

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90118

裙带菜微波真空干燥质热传递特性与品质优化

Mass and heat transfer characteristics and quality optimization of microwave vacuum drying for wakame

张倩^{1,2,3} 李世榆² 李秀辰^{1,2,3}ZHANG Qian^{1,2,3} LI Shi-yu² LI Xiu-chen^{1,2,3}母刚^{1,2,3} 戴逸俊² 张国琛^{1,2,3}MU Gang^{1,2,3} DAI Yi-jun² ZHANG Guo-chen^{1,2,3}

(1. 辽宁省海洋渔业装备专业技术创新中心, 辽宁 大连 116023;

2. 大连海洋大学机械与动力工程学院[中新合作学院], 辽宁 大连 116023;

3. 设施渔业[大连海洋大学]教育部重点实验室, 辽宁 大连 116023)

(1. Marine Fishery Equipment Professional Technology Innovation Center of Liaoning Province, Dalian, Liaoning 116023, China; 2. College of Mechanical and Power Engineering [College of China & New Zealand Collaboration], Dalian Ocean University, Dalian, Liaoning 116023, China; 3. Key Laboratory of Environment Controlled Aquaculture Ministry of Education [Dalian Ocean University], Dalian, Liaoning 116023, China)

摘要:目的:提高裙带菜的干燥速率,改善加工品质。方法:在不同微波功率密度、真空度、脉冲间歇条件下开展裙带菜微波真空干燥试验,建立其薄层干燥模型;并以干燥时间、感官品质、复水率、能耗、物料温度为指标,利用 $L_9(3^4)$ 正交试验对干燥工艺参数进行优化。结果:Page模型表征干燥过程的拟合度最好,有效水分扩散系数为 $2.38 \times 10^{-9} \sim 1.49 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$,且随微波功率密度的升高而增加。随着干燥温度的升高,焓变、熵变减小,吉布斯自由能变增大,裙带菜干燥活化能为 $4.51 \text{ kJ}/\text{mol}$ 。当微波功率密度为 $4.5 \text{ W}/\text{g}$,真空度为 80 kPa ,连续干燥 16 min 时,裙带菜的湿基含水率即可降至 12.30% ,能耗为 $0.04 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{g}$ 水,复水率为 1885.69% ,平均物料温度为 $26.71 \text{ }^\circ\text{C}$,叶片呈深绿色,平整且无焦糊及气泡产生。结论:微波真空干燥裙带菜速度快,品质可控,复水后的样品与新鲜样品几乎无差异,是一种适宜的加工方法。

关键词:裙带菜;微波真空干燥;传热传质;品质

Abstract: Objective: This study aimed to improve both the drying rate and quality of *Undaria pinnatifida*. **Methods:** Microwave

vacuum drying experiment was carried out under different microwave power density, vacuum degree and pulse intermittent conditions. The thin layer drying model was established and the mass and heat transfer parameters were calculated. The drying process parameters were optimized by $L_9(3^4)$ orthogonal test with indicators of drying time, sensory quality, rehydration rate, energy consumption and material temperature. **Results:** Page model was found fit the drying kinetics well, and the change of drying kinetics showed obvious dependence on energy contribution of drying conditions. The effective moisture diffusion coefficient ranged from 2.38×10^{-9} to $1.49 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ and increased with the microwave power density. The enthalpy and entropy decreased, while the Gibbs free energy increased with the increase of drying temperature. The drying activation energy of *U. pinnatifida* was $4.51 \text{ kJ}/\text{mol}$. When the microwave power density was $4.5 \text{ W}/\text{g}$, with vacuum degree 80 kPa , the moisture content was reduced to 12.30% within 16 min , and the energy consumption was $0.04 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{g H}_2\text{O}$, with rehydration rate of 1885.69% at an average drying temperature of $26.71 \text{ }^\circ\text{C}$. The leaves of *U. pinnatifida* were in dark green, flat and free of burning spots and bubbles. **Conclusion:** Microwave vacuum drying was a suitable method for drying *U. pinnatifida* with high efficiency, controllable quality. Most importantly, few difference between rehydrated specimen and fresh materials was found.

Keywords: *Undaria pinnatifida*; microwave vacuum drying; heat and mass transfer; quality

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2019YFD0901800);辽宁省教育厅项目(编号:JL202011);辽宁省海洋渔业厅项目(编号:201722)

作者简介:张倩,女,大连海洋大学实验师,硕士。

通信作者:张国琛(1965—),男,大连海洋大学教授,硕士。

E-mail: zhanguochen@dlou.edu.cn

收稿日期:2021-10-26

裙带菜是褐藻门温带性海藻,被誉为长寿菜,其多糖能够通过促进人淋巴细胞亚群表达和T细胞生长因子分泌,达到提高人体免疫能力、抗肿瘤的药理作用^[1-3]。其黏液中含有的褐藻酸和岩藻固醇可以降低人体血液中的胆固醇,避免脑血栓、动脉硬化和高血压的发生^[4]。此外,由于裙带菜具有生物质能含量高、生长快并能减少水体富营养化等优势^[5-6],已被列入最具开发利用潜力的生物质能资源行列。由于新鲜裙带菜含水率高达75%~95%,并且富含有机成分和矿物质,因此不论是将其作为食材、有机肥料、海洋药物或是清洁能源,都需在收获数天内迅速将其干燥,以降低水分活性及延缓微生物生长,从而获得较好的产品品质并减小贮藏空间^[7]。中国裙带菜年产量高达20万t,超过50%远销海外,其中主要以盐腌干品形式出口,年出口额近1.3亿美元,是中国重要的创汇产品,但由于对其营养物质保留需求的提高,淡干裙带菜在市场中越发具有优势。

