

干燥温度对铁皮石斛颗粒中多糖溶出特性的影响

马厚雨, 邢丽, 缪冶炼

(南京工业大学食品与轻工学院, 江苏南京 211800)

摘要: 本研究旨在探究干燥温度对铁皮石斛颗粒多糖溶出率和溶出速度的影响及其机理。以新鲜铁皮石斛颗粒(直径5 mm×长5 mm)为原料,通过60~140 °C热风干燥制备干燥铁皮石斛颗粒,于60 °C水浴锅上进行铁皮石斛颗粒的多糖浸提,同时比较新鲜和干燥铁皮石斛颗粒的组织结构。新鲜铁皮石斛颗粒的多糖溶出率和多糖扩散系数分别为(46.65±0.86)%、 1.02×10^{-2} mm²/h。在60~100 °C的干燥温度范围内,干燥促进了铁皮石斛颗粒中多糖的溶出,干燥温度越低,对多糖溶出的促进作用越大。60 °C干燥铁皮石斛颗粒的多糖溶出率和多糖扩散系数分别高达(64.54±1.27)%和 1.94×10^{-2} mm²/h。较低的干燥温度有利于铁皮石斛颗粒保持组织结构,减少材料收缩,减轻美拉德反应和焦糖化反应,同时产生一定的内部空隙,从而促进其多糖的溶出。本研究为铁皮石斛的干燥加工和利用提供了技术数据和理论依据。

关键词: 铁皮石斛; 多糖; 干燥; 溶出; 组织结构

文章编号: 1673-9078(2019)04-109-115

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.4.016

Effects of Drying Temperature on the Dissolving-out Properties of Polysaccharides in *Dendrobium officinale* Particles

MA Hou-yu, XING Li, MIAO Ye-lian

(College of Food Science and Light Industry, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China)

Abstract: The objective of this work was to evaluate the effect of drying temperature on the dissolving-out ratio and the dissolving-out velocity of polysaccharides in *D. officinale* particles. The fresh *D. officinale* particles (5 mm in diameter×5 mm in length) as the raw material was used to prepare the dried *D. officinale* particles by hot-air-drying at different temperatures with the range of 60 to 140 °C. Polysaccharides in the dried *D. officinale* particles were extracted by hot-water soaking at 60 °C. The tissue structures of fresh and dried *D. officinale* particles were compared. The polysaccharide dissolving-out ratio and diffusion coefficient of fresh *D. officinale* particles were (46.65±0.86)% and 1.02×10^{-2} mm²/h, respectively. In the drying temperature range of 60 to 100 °C, the dissolving-out of polysaccharides in dried *D. officinale* particles was promoted by drying. Low temperature is beneficial to the dissolving-out of polysaccharides. The polysaccharide dissolving-out ratio and diffusion coefficient of dried *D. officinale* particles prepared at 60 °C reached (64.54±1.27)% and 1.94×10^{-2} mm²/h, respectively. The low drying temperature was beneficial for *D. officinale* particles to maintaining the tissue structure, reducing shrinkage, mitigating Maillard reaction and caramelizing reaction, and producing certain internal voids, which promoted the dissolving-out of polysaccharides. This work provided technical data and theoretical basis for the drying and utilization of *D. officinale*.

Key words: *Dendrobium officinale*; polysaccharide; drying; dissolving-out; tissue structure

铁皮石斛(*Dendrobium officinale*)被认为是一种传统的药食两用植物材料,含有多糖、石斛碱、氨基酸、芪类及其衍生物等功能性成分。铁皮石斛的多糖含量远高于其他功能性成分^[1]。铁皮石斛多糖具有显著的增强免疫力、抗氧化、降血糖和抗肿瘤作用^[2-4]。

收稿日期: 2018-12-13

基金项目: 江苏省重点研发计划社会发展项目(BE2016765); 国家重点研发计划(2017YFC1600404)

作者简介: 马厚雨(1993-),男,硕士研究生,研究方向: 功能性食品

通讯作者: 缪冶炼(1958-),男,博士,教授,研究方向: 生物活性成分及功能性食品

老鼠体内免疫试验结果表明,铁皮石斛多糖能够促进免疫缺陷老鼠脾淋巴细胞的增殖,增强腹膜巨噬细胞的吞噬能力^[5]。

通过干燥加工去除新鲜铁皮石斛中的水分,可避免微生物造成的腐败,减缓化学变质,延长保质期,还能减轻重量,减小体积,便于其作为食品加工原料的使用。然而,干燥加工或多或少改变铁皮石斛的物理、化学和感官特性,特别是高温会导致热敏感性成分的减少,降低干制品的品质^[6]。目前,比较常见的干燥方式有自然晾干,热风干燥、真空干燥、红外干燥和微波干燥等。其中,热风干燥不仅速度较快,干

