

鲜石斛冻干工艺对多糖含量、抗氧化活性及其细粉品质的影响

冉庆念¹, 胡庆丰¹, 孙梦萍¹, 詹佳睿¹, 陈姿文¹, 姜雨冰¹, 惠爱玲^{1*}, 何祥林²

(1. 合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 霍山县长冲中药材开发有限公司, 安徽六安 237200)

摘要: 以鲜铁皮石斛为加工对象, 研究冻干、粉碎处理对石斛多糖含量、抗氧化活性及其冻干细粉品质的影响。结果表明: 石斛鲜条宜切段-30℃预冻2h, -30℃升华干燥12h, 此条件下冻干铁皮石斛多糖含量为4.78%(以鲜石斛计), 较烘干石斛粉提高约49.5%; 其体外抗氧化活性IC₅₀值分别达到2.356 mg/mL(DPPH·)、2.782 mg/mL(ABTS⁺·)、2.108 mg/mL(O₂⁻·)、2.658 mg/mL(·OH)。该冻干石斛过80目筛的出粉率为55.46%, 石斛粉色泽鲜亮偏蓝绿色, 其在75℃以上热水中易分散, 结块率低于5%; 冲泡水黏度达17.14 mm²/s, 是烘干石斛粉的4.8倍; 于95℃热水冲泡, 其水溶液中多糖含量达到35%以上, 较烘干石斛粉提高约16%。

关键词: 铁皮石斛; 冻干; 多糖; 抗氧化活性; 冲泡性能; 黏度

Effects of Freeze-Drying Technology on Polysaccharide Content, Antioxidant Activity, and Fine Powder Quality of Fresh *Dendrobium officinale*

RAN Qingnian¹, HU Qingfeng¹, SUN Mengping¹, ZHAN Jiarui¹, CHEN Ziwen¹, JIANG Yubing¹, HUI Ailing^{1*}, HE Xianglin²

(1. School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2. Huoshan Changchong Traditional Chinese Medicine Development Co., Ltd., Lu'an 237200, Anhui, China)

Abstract: This study investigated the effects of freeze-drying and powdering processes on the polysaccharide content, antioxidant activity, and fine powder quality of fresh *Dendrobium officinale*. The results showed that freeze-drying at -30℃ for 12 h after pre-freezing at -30℃ for 2 h was suitable for *D. officinale* segments. Under this condition, the polysaccharide content of freeze-dried *D. officinale* reached 4.78% (calculated based on fresh *D. officinale*), increased by nearly 49.5% compared to that of hot air-dried *D. officinale*. For the freeze-dried *D. officinale*, the IC₅₀ values representing antioxidant activity were 2.356 mg/mL (DPPH radical), 2.782 mg/mL (ABTS⁺ radical), 2.108 mg/mL (superoxide anion radical), and 2.658 mg/mL (hydroxyl radical). Passing through 80 mesh sieve, it afforded fine powder (55.46% of the total), which was bright with a blue-green color. The fine powder was easily dispersed in hot water above 75℃ with a clumping rate of less than 5%. The viscosity of the brewing water reached 17.14 mm²/s, 4.8 times that of hot air-dried *D. officinale* powder. When the freeze-dried *D. officinale* powder was brewed with hot water at 95℃, the polysaccharide content in the aqueous solution reached over 35%, which was about 16% higher than that when the powder of hot air-dried *D. officinale* was brewed.

Key words: *Dendrobium officinale*; freeze-drying; polysaccharides; antioxidant activity; brewing performance; viscosity

引文格式:

冉庆念, 胡庆丰, 孙梦萍, 等. 鲜石斛冻干工艺对多糖含量、抗氧化活性及其细粉品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(4): 55-60, 67.

基金项目: 质量基础设施标准化专项项目(2022MKS08)

作者简介: 冉庆念(1999—), 男(汉), 硕士, 研究方向: 天然药物化学。

*通信作者: 惠爱玲(1980—), 女(汉), 副研究员, 研究方向: 天然产物研究与开发。

RAN Qingnian, HU Qingfeng, SUN Mengping, et al. Effects of Freeze-Drying Technology on Polysaccharide Content, Antioxidant Activity, and Fine Powder Quality of Fresh *Dendrobium officinale*[J]. Food Research and Development, 2025, 46(4): 55-60, 67.