目前,裙带菜常用的淡干方法为日光干燥,其卫生条件较差,产品品质不高,此外还有流化床干燥、热风干燥等,但干燥时间较长,生产效率较低^[8-9]。微波真空干燥能够将物料含水率快速降低至安全贮藏范围内,是一种高效节能的干燥方式^[10-11],与目前常用的生产干燥方式相比,可明显缩短干燥时间、降低能耗,已被应用于罗非鱼片^[12]、生姜^[13]、荔枝^[14]、银耳^[15]、绿茶^[16]、黄秋葵^[17]、蘑菇^[18]、酶^[19]等产品干燥中,而利用微波真空干燥技术加工裙带菜叶片的相关研究尚未见报道。研究拟在前期试验^[20]的基础上,探究不同微波功率密度、真空度及间歇比对裙带菜叶片微波真空干燥特性的影响,建立裙带菜微波真空干燥动力学模型,并计算其相关热力学性质参数,以期对裙带菜的快速、优质干燥加工提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料及预处理

裙带菜:大连海域成熟新鲜的裙带菜,去梗,将叶片剪成20 cm×10 cm的长条形状,于盐度3%的沸水中漂烫10 s,用凉水冲洗并沥干,测得初始干基含水率为94.275%,−20℃冷冻,干燥前取出自然解冻,每组试验选取15片,市售。

1.2 主要仪器设备

微波真空试验炉: MZ08S-1型,南京汇研微波系统工程有 限公司;

电热鼓风烘箱: 101A-5型,上海试验仪器厂有 限公司;

精密电子天平: JA-MP1100B型,上海精密科学仪器有 限公司。

1.3 微波真空干燥试验优化

1.3.1 微波功率密度 固定真空度90 kPa,连续间歇比,

考察微波功率密度(3,4,5 W/g)对干燥特性的影响。

1.3.2 真空度 固定微波功率密度4 W/g,连续间歇比,考察真空度(70,80,90 kPa)对干燥特性的影响。

1.3.3 间歇比 固定微波功率密度4 W/g,真空度90 kPa,考察间歇比(微波开启与关闭比值分别为10-20即10 s-on/20 s-off,20-10即20 s-on/10 s-off,连续30 s)对干燥特性的影响。

1.3.4 正交试验 根据单因素试验结果并结合实际生产需求,选取干燥时间较短、感观和复水效果较好的因素水平进行L₉(3⁴)正交试验。由于研究中,干燥时间、能耗、物料温度越小越好,复水率越大越好,因此正交试验以综合评分为指标进行工艺优化。在加权评分时,干燥时间、能耗、复水率和物料温度的权重赋值分别为−15,−20,50,−15。

1.4 微波真空干燥特性

1.4.1 水分比 按GB/T 5009.3-2003执行,干燥至干基含水率≤15.60%。

1.4.2 能耗 采用电能表测定。

1.4.3 干燥品质

(1) 感官特性:根据色泽、叶片平整度及产生气泡情况进行评定,颜色为绿色或深绿色、叶片平整无焦糊、无气泡产生为优。

(2) 复水率:将干裙带菜于100℃水浴10 min,于筛网上沥干水分,称量,按式(1)计算复水率。

$$R_r = \frac{G - G_0}{G_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

R_r ——复水率,%;

G_0 ——复水前裙带菜重量,g;

G ——复水后裙带菜重量,g。

(3) 物料温度:由干燥箱内的非接触式红外测温传感器实时监测物料表面温度,每5 min或10 min记录1次。由于裙带菜较薄,因此将其作为物料温度。

1.5 微波真空干燥动力学模型

选择如表1所示的2个常用的薄层干燥模型进行裙带菜干燥动力学研究^[21-23]。

干燥模型拟合程度优劣通常由决定系数(R^2)决定。 R^2 越大,越接近1,说明拟合程度越好^[22-23], R^2 定义为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (M_{Rexp,i} - M_{Rpre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (M_{Rexp,i} - \bar{M}_{Rpre,i})^2}, \quad (2)$$

式中:

$M_{Rpre,i}$ 、 $M_{Rexp,i}$ ——水分比的预测值和试验值;

N ——观测次数;

n ——回归模型中常数项个数。

1.5.1 水分有效扩散系数 裙带菜干燥以降速为主,运

表 1 常见的描述薄层干燥的数学模型

Table 1 Mathematial models that describe thin layer drying

模型	方程式	线性化处理数学模型
Henderson-Pabis model	$M_R = A \exp(-Kt)$	$-\ln M_R = -\ln A + Kt$
Page model	$M_R = \exp(-Kt^n)$	$\ln[-\ln(M_R)] = \ln K + n \ln t$

用 Fick 非稳态第二定律方程计算干燥过程中水分有效扩散系数^[24]。

$$\ln M_R = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} t, \quad (3)$$

式中:

D_{eff} ——物料的水分有效扩散系数, m^2/s ;