制品的多糖含量较高,而且设备的操作简单、价格和维修成本较低,更适用于铁皮石斛的加工^[6-8]。Meng等^[6]分别采用自然晾干、热风干燥(60℃)、真空干燥(60℃,100 Pa)、红外干燥(60℃)和真空冷冻干燥(-60℃,30 Pa)方式对新鲜铁皮石斛小段(长1 cm)进行干燥,制备含水率约为8%的干燥铁皮石斛。热风和红外干燥所需时间仅为16 h和14 h,而真空冷冻干燥、真空干燥和自然晾干所需时间均大于30 h。热风干燥铁皮石斛的多糖含量为29.36%,高于其他干燥铁皮石斛的18.04%~26.54%。徐兰芳等^[9]通过铁皮石斛颗粒(长0.5 cm)的热风干燥实验发现,当干燥温度由90℃升高至210℃时,铁皮石斛的多糖保留率由91.5%下降至3.7%。

一般来说,食材中功能性成分的溶出率和溶出速度受到材料性状、加工条件和浸提条件等的影响^[10-12]。干燥铁皮石斛食用时需要通过热水浸泡、熬煮等方式使其功能成分溶出,以便被人体吸收。因此,有必要把握干燥铁皮石斛功能性成分在水中的溶出特性。目前关于石斛干燥的文献报道大多集中在干燥(方式、温度)对多糖含量、多糖结构及生物活性的影响^[6,8,9]。本研究旨在探究干燥温度对铁皮石斛颗粒多糖溶出率和溶出速度的影响及其机理。通过60~140℃热风干燥制备干燥铁皮石斛颗粒,于60℃水浴锅上进行铁皮石斛颗粒的多糖浸提,采用基于Fick扩散第二定律的数学模型对多糖溶出速度进行解析,并着重从铁皮石斛颗粒组织结构的角度对影响机理进行了分析。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

以南京某公司大棚种植的3年生、直径为4~6 mm的新鲜铁皮石斛茎为实验材料。新鲜铁皮石斛茎采摘后保存于5℃低温库中,使用前用剪刀剪成长度约为5 mm的颗粒。

葡萄糖、苯酚和浓硫酸均为国产分析纯试剂。

表1 新鲜和干燥铁皮石斛颗粒的湿基含水率和多糖含量(平均值±标准偏差)

Table 1 Moisture and polysaccharide content of fresh and dried *D. officinalis* particles on wet basis (Mean±SD)

| 项目 | 新鲜铁皮石斛颗粒 | 干燥铁皮石斛颗粒(干燥温度/℃) | | | | |
|--------|------------|------------------|------------|------------|------------|------------|
| | | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 |
| 含水率/% | 66.92±2.63 | 12.01±0.63 | 12.13±0.58 | 12.05±0.49 | 11.96±0.67 | 9.80±0.43 |
| 多糖含量/% | 11.66±0.48 | 26.94±1.63 | 27.30±0.97 | 27.85±1.48 | 27.26±1.56 | 28.59±1.72 |

新鲜和干燥铁皮石斛颗粒的湿基含水率和多糖含量如表1所示。新鲜铁皮石斛颗粒的湿基含水率为(66.92±2.63)%。60、80、100、120℃干燥铁皮石

1.2 仪器与设备

GXZ-9140 电热恒温鼓风干燥箱,上海博迅实业有限公司医疗设备厂;FZ102 微型植物粉碎机,天津市泰斯特仪器有限公司;UV-1900PC 紫外分光光度计,翱艺仪器(上海)有限公司;JSZ6S 体视显微镜,南京江南永新光学有限公司。

1.3 方法

1.3.1 铁皮石斛颗粒的干燥

取适量的新鲜铁皮石斛颗粒平铺于直径15 cm的培养皿中,分别在60、80、100、120和140℃的恒温鼓风干燥箱中干燥28.5、6.5、3.0、1.5、1.0 h,获得含水率约为12%的干燥铁皮石斛颗粒。

1.3.2 铁皮石斛颗粒的含水率和多糖含量测定

新鲜和干燥铁皮石斛颗粒的含水率按照国家标准方法^[13]进行测定。铁皮石斛颗粒的含水率以试样湿基百分比表示。

新鲜和干燥铁皮石斛颗粒的多糖含量按照李满飞等^[14]的方法进行测定。干燥铁皮石斛颗粒用微型植物粉碎机粉碎并过60目筛网后,称取0.25 g粉末作为试样;新鲜铁皮石斛颗粒取1.0 g,用研钵捣碎,作为试样。将铁皮石斛试样放入圆底烧瓶中,加入100 mL 80%乙醇,在90℃水浴锅上回流1 h。待铁皮石斛试样冷却至室温后,在5000 r/min条件下离心10 min,收集铁皮石斛渣。将铁皮石斛渣置于500 mL锥形瓶中,加入300 mL去离子水,沸水浸提4 h。预实验结果表明,新鲜和干燥铁皮石斛试样的浸提液多糖浓度在浸提4 h后均保持恒定,表明浸提时间充分。浸提液的多糖浓度采用苯酚-硫酸比色法^[14,15]进行测定(见1.3.4节),铁皮石斛颗粒的湿基多糖含量(W_s ,%)按下式计算:

$$W_s = \frac{C_s \times V}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_s 为浸提液的多糖浓度,g/L; V 为浸提液的体积,L; M 为铁皮石斛试样质量,g。

