

刺梨不同干燥模型建立及综合品质分析

陈思奇, 顾苑婷, 王霖岚, 肖仕芸, 杜勃峰, 丁筑红*

(贵州大学酿酒与食品工程学院, 国家林业草原局刺梨工程技术研究中心,

贵州省农畜产品储藏与加工重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 为科学合理地选择刺梨果实人工干燥实用技术, 最大限度减少干制后原料品质变化和营养损失, 以刺梨鲜果与冻果为原料, 比较热风干燥和远红外干燥技术并构建干燥模型, 同时采用逼近理想解排序法 (technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS) 法和电子鼻技术评价其综合品质指标及风味特征差异, 确定最佳干燥技术条件。结果表明: Page模型对鲜果热风干燥、远红外干燥和冻果远红外干燥拟合度最高, Diffusion approximation模型对冻果热风干燥拟合度最好, 以上模型可以用来描述和预测刺梨的干燥进程。通过TOPSIS法和电子鼻技术得出, 刺梨冻果采用50 °C远红外干燥时, 干制品的复水比为7.41, 褐变度为0.103, VC含量损失率为29.39%, 总酚含量损失率为39.54%, 还原糖含量损失率为13.58%, 总黄酮含量损失率为11.09%, C_i 值为0.958 0, 最接近理想解, 且风味与鲜果最为接近, 说明该干燥方式及干燥条件下刺梨干制品综合品质最优。

关键词: 刺梨原料; 热风干燥; 远红外干燥; 干燥模型; 品质

Drying Modeling and Comprehensive Quality Analysis of *Rosa roxburghii* Tratt Fruit

CHEN Siqi, GU Yuanting, WANG Linlan, XIAO Shiyun, DU Bofeng, DING Zhuhong*

(National Forestry and Grassland Bureau *Rosa roxburghii* Tratt Engineering Technology Research Center,

Key Laboratory of Agricultural and Animal Products Store and Processing of Guizhou Province,

School of Liquor and Food Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: This study aimed to scientifically and reasonably select a practical drying technology for *Rosa roxburghii* Tratt fruit that allows minimum quality changes and nutritional losses during the drying process. Hot air drying and far-infrared drying were comparatively applied to fresh and frozen fruit, and the drying processes were modeled. Meanwhile, the technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) and electronic nose technology were applied respectively to evaluate the comprehensive quality and flavor characteristics of the dried products in order to determine the optimal drying conditions. The results showed that page model had the highest fitting degree for hot air and far-infrared drying of fresh fruit and far-infrared drying of frozen fruit, whereas the Diffusion approximation model revealed the best fitting degree for hot air drying of frozen fruit. The models could describe and predict the drying processes. When frozen fruit were dried by far-infrared drying at 50 °C, the rehydration rate was 7.41, the browning degree was 0.103, 29.39% of VC, 39.54% of total phenols, 13.58% of reducing sugar and 11.09% of total flavonoids were lost, and the C_i value was 0.958, which was the closest to the ideal solution; similarly, the flavor of the dried product was the closest to fresh fruit, indicating that the drying method and drying conditions provided the best comprehensive quality of dried *Rosa roxburghii* Tratt fruit.

Keywords: fresh fruit of *Rosa roxburghii* Tratt; hot air drying; far-infrared drying; drying model; quality

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190503-009

中图分类号: TS255.36

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2020) 03-0047-08

引文格式:

陈思奇, 顾苑婷, 王霖岚, 等. 刺梨不同干燥模型建立及综合品质分析[J]. 食品科学, 2020, 41(3): 47-54. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190503-009. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2019-05-03

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(31860446); 贵州省科学技术基金项目(黔科合基础[2019]1104); 贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2018]5781号)