石斛具有益胃生津、滋阴清热功效^[1],常以茎入药。现代药理学、临床研究证实石斛含有多糖、生物碱、黄酮、多酚等活性成分^[2-3],具有抗氧化、抗炎镇痛、调节免疫力等功效^[4-8],且鲜品石斛中粗多糖、甘露糖、果胶多糖等含量均高于干石斛,其抗氧化活性也更优^[9-10]。然而,鲜石斛(或鲜条)放置易霉变,直接保存难度大,其采后通常要进行干燥处理,如制成干条、枫斗等形式。鲜条干燥过程中,多糖成分会发生不可逆改变,多糖含量下降,石斛品质也会受到不同程度影响^[9]。为此,学者们尝试开发不同干燥方式并优化工艺来减少石斛多糖、黄酮等活性物质损失。徐兰芳等^[11]以铁皮石斛中多糖、游离氨基酸和总氨基酸保留率及7种单糖组成变化为品质指标,从自然晒干、烘箱烘干、真空冷冻干燥(冻干)、微波干燥4种方式中筛选出90℃烘箱烘干24~36h较宜;张雨婷等^[12]以铁皮石斛多糖、甘露糖含量为指标,对比红外干燥、烘干、微波干燥和冻干4种干燥方式,发现冻干法能最大程度地保留样品中的多糖和甘露糖;韩姝葶等^[13]研究表明,冻干铁皮石斛多糖含量较微波间歇干燥、热风干燥更高,且色泽及总酚含量也较优;周思静等^[14]考察自然晒干、热风60℃、热风100℃、冻干、微波干燥5种方式对石斛粉物理特性(色泽、微观结构)、营养成分(氨基酸、矿物质)、活性成分(多糖、总酚、总黄酮)的影响,得到冻干、自然晒干的石斛粉品质更优的结论。

以上研究表明,与常规烘干法相比,冻干石斛形态、色泽与鲜品最为接近,对多糖、黄酮等活性成分保存更有利,但冻干、烘干处理对石斛粉抗氧化活性及其冲泡分散性等品质影响未有深入、全面的考察。基于此,本研究以粗多糖含量为指标,首先从升华干燥温度、时间两方面优化鲜铁皮石斛冻干工艺,进而比较冻干、烘干石斛多糖体外抗氧化活性差异;并考察不同粒径冻干粉、烘干粉的冲泡分散性,以及色泽、黏度、多糖溶出率等,以期对石斛冻干粉产品的产业化加工提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

铁皮石斛鲜条(批号230318):安徽霍山县长冲中药材开发有限公司,茎长15~20cm、直径0.5~0.8cm;葡萄糖标准品(优级纯):南京广润生物制品有限公司;浓硫酸、苯酚、过硫酸钾、邻苯三酚、三羟甲基氨基甲烷、HCl、FeSO₄、水杨酸、过氧化氢、维生素C、无水乙醇

(均为分析纯):国药集团化学试剂有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picryl-hydrazyl radical, DPPH)、2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵[2,2'-azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS](纯度均≥98%):上海化源世纪贸易有限公司。

1.2 仪器与设备

分析天平(PWN124ZH/E)、涡旋振荡器(VXM-NFS):奥豪斯仪器有限公司;真空冷冻干燥机(JB20032-2004):福建铸晟智能科技有限公司;电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9035):浙江赛德仪器设备有限公司;色差仪(cs-200)、数显恒温水浴锅(HH-4):常州普天仪器制造有限公司;超声波清洗器(KQ-500B):昆山市超声仪器有限公司;低温破壁机(935A):中山市惠人电器有限公司;电子天平(JA2003B):上海越平科学仪器有限公司;循环水真空泵(SHZ-DⅢ):巩义市予华仪器有限责任公司;pH计(PHS-25):上海仪电(集团)有限公司;台式高速离心机(TG16-WS):湖南湘鑫仪器仪表有限公司;电动搅拌器(H2010G):上海梅颖浦仪器仪表制造有限公司;旋转黏度计(NDJ-79+DC0506W):上海平轩科学仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 石斛鲜条冻干、烘干试验

结合铁皮石斛共晶点-19℃^[15]及已报道的较优冻干工艺^[16],本试验中石斛鲜条预冻条件设定为-30℃、2h,重点优化对产品品质有关键影响的升华干燥温度及时间,具体操作如下:石斛鲜条经清洗、去杂、晾干后,切成3~6mm短段,均匀平铺在冻干机托盘中,置于-30℃预冻2h,此后分别于-10、-20、-30、-40、-50℃升华干燥8、12、16h,真空度控制在70Pa,即得铁皮石斛冻干品。

鲜石斛烘干试验中,热风干燥条件参考方良材等^[17]及文献^[18]方法,略作改变,即3~6mm鲜石斛短段,置于65℃热风干燥12~24h,其含水量降到5%以下,即得烘干品。

1.3.2 失水率计算

石斛鲜条冻干、烘干后失水率(S ,%)按公式(1)计算。

$$S = \frac{m_1 - m_0}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

式中: m_0 为干燥后样品的质量,g; m_1 为鲜品的质量,g。

1.3.3 石斛多糖含量检测

上述冻干、烘干石斛段,粉碎过3号筛得石斛粉,

其多糖提取按照《中国药典》2020版^[1]铁皮石斛项下多糖含量测定的方法进行,即石斛粉加热水回流浸提,续滤液加无水乙醇沉淀,80%乙醇洗涤,离心(4 000 r/min、20 min)得粗多糖沉淀,进一步冻干得到干燥的粗多糖样品,可用于石斛多糖含量测定及后续抗氧化活性测定。

