

# 雪莲果浆的真空泡沫干燥特性及数学模型

石启龙, 赵亚, 潘王盈

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东淄博 255049)

**摘要:** 为了研究乳清分离蛋白对雪莲果浆起泡特性的影响, 确定雪莲果浆真空泡沫干燥特性和数学模型, 以雪莲果浆固形物含量、起泡剂种类及质量分数和搅拌时间为因素, 以泡沫膨胀率、泡沫稳定性和泡沫密度为指标, 研究了雪莲果浆的起泡工艺, 得到了雪莲果浆适宜的起泡工艺参数: 果浆固形物含量 5%~7%, 起泡剂 15%乳清分离蛋白, 稳定剂 1%羧甲基纤维素钠, 搅拌时间 20 min。研究了不同温度 (55、65、75 °C) 和真空度 (0.075、0.095 MPa) 下雪莲果浆的干燥特性。雪莲果浆干燥速率随着温度、真空度的升高而增加。与未经起泡处理的雪莲果浆相比, 起泡处理显著增加了干燥过程中的有效水分扩散系数、降低了活化能, 进而提高了果浆的干燥速率、缩短了干燥时间。用于描述雪莲果浆真空泡沫干燥的适宜模型为 Midilli *et al.* 模型。

**关键词:** 雪莲果; 乳清分离蛋白; 起泡特性; 真空干燥; 干燥特性; 数学模型

文章编号: 1673-9078(2014)6-131-139

## Drying Characteristics and Mathematical Modeling of Yacon Pulp by Vacuum Foam Mat Drying

SHI Qi-long, ZHAO Ya, PAN Wang-ying

(School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**Abstract:** The purpose of the present study was to illuminate the effect of whey protein isolate on the foam properties of yacon pulp and determine the drying characteristics and mathematical model of vacuum foam mat drying. Effects of total solid content of yacon pulp, types and mass fractions of foaming agent, and whipping time on the foam expansion, foam stability and foam density were investigated. The optimum for stable foam formation was yacon pulp with total solid content of 5%~7%, with 15% whey protein isolate as foaming agent and 1% carboxymethylcellulose sodium as foam stabilizer, and whipping time of 20min. Drying characteristics of foamed yacon pulp at different temperatures (55, 65 and 75 °C) and vacuum degrees (0.075 and 0.095 MPa) were investigated. Drying rate increased with increasing drying temperature and vacuum degree. Compared with non-foamed pulp, foam mat treatment significantly increased the effective moisture diffusivity coefficients and decreased the activation energy for the diffusion of the moisture associated with yacon pulp and therefore increased the drying rate and lowered the drying time of yacon pulp. Midilli *et al.* model achieved the best fit and can be used to describe the foam mat vacuum drying process of yacon pulp.

**Key words:** yacon; whey protein isolate; foaming properties; vacuum drying; drying characteristics; mathematical model

雪莲果 (*Smallanthus sonchifolius*) 营养丰富, 而且富含果寡糖, 具有清除血糖和血脂、调理胃肠道、促进益生菌繁殖、清热解毒、通便等功能<sup>[1~3]</sup>。雪莲果含水率高, 极易腐烂、褐变, 而且果寡糖极易水解<sup>[4]</sup>。解决这一问题的主要途径是大力发展雪莲果精深加工技术。果蔬粉具有营养丰富、风味独特、冲调迅速、易于保存等优点而成为国内外的研究热点<sup>[5]</sup>。但是果蔬富含葡萄糖、果糖、蔗糖等成分, 这些糖类的玻璃

收稿日期: 2014-01-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31171708); 山东理工大学青年教师发展支持计划资助项目 (110033)

作者简介: 石启龙 (1974-), 男, 博士, 副教授, 主要从事果蔬、水产品加工与贮藏研究

化转变温度较低且吸湿性较高, 因此粉体在加工及贮藏过程中极易出现发粘、结块等现象<sup>[6]</sup>。生产上常用方法是添加干燥助剂如麦芽糊精, 但其用量通常超过 35%, 不仅增加成本, 而且会改变果蔬原有的风味和口感<sup>[7~8]</sup>。

泡沫干燥是将液体或半固体原料通过加入起泡剂和稳定剂, 使其形成稳定的泡沫状, 然后将其干燥并粉碎, 从而得到粉末产品, 尤其适用于黏度大、含糖量高的物料干燥<sup>[9]</sup>。近年来, 果蔬浆料泡沫干燥方面的报道逐渐增多, 例如豇豆<sup>[9]</sup>、西红柿<sup>[10]</sup>、芒果<sup>[11]</sup>、黑加仑<sup>[12]</sup>、苹果<sup>[13]</sup>、芭蕉<sup>[14]</sup>、木瓜<sup>[15]</sup>和蓝莓果<sup>[16]</sup>。起泡特性 (如泡沫密度、泡沫膨胀率、泡沫稳定性等) 是泡沫干燥的重要指标, 而起泡特性主要取决于起泡

剂、稳定剂的种类及其添加量。文献报道的泡沫干燥常用起泡剂有单硬脂酸甘油酯、甲基纤维素、卵清蛋白和大豆分离蛋白<sup>[9-16]</sup>。乳清分离蛋白因具有起泡性、乳化性和成膜等功能特性而广泛用于食品及医药行业<sup>[17]</sup>。但是,以乳清分离蛋白作为起泡剂用于果蔬浆料的泡沫干燥尚未见报道。常用的泡沫干燥是以热风作为干燥介质,泡沫内空气阻碍热量向内部传递,导致干燥速率降低;而且高温容易破坏物料的营养和风味<sup>[12]</sup>。郑先哲等<sup>[12,16]</sup>利用微波辅助泡沫干燥黑加仑和蓝靛果果浆,不仅提高了干燥速率,而且改善了产品品质。真空干燥具有传热均匀、干燥温度低、水分易于去除等优点,尤其适用于热敏性物质的干燥<sup>[18]</sup>。尽管真空干燥在食品物料干燥中得到了广泛应用<sup>[18-20]</sup>,但其用于果蔬浆料的泡沫干燥尚未见报道。因此,本文研究目的:(1)筛选雪莲果浆起泡工艺最优参数;(2)研究雪莲果浆(起泡处理组和未起泡果浆)真空干燥特性;(3)确立雪莲果浆真空泡沫干燥数学模型。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