第一作者简介: 陈思奇(1995—)(ORCID: 0000-0003-0791-7869), 男, 硕士研究生, 研究方向为食品加工与安全。

E-mail: gzxcsq@163.com

*通信作者简介: 丁筑红(1966—)(ORCID: 0000-0002-5407-4983), 女, 教授, 硕士, 研究方向为农产品加工与质量安全。

E-mail: gzdxdzh@163.com

CHEN Siqi, GU Yuanting, WANG Linlan, et al. Drying modeling and comprehensive quality analysis of *Rosa roxburghii* Tratt fruit[J]. Food Science, 2020, 41(3): 47-54. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190503-009. <http://www.spkx.net.cn>

刺梨 (*Rosa roxburghii* Tratt), 系薔薇科薔薇属多年生落叶小灌木^[1], 富含超氧化物歧化酶和VC、刺梨黄酮、多糖等物质^[2], 具有抗氧化、增强机体免疫力、防治癌症、预防动脉粥样硬化和延年益寿等功能^[3]。干燥脱水技术实用性强, 能有效延长食品货架期^[4], 在食品生产和加工中得到广泛应用。刺梨干制技术在刺梨开发利用中有着重要作用, 热风干燥及远红外干燥由于成本廉价, 对设备、环境及操作技术要求不高而得到广泛应用^[5-6]。Zhao Yuanyuan等^[7]研究香菇热风干燥和远红外干燥对比, 远红外干燥的水分扩散和蒸发速率较快, 耗时短, 干制品含水量低, 香菇制品均匀多孔, 品质优良。目前, 对刺梨果干制技术的研究特别是对不同原料、不同干燥技术及条件下刺梨果的干燥特性、干燥后的品质指标与风味的探究少有详细报道。

本研究通过分析刺梨鲜果与冻果原料热风、远红外干燥过程中含水量变化及干燥速率的变化规律, 探讨不同干燥技术对不同处理刺梨果实干燥特性的影响, 建立适合刺梨果的干燥模型及通过理化指标、风味品质综合对比, 筛选最佳干燥技术条件, 旨在为提高刺梨干制品品质以及为生产企业进行刺梨原料干燥加工提供科学实用的技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

刺梨(贵农5号品种), 摘于贵州省龙里县, 选取新鲜、无虫害、无霉烂变质且大小、色泽一致的果实, 清洗、滤干后备用。

无水乙醇、抗坏血酸、草酸、2,6-二氯靛酚钠、福林-酚试剂、芦丁、葡萄糖、焦性没食子酸等均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

101-3A电热鼓风干燥箱、GX-45B远红外干燥箱北京市泰斯特仪器有限公司; SG8200HPT超声波清洗器北京冠特超声仪器有限公司; TGL20M台式高速冷冻离心机湖南迈佳森仪器设备有限公司; T6新世纪紫外-可见分光光度计北京普析通用仪器有限公司; TG328A分析天平上海分析天平厂; FOX3000电子鼻指纹分析系统阿默思(上海)仪器贸易有限公司; HH-S数显六孔水浴锅上海欣茂仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 刺梨原料预处理

鲜果: 将果实用刀由花蒂处向下十字切开均分为4片, 片厚4.5 mm, 去蒂、去籽备用。

冻果: 将切分后的刺梨鲜果片放入-18 ℃冰柜中冷藏, 待刺梨果片完全结晶, 备用。

1.3.2 刺梨干燥处理

分别取500 g上述切分后刺梨鲜果片与-18 ℃结晶状态的冻果片均匀平铺于托盘, 采用热风干燥、远红外干燥直接进行干制, 分别设定50、60、70 ℃不同温度梯度, 每隔0.5 h随机取样进行水分质量分数测定, 直至水分质量分数趋于恒定, 根据水分比(moisture ratio, MR)变化建立干燥模型, 其中MR按公式(1)计算^[8]。

$$MR = \frac{\omega_t - \omega_e}{\omega_0 - \omega_e} \quad (1)$$

式中: ω_e 表示平衡时水分质量分数/%; ω_0 表示初始水分质量分数/%; ω_t 表示t时刻的水分质量分数/%。

1.3.3 干燥数学模型拟合

薄层干燥模型有很多种, 一般可分为理论方程、半理论方程、半经验方程和经验方程^[9], 本实验采用7种常用的经典薄层干燥数学模型^[10-15]以及根据曲线估计得到的二次多项式及三次多项式模型对刺梨鲜果和冻果热风干燥和远红外干燥的实验数据进行拟合, 如表1所示。根据R²、误差平方和(sum of the squared errors, SSE)、均方根误差(root mean square error, RMSE)、 χ^2 选择最佳干燥模型, 并对干燥曲线进行预测和描述^[16]。