配制质量浓度为0.1 mg/mL的D-无水葡萄糖标准品溶液,于488 nm波长下测吸光度,得到葡萄糖浓度(x , mg/mL)与吸光度(y)的标准曲线回归方程为 $y=7.365x+0.1775$ ($R^2=0.9949$)。

用40℃温水配制浓度0.6 mg/mL的粗多糖溶液,并进一步稀释至0.06 mg/mL,采取苯酚-硫酸法测定铁皮石斛冻干品、烘干品多糖含量,并进一步折算为鲜石斛的多糖含量,即最终结果以D-葡萄糖量占石斛鲜重计(%)。

1.3.4 石斛多糖抗氧化活性测定

参考文献[9, 18-20]的方法,通过测定铁皮石斛冻干品和烘干品中多糖对DPPH自由基、ABTS⁺自由基、超氧阴离子自由基($O_2^{\cdot-}$)、羟自由基($\cdot OH$)的清除能力来评价其体外抗氧化活性。测定时,将1.3.2项下干燥的粗多糖样品配制成质量浓度为0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、4.0 mg/mL的多糖溶液,并选用0.1~0.5 mg/mL的抗坏血酸(vitamin C, V_C)溶液作为对照组,每个样品质量浓度测定3个平行组。自由基清除率(X , %)计算公式如下。

$$X = \left(1 - \frac{A_1 - A_0}{A} \right) \times 100 \quad (2)$$

式中: A_1 为DPPH溶液或ABTS溶液与多糖样品混合后的吸光度; A_0 为多糖样品吸光度; A 为DPPH溶液或ABTS溶液与等体积蒸馏水混合后的吸光度。

1.3.5 石斛粉性能检测

鲜石斛在上述较优冻干工艺(-30℃预冻2 h, -40℃升华干燥12 h)下获得对应的冻干品,每次取20 g于低温破壁机(≤ 40 ℃)粉碎100 s,粉碎后样品分别过60、80、100目筛,所得细粉置于干燥皿中用于后续性能测试。

1.3.5.1 出粉率

出粉率(Y , %)计算公式如下。

$$Y = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad (3)$$

式中: m_1 为石斛细粉质量,g; m_2 为粉碎前干石斛段质量,g。

1.3.5.2 溶解时间

过筛后石斛细粉1.0 g,缓慢加入50 mL纯净水(药典石斛用量6~12 g,取中间数10 g/500 mL水,故冲泡试验以1 g石斛粉分散于50 mL水中),水温85℃,用电动搅拌器以50 r/min搅拌使其充分溶解,记录石

斛粉溶解所需时间(s)。

1.3.5.3 结块率

参考文献[21]的方法并进行适当修改。粉碎过筛后粉末2 g缓慢加入50 mL 85℃纯净水中,用电动搅拌器以50 r/min搅拌30 s,其后用20目筛网过滤,筛上残渣用纯水清洗,筛网沥干水后于105℃电热恒温鼓风干燥箱烘干至恒重,结块率(Z , %)按下式计算。

$$Z = \frac{m_2}{m_1} \times 100 \quad (4)$$

式中: m_1 为冲泡石斛粉质量,g; m_2 为沥干后筛网105℃烘干至恒重后与筛网质量差,g。

1.3.5.4 色泽

采用色差仪测定1.3.5过80目的铁皮石斛冻干、烘干粉的 L^* 值、 a^* 值、 b^* 值,其中 L^* 值表示明度,值越大亮度越大; a^* 值从负到正表示颜色从绿色到红色的变化; b^* 值从负到正表示颜色从蓝色到黄色的变化^[14]。

1.3.5.5 黏度

根据《中国药典》2020年版四部通则0633中黏度测定第一法,用黏度计分别测定铁皮石斛冻干、烘干粉冲泡后过滤的溶液在毛细管内从小球上线流动到下线的时间。黏度按下列公式计算。

$$V = K \times t \quad (5)$$

式中: V 为黏度,mm²/s; K 为毛细管($\Phi 0.6$ mm)的常数,mm²/s²; t 为平均流出时间,s。

1.3.6 石斛粉冲泡多糖溶出量测定

取0.2 g石斛粉用10 mL的75、85、95℃热水冲泡,冲泡水自然放置10~15 min,用250 mL容量瓶定容、过滤,用苯酚-硫酸法测多糖溶出量^[22],并按下式计算多糖溶出量(D , %)。

$$D = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad (6)$$

式中: m_1 为溶出的多糖质量,g; m_2 为冲泡石斛粉质量,g。

1.4 数据处理

用Origin 2015进行数据处理,结果以平均值±标准差表示,试验重复3次;使用SPSS 19.0软件对试验结果进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同冻干条件鲜石斛失水率及其多糖含量的变化