斛颗粒的湿基含水率均达到了目标值12%左右,140℃干燥铁皮石斛颗粒的湿基含水率略低($p<0.05$)。此外,将湿基多糖含量转换为干基多糖含

量则可以看出,所有干燥铁皮石斛颗粒的干基多糖含量在(30.62±1.85)%~(31.70±1.91)%范围内基本不变($p>0.05$),且略低于新鲜铁皮石斛颗粒的(35.25±1.45)%($p<0.05$)。

1.3.3 铁皮石斛颗粒的多糖浸提

为了测定铁皮石斛颗粒中多糖的溶出率和溶出速度,进行铁皮石斛颗粒的多糖浸提实验。分别称取新鲜和干燥铁皮石斛颗粒3g于500mL锥形瓶中,加入0.2L80%(V/V)乙醇,加盖瓶塞,于60℃水浴锅上保温1h。过滤,收集铁皮石斛颗粒。将铁皮石斛颗粒置于锥形瓶中,加入0.4L去离子水,于60℃水浴锅上浸提至浸提液的多糖浓度达到恒定。

浸提过程中,适当搅拌,并定时取出2mL的浸提液,采用苯酚-硫酸比色法^[14,15]测定浸提液的多糖浓度(见1.3.4节),并按照公式(2)计算铁皮石斛颗粒的多糖溶出率($\eta_s, \%$):

$$\eta_s = \frac{C_s \times V}{\frac{W_s}{100} \times M} \times 100\% \quad (2)$$

式中: C_s 为浸提液的多糖浓度,g/L; V 为浸提液体积, $V=0.4$ L; W_s 为铁皮石斛颗粒试样的湿基多糖含量, $\%$; M 为铁皮石斛颗粒试样的质量,g。

每个铁皮石斛颗粒试样的浸提实验重复3次。

1.3.4 浸提液的多糖浓度测定

浸提液的多糖浓度采用苯酚-硫酸比色法^[14,15]测定。将浸提液在5000r/min条件下离心10min,取2mL上清液于试管中,加入50g/L的苯酚溶液1.0mL,再加入浓硫酸5.0mL,摇匀,静置5min。将试管置于沸水浴中15min,取出并冷却至室温,作为测试液。以去离子水为空白,在490nm处测定测试液的吸光值,根据标准曲线方程计算标准葡萄糖溶液浓度,并按照公式(3)计算浸提液的多糖浓度($C_s, \text{g/L}$):

$$C_s = \frac{C_g \times F}{1000} \quad (3)$$

式中: C_g 为标准葡萄糖溶液的浓度, $\mu\text{g/mL}$; F 为多糖浓度换算系数, $F=1.46$ (本研究的实测值)。

葡萄糖含量测定的标准曲线采用质量浓度分别为10、20、30、40、50、60 $\mu\text{g/mL}$ 的标准葡萄糖溶液制作,标准曲线方程为:

$$A_g = 0.0137C_g \quad (r^2 = 0.99) \quad (4)$$

式中: A_g 为测试液在490nm处的吸光值; C_g 为标准葡萄糖溶液的浓度, $\mu\text{g/mL}$ 。

1.3.5 铁皮石斛颗粒的收缩率测定和组织结构观察

随机取新鲜和干燥铁皮石斛颗粒各50个,并将干

燥铁皮石斛颗粒分为3组,采用游标卡尺测定各试样的最小直径。按下式计算每组干燥铁皮石斛颗粒的收缩率($\eta_c, \%$)^[8]:

$$\eta_c = \frac{\bar{d}_f^2 - \bar{d}_d^2}{\bar{d}_f^2} \times 100\% \quad (5)$$

式中: \bar{d}_f 表示50个新鲜铁皮石斛颗粒最小直径的平均值, \bar{d}_d 表示每组干燥铁皮石斛颗粒最小直径的平均值,mm。

新鲜和干燥铁皮石斛颗粒横断面的组织结构采用体视显微镜观察。

1.3.6 数据统计分析

铁皮石斛颗粒的含水率、多糖含量、浸提液多糖浓度和收缩率等测定重复3次,采用软件Excel 2016计算测定值的平均值和标准偏差,并进行单因素方差分析, $p<0.05$ 为样本平均值之间存在显著性差异。表观多糖扩散速率常数和多糖扩散系数采用浸提液多糖浓度的平均值进行计算。