表1 薄层干燥的数学模型表达
Table 1 Mathematical models for describing thin layer drying

模型序号	模型名称	模型方程
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Midilli and Kucuk	$MR = a\exp(-kt^n) + bt$
3	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
4	Logarithmic	$MR = b + a\exp(-kt)$
5	Wang and Sing	$MR = 1 + at + bt^2$
6	Hendersnn-Pahis	$MR = a\exp(-kt)$
7	Diffusion approximation	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$
8	Quadratic	$MR = a + bt + ct^2$
9	Cubic	$MR = a + bt + ct^2 + dt^3$

注: t为干燥时间/h; k为干燥常数; a、b、c、d、n为数学模型系数。

R^2 、SSE、RMSE、 χ^2 分别按公式(2)~(5)计算。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - \overline{MR}_{\text{pre},i})^2} \quad (2)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^N (\text{MR}_{\text{pre},i} - \text{MR}_{\text{exp},i})^2 \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{MR}_{\text{pre},i} - \text{MR}_{\text{exp},i})^2} \quad (4)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\text{MR}_{\text{exp},i} - \text{MR}_{\text{pre},i})^2}{N-n} \quad (5)$$

式中: N 表示实验次数; n 表示参数个数; $\text{MR}_{\text{exp},i}$ 表示实测水分比; $\text{MR}_{\text{pre},i}$ 表示预测水分比。

1.3.4 刺梨理化指标综合分析

根据热风、远红外干制后样品褐变度选择最佳干燥温度条件, 对最佳干燥温度条件下得到的样品进行理化指标测定。

褐变度测定^[17]: 取刺梨果5 g, 加入20 mL体积分数95%的乙醇溶液打浆, 静置90 min后4 000 r/min离心10 min, 取上清液以95%乙醇溶液做空白样, 在420 nm波长处比色, 以吸光度表征刺梨果褐变度。以上指标每组样品均平行测定3次。水分含量测定: 参考GB/T 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》^[18]; 还原糖含量测定: 采用3,5-二硝基水杨酸法^[19]; VC含量测定: 采用2,6-二氯酚靛酚滴定法^[20]; 黄酮含量测定: 采用紫外分光光度法^[21]; 总酚含量测定: 采用紫外分光光度法^[22]。还原糖、VC、黄酮、总酚含量损失率按公式(6)计算。复水比测定: 参考Hammami等^[23]的测定方法。

$$\text{损失率}/\% = \frac{\text{干制前含量} - \text{干制后含量}}{\text{干制前含量}} \times 100 \quad (6)$$

采用逼近理想解排序法 (technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS) 对多因素指标进行综合评价。TOPSIS综合评价法^[24-25]中的规范化决策矩阵 (R_{ij})、指标的理想解 (X^+)、指标的负理想解 (X^-)、目标与理想解的距离 (D_i^+)、目标与负理想解的距离 (D_i^-)、理想解的相对贴近度 (C_i) 分别按公式(7)~(12)计算。

$$R_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2} \quad (7)$$

$$X^+ = (X_1^+, X_2^+, \dots, X_n^+) \text{, } X_j^+ = \max(R_{ij}) \quad (8)$$

$$X^- = (X_1^-, X_2^-, \dots, X_n^-) \text{, } X_j^- = \min(R_{ij}) \quad (9)$$

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (R_{ij} - X_j^+)^2} \quad (10)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (R_{ij} - X_j^-)^2} \quad (11)$$

