(58.62 \pm 1.91)\%$ 和 $(75.12 \pm 2.18)\%$,其中真空冷冻干燥处理的火龙果茎多糖的 DPPH·清除能力显著高于其它3种干燥方式 ($P < 0.05$),这表明真空冷冻干

燥处理最大程度地保留了火龙果茎多糖的抗氧化活性。

2.2.2 不同干燥方式火龙果茎多糖·OH清除率

不同干燥方式的火龙果茎多糖·OH清除率的影响见图2。

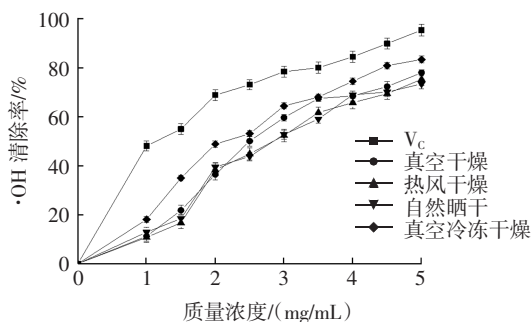


图2 不同干燥方式火龙果茎多糖·OH清除率

Fig.2 Effects of different drying methods on ·OH scavenging rate of pitaya stem polysaccharide

由图2可知,不同干燥方式制得的火龙果茎多糖·OH清除率有差异,其中真空冷冻干燥处理后的火龙果茎多糖在试验浓度范围内具有较好的清除·OH的能力,且在质量浓度达到 5 mg/mL 时,其·OH清除率达到了 $(80.03 \pm 2.21)\%$,显著高于其它干燥处理组 ($P < 0.05$)。在 $0 \sim 5 \text{ mg/mL}$ 的浓度范围内,4种干燥方式处理的火龙果茎多糖·OH清除率整体呈上升趋势,但均低于 V_c 阳性对照组。试验结果与 DPPH·清除率结果趋势相同,这表明真空冷冻干燥处理后的火龙果茎多糖具有较好的抗氧化活性。

2.2.3 不同干燥方式火龙果茎多糖对 $O_2^{\cdot-}$ 的氧化速率

不同干燥方式火龙果茎多糖对 $O_2^{\cdot-}$ 的氧化速率的影响见图3。

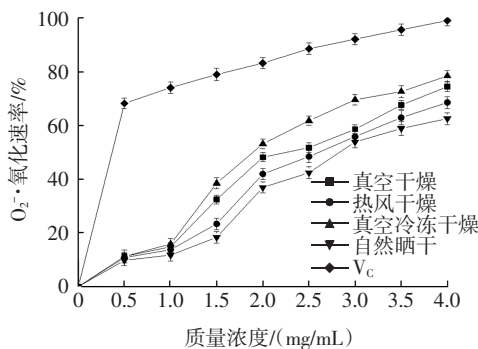


图3 不同干燥方式对火龙果茎多糖 $O_2^{\cdot-}$ 氧化速率的影响

Fig.3 Effects of different drying methods on $O_2^{\cdot-}$ scavenging ability of polysaccharide from stem of pitaya

由图3可知,经过4种不同干燥方式处理后的火龙果茎多糖均具有较好的 $O_2^{\cdot-}$ 氧化速率,且随着质量

浓度的增加而增强,但在试验的质量浓度范围内其清除能力均低于阳性对照 V_c 。当质量浓度为 4.0 mg/mL 时, $O_2^{\cdot-}$ 氧化速率的大小顺序为 $V_c > \text{真空冷冻干燥} > \text{真空干燥} > \text{热风干燥} > \text{自然晒干}$, 其中真空冷冻干燥的作用能力显著强于其它干燥方式 ($P < 0.05$)。结果与火龙果茎多糖 $\text{DPPH}^{\cdot}$ 、 $\cdot\text{OH}$ 清除能力一致, 这表明真空冷冻干燥方式处理后的火龙果茎多糖其 $O_2^{\cdot-}$ 氧化速率升高。

2.3 不同干燥方式火龙果茎多糖对体外降血糖活性的影响

2.3.1 葡萄糖束缚能力

不同干燥方式得到的火龙果茎多糖对葡萄糖的束缚能力见图4。

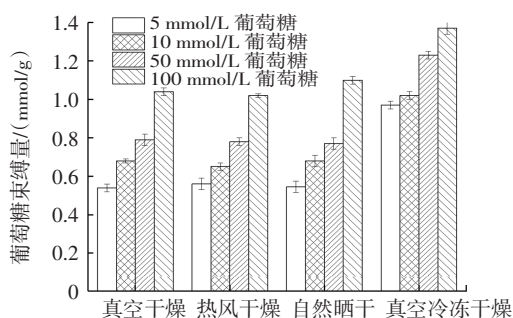


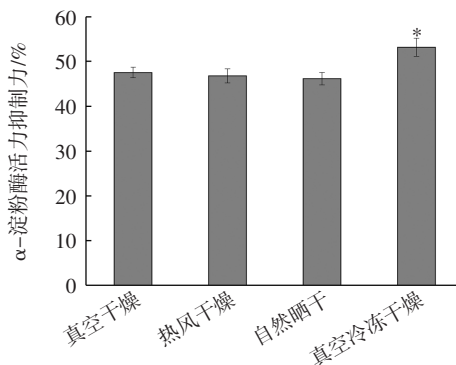
图4 不同干燥方式对火龙果茎多糖的葡萄糖束缚能力的影响
Fig.4 Effects of different drying methods on glucose binding capacity from pitaya stem polysaccharide