L ——海带的物料厚度, m ;

t ——干燥时间, s 。

1.5.2 热力学特性 根据艾琳过渡态理论^[25], 干燥过程中恒定速率 k 为:

$$k = \left(\frac{k_b T_{abs}}{h_p} \right) \exp\left(\frac{\Delta S}{R}\right) \exp\left(\frac{-\Delta H}{RT_{abs}}\right). \quad (4)$$

若干燥过程中褐变机理未发生变化, 则各含水率在干燥过程中应满足式(4)。对式(4)取对数, 乘以 RT_{abs} , 得

$$\Delta S = R \left[\ln k_0 - \ln \left(\frac{k_b}{h_p} \right) - \ln T_{abs} \right], \quad (5)$$

$$\Delta H = E_a - RT_{abs}, \quad (6)$$

$$\Delta G = \Delta H - T_{abs} \Delta S, \quad (7)$$

式中:

ΔH ——焓变, J/mol ;

ΔS ——熵变, $J/(mol \cdot K)$;

ΔG ——吉布斯自由能变, J/mol ;

k_b ——玻尔兹曼常数, J/K ;

h_p ——普朗克常数, J/s ;

R ——气体摩尔常数, $8.314 J/(mol \cdot K)$;

T_{abs} ——绝对温度, K ;

k ——干燥过程速率常数, s^{-1} 。

按式(8)计算干燥活化能 E_a 。

$$D_{eff} = D_0 \exp \left[-\frac{E_a}{R(T + 273.15)} \right], \quad (8)$$

式中:

D_0 ——物料扩散基数, m^2/s ;

E_a ——物料的干燥活化能, kJ/mol ;

R ——气体摩尔常数, $8.314 J/(mol \cdot K)$;

T ——裙带菜干燥温度, $^{\circ}C$ 。

将式(8)两边取对数得:

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R(T + 273.15)}. \quad (9)$$

因此, 水分有效扩散系数的自然对数 $\ln D_{eff}$ 与 $(T + 273.15)^{-1}$ 呈线性关系, 将该曲线进行线性拟合, 依据拟合直线斜率 $-\frac{E_a}{R}$, 计算海带的干燥活化能。

1.6 数据分析

利用 SPSS 软件对数据进行回归分析, 构建数学模型, 采用双尾 t 检验分析品质评价指标与热力学特性参数的相关性。

2 结果与分析

2.1 对干燥速率的影响

2.1.1 微波功率密度 由图 1(a)可知, 微波功率密度对裙带菜干燥速率有较大影响, 提高微波功率可以明显缩短干燥时间, 当微波功率密度分别为 3, 4, 5 W/g 时, 裙带菜干燥时间分别为 23, 18, 16 min。这是由于裙带菜叶片较薄, 水分由内向外迁移所需经过的路程较短, 极大的压力差使水分快速迁移至叶片表面, 水蒸气达到饱和并迅速蒸发除去, 因此干燥时间较短。此外, 由于微波能提供了干燥过程中水分蒸发所需的热量, 功率密度越大水分子吸收的微波能越多, 相互摩擦越剧烈, 故功率密度越大, 干燥时间越短^[26]。

2.1.2 真空度 由图 1(b)可知, 当真空度分别为 70, 80, 90 kPa 时, 裙带菜干燥时间分别为 21, 20, 18 min。即提高真空度可以缩短干燥时间, 是由于真空条件在物料内外部形成了较大的压力梯度, 有效降低了物料沸点从而

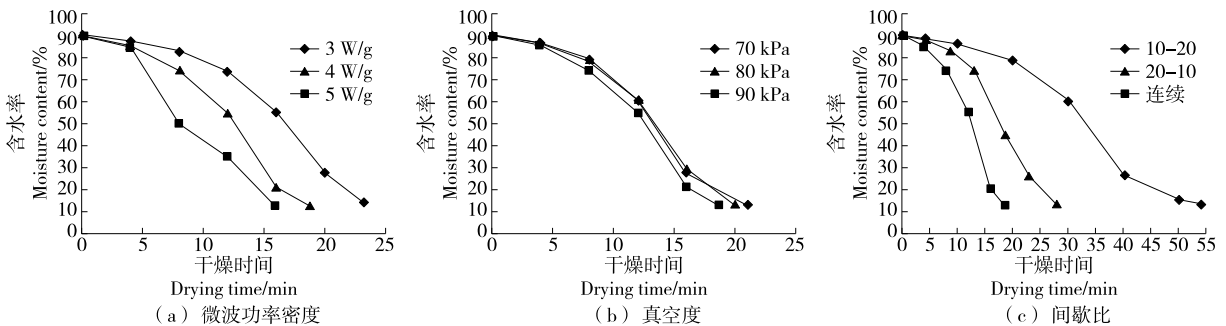


图 1 各因素对裙带菜微波真空干燥曲线的影响

Figure 1 Moisture curves of *Undaria pimatifida Suringar* with different factor

使其在较低温度下干燥成为可能,当微波功率密度和间歇比一定时,单位时间内获得的微波能相同,提高真空度即增大了压力梯度的推动作用,因此干燥速率有所提高^[18],但真空度对干燥速率的影响与微波功率密度相比不明显,与张继驰^[27]的结果一致。

2.1.3 间歇比 由图 1(c)可知,间歇比对裙带菜干燥速率影响较大,增大间歇比可以明显提高干燥速率,缩短干燥时间,当间歇比为 10-20、20-10 和连续时,裙带菜干燥时间分别为 54,28,18 min。这是由于微波功率密度一定时,工作周期内微波开启时间的增加使得提供的微波能和转换热能增加,进而加速了干燥。