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} (0 \leq C_i \leq 1) \quad (12)$$

式中: x_{ij} 表示第*i*个评价对象在第*j*个指标上同趋势化后的取值; R_{ij} 为规范化矩阵; X^+ 为指标的理想解; X^- 为指标的负理想解; D_i^+ 为目标与理想解的距离; D_i^- 为目标与负理想解的距离; C_i 为理想解的相对贴近度。

1.3.5 电子鼻分析气味信息

准确称取2 g刺梨干样品于10 mL电子鼻专用顶空瓶中, 检测时, 顶空注射采用直接顶空方式, 载气流速150 mL/min, 注射体积1 mL, 注射针总体积2.5 mL, 注射速率2.5 mL/s, 注射针温度50 °C, 获取时间90 s。每个样品重复3次。

1.4 数据处理与分析

采用SPSS 22.0软件对干燥模型进行非线性回归拟合, Duncan检验法进行差异显著性分析, $P < 0.05$ 表示差异显著, Origin 2017和Excel 2016软件对实验数据处理作图。

2 结果与分析

2.1 不同干燥方式刺梨鲜果与冻果干燥特性

2.1.1 热风干燥与远红外干燥对刺梨鲜果干燥速率的影响

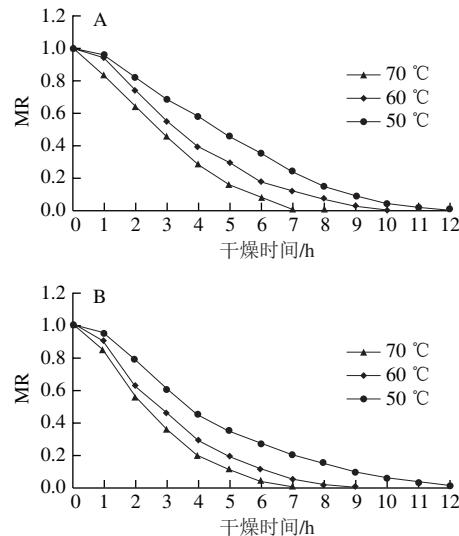


图1 热风干燥(A)与远红外干燥(B)条件下刺梨鲜果水分比变化

Fig. 1 Changes in moisture ratio during hot air drying (A) and far-infrared drying (B) of fresh *Rosa roxburghii* Tratt fruit

由图1可知, 在不同的干燥方式与干燥温度条件下, 刺梨鲜果热风干燥与远红外干燥过程中水分比随时间的延长呈现“S”型曲线变化。干燥前期, 水分比下降速率快于后期, 是因为干燥后期传送介质推动力逐渐减小, 且物料表面物质逐渐变得致密^[26]。温度与干燥速率之间呈正相关联系, 在50、60、70 °C条件下, 刺梨鲜果水分含量经热风干燥至恒定所需时间为12、10、8 h, 而经远红外干燥所需时间为12、8.5、7 h。相较与热风干燥而言, 远红外干燥由于物料吸收远红外射线引起物料内部质子共振, 物料内部温度常常比表面高, 受内高

外低的温度梯度和湿度梯度同时影响，热惯性减小，可不断将内部的水分转移出来，并扩散蒸发，因此可实现快速干燥^[27]。可见，除了50 °C，其余温度条件下，远红外干燥所需时间短、干燥速率快。

2.1.2 热风干燥与远红外干燥对刺梨冻果干燥速率的影响

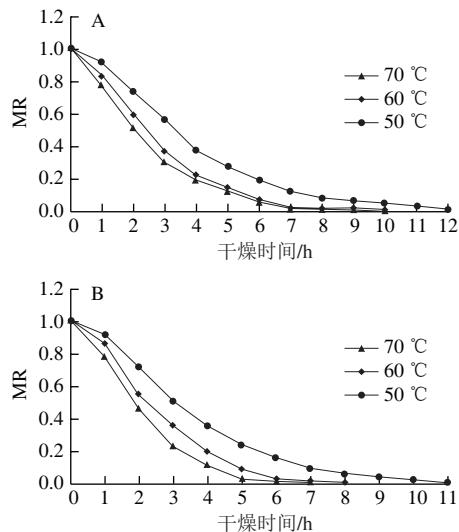


图2 热风干燥(A)与远红外干燥(B)条件下刺梨冻果水分比变化

Fig. 2 Changes in moisture ratio during hot air drying (A) and far-infrared drying (B) of frozen *Rosa roxburghii* Tratt fruit