不同干燥条件下鲜石斛失水率和多糖含量如表1所示。

由表1可知,鲜石斛采取冻干或烘干处理,其失水率随时间延长逐渐增加并趋于稳定,且失水率变化与升华干燥温度(-10~-50℃)关系不大,当升华干燥12~16 h或烘干18~24 h时,失水率均在80%左右。然而,干燥温度和时间对石斛粗多糖含量产生较大影响。

表1 不同干燥条件下鲜石斛失水率和多糖含量

Table 1 Water loss rate and polysaccharide content of fresh *D. officinale* under different drying conditions

干燥方式及温度	时间/h	失水率/%	多糖含量/%
烘干, 65 °C	12	74.6±1.0	2.96±0.11
	18	79.5±1.2	3.19±0.27
	24	80.8±0.9	3.12±0.18
冻干, -10 °C	8	76.5±1.0	3.93±0.17
	12	80.9±1.1	4.03±0.12
	16	81.8±1.3	4.07±0.12
冻干, -20 °C	8	76.4±0.8	3.93±0.18
	12	81.0±1.1	4.67±0.12
	16	81.7±1.2	4.35±0.16
冻干, -30 °C	8	72.9±0.7	3.98±0.18
	12	79.6±1.0	4.77±0.13
	16	80.5±0.9	4.49±0.17
冻干, -40 °C	8	73.7±0.8	4.20±0.19
	12	78.9±1.4	4.35±0.26
	16	80.9±1.0	4.15±0.17
冻干, -50 °C	8	76.6±1.1	4.03±0.15
	12	80.7±1.2	4.40±0.18
	16	82.0±1.3	4.23±0.20

对热风干燥而言, 65 °C热风烘干 18 h 的石斛多糖含量最高, 为(3.19±0.27)%, 而 15 个冻干条件下的多糖含量均在 3.93% 以上, 这与缪晓丹等^[23]研究发现冻干法是保存石斛多糖最佳的加工方式相一致。本冻干试验中, 在-30 °C或-20 °C冻干 12 h 时, 多糖含量较高, 分别为(4.77±0.13)%、(4.67±0.12)%, 此时多糖含量较烘干法提高近 50%。

2.2 多糖体外抗氧化活性分析

基于石斛多糖含量, 确立了鲜石斛冻干工艺, 即-30 °C预冻 12 h, -30、-20 °C升华干燥 12 h, 在此条件下获得的石斛冻干品, 其粗多糖对 DPPH 自由基、ABTS⁺自由基、超氧阴离子自由基、羟自由基清除能力如图 1~图 4 所示, 4 种自由基清除能力的 IC₅₀ 值如表 2 所示。

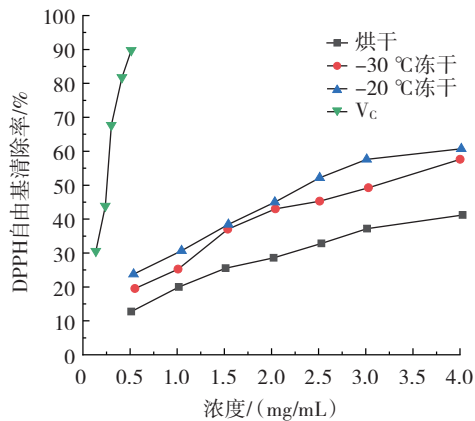


图1 石斛多糖对 DPPH 自由基的清除能力

Fig.1 Scavenging ability of *D. officinale* polysaccharides against DPPH radical

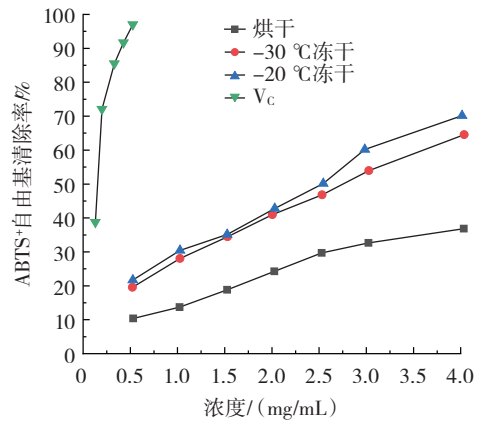


图2 石斛多糖对 ABTS⁺自由基的清除能力

Fig.2 Scavenging ability of *D. officinale* polysaccharides against ABTS⁺ radical