雪莲果:购于淄博果品批发市场。

大豆分离蛋白(SPI)、乳清分离蛋白(WPI)、羧甲基纤维素钠(CMC-Na)均为食品级。

### 1.2 仪器与设备

SJ203A-250型多功能搅拌机,浙江绍兴苏泊尔电器有限公司;HH-6型数显恒温水浴锅,龙口市先科仪器公司;DZF-6050型真空干燥箱,上海精宏实验设备有限公司;DHG-9623A型电热恒温鼓风干燥箱,上海精宏实验设备有限公司;JJ-1A型数显电动搅拌器,常州普天仪器制造有限公司;PL203型分析天平,梅特勒-托利多仪器有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 雪莲果浆起泡试验

雪莲果经清洗、去皮、切片、护色后<sup>[5]</sup>,置于打浆机中打浆,然后置于冰箱中冷藏待用。

##### 1.3.1.1 固形物含量对起泡性影响

通过稀释和浓缩方法调节果浆固形物含量为3%、5%、7%、9%和11%,取100g果浆于烧杯中,然后添加10%(以干基计,下同)WPI和1%CMC-Na,混匀后以1000r/min搅拌15min,然后迅速测量果浆体积变化,计算泡沫膨胀率( $F_E$ )<sup>[11]</sup>。 $F_E$ 计算方法见

式(1):

$$F_E/\% = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100 \quad (1)$$

式中, $V_0$ 为未起泡果浆的体积,mL; $V_1$ 为起泡果浆的体积,mL。

##### 1.3.1.2 搅拌时间对起泡性影响

取100g固形物含量为5%的果浆于烧杯中,分别添加5%、10%、15%和20%WPI和SPI,1%CMC-Na,混匀后以1000r/min搅拌30min,每隔5min测量果浆体积变化,计算 $F_E$ 和泡沫密度( $F_D$ )<sup>[11,14]</sup>。 $F_D$ 计算方法见式(2):

$$F_D / (\text{g}/\text{cm}^3) = \frac{m}{V_1} \quad (2)$$

式中, $m$ 为初始果浆质量,g; $V_1$ 为起泡果浆体积,mL。

##### 1.3.1.3 起泡剂筛选

根据1.3.1.2试验结果,筛选雪莲果浆起泡后密度范围为0.2g/mL~0.6g/mL的起泡剂、稳定剂组合,将其加入到固形物含量为7%的雪莲果浆中,混匀后以1000r/min搅拌20min。取100mL起泡雪莲果浆置于透明刻度烧杯中(转移过程中尽量避免泡沫结构破坏),室温静置3h,每隔30min测定泡沫体积减少量,计算泡沫稳定性( $F_S$ )<sup>[11]</sup>。 $F_S$ 计算方法见式(3):

$$F_S / \% = V_0 \frac{\Delta t}{\Delta V} \times 100 \quad (3)$$

式中, $\Delta t$ 为时间间隔,min; $\Delta V$ 为时间间隔 $\Delta t$ 时,果浆泡沫体积的变化量mL。

### 1.3.2 雪莲果浆真空干燥特性

将未经起泡处理的雪莲果浆(YP)和起泡处理后的雪莲果浆(FM-YP)分别放于料盘中,料层厚度为3mm。将料盘放于真空干燥箱中,控制干燥温度分别为55、65和75℃,真空度为0.075和0.095MPa。干燥过程中每隔30min测定一次物料质量,直至干基含水率为0.05kg/kg为止。每次试验平行3次,结果取平均值。

#### 1.3.2.1 含水率

采用常压干燥法<sup>[21]</sup>。

#### 1.3.2.2 干燥速率(DR)

干燥速率按式(4)计算<sup>[22]</sup>:

$$DR = -\frac{dM_d}{dt} = -\frac{M_{d,i+1} - M_{d,i}}{t_{i+1} - t_i} \quad (4)$$

式中, $M_d$ 为干基含水率,kg/kg; $M_{d,i+1}$ 为*i*+1时刻的干基含水率,kg/kg; $M_{d,i}$ 为*i*时刻的干基含水率,kg/kg。

## 1.4 数学模型

水分比(MR)表示一定干燥条件下物料中未被干

燥除去的水分量,可以用来反映物料干燥速率的快慢,  
MR 计算方法见式 (5) [4,10]:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (5)$$

式中,  $M_t$  为干燥时间  $t$  时刻的干基含水率, kg/kg;  $M_0$  为初始干基含水率, kg/kg;  $M_e$  为平衡干基含水率, kg/kg。

$M_e$  与  $M_t$  和  $M_0$  相比要小得多, MR 计算式可简化为[4,10,23]

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (6)$$

常见的用于描述农产品薄层干燥的数学模型如表 1 所示[4]。采用表 1 所示的 8 种数学模型拟合雪莲果浆真空泡沫干燥 MR 数据, 模型拟合精度通过统计参数均方根误差 (RMSE), 卡方 ( $\chi^2$ ) 和相关系数 ( $R^2$ ) 来衡量。 $R^2$  越高、 $\chi^2$  和 RMSE 越低, 说明模型拟合的越好。 $\chi^2$  和 RMSE 计算方法见式 (7) 和 (8):

表 1 薄层干燥数学模型

Table 1 Mathematical models applied to the thin-layer drying

模型名称	模型表达式
Lewis	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
Two term model	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$

注: MR 为水分比 (无量纲),  $k, k_0, k_1, n, a, b, c$  为干燥模型的参数。

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (7)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中,  $MR_{exp,i}$  为实测的水分比;  $MR_{pre,i}$  为模型预测的水分比;  $N$  为试验观察数;  $n$  为模型中的参数个数。