由图2可知，刺梨冻果原料热风干燥与远红外干燥过程中水分比随时间的延长也呈现“S”型曲线变化。刺梨冻果干燥曲线趋势与鲜果干燥曲线相似，温度与干燥速率之间呈正相关联系。在50、60、70 °C条件下，刺梨冻果热风干燥至水分含量恒定时所需时间为12、10、8 h，经远红外干燥所需时间分别为11、8、6.5 h，可见，远红外干燥所需时间比热风干燥所需时间短。与2.1.1节结果比较，刺梨冻果干燥所需时间比刺梨鲜果所需时间短，可能是因为刺梨冻果经慢速冻结时，细胞外先形成冰晶，水分含量减少，使得细胞内渗透系数为负并向外渗水，由于形成较大冰晶体，刺梨冻果的细胞壁、细胞膜等结构留下多孔性通道，细胞的通透性增大，加快了水分的迁移，这与热扩散的方向一致，因此加快了脱水速率，干燥时间也随之缩短^[28]。

2.1.3 不同干燥温度对刺梨褐变度的影响

由图3可以看出，干燥温度越高，刺梨干制品的褐变度越大，这主要是发生非酶褐变导致褐变度加深^[29]。70 °C时褐变度最高，其原因是刺梨丰富的抗坏血酸受溶解氧的影响迅速分解成脱氢抗坏血酸，经脱水脱羧后产生还原酮参加Maillard反应，Maillard反应的速率随温度升高大大加快；其次是热风干燥与远红外干燥的鼓风加热循环增加了刺梨表面与氧气的接触面积，高温时大量醌类物质形成，进一步氧化形成黑色素使样品颜色加深^[30]。由于抗坏血酸的氧化程度与褐变具有直接关联性^[31]，

因此，褐变度的高低可以作为刺梨干燥的品质参考指标。50 °C条件下褐变度最低，为保证刺梨干制品品质，以刺梨热风干燥与远红外干燥的温度50 °C为宜。

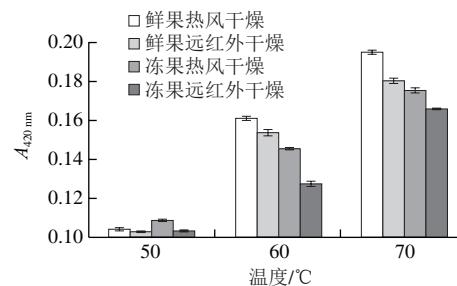


图3 不同干燥方式对刺梨褐变度的影响

Fig. 3 Effect of different drying methods on browning degree of *Rosa roxburghii* Tratt fruit

2.2 干燥模型的建立

2.2.1 不同干燥方式数学模型拟合结果分析

为了确定刺梨干燥动力学变化规律，选择合适的数学模型描述刺梨的干燥过程，通过SPSS 22.0软件进行非线性回归拟合，Excel 2016软件对实验数据进行绘图，其中决定系数R²越大，SSE、RMSE和χ²越小，模型拟合程度越高^[32]。

表2 刺梨鲜果热风干燥与远红外干燥数学模型及其拟合结果

Table 2 Mathematical models and fitting results for hot-air drying and far-infrared drying of fresh *Rosa roxburghii* Tratt fruit