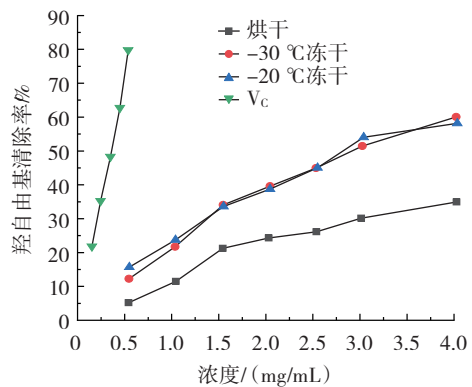


图3 石斛多糖对羟自由基的清除能力

Fig.3 Scavenging ability of *D. officinale* polysaccharides against hydroxyl radical

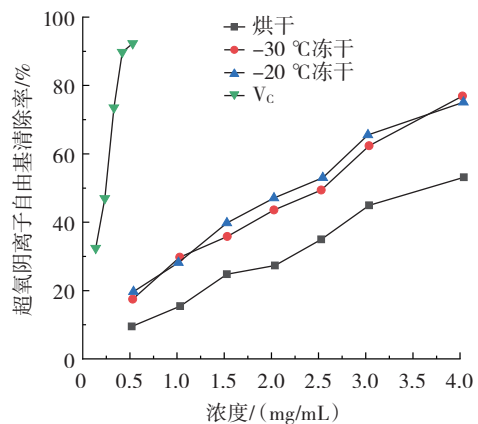


图4 石斛多糖对超氧阴离子自由基的清除能力

Fig.4 Scavenging ability of *D. officinale* polysaccharides against superoxide anion radical

由图 1~图 4 可知, 冻干、烘干石斛粗多糖浓度为 0.5~4.0 mg/mL 时, 其对 4 种自由基的清除率逐渐增大且具有浓度依赖性, 这与对照组 V_c 的自由基清除率迅速增长不同; 同一浓度下, 冻干石斛多糖 4 种自由基清除率明显高于烘干石斛, 其增幅达 41.1%~104.6%, 表 2 的 IC₅₀ 值更直观地展示这一趋势, 即冻干石斛多糖对

表2 3种石斛多糖对4种自由基清除能力的IC₅₀
Table 2 IC₅₀ of polysaccharides from three kinds of dried *D. officinale* for scavenging of four radicals

组别	IC ₅₀ 值/(mg/mL)			
	DPPH·	ABTS ⁺ ·	·OH	O ₂ ⁻ ·
-30℃,冻干	2.949	3.130	2.653	1.968
-20℃,冻干	2.356	2.782	2.658	2.108
烘干	6.246	7.294	7.007	3.846
V _c	0.186	0.126	0.253	0.169

4种自由基的IC₅₀值处于1.968~3.130 mg/mL;而烘干石斛多糖,除对O₂⁻·清除能力(IC₅₀值为3.846 mg/mL)相对较好外,对其它3种自由基的IC₅₀值则处于6.246~7.294 mg/mL,这与贺文韬^[24]、欧阳伟虹等^[25]研究发现冻干石斛抗氧化能力高于烘干石斛的结果一致。此外,图1~图4及表2结果也显示,-20℃冻干石斛多糖清除DPPH自由基和ABTS⁺自由基的IC₅₀值低于-30℃冻干石斛多糖,·OH和O₂⁻·的IC₅₀值高于-30℃冻干石斛多糖。结果表明:冻干工艺石斛多糖自由基清除能力高于烘干工艺,且随着冻干温度降低对不同的自由基清除能力具有增加或降低的作用,但与表1中多糖含量呈现出升高的趋势有一定偏差。

2.3 性能分析

结合石斛多糖含量及其抗氧化活性的分析,选择以-20℃升华干燥12h获得冻干石斛进行后续石斛粉品质考察。冻干、烘干石斛低温粉碎后分别过60、80、100目筛,3种石斛粉加入85℃以上热水[料液比1:50(g/mL)]冲泡时,基本在3s内可完全分散开,且水溶液呈现一定黏度;继续增大冲泡量[料液比2:50(g/mL)],研究石斛冻干、烘干细粉的冲泡结块情况。冻干、烘干石斛粉性能对比结果如表3所示。

表3 冻干、烘干石斛粉性能对比

Table 3 Property comparison of powder between freeze-dried and hot air-dried *D. officinale*

干燥方式	过筛目数	出粉率/%	结块率/%	L*值	a*值	b*值	黏度/(mm ² /s)
冻干	60	73.54	9.5	-	-	-	-
	80	55.46	5.0	68.68	0.76	12.29	17.14
	100	43.24	24.5	-	-	-	-
烘干	60	72.87	9.5	-	-	-	-
	80	55.84	5.0	59.72	2.31	16.76	3.54
	100	44.98	29.5	-	-	-	-

注:-表示未在其条件下进行试验。

由表3可知,80目冻干品、烘干品出粉率较100目明显提高,其出粉率分别为55.46%和55.84%,80目粉质较优无纤维杂质。增大冲泡量后,发现80目筛粉冲泡时有轻微结团现象,而60、100目粉冲泡时的结团现象更为普遍,其结块率达到9.5%~