由图4可知, 不同干燥方式得到的火龙果茎多糖可阻碍葡萄糖的扩散和吸附, 从而达到降低血糖水平的作用。不同干燥方式处理的火龙果茎多糖的葡萄糖束缚能力随着葡萄糖浓度增加而增强; 当葡萄糖浓度为 100 mmol/L 时, 真空冷冻干燥处理后的火龙果茎多糖的葡萄糖束缚量为 $(1.38 \pm 0.22) \text{ mmol/g}$, 显著高于其它3种干燥方式 ($P < 0.05$)。其它3种干燥方式在不同浓度下的葡萄糖束缚能力无明显差异。这可能是因为干燥过程中, 由于内部水分的迁移导致结构的硬化、结块, 以及可能对热敏性物质和挥发性成分造成了破坏, 且网络结构在温度的作用下遭到了破坏, 从而影响了葡萄糖的吸附。而真空冷冻干燥处理在低温下干燥抑制了微生物和酶的作用, 同时最大程度地保留原料原有的网络结构和形态, 因此具有较好的葡萄糖吸附能力^[19]。

2.3.2 α -淀粉酶活力抑制力

不同干燥方式对 α -淀粉酶活力抑制力见图5。

由图5可知, 真空冷冻干燥具有较高的 α -淀粉酶活力抑制力, 可达 $(52.43 \pm 1.83)\%$, 显著高于其它3种干燥方式的火龙果茎多糖 ($P < 0.05$), 这可能是因为真空冷冻干燥处理更好地保持了多糖原来的结构, 可最



* 表示差异显著, $p < 0.05$ 。

图5 不同干燥方式对火龙果茎多糖 α -淀粉酶活力抑制力的影响

Fig.5 Effects of different drying methods on inhibition of α -amylase activity from pitaya stem polysaccharide

大程度地包埋酶或淀粉^[20], 而真空干燥和热风干燥的处理后的火龙果多糖结构在干燥过程中发生了降解, 从而影响了 α -淀粉酶活力抑制。综上所述, 真空冷冻干燥是一种较好的干燥红龙果茎的处理方式。

3 结论

4种不同干燥方式处理对火龙果茎多糖得率产生了不同程度的影响, 其中真空冷冻干燥处理的多糖得率最高为 $(19.75 \pm 0.21)\%$ 。此外, 不同干燥处理的火龙果茎多糖均有一定的抗氧化活性, 其中真空冷冻干燥处理后的火龙果茎多糖具有较高的 $\text{DPPH}^{\cdot}$ 清除率、 $\cdot\text{OH}$ 清除率以及 $O_2^{\cdot-}$ 氧化速率, 但低于阳性对照 V_c 。真空冷冻干燥是在 0°C 温度下物料进行升华, 干燥后的组织结构疏松多孔, 可最大程度地保留了物料原有的网络结构从而赋予了火龙果茎多糖较好的抗氧化活性, 吸附葡萄糖和 α -淀粉酶的能力。综上所述, 真空冷冻干燥对火龙果茎多糖保留率最高、体外抗氧化活性和降血糖活性最强, 是干燥新鲜火龙果茎的最佳方式。

参考文献:

- [1] 段秋霞, 李定金, 段振华, 等. 红心火龙果酒颜色稳定性影响因素的研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(24): 130-136.
DUAN Qiuxia, LI Dingjin, DUAN Zhenhua, et al. Study on the factors affecting the color stability of red heart pitaya wine[J]. Food Research and Development, 2020, 41(24): 130-136.
- [2] 王超雪. 红心火龙果果皮、茎叶中多糖分离纯化及抗氧化活性研究[D]. 长春: 长春师范大学, 2020.
WANG Chaoxue. Separation and purification and antioxidant activities of polysaccharides from peels and leaves of red dragon fruit[D]. Changchun: Changchun Normal University, 2020.
- [3] WICHICHOT S, JATUPORNIPAT M, RASTALL R A. Oligosaccharides of pitaya (dragon fruit) flesh and their prebiotic properties