模型	温度/°C	热风干燥				远红外干燥			
		R ²	χ ²	SSE	RMSE	R ²	χ ²	SSE	RMSE
	50	0.928	0.009 54	0.114 48	0.161 32	0.957	0.005 29	0.063 51	0.139 23
Newton	60	0.945	0.007 41	0.074 06	0.157 29	0.954	0.006 36	0.057 24	0.154 68
	70	0.953	0.006 36	0.050 86	0.158 30	0.956	0.006 29	0.044 05	0.161 97
平均值		0.942	0.007 77	0.079 80	0.158 97	0.956	0.005 98	0.054 93	0.151 96
Midilli and Kucuk	50	0.969	0.004 20	0.037 82	0.122 31	0.948	0.006 15	0.055 31	0.134 50
	60	0.957	0.005 80	0.040 59	0.135 33	0.957	0.005 57	0.033 39	0.135 18
	70	0.964	0.004 75	0.023 76	0.130 87	0.973	0.003 89	0.015 56	0.124 87
平均值		0.963	0.004 92	0.034 06	0.129 50	0.959	0.005 20	0.034 75	0.131 52
Page	50	0.997	0.000 42	0.004 59	0.072 19	0.997	0.000 43	0.004 77	0.072 89
	60	0.998	0.000 32	0.002 91	0.070 03	0.997	0.000 41	0.003 29	0.075 74
	70	0.997	0.000 49	0.003 41	0.080 55	0.999	0.000 24	0.001 44	0.068 87
平均值		0.997	0.000 41	0.003 64	0.074 26	0.998	0.000 36	0.003 17	0.072 50
Logarithmic	50	0.990	0.001 56	0.015 56	0.009 60	0.990	0.001 54	0.015 38	0.097 67
	60	0.987	0.002 19	0.017 54	0.109 73	0.987	0.002 27	0.015 88	0.112 26
	70	0.993	0.001 20	0.007 22	0.097 17	0.989	0.002 24	0.011 12	0.114 81
平均值		0.990	0.001 65	0.013 44	0.072 17	0.989	0.002 02	0.014 13	0.108 25
Wang and Sing	50	0.987	0.001 83	0.020 14	0.104 48	0.988	0.001 55	0.017 10	0.100 29
	60	0.985	0.002 17	0.019 57	0.112 77	0.989	0.001 66	0.013 29	0.107 37
	70	0.996	0.000 69	0.004 86	0.007 75	0.991	0.001 56	0.009 37	0.110 00
平均值		0.989	0.001 56	0.014 86	0.075 00	0.989	0.001 59	0.013 25	0.105 89
Hendersnn-Pahis	50	0.949	0.007 37	0.081 06	0.147 99	0.972	0.003 77	0.041 49	0.125 17
	60	0.961	0.005 76	0.051 80	0.143 84	0.965	0.005 41	0.043 28	0.144 24
	70	0.962	0.005 98	0.041 87	0.150 78	0.964	0.005 91	0.035 47	0.153 43
平均值		0.957	0.006 37	0.058 24	0.147 54	0.967	0.005 03	0.040 08	0.140 95

续表2

模型	温度/℃	热风干燥				远红外干燥			
		R ²	χ ²	SSE	RMSE	R ²	χ ²	SSE	RMSE
Diffusion approximation	50	0.990	0.00149	0.01642	0.09928	0.998	0.00030	0.00335	0.06673
	60	0.998	0.00034	0.00304	0.07080	0.997	0.00049	0.00394	0.07923
	70	0.992	0.00127	0.00887	0.10230	0.998	0.00037	0.00219	0.07648
平均值		0.993	0.00103	0.00944	0.09079	0.998	0.00039	0.00316	0.07415
Quadratic	50	0.993	0.00114	0.01142	0.09067	0.992	0.00112	0.01122	0.09027
	60	0.991	0.00152	0.01212	0.10004	0.993	0.00131	0.00918	0.09788
	70	0.997	0.00057	0.00341	0.08055	0.993	0.00146	0.00708	0.10256
平均值		0.994	0.00108	0.00898	0.09042	0.993	0.00130	0.00916	0.09690
Cubic	50	0.998	0.00028	0.00256	0.06239	0.992	0.00124	0.01118	0.09019
	60	0.993	0.00141	0.00986	0.09501	0.993	0.00136	0.00817	0.09507
	70	0.999	0.00012	0.00062	0.05260	0.994	0.00142	0.00568	0.09706
平均值		0.996	0.00060	0.00435	0.07000	0.993	0.00134	0.00834	0.09411