### 1.5 有效水分扩散系数和活化能

Fick 第二定律可用于描述物料降速干燥特性。雪莲果浆薄层干燥过程是水分自果浆内部向外界扩散的过程, 假设果浆内部水分均匀分布、温度和扩散系数恒定, 且忽略外部阻力, 则可采用 Fick 扩散方程描述雪莲果浆真空泡沫干燥特性[4,10,11]:

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t \quad (9)$$

式中,  $D_{eff}$  为有效水分扩散系数,  $m^2/s$ ;  $L$  为浆料厚度的 1/2, 其值为  $1.5 \times 10^{-3} m$ ;  $t$  为干燥时间, s。

由式 (9) 可知,  $\ln MR$  与  $t$  呈线性关系, 根据曲线斜率, 即可计算得到  $D_{eff}$ 。

$D_{eff}$  与温度间的关系可用阿伦尼乌斯公式表示[4]:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (10)$$

式中,  $D_0$  为指前因子,  $m^2/s$ ;  $E_a$  为活化能,  $kJ/mol$ ;  $T$  为绝对温度,  $K$ ;  $R$  为气体常数,  $8.314 \times 10^{-3} kJ/(mol \cdot K)$ 。

对式 (10) 两边取对数可知,  $\ln D_{eff}$  与  $1/T$  呈线性关系, 通过直线斜率可以计算得到活化能。

### 1.6 数据分析

采用 Matlab 7.0 软件对表 1 所示的 8 种干燥模型进行非线性拟合求解; 采用 Origin 7.5 软件进行方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 雪莲果浆起泡特性

#### 2.1.1 固形物含量对果浆起泡性影响

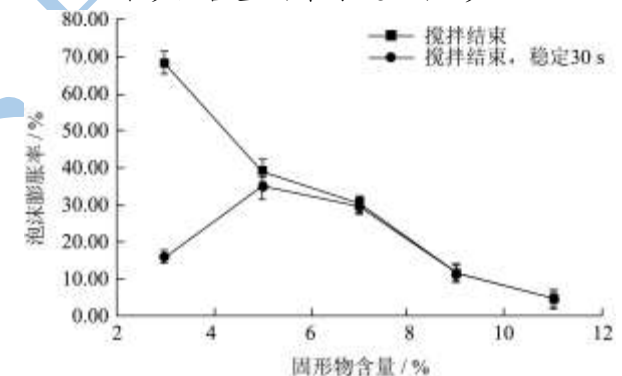


图 1 固形物含量对雪莲果浆泡沫膨胀率影响

Fig.1 Effect of solid content on the foam expansion of yacon pulp

雪莲果浆固形物含量对泡沫膨胀率的影响如图 1 所示。可以看出, 雪莲果浆固形物含量 3% 时, 尽管搅拌结束泡沫膨胀率较高, 但是静置 30 s 后, 泡沫稳定性显著 ( $P < 0.05$ ) 降低, 因此泡沫稳定性较差, 不宜泡沫干燥。固形物含量  $> 5\%$  时, 泡沫膨胀率随着固形物含量的增加而降低。固形物含量为 5% 时, 泡沫稳定性与固形物含量 3% 相比显著 ( $P < 0.05$ ) 提高, 但是静置 30 s 后, 泡沫膨胀率略有下降。固形物含量为 7% 时, 搅拌结束以及搅拌结束静置 30 s 处理间膨

胀率无明显变化 ( $P>0.05$ ), 泡沫稳定性较好。固形物含量增加至 9% 和 11% 时, 泡沫膨胀率与固形物含量为 5% 和 7% 时相比显著降低 ( $P<0.05$ )。Kandasamy 等<sup>[15]</sup>研究了木瓜浆浓度对泡沫膨胀率影响, 得到了相似的结论。因此, 雪莲果浆起泡工艺的适宜固形物含量范围为 5%~7%。

### 2.1.2 搅拌时间对果浆起泡性影响

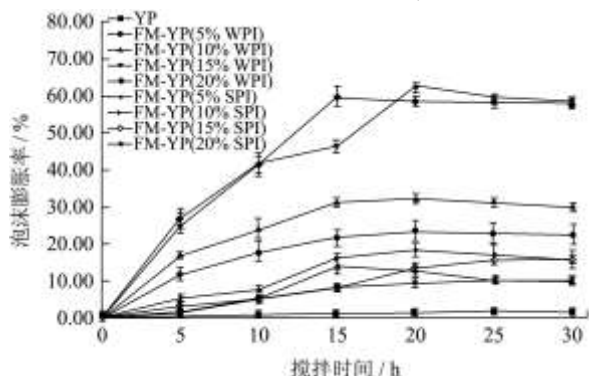


图 2 搅拌时间对雪莲果浆泡沫膨胀率影响

Fig.2 Effect of whipping time on the foam expansion of yacon pulp

添加不同起泡剂及质量分数的雪莲果浆泡沫膨胀率随搅拌时间变化如图 2 所示。可以看出, 泡沫膨胀率随着搅拌时间延长而增加。搅拌时间为 15 min~20 min 时, 膨胀率达到最高值, 之后泡沫膨胀率随搅拌时间延长基本维持恒定, 个别处理组泡沫膨胀率甚至略有下降。起泡剂种类和质量分数对果浆的泡沫膨胀率有显著影响。添加 WPI 和 SPI 的果浆泡沫膨胀率显著 ( $P<0.05$ ) 高于未经起泡处理的果浆 (YP); 而添加 WPI 的果浆泡沫膨胀率显著 ( $P<0.05$ ) 高于添加 SPI 的果浆。添加 5% WPI 的果浆, 即 FM-YP (5% WPI), 其膨胀率高于所有的添加 SPI 的处理组。此外, 起泡剂质量分数也会影响果浆的起泡效果。添加 20% 和 15% WPI 的果浆, 其膨胀率显著 ( $P<0.05$ ) 高于添加 5% 和 10% WPI 的处理组。FM-YP (15% WPI) 的果浆搅拌时间为 15 min 和 20 min 时, 泡沫膨胀率分别为 46.23% 和 62.31%; 而 FM-YP (20% WPI) 的果浆搅拌时间为 15 min 和 20 min 时, 泡沫膨胀率分别为 59.52% 和 58.28%。综合考虑, 雪莲果浆适宜起泡剂及质量分数范围 15%~20% WPI, 搅拌时间 15 min~20 min。