2.2 干燥模型

由表 2 可知,相同参数下 $\ln[-\ln(M_R)]$ 和 $\ln t$ 之间的相关系数 R^2 为 0.818~0.970,其平均值更接近 1,因此,试验数据在 $\ln[-\ln(M_R)]-\ln t$ 坐标系内更接近线性关系,即 Page 模型 $M_R = \exp(-Kt^n)$ 更适合拟合该数据,与某些学者^[24,28]的结论一致。

依据不同试验条件下的微波真空功率(M)、真空度(V)以及 Page 模型中 k 和 n 值,利用 SPSS 拟合分析,求出各试验条件下 Page 模型中的参数 k 和 n 的回归方程及模型拟合方程为

$$\ln k = -5.541 + 0.453M - 0.037V, \quad (10)$$

$$n = 2.028 - 0.033M + 0.005V, \quad (11)$$

$$\ln[-\ln(M_R)] = -5.541 + 0.453M - 0.037V + (2.028 - 0.033M + 0.005V)\ln t. \quad (12)$$

2.2.1 干燥模型验证 由图 2 可知,干燥试验值与模型预测值曲线拟合良好,误差范围在 3%以内,因此该模型能够较好地反映裙带菜干燥中水分比的变化规律。

2.2.2 水分有效扩散系数 由式(3)可知,裙带菜干燥过程中水分比的自然对数 $\ln M_R$ 与干燥时间 t 呈线性关系,通过线性回归计算得出不同干燥条件下裙带菜水分有效扩散系数 D_{eff} 如表 3 所示。

由表 3 可知,当干燥功率密度升高时,裙带菜水分有效扩散系数升高,其变化范围为 $1.49 \times 10^{-9} \sim 2.38 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$;当干燥真空度从 70 kPa 上升到 90 kPa 时,裙带菜水分有效扩散系数从 $1.08 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 升高至 $1.62 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$;说明微波功率密度升高,真空度上升时能有效提高裙带菜在干燥过程中的水分有效扩散系数。这主要是由于微波功率密度升高降低了裙带菜内部水黏度,加剧了水分子振动,从而使得水分有效扩散系数增大;真空度加大,加快了裙带菜表面水分的汽化过程,并加大了裙带菜表面与内部的湿度梯度,使内部水分向表

表 2 不同干燥条件下曲线拟合参数

Table 2 Curve fitting parameters under different drying conditions

干燥条件	Henderson-Pabis model			Page		
	模型参数	评价参数		模型参数	评价参数	
3 W/g, 连续, 90 kPa	$\ln A = 0.341$	$k = 0.076$	0.782	$\ln K = -7.244$	$n = 2.413$	0.954
4 W/g, 连续, 90 kPa	$\ln A = 0.315$	$k = 0.100$	0.852	$\ln K = -6.297$	$n = 2.315$	0.970
5 W/g, 连续, 90 kPa	$\ln A = 0.272$	$k = 0.104$	0.795	$\ln K = -6.337$	$n = 2.346$	0.818
4 W/g, 连续, 70 kPa	$\ln A = 0.282$	$k = 0.084$	0.836	$\ln K = -6.553$	$n = 2.296$	0.956
4 W/g, 连续, 80 kPa	$\ln A = 0.256$	$k = 0.075$	0.703	$\ln K = -6.305$	$n = 2.141$	0.885
4 W/g, 20-10, 90 kPa	$\ln A = 0.333$	$k = 0.069$	0.848	$\ln K = -7.195$	$n = 2.304$	0.958
4 W/g, 10-20, 90 kPa	$\ln A = 0.335$	$k = 0.038$	0.891	$\ln K = -8.604$	$n = 2.309$	0.968

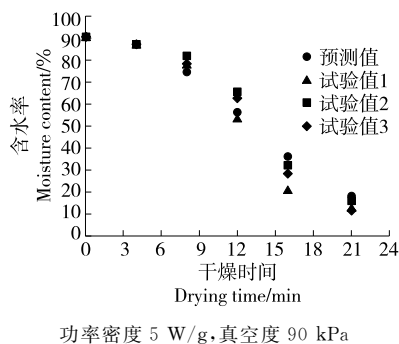


图 2 干燥模型验证

Figure 2 Drying model validation

表 3 不同干燥条件下裙带菜的水分有效扩散系数

Table 3 Effective water diffusivity under different drying conditions

干燥条件	拟合方程	有效扩散系数 D_{eff}
3 W/g, 连续, 90 kPa	$y = -0.300 1x + 0.648 2$	$1.491 6E-08$
4 W/g, 连续, 90 kPa	$y = -0.399 9x + 0.713 5$	$1.622 7E-09$
5 W/g, 连续, 90 kPa	$y = -0.587 1x + 0.901 3$	$2.382 0E-09$
4 W/g, 连续, 70 kPa	$y = -0.363 7x + 0.696 5$	$1.475 5E-09$
4 W/g, 连续, 80 kPa	$y = -0.351 4x + 0.689 5$	$1.080 8E-09$
4 W/g, 10-20, 90 kPa	$y = -0.352 8x + 0.652 6$	$1.431 4E-09$
4 W/g, 20-10, 90 kPa	$y = -0.330 4x + 0.688 0$	$1.340 7E-09$