29.5%,尤以100目烘干粉结块最严重,因此在实际应用中受到限制。为此,后续仅选择80目石斛粉进行色泽、冲泡黏度的测定。

由表3可知,冻干石斛粉L*值(亮度)为68.68,较烘干石斛粉更鲜亮;在颜色上,冻干石斛粉偏向蓝绿色,烘干石斛偏向黄红色,这与张悦等^[26]研究得到冻干石斛极大地保留石斛鲜药材外观的论点一致;此外,80目冻干石斛粉冲泡后黏度是同一条件下烘干石斛粉黏度的4.8倍,其黏度达到17.14 mm²/s,该冻干粉冲泡后黏度和色泽等外观状态与鲜榨石斛汁近似,比鲜汁更方便食用。

2.4 石斛粉冲泡多糖溶出量分析

考虑到冻干粉食用可发挥降血糖、抗氧化等功效,王小军^[27]在对牛初乳冻干粉和常乳冻干粉研究表明,冻干粉对糖尿病小鼠有降血糖及抗氧化作用。本试验使用75、85、95℃热水冲泡冻干粉后,对冲泡后的溶液进行多糖溶出量检测,结果如表4所示。

表4 石斛粉冲泡多糖溶出量对比

Table 4 Comparison of dissolved amount of polysaccharides from brewed *D. officinale* powder

干燥方式	多糖溶出量/%		
	75℃	85℃	95℃
冻干	44.82	37.01	35.84
烘干	35.34	26.19	19.37

由表4可知,冻干、烘干石斛粉在75、85、95℃热水冲泡10min左右时,随着冲泡温度的升高水溶液中多糖的含量变低,同冲泡温度条件下冻干石斛粉水溶液中的多糖含量高于烘干石斛粉水溶液的多糖含量。冻干石斛粉多糖溶出量普遍高于烘干石斛粉,说明干燥温度越低,多糖的溶出量就越大,这与马厚雨等^[28]研究发现干燥温度对铁皮石斛颗粒中多糖溶出特性影响的试验结果是一致的,这也说明冻干石斛粉质疏松,冲泡时活性多糖较易溶出。

3 结论

基于石斛多糖含量及其抗氧化活性评价,优化获得鲜铁皮石斛冻干工艺为鲜石斛切段于-30℃预冻2h,-30℃升华干燥12h,此条件下石斛多糖含量为4.78%(以鲜重计),同时对DPPH·、ABTS⁺·、O₂⁻·、·OH 4种自由基呈现较优的清除能力,普遍高于烘干石斛多糖41.1%~104.6%;上述石斛冻干品粉碎过80目筛石斛细粉出粉率为55.46%,石斛冻干粉色泽鲜亮、偏蓝绿色,在75℃以上热水中分散性好,结块率低,水溶液多糖溶出率达44.82%。综上所述,石斛冻干粉较烘干粉具有较好的抗氧化活性,冲泡性能好且多糖溶出效果好,具有较大的应用价值和开发潜力。