### 2.1.3 起泡剂对果浆稳定性影响

添加不同起泡剂的雪莲果浆搅拌 20 min 时的泡沫特性如表 1 所示。Hart 等<sup>[24]</sup>研究表明, 对于泡沫干燥而言, 泡沫果浆最适宜的密度范围为 0.2 g/cm<sup>3</sup>~0.6 g/cm<sup>3</sup>。因此, 添加 15% 和 20% WPI、1% CMC-Na 的果浆符合这一要求。

表 1 搅拌 20 min 时果浆的密度和泡沫膨胀率

Table 1 Foam density and foam expansion of yacon pulp with whipping time of 20min

起泡剂	质量分数/%	泡沫膨胀率/%	泡沫密度/(g/mL)
WPI	5	23.21±3.05 <sup>d</sup>	0.76±0.06 <sup>cd</sup>
WPI	10	32.06±0.61 <sup>c</sup>	0.71±0.07 <sup>d</sup>
WPI	15	62.31±1.23 <sup>a</sup>	0.58±0.04 <sup>e</sup>
WPI	20	58.28±0.78 <sup>b</sup>	0.59±0.03 <sup>e</sup>
SPI	5	12.39±1.13 <sup>f</sup>	0.83±0.09 <sup>b</sup>
SPI	10	18.14±1.57 <sup>e</sup>	0.79±0.07 <sup>bc</sup>
SPI	15	13.22±1.08 <sup>f</sup>	0.82±0.08 <sup>b</sup>
SPI	20	9.40±1.19 <sup>f</sup>	0.85±0.05 <sup>b</sup>
无		1.28±0.42 <sup>g</sup>	0.92±0.12 <sup>a</sup>

注: 同一列数据标注不同字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ); 标注相同字母表示差异不显著 ( $P>0.05$ )。

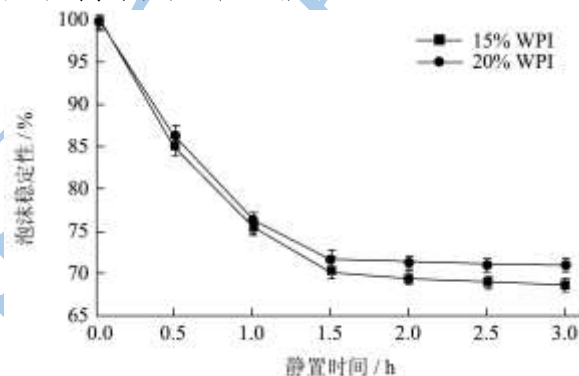


图 3 WPI 质量分数对泡沫稳定性影响

Fig.3 Effect of whey protein isolate mass fraction on the foam stability of foamed yacon pulp

以 15% 和 20% WPI 作为起泡剂, 以 1% CMC-Na 作为泡沫稳定剂, 添加到固形物含量为 7% 的雪莲果浆中, 采用电动搅拌器 1000 r/min 搅拌 20 min, 然后室温静置 3 h, 观察果浆的泡沫稳定性, 结果见图 3。可以看出, 添加 20% WPI 的浆料泡沫稳定性略高于添加 15% WPI 的浆料, 但二者间无显著差异 ( $P>0.05$ )。而对于果浆泡沫膨胀率, 添加 15% WPI 的浆料则明显 ( $P<0.05$ ) 高于添加 20% WPI 的果浆。因此, 选择 15% WPI 作为起泡剂进行后续的真空中干燥。

## 2.2 雪莲果浆真空干燥特性

### 2.2.1 温度对雪莲果浆干燥特性影响

真空度为 0.095 MPa 时, 不同温度 (55、65 和 75 °C) 条件下, 雪莲果浆的干燥曲线和干燥速率曲线如图 4、5 所示。由图 4 可以看出, 雪莲果浆的干基含水率随干燥时间的延长而降低; 干燥温度越高, 达到干燥终点所需时间越短。FM-YP 的干燥时间明显低于 YP。例如, 温度 55、65 和 75 °C 时, FM-YP 干基含

水率达到 0.05 kg/kg 所需时间分别为 8.0、6.0 和 3.5 h；而温度 55、65 和 75 °C 时，YP 干基含水率达到 0.05 kg/kg 所需时间分别为 9.0、7.0 和 5.0 h。