面扩散的速率加快,因此水分扩散系数增大^[29-32]。

2.2.3 热动力学特性

(1) 干燥活化能:由表 7 可知,裙带菜的干燥活化能为 4.51 kJ/mol,低于南瓜片(18.59 kJ/mol)^[33]和南美白对虾(39.63 kJ/mol)^[34]的,可能是不同的干燥方式会影响物料的组织状态、结构等,从而间接影响干燥活化能。解国珍等^[35]研究发现,颗粒尺寸越大,质量传递越困难,其干燥活化能越大,与试验结果一致。

(2) 焓、熵和吉布斯自由能:由表 4 可知,所有的焓值均为正值,为吸热反应,随着微波功率密度的增加,焓值减小,即所需干燥能量较少,与 Cristian 等^[36]的结果一致。 ΔS 均小于 0,主要是由于当干燥温度升高时,熵变弱,表明系统的顺序增加,对熵不利。因为降低干燥温度会减少对物料水分子的激发,并改善物料系统中水分子的有序性,从而使熵减增加。同时,水分子失去了在平动和旋转方向上的自由,其熵变只能为负值。 ΔG 为正值,与 Nadi 等^[37]的结论一致。

2.3 对感官品质的影响

由表 5 可知,不同微波功率密度下的裙带菜品质差异较大,过低或过高的微波功率密度均无法获得满意的感官品质,当微波功率密度为 3 W/g 时,裙带菜叶片发生褐变,且出现了较大气泡,严重破坏了表面质量;当微波功率密度为 5 W/g 时,部分叶片出现烧焦的黄褐色斑点及小气泡,整体感观不理想。真空度和间歇比对物料感官品质也有一定影响,真空度较低或间歇比较小时,物料边缘均出现了较小的气泡,降低了感官品质。微波功率密度为 4 W/g,真空度为 90 kPa,连续干燥下获得的裙带菜感官品质最好,叶片为深绿色或褐色,叶面平整,无焦糊和气泡现象。

2.4 对复水品质的影响

由表 6 可知,微波功率密度、真空度及间歇比对裙带菜的复水率影响不显著,复水率为 1 880%~1 885%,其中微波功率密度为 4 W/g,真空度为 90 kPa,连续干燥条件下的复水率最高为 1 885.81%。复水后的裙带菜感观

表 4 不同干燥条件下的焓变、熵变和吉布斯自由能变

Table 4 Changes in enthalpy, entropy and Gibbs free energy under different drying conditions

干燥条件	温度/℃	热力学性质			活化能 $E_a/(kJ \cdot mol^{-1})$
		$\Delta H/(J \cdot mol^{-1})$	$\Delta S/(J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1})$	$\Delta G/(J \cdot mol^{-1})$	
3 W/g,连续,90 kPa	35.56	1.95	-157.10	48 501.08	
4 W/g,连续,90 kPa	39.50	1.91	-155.16	48 515.15	
5 W/g,连续,90 kPa	40.50	1.91	-157.62	49 441.08	
4 W/g,连续,70 kPa	41.54	1.90	-156.59	49 279.98	4.51
4 W/g,连续,80 kPa	45.72	1.86	-158.43	50 524.08	
4 W/g,10-20,90 kPa	27.87	2.01	-167.91	50 549.96	
4 W/g,20-10,90 kPa	29.75	2.00	-166.21	50 348.08	

表 5 微波真空干燥条件对裙带菜感观品质的影响

Table 5 Influence of different microwave vacuum drying conditions on sensory quality of *Undaria pinnatifida* Suringar

指标	微波功率密度/(W·g ⁻¹)			真空度/kPa			间歇比		
	3	4	5	70	80	90	10-20	20-10	连续
色泽	褐色	深绿色或褐色	深绿色,有黄褐色斑点	深绿色或褐色	深绿色	深绿色或褐色	绿色	深绿色	深绿色或褐色
叶片质量	较平整	平整	平整,部分出现焦糊	较平整	平整	平整	较平整	平整	平整
气泡	部分叶片中心有大气泡,边缘有小气泡	无	部分叶片中心及边缘有小气泡	边缘有小气泡	极少气泡	无	边缘有小气泡	无	无

表 6 不同微波功率密度、真空度和间歇比下裙带菜的复水率

Table 6 Rehydration rate of *Undaria pinnatifida* Suringar with different microwave powers, vacuum degrees and intermittent ratios %

微波功率密度/(W·g ⁻¹)			真空度/ kPa			间歇比		
3	4	5	70	80	90	10-20	20-10	连续
1 880.07	1 885.81	1 884.88	1 883.24	1 879.70	1 885.81	1 879.97	1 880.87	1 885.81