参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典—部: 2020年版[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 295-296.
National Pharmacopoeia Committee. People's Republic of China pharmacopoeia-part I: 2020 edition[M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2020: 295-296.
- [2] HUANG K W, LI Y R, TAO S C, et al. Purification, characterization and biological activity of polysaccharides from *Dendrobium officinale*[J]. *Molecules*, 2016, 21(6): 701.
- [3] WANG Q, GONG Q, WU Q, et al. Neuroprotective effects of *Dendrobium alkaloids* on rat cortical neurons injured by oxygen-glucose deprivation and reperfusion[J]. *Phytomedicine*, 2010, 17(2): 108-115.
- [4] 肖开心, 朱滢嘉, 陈瑞, 等. 铁皮石斛药理作用研究进展[J]. 河南中医, 2020, 40(5): 788-792.
XIAO Kaixin, ZHU Yingjia, CHEN Rui, et al. Research progress in pharmacological action of tiepi Shihu[J]. *Journal of Hunan University of Chinese Medicine*, 2020, 40(5): 788-792.
- [5] HE T B, HUANG Y P, YANG L, et al. Structural characterization and immunomodulating activity of polysaccharide from *Dendrobium officinale*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 83: 34-41.
- [6] ZHAO Y, LIU Y, LAN X M, et al. Effect of *Dendrobium officinale* extraction on gastric carcinogenesis in rats[J]. *Evidence - Based Complementary and Alternative Medicine: ECAM*, 2016, 2016: 1213090.
- [7] LUO Q L, TANG Z H, ZHANG X F, et al. Chemical properties and antioxidant activity of a water-soluble polysaccharide from *Dendrobium officinale*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 89: 219-227.
- [8] PAN L H, WANG J, YE X Q, et al. Enzyme-assisted extraction of polysaccharides from *Dendrobium chrysotoxum* and its functional properties and immunomodulatory activity[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2015, 60(2): 1149-1154.
- [9] ZHANG W, LIU X J, SUN X, et al. Comparison of the antioxidant activities and polysaccharide characterization of fresh and dry *Dendrobium officinale* kimura et migo[J]. *Molecules*, 2022, 27(19): 6654.
- [10] 徐伟琴, 莫立丹, 刘生, 等. 鲜石斛果胶提取、结构改造及其物理特性研究[J]. 食品科技, 2020, 45(5): 261-268.
XU Weiqin, MO Lidan, LIU Sheng, et al. Extraction, structural modification and physical properties of fresh *Dendrobium pectin*[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(5): 261-268.
- [11] 徐兰芳, 鲁芹飞, 张扬, 等. 干燥方法对铁皮石斛质量的影响研究[J]. 中国药房, 2015, 1(13): 1808-1811.
XU Lanfang, LU Qinfei, ZHANG Yang, et al. Study on the effects of drying methods on the quality of *Dendrobium officinale*[J]. *China Pharmacy*, 2015, 1(13): 1808-1811.
- [12] 张雨婷, 郭赛, 张莉, 等. 不同干燥方法对铁皮石斛多糖和甘露糖含量的影响[J]. 安徽中医药大学学报, 2017, 36(2): 68-71.
ZHANG Yuting, GUO Sai, ZHANG Li, et al. Influence of different drying methods on the content of polysaccharides and mannose in *Dendrobium officinale*[J]. *Journal of Anhui University of Chinese Medicine*, 2017, 36(2): 68-71.
- [13] 韩姝葶, 王婉馨, 袁国强, 等. 干燥方式对铁皮石斛品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(3): 142-148.
HAN Shuting, WANG Wanxin, YUAN Guoqiang, et al. Effect of different drying methods on quality of *Dendrobium officinale* stems [J]. *Food Science*, 2019, 40(3): 142-148.
- [14] 周思静, 乔宇琛, 刘桂君, 等. 不同干燥方式对铁皮石斛粉品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(16): 11-16.
ZHOU Sijing, QIAO Yuchen, LIU Guijun, et al. Effects of different drying methods on the quality of *Dendrobium officinale* kimura et migo powder[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(16): 11-16.
- [15] 臧琛, 聂其霞, 王国华, 等. Box-Behnken 响应面法优化铁皮石斛的真空冷冻干燥工艺[J]. 中国实验方剂学杂志, 2018, 24(10): 15-20.
ZHANG Chen, NIE Qixia, WANG Guohua, et al. Optimization of vacuum freeze-drying technology for *dendrobium officinale* caulis by box-behnken response surface methodology[J]. *China Industrial Economics*, 2018, 24(10): 15-20.
- [16] 赵美芳, 陈永, 陈灿灵, 等. 正交实验优化铁皮石斛冷冻干燥工艺研究[J]. 中国新药杂志, 2022, 31(9): 901-908.
ZHAO Meifang, CHEN Yong, CHEN Canling, et al. Optimization of freeze-drying process of *Dendrobium officinale* by orthogonal test [J]. *Chinese Journal of New Drugs*, 2022, 31(9): 901-908.
- [17] 方良材, 刘梦姣, 黄卫萍. 铁皮石斛热风干燥工艺优化研究[J]. 现代食品, 2021(16): 139-142.
FANG Liangcai, LIU Mengjiao, HUANG Weiping. Study on optimization of hot-air drying process for *Dendrobium officinale*[J]. *Modern Food*, 2021(16): 139-142.
- [18] HUI A L, XU W Q, WANG J H, et al. A comparative study of pectic polysaccharides from fresh and dried *Dendrobium officinale* based on their structural properties and hepatoprotection in alcoholic liver damaged mice[J]. *Food & Function*, 2023, 14(9): 4267-4279.
- [19] 万代林, 李秀芳, 李强明, 等. 流苏石斛多糖抗氧化活性研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(12): 1694-1698.
WAN Dailin, LI Xiufang, LI Qiangming, et al. Research on antioxidative activities of polysaccharides from *Dendrobium fimbriatum* Hook[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2020, 43(12): 1694-1698.
- [20] 刘晓明, 刘盛, 姜贵全, 等. 蓝靛果果粉喷雾干燥工艺优化及其品质[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(14): 140-146.
LIU Xiaoming, LIU Sheng, JIANG Guiquan, et al. Optimization of spray drying technology of *Lonicera caerulea* fruit powder and its quality characteristics[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(14): 140-146.
- [21] 邵子哈, 洪莹, 曹磊, 等. 预糊化时间对即食冲调米粉品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 53-59.
SHAO Zihan, HONG Ying, CAO Lei, et al. Effect of pregelatinization time on the quality of instant rice powder[J]. *Food Science*, 2022, 43(4): 53-59.
- [22] 刘恋, 杨小明, 马海乐. 冲泡过程对条斑紫菜多糖溶出的影响及其动力学研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(16): 14-18, 23.
LIU Lian, YANG Xiaoming, MA Haile. The influence of immersing process on the dissolution of polysaccharides from *Porphyra yezoensis* and its kinetics research[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(16): 14-18, 23.
- [23] 缪晓丹, 徐丽红, 宋仙水, 等. 不同加工方式对铁皮石斛品质的影响[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(4): 704-707, 734.
MIAO Xiaodan, XU Lihong, SONG Xianshui, et al. Effects of different processing methods on quality of *Dendrobium officinale*[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020, 61(4): 704-707, 734.
- [24] 贺文韬. 不同干燥模式下对浙产铁皮石斛品质影响及生物活性研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2021.