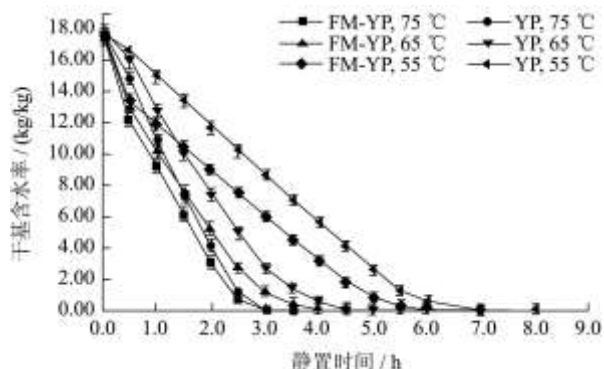


图 4 不同温度下雪莲果浆干燥曲线

Fig.4 Drying curves of yacon pulp with and without foamed

treatment at different drying temperatures

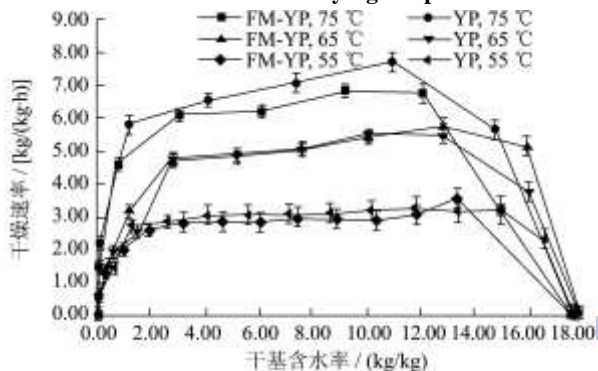


图 5 不同温度下雪莲果浆干燥速率曲线

Fig.5 Drying rate curves of yacon pulp with and without

foamed treatment at different drying temperatures

由图 5 可以看出，干燥温度为 55 °C 时，雪莲果浆真空干燥过程由升速、恒速和降速干燥等 3 个阶段组成；而温度为 65 °C 和 75 °C 时，整个干燥过程干燥仅包括升速和降速干燥等 2 个阶段组成。整个干燥过程升速干燥时间较短，65 °C 和 75 °C 时，绝大部分干燥过程以降速干燥为主。干燥速率随着温度升高而增加。干燥初期，尤其是前 0.5 h，FM-YP 的升速干燥速率显著 ( $P < 0.05$ ) 高于 YP，这可能是由于起泡后的果浆在预热阶段保持泡沫状，干燥比表面积大，同时浆料处于真空状态下，水分易于去除的缘故。随着干燥进行，FM-YP 和 YP 间，干燥速率差别不大。Rajkumar 等<sup>[1]</sup>研究了芒果浆的泡沫干燥特性，得到了相似的结论。因此，果蔬浆料泡沫干燥主要是显著提高了干燥初期的干燥速率，进而缩短了干燥时间。此外，起泡处理对干燥过程的影响在很大程度上取决于干燥温度的高低，温度越高，泡沫干燥效果越明显。真空度为 0.075 MPa 时，不同温度 (55、65 和 75 °C) 对 FM-YP 和 YP 干燥特性的影响与真空度为 0.095

MPa 时较为接近 (图略)，不再赘述。

### 2.2.2 真空度对雪莲果浆干燥特性影响

温度为 65 °C 时，不同真空度 (0.075、0.095 MPa) 条件下，雪莲果浆的干燥曲线和干燥速率曲线如图 6、7 所示。

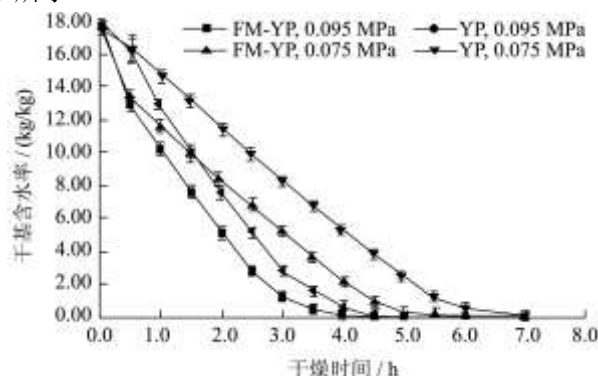


图 6 不同真空度下雪莲果浆干燥曲线

Fig.6 Drying curves of yacon pulp with and without foamed

treatment at different vacuum degrees

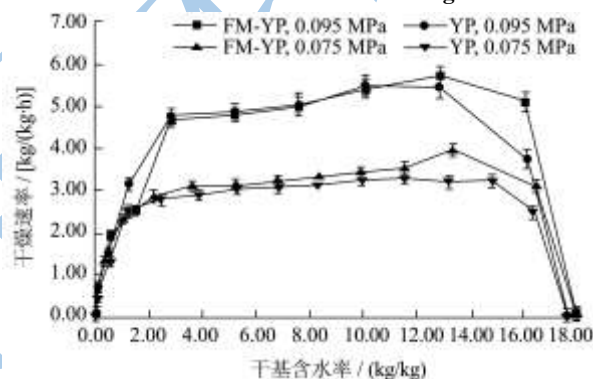


图 7 不同真空度下雪莲果浆干燥速率曲线

Fig.7 Drying rate curves of yacon pulp with and without

foamed treatment at different vacuum degrees

由图 6 可以看出，雪莲果浆的干基含水率随干燥时间的延长而降低；真空度越高，达到干燥终点所需时间越短。FM-YP 的干燥时间明显低于 YP。例如，真空度为 0.075、0.095 MPa 时，FM-YP 干基含水率达到 0.05 kg/kg 所需时间分别为 7.0 和 6.0 h；而真空度 0.075、0.095 MPa 时，YP 干基含水率达到 0.05 kg/kg 时所需时间分别为 8.0 和 7.0 h。由图 7 可以看出，干燥温度为 65 °C，真空度为 0.075、0.095 MPa 时，雪莲果浆真空干燥过程由升速、降速干燥等 2 个阶段组成。温度一定时，干燥速率随着真空度的升高而增加。真空度为 0.075 和 0.095 MPa 时，FM-YP 干基含水量 5.21 kg/kg 时，干燥速率分别为 3.14 和 4.90 kg/(kg·h)。温度、真空度相同时，干燥初期，尤其是前 0.5 h，FM-YP 的干燥速率显著 ( $P < 0.05$ ) 高于 YP；而干燥中、后期，FM-YP 和 YP 之间干燥速率差异不大。这与温度对雪莲果浆泡沫干燥特性的影响趋于一致。温度为 55 和 75 °C 时，不同真空度对 FM-YP 和

YP的干燥特性影响与温度为65℃时趋于一致(图略),不再赘述。

### 2.3 模型拟合

将雪莲果浆真空干燥特性数据按式(6)整理,得到不同干燥条件下MR。采用表1所示8种数学模型拟合雪莲果浆真空干燥MR数据,结果如表2所示。在本文所选的真空干燥条件下,R<sup>2</sup>平均值较高的模型为Midilli et al、Logarithmic、Page和Two Term模型,其R<sup>2</sup>范围分别为0.981~0.991; 0.980~0.986;