与预处理后的样品极其相似,即微波真空干燥不仅能够将裙带菜迅速干燥以易于贮藏,且复水后能够获得近乎新鲜样品的感官品质。

2.5 正交试验优化裙带菜的微波真空干燥工艺

根据单因素试验结果,选择微波功率密度、真空度和间歇比进行裙带菜微波真空干燥正交试验优化,各因素水平取值见表 7,试验设计及结果见表 8。

表 7 L₉(3⁴) 正交试验因素及水平

Table 7 Factors and levels of L₉(3⁴) orthogonal experiment

水平	A 微波功率密度/(W · g ⁻¹)	B 真空度/kPa	C 间歇比
1	3.5	80	10—20
2	4.0	85	20—10
3	4.5	90	连续

表 8 L₉(3⁴) 正交试验设计及结果

Table 8 Results of the L₉(3⁴) orthogonal experiment

试验号	A	B	C	干燥时间/ min	能耗/ (kW · h · g ⁻¹ 水)	复水率/ %	物料温 度/℃	综合评分
1	1	1	1	60	0.166 3	1 933.44	27.43	0.58
2	1	2	2	30	0.088 9	1 856.77	30.29	14.10
3	1	3	3	20	0.062 4	1 894.31	30.00	20.87
4	2	1	2	33	0.092 9	1 988.62	30.88	15.91
5	2	2	3	20	0.039 3	1 987.65	27.67	27.10
6	2	3	1	60	0.120 1	1 906.31	29.88	4.29
7	3	1	3	16	0.034 1	1 981.24	26.00	29.36
8	3	2	1	55	0.136 8	1 979.63	31.57	4.57
9	3	3	2	25	0.056 0	1 865.45	28.50	20.38
K ₁	35.55	45.84	9.44					
K ₂	47.30	45.78	50.38					
K ₃	54.31	45.54	77.33					
R	18.76	0.31	67.89					

由表 8 可知,各因素对综合评分的作用大小为间歇比>微波功率密度>真空度,最优参数组合为微波功率密度为 4.5 W/g,真空度为 80 kPa,连续干燥。在此条件下对裙带菜进行微波真空干燥验证实验,平行 3 次。结果表明,微波真空干燥 16 min 即可将物料含水率降至 12.30%,此时能耗为 0.037 5 kW · h/g 水,复水率为 1 885.69%,物料温度为 26.71 ℃,叶片呈深绿色,叶面平整,无焦糊及气泡产生,复水后的样品与新鲜样品几乎无差别。因此,采用正交优化试验得到的裙带菜微波真空干燥参数可靠,实现了裙带菜快速节能干燥,干制的裙带菜品质稳定,对实际生产具有指导意义。

3 结论

试验表明,微波真空干燥有效解决了裙带菜传统干燥方式速度慢、质量差的问题,能够将裙带菜迅速干燥,且复水后获得近乎新鲜样品的感官品质,设备操作简单,是一种适宜的生产加工方法。裙带菜的有效水分扩散系数为 2.38 × 10⁻⁹ ~ 1.49 × 10⁻⁸ m²/s,随微波功率密度的升高而增加。干燥活化能为 4.51 kJ/mol,熵变为 -155.16 ~ -158.43 J/(mol · K),吉布斯自由能变为 48 501.08 ~ 50 524.08 J/mol,焓变为 1.86 ~ 1.95 kJ/mol。裙带菜微波真空干燥的最佳工艺条件为微波功率密度

4.5 W/g,真空度 80 kPa,连续干燥 16 min 即可达到 12.30%湿基含水率要求,此时能耗为 0.037 5 kW · h/g 水,复水率为 1 885.69%,物料温度为 26.71 ℃,叶片呈深绿色,叶面平整,无焦糊及气泡产生,复水后的样品与新鲜样品几乎无差别。后续可围绕裙带菜品质形成机制开展进一步的研究。

参考文献

[1] 高淑清,张辉,邸红琴,等. 裙带菜多糖对体外周血淋巴细胞因子分泌的影响[J]. 河北医药, 2012, 34(22): 3 368-3 370.
GAO Shu-qing, ZHANG Hui, QIU Hong-qin, et al. Effects of Undaria pinnatifida polysaccharide on cytokine secretion in human peripheral blood[J]. Hebei Medical Journal, 2012, 34(22): 3 368-3 370.

[2] 王恩明,季宇彬. 裙带菜多糖的分离纯化及抗肿瘤活性[J]. 食品科技, 2011, 36(12): 199-202.
WANG En-ming, JI Yu-bin. Separation, purification and the anti-tumor activity of Undaria pinnatifida polysaccharides[J]. Food Science and Technology, 2011, 36(12): 199-202.

[3] 商晓辉,商晓丽,张勇,等. 裙带菜多糖对胃癌细胞 BGC-823 的影响[J]. 肿瘤防治研究, 2011, 38(2): 134-140.
SHANG Xiao-hui, SHANG Xiao-li, ZHANG Yong, et al. Effects of Undaria pinnatifida polysaccharide on GASTRIC cancer cell BGC-