2 结果与讨论

2.1 铁皮石斛颗粒的多糖溶出率

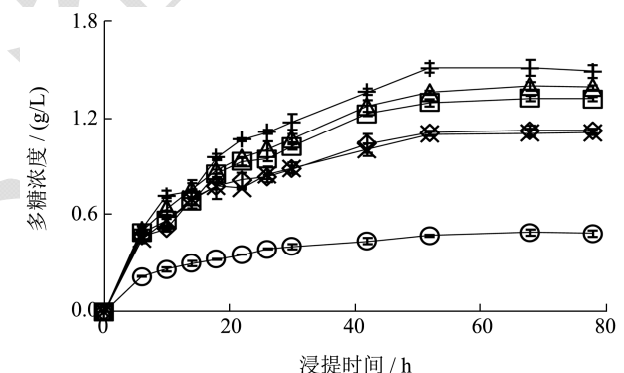


图1 铁皮石斛颗粒浸提液多糖浓度随浸提时间的变化(平均值±标准偏差)

Fig.1 Change of polysaccharide concentrations in the soaking solutions of *D. officinal* particles with soaking time (Mean±SD)

注:浸提温度:60℃;○新鲜;△60℃干燥;□80℃干燥;◇100℃干燥;◇120℃干燥;×140℃干燥。

图1表示新鲜和干燥铁皮石斛颗粒浸提液多糖浓度随浸提时间的变化。在0~52h的浸提时间范围内,浸提液多糖浓度随浸提时间的增加而上升,但其上升速度在不同铁皮石斛颗粒之间有差异。当浸提时间为52h时,新鲜铁皮石斛颗粒浸提液多糖浓度为0.47±0.01g/L,60~140℃干燥铁皮石斛颗粒浸提液多糖浓度为1.10±0.01~1.51±0.03g/L。当浸提时间大于52h时,浸提液多糖浓度基本不变($p>0.05$)。

以52h时浸提液的多糖浓度计算铁皮石斛颗粒的

多糖溶出率。新鲜铁皮石斛颗粒的多糖溶出率为(46.65±0.86)%。干燥铁皮石斛颗粒多糖溶出率随干燥温度的变化如图2所示。干燥温度为60℃时,多糖溶出率为(64.54±1.27)%。多糖溶出率随干燥温度的上升而减小,干燥温度为100℃时下降至(53.79±0.90)%,干燥温度为140℃时下降至(44.27±1.27)%。由此可见,在60~100℃的干燥温度范围内,干燥提高了铁皮石斛颗粒中多糖的溶出率,且干燥温度越低,多糖溶出率越大。

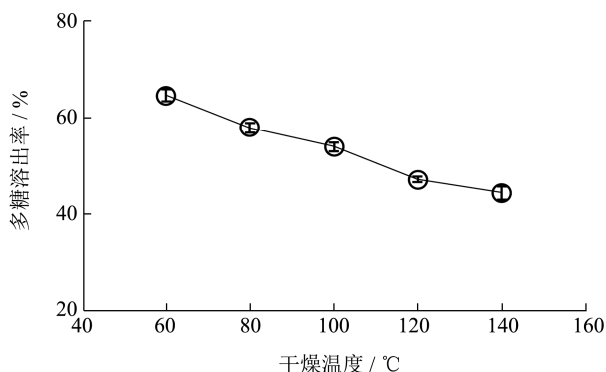


图2 干燥铁皮石斛颗粒多糖溶出率随干燥温度的变化(平均值±标准偏差)

Fig.2 Change of dissolving-out ratio of polysaccharides in dried *D. officinalis* particles with drying temperature (Mean±SD)

注:浸提温度:60℃;浸提时间:52h。

2.2 铁皮石斛颗粒的多糖溶出速度

浸提过程中铁皮石斛颗粒的多糖溶出在本质上是多糖由颗粒内部向外部浸提液的非稳态扩散。多糖在颗粒内部的扩散较慢,是多糖溶出速度的控制步骤。对于铁皮石斛颗粒内部的多糖扩散,可以假设:①颗粒是均质、多孔的球形;②多糖的扩散方向为颗粒的径向;③在任意一个取样时间间隔内,多糖在颗粒内部的浓度分布恒定不变;④颗粒表面的传质阻力忽略不计;⑤颗粒和浸提液的温度相同并恒定不变;⑥同一浸提温度条件下,颗粒中多糖的扩散系数恒定不变。在此假设条件下,铁皮石斛颗粒中多糖的非稳态扩散过程服从Fick扩散第二定律,可用下式表示^[12,16,17]:

$$\ln \frac{C_{\infty}}{C_{\infty}-C} = \frac{\pi^2 D_S}{R^2} t + \ln \left(\frac{\pi^2 C_{\infty}}{6C_{\infty}-6C_0} \right) \quad (6)$$