0.971~0.990和0.970~0.990;  $\chi^2$ 平均值较低的模型为Page、Wang and Singh、Logarithmic和Midilli et al模型,其值范围分别为0.0017~0.0030; 0.0014~0.0045; 0.0021~0.0031和0.0024~0.0038; RMSE平均值较低的模型分别为Midilli et al、Page、Logarithmic和Wang and Singh模型,其值范围分别为0.0414~0.0505; 0.0372~0.0534; 0.0407~0.0489和0.0348~0.0610。综合考虑, Midilli et al.模型为描述雪莲果浆真空干燥特性的最适模型。

表2 雪莲果浆真空泡沫干燥模型拟合参数

Table 2 Model fitting constants of vacuum foamed mat dried yacon pulp

模型	干燥条件		模型参数	R <sup>2</sup>	$\chi^2$	RMSE
	温度/℃	真空度/MPa				
Lewis	75	0.095	k=0.826	0.975	0.0033	0.0545
	65	0.095	k=0.699	0.975	0.0031	0.0536
	55	0.095	k=0.416	0.970	0.0033	0.0558
	75	0.075	k=0.596	0.974	0.0031	0.0536
	65	0.075	k=0.456	0.972	0.0031	0.0540
	55	0.075	k=0.313	0.965	0.0035	0.0578
Page	75	0.095	k=0.711, n=1.338	0.990	0.0017	0.0372
	65	0.095	k=0.585, n=1.300	0.988	0.0018	0.0391
	55	0.095	k=0.336, n=1.194	0.977	0.0029	0.0500
	75	0.075	k=0.522, n=1.179	0.980	0.0030	0.0496
	65	0.075	k=0.370, n=1.204	0.980	0.0025	0.0470
	55	0.075	k=0.245, n=1.177	0.971	0.0032	0.0534
Modified Page	75	0.095	k=1.053, n=0.785	0.975	0.0040	0.0575
	65	0.095	k=0.713, n=0.979	0.975	0.0038	0.0559
	55	0.095	k=0.957, n=0.435	0.970	0.0038	0.0577
	75	0.075	k=0.733, n=0.814	0.974	0.0038	0.0562
	65	0.075	k=0.585, n=0.778	0.972	0.0036	0.0560
	55	0.075	k=0.656, n=0.477	0.965	0.0039	0.0593
Henderson and Pabis	75	0.095	k=0.851, a=1.036	0.977	0.0038	0.0558
	65	0.095	k=0.720, a=1.035	0.977	0.0036	0.0544
	55	0.095	k=0.421, a=1.013	0.970	0.0038	0.0575
	75	0.075	k=0.603, a=1.012	0.974	0.0038	0.0560
	65	0.075	k=0.463, a=1.018	0.972	0.0036	0.0556
	55	0.075	k=0.314, a=1.003	0.965	0.0039	0.0593
Logarithmic	75	0.095	a=1.082, c=-0.059, k=0.735	0.984	0.0033	0.0489
	65	0.095	a=1.077, c=-0.056, k=0.627	0.983	0.0031	0.0485
	55	0.095	a=1.098, c=-0.115, k=0.322	0.983	0.0025	0.0446
	75	0.075	a=1.071, c=-0.076, k=0.502	0.983	0.0031	0.0485
	65	0.075	a=1.109, c=-0.123, k=0.348	0.986	0.0021	0.0407
	55	0.075	a=1.091, c=-1.237, k=0.234	0.980	0.0025	0.0462

转下页

接上页

Two term	75	0.095	$a=-111.900, k_0=0.682, b=112.900, k_1=0.684$	0.979	0.0057	0.0600
	65	0.095	$a=-65.300, k_0=1.224, b=66.290, k_1=1.211$	0.988	0.0029	0.0440
	55	0.095	$a=-29.500, k_0=0.661, b=30.460, k_1=0.649$	0.980	0.0034	0.0506
	75	0.075	$a=-11.480, k_0=0.326, b=12.470, k_1=0.342$	0.985	0.0035	0.0483
	65	0.075	$a=-23.980, k_0=0.668, b=24.960, k_1=0.656$	0.980	0.0035	0.0509
	55	0.075	$a=-77.950, k_0=0.456, b=78.900, k_1=0.454$	0.975	0.0035	0.0534
Wang and Singh	75	0.095	$a=-0.507, b=0.059$	0.972	0.0045	0.0610
	65	0.095	$a=-0.438, b=0.044$	0.973	0.0041	0.0586
	55	0.095	$a=-0.288, b=0.020$	0.986	0.0017	0.0385
	75	0.075	$a=-0.399, b=0.038$	0.982	0.0023	0.0476
	65	0.075	$a=-0.315, b=0.024$	0.989	0.0014	0.0348
	55	0.075	$a=-0.217, b=0.011$	0.982	0.0020	0.0426
Midilli et al.	75	0.095	$a=0.978, b=-0.003, k=0.677, n=1.353$	0.991	0.0025	0.0400
	65	0.095	$a=0.972, b=-0.002, k=0.546, n=1.334$	0.989	0.0026	0.0414
	55	0.095	$a=0.943, b=-0.006, k=0.273, n=1.228$	0.984	0.0028	0.0456
	75	0.075	$a=0.966, b=-0.005, k=0.479, n=1.182$	0.983	0.0038	0.0505
	65	0.075	$a=0.957, b=-0.008, k=0.330, n=1.183$	0.987	0.0024	0.0423
	55	0.075	$a=0.907, b=-0.004, k=0.168, n=1.322$	0.981	0.0026	0.0456