- 823[J]. *Cancer Research on Prevention and Treatment*, 2011, 38(2): 134-140.
- [4] 张大雷, 葛炳艳, 李建, 等. 裙带菜多糖中硫酸基含量的测定[J]. *黑龙江医药*, 2012, 25(3): 335-336.
ZHANG Da-lei, GE Bing-yan, LI Jian, et al. Determination of sulfate group in *Undaria pinnatifida* polysaccharide[J]. *Heilongjiang Medicine Journal*, 2012, 25(3): 335-336.
- [5] 周洪英, 贾海红, 李娜. 两种褐藻对水溶液中 Zn^{2+} 的吸附研究[J]. *食品研究与开发*, 2012, 33(1):150-154.
ZHOU Hong-ying, JIA Hai-hong, LI Na. Study on the biosorption of Zn^{2+} by two brown algae[J]. *Food Research and Development*, 2012, 33(1): 150-154.
- [6] 周洪英, 李娜, 王学松, 等. 3 种常见海藻对废水中铜的生物吸附性能[J]. *江苏农业科学*, 2012, 40(1): 309-312.
ZHOU Hong-ying, LI Na, WANG Xue-song, et al. Biosorption of copper from wastewater by three common algae[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2012, 40(1): 309-312.
- [7] SABRINA Cox, NISSREEN Abughannam, SHILPI Gupta. Effect of processing conditions on phytochemical constituents of edible Irish seaweed *Himantalia Elongata*[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2011, 36: 348-363.
- [9] SHILPI Gupta, SABRINA Cox, NISSREEN Abu-Ghannam. Effect of different drying temperatures on the moisture and phytochemical constituents of edible Irish brown seaweed[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2011, 44: 1 266-1 272.
- [10] 程新峰, 潘玲, 李宁, 等. 菊芋微波真空干燥过程的水分扩散特性及模型拟合[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(6): 33-40.
CHENG Xin-feng, PAN Ling, LI Ning, et al. Moisture diffusivity characteristics and model fitting of Jerusalem Artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) during microwave vacuum drying[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(6): 33-40.
- [11] CARVALHO Gisandro Reis, MONTEIRO Ricardo Lemos, LAURINDO João Borges, et al. Microwave and microwave-vacuum drying as alternatives to convective drying in barley malt processing[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 73: 102770.
- [12] 薛广. 微波真空干燥罗非鱼片工艺优化及其相关特性研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2020: 12-45.
XUE Guang. Optimization of microwave vacuum drying tilapia fillet and related characteristics[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2020: 12-45.
- [13] 魏来. 基于二氧化碳浸渍前处理的生姜真空微波干燥行为及机理研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2019: 18-45.
WEI Lai. Behavior and mechanism research on vacuum-microwave drying of ginger based on carbonic maceration pretreatment [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2019: 18-45.
- [14] 李辉, 林河通, 袁芳, 等. 荔枝果肉微波真空干燥特性与动力学模型[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(6): 107-112.
LI Hui, LIN He-tong, YUAN Fang, et al. Microwave-vacuum drying characteristics and kinetics model of litchi pulp[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(6): 107-112.
- [15] 尹青, 赵有斌, 韩清华, 等. 微波真空干燥技术在农产品加工中的应用进展[J]. *农产品加工(学刊)*, 2013(21): 52-55.
YIN Qing, ZHAO You-bin, HAN Qing-hua, et al. Microwave vacuum drying technology in the processing of agricultural products[J]. *Academic Periodical of Farm Products Processing*, 2013(21): 52-55.
- [16] 王文成, 胡银凤, 饶建平, 等. 微波真空干燥速溶绿茶工艺优化[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(4): 202-207.
WANG Wen-cheng, HU Yin-feng, RAO Jian-ping, et al. The study of microwave vacuum drying technology of instant green tea[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(4): 202-207.
- [17] 郭正南. 黄秋葵微波真空干燥技术的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015: 11-41.
GUO Zheng-nan. Study on the microwave vacuum drying technology of okra [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015: 11-41.
- [18] 陈健凯, 林河通, 林艺芬, 等. 基于品质和能耗的杏鲍菇微波真空干燥工艺参数优化[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(3): 277-284.
CHEN Jian-kai, LIN He-tong, LIN Yi-fen, et al. Optimized technology of *Pleurotuseryngii* by microwave-vacuum drying based on quality and energy consumption[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(3): 277-284.
- [19] 吴健锋. 专一酶水解壳聚糖高效制备壳寡糖的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 60-77.
WU Jian-feng. Study on efficient preparation of chitosan oligosaccharide by specific enzyme hydrolysis [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018: 60-77.
- [20] 康鹏. 裙带菜干燥技术[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 1997(1): 176-177.
KANG Peng. Drying technology of qundai vegetable[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 1997(1): 176-177.
- [21] GOLESTANI R, RAISI A, AROUJALIAN A. Mathematical modeling on air drying of apples considering shrinkage and variable diffusion coefficient[J]. *Drying Technology*, 2013, 31(1): 40-51.
- [22] BALCELOS M S, ALMEIDA P F. Modelling of drying kinetic of potatoes taking into account shrinkage[J]. *Procedia Food Science*, 2011(1): 713-721.
- [23] CORRÊA P C, BOTELHO F M, OLIVEIRA G H H, et al. Mathematical modeling of the drying process of corn ears[J]. *Acta Scientiarum Agronomy*, 2011, 33(4): 575-581.
- [24] 应巧玲, 励建荣, 傅玉颖, 等. 食品薄层干燥技术的研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2010, 25(5): 115-119.
YING Qiao-ling, LI Jian-rong, FU Yu-ying, et al. Supercritical fluid extraction and fractionation of functional lipids areview[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2010, 25(5): 115-119.