式中: C 为某一时刻浸提液的多糖浓度, g/L; C_0 为浸提开始时浸提液的多糖浓度, g/L; C_{∞} 为在浸提时间趋于无穷时浸提液的多糖浓度, 即铁皮石斛颗粒中多糖的质量和浸提液体积的比值, g/L; R 为铁皮石斛颗粒的等体积球半径, 本研究中 $R=2.9$ mm; D_S 为多糖扩散系数, mm^2/h ; t 为浸提时间, h。多糖扩散系数 D_S 代表铁皮石斛颗粒中多糖的扩散能力, D_S 越大, 多糖的扩散能力越强。

令:

$$k = \frac{\pi^2 D_S}{R^2}$$

$$b = \ln \left(\frac{\pi^2 C_{\infty}}{6C_{\infty}-6C_0} \right)$$

则公式(6)可简化为:

$$\ln \frac{C_{\infty}}{C_{\infty}-C} = kt + b \quad (7)$$

式中: k 为表观多糖扩散速率常数, h^{-1} ; b 为常数项, -。表观多糖扩散速率常数 k 代表铁皮石斛颗粒中多糖的扩散速度, 其大小不仅受多糖物性、浸提条件和铁皮石斛材料性质的影响, 还受到颗粒大小的影响。

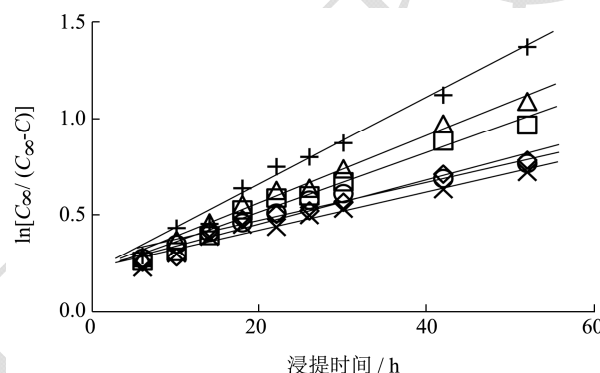


图3 $\ln(C_{\infty}/(C_{\infty}-C))$ 随浸提时间的变化

Fig.3 Change of $\ln(C_{\infty}/(C_{\infty}-C))$ with soaking time

注:浸提温度:60℃;○新鲜;+60℃干燥;△80℃干燥;□100℃干燥;◇120℃干燥;×140℃干燥。

图3表示新鲜和干燥铁皮石斛颗粒浸提液 $\ln(C_{\infty}/(C_{\infty}-C))$ 随浸提时间 t 的变化。 $\ln(C_{\infty}/(C_{\infty}-C))$ 随 t 的增加呈线性上升趋势, 表示式(7)成立。对 $\ln(C_{\infty}/(C_{\infty}-C))$ 随 t 变化的实验数据进行线性回归, 可以得到各铁皮石斛颗粒中多糖的扩散方程。表2表示铁皮石斛颗粒多糖扩散方程的参数和相关系数(r^2)。各多糖扩散方程的 r^2 均大于0.9, 说明 $\ln(C_{\infty}/(C_{\infty}-C))$ 与 t 具有较好的线性关系。表观多糖扩散速率常数 k 在新鲜铁皮石斛颗粒中为 $1.19 \times 10^2/\text{h}$, 在60~140℃干燥铁皮石斛颗粒中为 $(0.99 \sim 2.28) \times 10^2/\text{h}$ 。干燥温度越高, k 越小。铁皮石斛颗粒的多糖扩散系数 D_S 可由 k 求得。新鲜铁皮石斛颗粒的 D_S 为 $1.02 \times 10^2 \text{ mm}^2/\text{h}$ 。干燥铁皮石斛颗粒的 D_S 随干燥温度的上升而减小, 干燥温度60℃时为 $1.94 \times 10^2 \text{ mm}^2/\text{h}$, 干燥温度100℃时下降至 $1.34 \times 10^2 \text{ mm}^2/\text{h}$, 干燥温度140℃时下降至 $0.85 \times 10^2 \text{ mm}^2/\text{h}$ 。由此可见, 在60~100℃的干燥温度范围内, 干燥提高了铁皮石斛颗粒中多糖的扩散速度, 干燥温度越低, 多糖的扩散速度越快。

本研究在一定条件下对铁皮石斛颗粒中的多糖进行浸提, 对多糖溶出速度进行了解析。若在浸提中采

用酶解、超声波和微波等辅助方法,则多糖的溶出率和溶出速度将有所提高^[18,19]。此外,浸提温度也是影响多糖溶出速度的主要因素之一。关于石斛多糖溶出的动力学研究目前鲜有文献报道。在桑黄多糖^[20]、红

枣多糖^[21]、紫菜多糖^[12]浸提中,表现多糖扩散速率常数随浸提温度的升高而增大,两者之间的关系符合 Arrhenius 方程。

表2 铁皮石斛颗粒多糖扩散方程的参数和相关系数 (r^2) (浸提温度: 60 °C)