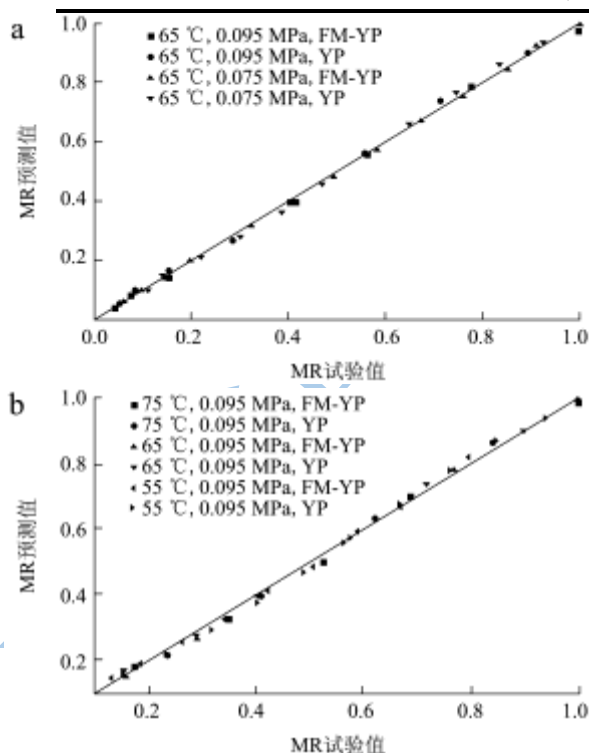


图8 MR Midilli et al. 模型预测值与试验值关系

Fig.8 Comparison of predicted and experimental MR from midilli et al. model at different temperatures and vacuum degrees

为进一步验证 Midilli et al. 的准确性, 将试验数据所得 MR 与模型预测 MR 进行对比, 结果如图 8 所示。可以看出, 数据点基本在 45° 直线处上下浮动, 表明试验数据与模型预测吻合度较高, Midilli et al 模型可

用于预测雪莲果浆真空泡沫干燥过程中 MR 随时间变化。

## 2.4 有效水分扩散系数和活化能

有效扩散系数是干燥参数优化和干燥设备设计的一个非常重要的传递特性<sup>[23]</sup>。不同温度、真空度条件下, FM-YP 和 YP 真空干燥过程中有效水分扩散系数和活化能如表 3 所示。可以看出, 有效水分扩散系数随着干燥温度和真空度的升高而增加。真空度为 0.095 MPa、温度分别为 55、65 和 75 °C 时, FM-YP 的有效水分扩散系数分别为  $2.039 \times 10^{-10}$ 、 $2.683 \times 10^{-10}$  和  $3.607 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ; 温度为 65 °C, 真空度分别为 0.075 和 0.095 MPa 时, FM-YP 的有效水分扩散系数分别为  $2.261 \times 10^{-10}$  和  $2.683 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。相同干燥条件下, 与未经起泡处理的雪莲果浆相比, 起泡处理能显著增加雪莲果浆真空干燥过程中的有效水分扩散系数。温度为 75 °C、真空度为 0.095 MPa 时, FM-YP 和 YP 的有效水分扩散系数分别为  $3.607 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  和  $3.380 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。由于起泡处理后, 果浆干燥过程中表面积增加, 从而加速干燥进程。Rajkumar 等<sup>[11]</sup>对起泡芒果浆进行了对流干燥研究, 得到了相似的结论。

活化能表示干燥过程中每除去 1 mol 水分所需的最低能量, 活化能越高, 说明物料越难干燥。雪莲果浆真空干燥过程中活化能随着真空度的增加而降低。真空度分别为 0.075 和 0.095 MPa 时, YP 真空干燥过程中的活化能分别为 34.0 和 27.0 kJ/mol。真空度为

0.075 MPa 时, YP 和 FM-YP 真空干燥过程中的活化能分别为 34.0 和 31.6 kJ/mol, 因此起泡处理能显著降低雪莲果浆真空干燥过程中的活化能; 而真空度为 0.095 MPa 时, YP 和 FM-YP 真空干燥过程中的活化能相同。根据有效水分扩散系数和活化能结果, 可以

推断: 干燥温度、真空度、起泡处理对雪莲果浆干燥特性影响较为复杂, 因素间存在交互作用影响, 因此未来研究需要重点考察 3 者间的交互作用并进行工艺参数的优化。

表 3 雪莲果浆真空泡沫干燥有效水分扩散系数和活化能

Table 3 Moisture effective diffusion coefficients and activation energy of vacuum foamed mat dried yacon pulp

干燥条件		有效水分扩散系数 $D_{eff}/(m^2/s)$		活化能 $E_a/(kJ/mol)$	
温度/ $^{\circ}C$	真空度/MPa	FM-YP	YP	FM-YP	YP
75	0.095	$3.607 \times 10^{-10}$	$3.380 \times 10^{-10}$		
65	0.095	$2.683 \times 10^{-10}$	$2.608 \times 10^{-10}$	27.0	27.0
55	0.095	$2.039 \times 10^{-10}$	$1.915 \times 10^{-10}$		
75	0.075	$2.888 \times 10^{-10}$	$2.740 \times 10^{-10}$		
65	0.075	$2.261 \times 10^{-10}$	$1.948 \times 10^{-10}$	31.6	34.0
55	0.075	$1.486 \times 10^{-10}$	$1.339 \times 10^{-10}$		

### 3 结论

3.1 乳清分离蛋白作为起泡剂可显著提高雪莲果浆的起泡特性。雪莲果浆适宜起泡工艺参数为: 果浆固形物含量 5%~7%, 起泡剂和稳定剂分别为 15% WPI 和 1% CMC-Na, 搅拌时间 20 min。

3.2 雪莲果浆干燥速率随着温度、真空度的升高而增加。与未经起泡处理的雪莲果浆相比, 起泡处理显著增加了果浆干燥初期的干燥速率、缩短了干燥时间。

3.3 描述雪莲果浆真空起泡干燥的最适模型为 Midilli *et al.* 模型。

3.4 真空干燥雪莲果浆的有效水分扩散系数随着干燥温度和真空度的升高而增加, 干燥过程中的活化能随着真空度的增加而降低。与未经起泡处理的雪莲果浆相比, 起泡处理能显著增加雪莲果浆真空干燥过程中的有效水分扩散系数、降低干燥过程中的活化能, 但活化能降低趋势随着真空度的升高而逐渐降低。