- troscopy[J]. Poultry Science, 2007, 86(4): 752-759.
- [16] OMANA D A, LIANG Y, KAV N N V, et al. Proteomic analysis of egg white proteins during storage[J]. Proteomics, 2011, 11(1): 144-153.
- [17] WARDY W, TORRICO D D, HERRERA CORREDOR J A, et al. Soybean oil-chitosan emulsion affects internal quality and shelf-life of eggs stored at 25 and 4 °C[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2013, 48(6): 1148-1156.
- [18] 马逸霄. 贮藏方法对鸡蛋呼吸&品质的影响规律及气调控制系统开发[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- MA Yixiao. Effect of storage conditions on the respiration&quality of eggs and development of atmosphere control system[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
- [19] 陈曦. 脂肪氧合酶诱导氧化对大豆分离蛋白结构和消化性的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- CHEN Xi. Study of the effects of lipoygenase-induced oxidation on the structure and digestibility of soybean protein isolate[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [20] WANG J Y, YANG Y L, TANG X Z, et al. Effects of pulsed ultrasound on rheological and structural properties of chicken myofibrillar protein[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 38: 225-233.
- [21] ZHANG Q T, TU Z C, XIAO H, et al. Influence of ultrasonic treatment on the structure and emulsifying properties of peanut protein isolate[J]. Food and Bioprocesses Processing, 2014, 92(1): 30-37.
- [22] 马婕, 杨晓雪, 迟玉杰, 等. 超声协同壳聚糖处理对蛋黄液乳化性质及蛋黄蛋白质结构的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(21): 81-89.
- MA Jie, YANG Xiaoxue, CHI Yujie, et al. Effect of ultrasound-assisted chitosan treatment on emulsification properties of liquid egg yolk and structure of egg yolk proteins[J]. Food Science, 2023, 44(21): 81-89.

加工编辑:张昱

收稿日期:2023-12-11

(上接第 60 页)

- HE Wentao. Effects of different drying modes on the quality and biological activity of *Dendrobium candidum* produced in Zhejiang Province[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2021.
- [25] 欧阳伟虹, 肖艺, 卢秋静, 等. 不同干燥工艺对铁皮石斛有效成分及抗氧化活性影响[J]. 药物生物技术, 2017, 24(2): 133-136.
- OUYANG Weihong, XIAO Yi, LU Qiuqing, et al. Effects of different drying processes on effective components and antioxidant activity of *Dendrobium officinale* kimura et migo[J]. China Industrial Economics, 2017, 24(2): 133-136.
- [26] 张悦, 孔菲菲, 张周菊, 等. 铁皮石斛不同干燥方法的质量对比研究[J]. 湖北中医杂志, 2022, 8(9): 54-58.
- ZHANG Yue, KONG Feifei, ZHANG Zhouju, et al. Comparative quality of different drying methods of *Dendrobium officinale*[J]. Hubei Journal of Traditional Chinese Medicine, 2022, 8(9): 54-58.
- [27] 王小军, 高睿嘉, 郁桦, 等. 牛初乳冻干粉和常乳冻干粉的降血糖及抗氧化作用[J]. 食品工业科技, 2017, 38(23): 262-267, 274.
- WANG Xiaojun, GAO Ruijia, YU Hua, et al. Hypoglycemic and antioxidant effect of lyophilized bovine colostrums and lyophilized milk[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(23): 262-267, 274.
- [28] 马厚雨, 邢丽, 缪冶炼. 干燥温度对铁皮石斛颗粒中多糖溶出特性的影响[J]. 现代食品科技, 2019, 35(4): 109-115.
- MA Houyu, XING Li, MIAO Yelian. Effects of drying temperature on the dissolving-out properties of polysaccharides in *Dendrobium officinale* particles[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(4): 109-115.

加工编辑:张岩蔚

收稿日期:2024-03-07