- [J]. Food Chemistry, 2010, 120(3): 850–857.
- [4] GAO Q P, JIANG R Z, CHEN H Q, et al. Characterization and cytokine stimulating activities of heteroglycans from *Tremella fuciformis*[J]. Planta Medica, 1996, 62(4): 297–302.
- [5] FAN L P, LI J W, DENG K Q, et al. Effects of drying methods on the antioxidant activities of polysaccharides extracted from *Ganoderma lucidum*[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(2): 1849–1854.
- [6] 陈欢, 姜媛媛, 徐峰, 等. 不同干燥方式对川芎多糖理化性质及抗氧化活性的影响[J]. 中成药, 2021, 43(1): 173–177.
- CHEN Huan, JIANG Yuanyuan, XU Feng, et al. Effects of different drying methods on the physicochemical properties and antioxidant activity of *Ligusticum chuanxiong* polysaccharide[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2021, 43(1): 173–177.
- [7] 胡安阳, 吕建秋, 杜冰. 不同干燥方式对柚子皮粉加工特性及功能成分含量的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(5): 170–176.
- HU Anyang, LÜ Jianqiu, DU Bing. Effects of different drying methods on the processing characteristics and content of functional components of pomelo peel powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(5): 170–176.
- [8] 张存艳, 魏蔼玲, 岳茂林, 等. 不同干燥方式对松露多糖含量及其抗氧化活性的影响[J]. 食品工业, 2020, 41(12): 214–218.
- ZHANG Cunyan, WEI Ailing, YUE Maolin, et al. Effects of different drying methods on polysaccharide content and its antioxidant activity from truffle[J]. The Food Industry, 2020, 41(12): 214–218.
- [9] 王琳炜, 欧阳臻, 张碧娟, 等. 霍山铁皮石斛多糖的脱蛋白工艺及结构分析[J]. 食品科学, 2017, 38(12): 164–170.
- WANG Linwei, OUYANG Zhen, ZHANG Bijuan, et al. Deproteinization and structural analysis of polysaccharides from *Dendrobium officinale* Kimura et Migo grown in Huoshan [J]. Food Science, 2017, 38(12): 164–170.
- [10] WANG T, SUN X H, RADDATZ J, et al. Effects of microfluidization on microstructure and physicochemical properties of corn bran[J]. Journal of Cereal Science, 2013, 58(2): 355–361.
- [11] AL-SHERAJI S H, ISMAIL A, MANAP M Y, et al. Functional properties and characterization of dietary fiber from *Mangifera pajang* Kort. fruit pulp[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(8): 3980–3985.
- [12] KAO T H, CHEN B H. Functional components in soybean cake and their effects on antioxidant activity[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(20): 7544–7555.
- [13] ZHU K X, ZHANG Y J, NIE S P, et al. Physicochemical properties and in vitro antioxidant activities of polysaccharide from *Artocarpus heterophyllus* Lam. pulp[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 155: 354–361.
- [14] 陆红佳. 纳米甘薯渣纤维素降血糖血脂的功效及其分子机理的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- LU Hongjia. Research on hypoglycemic and hypolipidemic effects and mechanism of cellulose nanocrystals from sweet potato residues [D]. Chongqing: Southwest University, 2015.
- [15] WEICKERT M O, MOHLIG M, KOEBNICK C, et al. Impact of cereal fibre on glucose-regulating factors[J]. Diabetologia, 2005, 48(11): 2343–2353.
- [16] 吴振, 李红, 罗杨, 等. 不同干燥方式对银耳多糖理化特性及抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(13): 93–97.
- WU Zhen, LI Hong, LUO Yang, et al. Effects of different drying methods on physio-chemical properties and antioxidant activities of polysaccharides extracted from *Tremella fuciformis*[J]. Food Science, 2014, 35(13): 93–97.
- [17] WANG L, ZHANG B, XIAO J, et al. Physicochemical, functional, and biological properties of water-soluble polysaccharides from *Rosa roxburghii* Tratt fruit[J]. Food Chemistry, 2018, 249: 127–135.
- [18] 徐雅琴, 刘柠月, 李大龙, 等. 蓝靛果多糖功能特性、结构及抗糖基化活性[J]. 食品科学, 2020, 41(2): 8–14.
- XU Yaqin, LIU Ningyue, LI Dalong, et al. Functional properties, structure and anti-glycosylation activity of polysaccharide from blue honeysuckle fruit(*Lonicera caerulea* L.)[J]. Food Science, 2020, 41(2): 8–14.
- [19] 吴燕燕, 石慧, 李来好, 等. 水产品真空冷冻干燥技术的研究现状与展望[J]. 水产学报, 2019, 43(1): 197–205.
- WU Yanyan, SHI Hui, LI Laihao, et al. Research status and prospects of vacuum freeze-drying technology for aquatic products [J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(1): 197–205.
- [20] 陈菊红. 湿法超微粉碎对马铃薯渣的改性及其功能特性和应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- CHEN Juhong. The modification of potato pulp by wet ultrafine grinding and the study on its functional properties and application [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.

加工编辑:张璐

收稿日期:2021-03-17