### 参考文献

[1] 石启龙,赵亚,郑亚琴.雪莲果热风-微波联合干燥工艺优化[J].食品科学,2011,32(12):150-155  
SHI Qi-long, ZHAO Ya, ZHENG Ya-qin. Drying of yacon by hot air and microwave combination [J]. Food Science, 2011, 32(12): 150-155

[2] Genta S, Cabrera W, Habib N, et al. Yacon syrup: Beneficial effects on obesity and insulin resistance in humans [J]. Clinical Nutrition, 2009; 28(2): 182-187

[3] Ojansivu I, Ferreira C L, Salminen S. Yacon, a new source of prebiotic oligosaccharides with a history of safe use [J]. Trends in Food Science & Technology, 2011, 22(1): 40-46

[4] Shi Q L, Zheng Y Q, Zhao Y. Mathematical modeling on thin-layer heat pump drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) slices [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 71: 208-216

[5] 马占强,石启龙.干燥方法对雪莲果粉品质特性的影响[J].食品工业科技,2013,34(17):201-205  
MA Zhan-qiang, SHI Qi-long. Effects of different drying methods on the quality characteristics of yacon powder [J]. Science and Technology of Food industry, 2013, 34(17): 201-205

[6] Roos Y H, Karel M, Kokini J L. Glass transitions in low moisture and frozen foods: effect on shelf life and quality [J]. Food Technology, 1996, 50(11): 95-108

[7] Bhandari B R, Datta N, Howes T. Problems associated with spray drying of sugar-rich foods [J]. Drying Technology, 1997, 15(2): 671-684

[8] Jayasundera M, Adhikari B, Adhikari R, et al. The effect of protein types and low molecular weight surfactants on spray drying of sugar-rich foods [J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(3): 459-469

[9] Falade K O, Adeyanju K I, Uzo-Peters P I. Foam-mat drying of cowpea (*Vigna unguiculata*) using glyceryl monostearate and egg albumin as foaming agents [J]. European Food Research and Technology, 2003, 217(6): 486-491

[10] Kadam D M, Balasubramanian S. Foam mat drying of tomato juice [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2011, 35(4): 488-495

[11] Rajkumar P, Kailappan R, Viswanathan R, et al. Foam mat drying of Alphonso mango pulp [J]. Drying Technology, 2007, 25(2): 357-365



- [12] 郑先哲,刘成海,周贺.黑加仑果浆微波辅助泡沫干燥特性[J]. 农业工程学报,2009,25(8):288-293  
ZHENG Xian-zhe, LIU Cheng-hai, ZHOU He. Drying characteristics of blackcurrant pulp by micro-assisted foam mat drying [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 288-293
- [13] Bag S K, Srivastav P P, Mishra H N. Optimization of process parameters for foaming of bael (*Aegle marmelos* L.) Fruit Pulp [J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 4(8): 1450-1458
- [14] Falade K O, Okocha J O. Foam-mat drying of plantain and cooking banana (*Musa* spp.) [J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(4): 1173-1180
- [15] Kandasamy P, Varadharaju N, Kalemullah S, et al. Optimization of process parameters for foam-mat drying of papaya pulp [J]. Journal of Food Science and Technology, DOI: 10.1007/S13197-012-0812-y
- [16] 孙宇,郑先哲,李强,等.微波辅助泡沫干燥蓝靛果果粉工艺的研究[J].东北农业大学学报,2012,43(05):17-23  
SUN Yu, ZHENG Xian-zhe, LI Qiang, et al. Technology of powdered honeysuckle berry subjected to microwave assisted foam drying conditons [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2012, 43(5): 17-23
- [17] 卢晓明,王静波,任发政,等.乳清蛋白在食品工业中的应用[J]. 食品科学,2010,31(1):262-267  
LU Xiao-ming, WANG Jing-bo, REN Fa-zheng, et al. Application of whey protein in food industry: a review [J]. Food Science, 2010, 31(1): 262-267
- [18] 刘云宏,朱文学,马海乐.山茱萸真空干燥模型建立与工艺优化[J].农业机械学报,2010,41(6):118-122  
LIU Yun-hong, ZHU Wen-xue, MA Hai-le. Model establishment and process optimization of vacuum drying of *Carnus officinalis* [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 118-122
- [19] 张琨,鲁军,郭萌,等.钝顶螺旋藻的真空干燥工艺优化[J].农业工程学报,2011,27(13):377-381  
ZHANG Kun, LU Jun, GUO Meng, et al. Optimization of vacuum drying process for *spirulina platensis* [J]. Transactions of the SCAE, 2011, 27(13): 377-381
- [20] 张弘,郑华,于连松,等.玛咖真空干燥特性及工艺参数优化[J]. 农业工程学报,2012,28(25):267-272  
ZHANG Hong, ZHENG Hua, YU Lian-song, et al. Vacuum drying characteristics and technological parameters optimization of maca [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(25): 267-272
- [21] 宁正祥.食品成分分析手册[M].北京:中国轻工业出版社,1998
- [22] Shi Q L, Xue C H, Zhao Y, et al. Drying characteristics of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) dried in a heat pump dehumidifier [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(1): 12-20
- [23] 张绪坤,苏志伟,王学成,等.污泥过热蒸汽与热风薄层干燥的湿分扩散系数和活化能分析[J].农业工程学报, 2013, 29(22): 226-235  
ZHANG Xu-kun, SU Zhi-wei, WANG Xue-cheng, et al. Analysis of moisture diffusion and activation energy in superheated steam and hot air sludge thin layer drying [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 29(22): 226-235
- [24] Hart M R, Graham R P, Ginnette L F, et al. Foams for foam-mat drying[J]. Food Technology, 1963, 17(10):90-92