Table 2 Parameters and correlation coefficients (r^2) for the diffusion equations of polysaccharides in *D. officinale* particles (soaking temperature: 60 °C)

| 项目 | 新鲜铁皮石斛颗粒 | 干燥铁皮石斛颗粒 (干燥温度/°C) | | | | |
|--|----------|--------------------|------|------|------|------|
| | | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 |
| $C_{\infty}/(\text{g/L})$ | 0.87 | 2.02 | 2.05 | 2.09 | 2.04 | 2.14 |
| $k/(\times 10^{-2}/\text{h})$ | 1.19 | 2.28 | 1.76 | 1.58 | 1.13 | 0.99 |
| $D_s/(\times 10^{-2} \text{ mm}^2/\text{h})$ | 1.02 | 1.94 | 1.50 | 1.34 | 0.96 | 0.85 |
| b | 0.29 | 0.19 | 0.21 | 0.19 | 0.23 | 0.22 |
| r^2 | 0.96 | 0.98 | 0.99 | 0.97 | 0.96 | 0.96 |

2.3 干燥铁皮石斛颗粒的组织结构变化

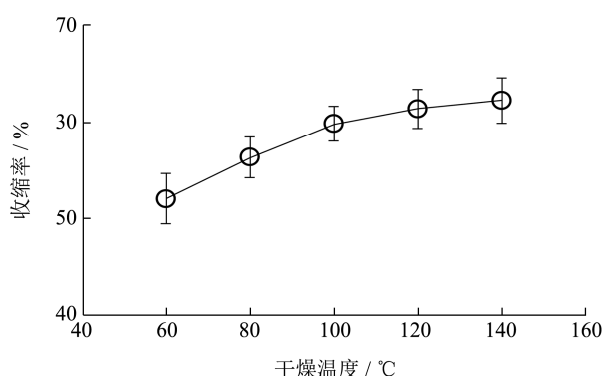


图4 干燥铁皮石斛颗粒收缩率随干燥温度的变化 (平均值±标准偏差)

Fig.4 Change of the shrinkage ratio of dried *D. officinale* particles with drying temperature (Mean±SD)

铁皮石斛茎由表皮、基本组织和维管束等三部分组成,而构成基本组织的薄壁细胞排列较为疏松,细胞之间存在一定的间隙^[22]。多糖主要分布在薄壁细胞中^[23]。在一定的浸提条件(如铁皮石斛颗粒大小、浸提液用量、浸提温度)下,铁皮石斛颗粒中多糖的溶出率、溶出速度与多糖含量及组织结构有着密切关系。干燥铁皮石斛颗粒与新鲜铁皮石斛颗粒相比,多糖含量较高(表1),有利于多糖溶出。然而另一方面,铁皮石斛颗粒在干燥过程中发生收缩,阻碍了多糖的溶出。干燥铁皮石斛颗粒收缩率随干燥温度的变化如图4所示。当干燥温度由60 °C上升至100 °C时,干燥铁皮石斛颗粒收缩率从(52.10±2.56) %增大至(59.83±1.75) %,其变化显著($p < 0.05$)。当干燥温度上升至140 °C时,干燥铁皮石斛收缩率继续增大至(62.25±2.34) %,但是100 °C和140 °C干燥铁皮石斛收缩率之间的差别不显著($p > 0.05$)。

图5为新鲜铁皮石斛、以及60 °C和140 °C干燥铁皮石斛颗粒横断面的显微镜照片。新鲜铁皮石斛(图5a)含有较高的水分,质地均匀。60 °C干燥铁皮石斛(图5b)由于失水而发生收缩,并产生大小不一的空隙,但此时的收缩率较小。然而,当干燥温度升高至140 °C时,干燥铁皮石斛(图5c)收缩严重,形成无空隙的致密结构,从而阻碍了多糖的溶出。

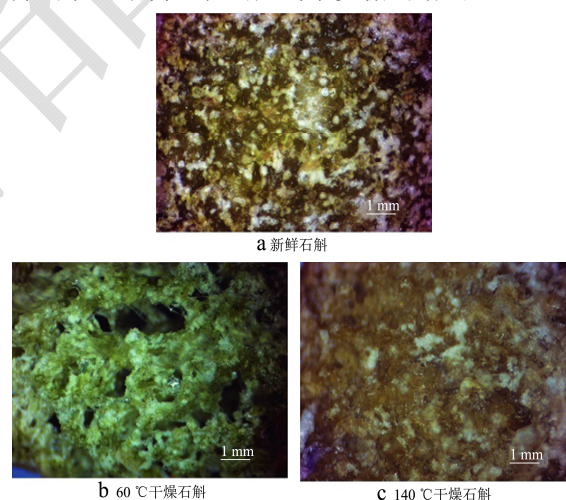


图5 新鲜和干燥铁皮石斛颗粒横断面的显微镜照片

Fig.5 Microscopic photos of the cross sections of fresh and dried *D. officinale* particles