- [25] FARID M M. Mathematical modeling of food processing[J]. *Contemporary Food Engineering*, 2010, 34(4): 22-42.
- [26] 张国琛, 李莎, 张倩, 等. 脱毒海星微波真空干燥工艺优化[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16): 289-295.
ZHANG Guo-chen, LI Sha, ZHANG Qian, et al. Optimization of microwave-vacuum drying for detoxified starfish[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(16): 289-295.
- [27] 张继驰. 金银花微波真空干燥特性及工艺优化的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015: 11-61.
ZHANG Ji-chi. Study on the microwave vacuum drying characteristics of *lonicera japonica* and optimization of the drying technology [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015: 11-61.
- [28] 郑炯, 张甫生, 阙建全, 等. 竹笋热风薄层干燥特性及动力学分析[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(2): 112-116.
ZHENG Jiong, ZHANG Fu-sheng, KAN Jian-quan, et al. Analysis of hot-air thin layer drying characteristics and kinetics model of bamboo shoots[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2014, 30(2): 122-116.
- [29] 邹三全, 刘显茜, 赵振超, 等. 猕猴桃切片流化床干燥特性与干燥动力学模型研究[J]. *食品与机械*, 2021, 37(4): 150-156.
ZOU San-quan, LIU Xian-xi, ZHAO Zhen-chao, et al. Study on drying characteristics and drying kinetic model of kiwi fruit slices in fluidized bed[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(4): 150-156.
- [30] BEIGI Mohsen. Influence of drying air parameters on mass transfer characteristics of apple slices[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2016, 52(10): 2 213-2 221.
- [31] 曾雅, 刘云宏, 张嘉怡, 等. 远红外辐射温度对猕猴桃干燥水分迁移的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(8): 143-147, 188.
ZENG Ya, LIU Yun-hong, ZHANG Jia-yi, et al. Effects of far-infrared radiation temperature on the moisture transfer of kiwifruit slices[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(4): 150-156.
- [32] 屈展平, 任广跃, 李叶贝, 等. 燕麦添加量对马铃薯复合面条品质特性的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(1): 186-192.
QU Zhan-ping, REN Guang-yue, LI Ye-bei, et al. Effect of adding oat flour on quality characteristics of potato compound noodles[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(1): 186-192.
- [33] EBRAHIM Sadeghi, KAMYAR Movagharnejad, ALI Haghighi Asl. Mathematical modeling of infrared radiation thin-layer drying of pumpkin samples under natural and forced convection[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(12): 3-13.
- [34] 员冬玲, 耿文广, 杜锐, 等. 南美白对虾过热蒸汽干燥特性及干燥数学模型[J]. *食品科学*, 2020, 41(3): 62-67.
YUN Dong-ling, GENG Wen-guang, DU Rui, et al. Drying characteristics and modelling of *penaeus vannamei* during superheated steam drying[J]. *Food Science*, 2020, 41(3): 62-67.
- [35] 解国珍, 贾力, 王瑞祥, 等. 物料温度和几何尺寸对动态干燥偏差活化能的影响[J]. *干燥技术与设备*, 2006, 4(1): 28-31.
JIE Guo-zhen, JIA Li, WANG Rui-xiang, et al. Effect of material temperature and geometry size on activation energy of dynamic drying deviation[J]. *Drying Technology and Equipment*, 2006, 4(1): 28-31.
- [36] COSTA C F, CORRÊA P C, VANEGAS J, et al. Mathematical modeling and determination of thermodynamic properties of jabuticaba peel during the drying process[J]. *Rev Bras Eng Agríc Ambient*, 2016, 20(6): 576-581.
- [37] NADI F, TZEMPELIKOS D. Vacuum drying of apples (cv. golden delicious): Drying characteristics, thermodynamic properties, and mass transfer parameters[J]. *Heat & Mass Transfer*, 2018(4): 1-14.
-
- (上接第 165 页)
- [26] GOZTEPE B, KAYACAN S, BOZKURT F, et al. Drying kinetics, total bioactive compounds, antioxidant activity, phenolic profile, lycopene and β -carotene content and color quality of Rosehip dehydrated by different methods[J]. *LWT*, 2022, 153: 112476.
- [27] FEDERICA T, ANNA L. Recent advances in controlling polyphenol oxidase activity of fruit and vegetable products[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2018, 50: 73-83.
- [28] 邓媛元, 汤琴, 张瑞芬, 等. 不同干燥方式对苦瓜营养与品质特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(2): 362-371.
DENG Yuan-yuan, TANG Qin, ZHANG Rui-fen, et al. Effects of different drying methods on nutritional and physical properties of *momordica charantia*[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2017, 50(2): 362-371.
- [29] 方长发, 乔方, 黄略略, 等. 不同贮藏条件对冻干荔枝色泽的影响[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(16): 335-337, 382.
FANG Chang-fa, QIAO Fang, HUANG Lue-lue, et al. Effects of different storage conditions on freeze-dried litchi pulp color[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(16): 335-337, 382.
- [30] DARICI M, SÜFER Ö, SIMSEK M. Determination of microwave drying and rehydration kinetics of green peppers with the bioactive and textural properties[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2021, 44(8): e13755.
- [31] HU Li-na, BI Jin-feng, JIN Xin, et al. Study on the rehydration quality improvement of shiitake mushroom by combined drying methods[J]. *Foods*, 2021, 10(4): 769-769.
- [32] PENG Jing, LU Lu, ZHU Ke-xue, et al. Effect of rehydration on textural properties, oral behavior, kinetics and water state of textured wheat gluten[J]. *Food Chemistry*, 2021, 376: 131934.
- [33] 李瑞杰, 张慇. 不同干燥方式对胡萝卜片吸湿性及品质的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2010, 29(3): 342-349.
LI Rui-jie, ZHANG Min. Drying methods affect the quality and hygroscopic capacity of carrot chips[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2010, 29(3): 342-349.