此外,随着干燥温度的升高,干燥铁皮石斛的颜色由绿色变为褐色(图5)。由此可以推测,温度较高时发生了多糖的美拉德反应和焦化反应,由此引起的多糖聚合也会影响多糖的溶出^[24]。

组织结构变化和褐变是食材干燥过程中常见的现象。在胡萝卜丁的热风干燥中,细胞组织发生收缩。与干燥温度65~75 °C时相比,干燥温度85~95 °C时的细胞组织收缩明显增大^[25]。此外,在橘皮的热风和红外干燥中,当干燥温度由60 °C上升至90 °C时,干燥

橘皮的褐变度逐渐增大^[26]。由此可见,在 60~140 °C 的温度条件下对铁皮石斛进行热风干燥,较低的干燥温度有利于保持组织结构,减少材料收缩,减轻美拉德反应和焦糖化反应,同时产生一定的内部空隙,从而提高了多糖的溶出率和溶出速度。

3 结论

以新鲜铁皮石斛颗粒(直径 5 mm×长 5 mm)为原料,通过 60~140 °C 热风干燥制备干燥铁皮石斛颗粒,于 60 °C 水浴锅上进行铁皮石斛颗粒的多糖浸提,同时比较新鲜和干燥铁皮石斛颗粒的组织结构,得到以下结论:

3.1 干燥铁皮石斛颗粒的多糖溶出率和多糖扩散系数均随干燥温度的上升而减小,干燥温度 60 °C 时分别为(64.54±1.27)%、 $1.94 \times 10^{-2} \text{ mm}^2/\text{h}$,干燥温度 140 °C 时分别下降至(44.27±1.27)%、 $0.85 \times 10^{-2} \text{ mm}^2/\text{h}$ 。

3.2 新鲜铁皮石斛颗粒的多糖溶出率和多糖扩散系数分别为(46.65±0.86)%、 $1.02 \times 10^{-2} \text{ mm}^2/\text{h}$ 。在 60~100 °C 的干燥温度范围内,干燥促进了铁皮石斛颗粒中多糖的溶出,干燥温度越低,对多糖溶出的促进作用越大。

3.3 与新鲜铁皮石斛颗粒相比,干燥铁皮石斛颗粒的多糖含量(湿基)和材料结构都发生了变化。较低的干燥温度有利于铁皮石斛颗粒保持组织结构,减少材料收缩,减轻美拉德反应和焦糖化反应,同时产生一定的内部空隙,从而促进其多糖的溶出。

参考文献

[1] 颜美秋,陈素红,周桂芬,等.不同种植年限铁皮石斛多糖、甘露糖含量的测定及其它化学成分比较研究[J].中华中医药学刊,2015,33(4):878-881
YAN Mei-qiu, CHEN Su-hong, ZHOU Gui-fen, et al. Variation characteristics of polysaccharides and mannose content and chemical composition of n-butanol and ether portion for different cultivating years of *D. officinale* Kimura et Migo [J]. Chinese Archives of Traditional Chinese medicine, 2015, 33(4): 878-881

[2] Wang J H, Luo J P, Zha X Q, et al. Comparison of antitumor activities of different polysaccharide fractions from the stems of *Dendrobium nobile* Lindl [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 79(1): 114-118

[3] Pan L H, Li X F, Wang M N, et al. Comparison of hypoglycemic and antioxidative effects of polysaccharides from four different *Dendrobium* species [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 64: 420-427

[4] 江贤敏,王正明,潘利华,等.提取温度对霍山石斛多糖理化性质及肠道黏膜免疫活性的影响[J].食品科学,2017,38(7): 176-181
JIANG Xian-min, WANG Zheng-ming, PAN Li-hua, et al. Effects of extraction temperatures on physicochemical properties and intestinal mucosal immunomodulating activities of polysaccharides from *Dendrobium huoshanense* [J]. Food Science, 2017, 38(7): 176-181

[5] Wang C X, Xu L, Guo X X, et al. Optimization of the extraction process of polysaccharides from *Dendrobium officinale* and evaluation of the *in vivo* immunomodulatory activity [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(11): e13598

[6] Meng Q, Fan H, Li Y, et al. Effect of drying methods on physico-chemical properties and antioxidant activity of *Dendrobium officinale* [J]. Journal of Food Measurement & Characterization, 2018, 12(1): 1-10

[7] 刘云宏,孙悦,王乐颜,等.超声波强化热风干燥梨片的干燥特性[J].食品科学,2015,36(9):1-6
LIU Yun-hong, SUN Yue, WANG Le-yan, et al. Drying characteristics of pear slices during ultrasound-assisted hot air drying [J]. Food Science, 2015, 36(9): 1-6

[8] 周伟,李汴生,阮征,等.不同干燥方式对铁皮石斛失水特性及品质的影响[J].食品与发酵工业,2016,42(2):135-139
ZHOU Wei, LI Bian-sheng, RUAN Zheng, et al. Effects of different drying methods on moisture loss characteristics and quality of *Dendrobium officinale* [J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(2): 135-139

[9] 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,2015,26(13):1808-1811
XU Lan-fang, LU Qin-fei, ZHANG Yang, et al. Study on the effects of drying methods on the quality of *Dendrobium officinale* [J]. China Pharmacy, 2015, 26(13): 1808-1811

[10] Spiro M, Hunter J E. The kinetics and mechanism of caffeine infusion from coffee: The effect of roasting [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1985, 36: 871-876

[11] 欧阳平,张高勇,康保安,等.苦叶七中类黄酮提取的动力学及相关热力学研究[J].中成药,2004,26(12):991-995
OUYANG Ping, ZHANG Gao-yong, KANG Bao-an, et al. Kinetics and related thermodynamics on the extraction of flavonoids from *Fagopyrum tartaricum* [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2004, 26(12): 991-995

[12] 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
LIU Lian, YANG Xiao-ming, MA Hai-le. 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
- [13] 食品中水的测定,GB 5009.3-2016 [S]
Determination of moisture in food, GB 5009.3-2016 [S]
- [14] 李满飞,平田义正.中药石斛类多糖的含量测定[J].中草药, 1990,21(10):10-12
LI Man-fei, PING Tian-yi. Determination of polysaccharide content in *Dendrobium* [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 1990, 21(10): 10-12
- [15] 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
- [16] 陆震鸣,陶文沂,许泓瑜,等.乙醇提取樟芝菌粉三萜类化合物的动力学研究 [J].食品科学,2009,30(3):20-23
LU Zhen-ming, TAO Wen-yi, XU Hong-yu, et al. Kinetics on extraction of triterpenoids from *Antrodia camphorata* [J]. Food Science, 2009, 30(3): 20-23
- [17] Zhang W N, Zhang H L, Lu C Q, et al. A new kinetic model of ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from Chinese chive [J]. Food Chemistry, 2016, 212: 274-281
- [18] 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
- [19] He L, Yan X T, Liang J, et al. Comparison of different extraction methods for polysaccharides from *Dendrobium officinale*, stem [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 198: 101-108
- [20] 程伟,秦俊哲,杜军国.桑黄多糖提取过程模型的建立与动力学分析 [J].现代食品科技,2013,29(3):513-518
CHENG Wei, QIN Jun-zhe, DU Jun-guo. Model establishment and kinetics analysis of the extraction of polysaccharide from the fruits of *phellinus igniarius* [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(3): 513-518
- [21] 徐也,刘晓凤,王永刚,等.临泽小枣粗多糖提取动力学模型建立及结构特征分析[J].食品科学,2019,40(3):1-8
XU Ye, LIU Xiao-feng, WANG Yong-gang, et al. Dynamic analysis model of extraction and structural characteristics of polysaccharide from Linze *jujube* [J]. Food Science, 2019, 40(3): 1-8
- [22] 丁小余,徐璐珊,王峥涛,等.铁皮石斛居群差异的研究(I)-植物体形态结构的差异[J].中草药,2001,32(9):828-831
DING Xiao-yu, XU Luo-shan, WANG Zheng-tao, et al. Studies on population difference of *Dendrobium officinale* (I)-differences in morphological structure [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2001, 32(9): 828-831
- [23] 白音,潘春香,包英华,等.束花石斛营养器官内部组织构造的探讨[J].时珍国医国药,2010,21(10):2625-2627
BAI Yin, PAN Chun-xiang, BAO Ying-hua, et al. The anatomical structure of the nutritional organs of *Dendrobium chrysanthum* [J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2010, 21(10): 2625-2627
- [24] 周逸群,贺福元,杨岩涛,等.美拉德反应研究现状及对中药炮制和制剂工艺研究方法的影响[J].中草药,2014,45(1): 125-130
ZHOU Yi-qun, HE Fu-yuan, YANG Yan-tao, et al. Research situation of Maillard reaction and its influence on research methods for processing and preparation process of Chinese materia medica [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2014, 45(1): 125-130
- [25] 马越,王丹,郑清云,等.热风干燥温度对脱水胡萝卜品质的影响[J].食品工业,2017,38(11):83-86
MA Yue, WANG Dan, ZHENG Qing-yun, et al. Effect of hot air drying temperature on quality of dehydrated carrot [J]. The Food Industry, 2017, 38(11): 83-86
- [26] 徐明月,钟耀广,毕金峰,等.干燥条件对橘皮颜色与结构性能的影响[J].现代食品科技,2016,32(8):197-203
XU Ming-yue, ZHONG Yao-guang, BI Jin-feng, et al. Effect of different drying conditions on color and texture of citrus peels [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(8): 197-203