通过对表2中9种模型R²值对比可知, 刺梨鲜果热风干燥Page模型、Logarithmic模型、Diffusion approximation模型、Quadratic模型、Cubic模型的决定系数R²均在可接受数值的范围内, 即R²>0.99, 其中Page模型拟合后平均R²为0.997, 拟合程度最高, χ²为0.000 41, SSE为0.003 64, RMSE为0.074 26, 均优于其他模型, 故Page模型为预测刺梨鲜果热风干燥特性最适合的数学模型。刺梨鲜果远红外干燥Page模型的平均决定系数R²为0.998, χ²为0.000 36, SSE为0.003 17, RMSE为0.072 50, 拟合程度最高, 故Page模型为预测刺梨鲜果远红外干燥特性最适合的数学模型。

表3 刺梨冻果热风干燥与远红外干燥数学模型及其拟合结果

Table 3 Mathematical models and fitting results for hot-air drying and far-infrared drying of frozen *Rosa roxburghii* Tratt fruit

模型	温度/℃	热风干燥				远红外干燥			
		R ²	χ ²	SSE	RMSE	R ²	χ ²	SSE	RMSE
Newton	50	0.962	0.00469	0.05632	0.13511	0.958	0.00540	0.05943	0.14253
	60	0.971	0.00376	0.03764	0.13281	0.953	0.00672	0.05374	0.16049
	70	0.981	0.00259	0.02007	0.12546	0.964	0.00531	0.03720	0.15527
平均值		0.971	0.00368	0.03801	0.13112	0.958	0.00581	0.05012	0.15276
Midilli and Kucuk	50	0.909	0.01019	0.09169	0.15262	0.922	0.00926	0.07406	0.15059
	60	0.908	0.00959	0.06715	0.15348	0.947	0.00709	0.03544	0.14463
	70	0.956	0.00461	0.02304	0.12987	0.946	0.00685	0.02738	0.14382
平均值		0.924	0.00813	0.06063	0.14532	0.938	0.00773	0.04563	0.14635
Page	50	0.998	0.00021	0.00231	0.06080	0.999	0.00014	0.00141	0.05594
	60	0.999	0.00005	0.00045	0.04391	0.998	0.00028	0.00199	0.07040
	70	0.999	0.00016	0.00111	0.06084	0.999	0.00005	0.00027	0.04532
平均值		0.999	0.00014	0.00129	0.05518	0.999	0.00016	0.00122	0.05722
Logarithmic	50	0.985	0.00221	0.02209	0.10692	0.985	0.00230	0.02074	0.10955
	60	0.988	0.00198	0.01584	0.10697	0.983	0.00363	0.02018	0.12563
	70	0.994	0.00103	0.00618	0.09346	0.985	0.00317	0.01548	0.12471
平均值		0.989	0.00174	0.01470	0.10245	0.984	0.00303	0.01880	0.11996
Wang and Sing	50	0.989	0.00155	0.01700	0.10015	0.989	0.00161	0.01612	0.10286
	60	0.994	0.00089	0.00805	0.09031	0.988	0.00194	0.01359	0.11381
	70	0.995	0.00068	0.00479	0.08769	0.993	0.00125	0.00752	0.10411
平均值		0.993	0.00104	0.00995	0.09272	0.990	0.00160	0.01241	0.10693
Hendersman-Pahis	50	0.974	0.00357	0.03925	0.12345	0.970	0.00422	0.04224	0.13087
	60	0.977	0.00331	0.02981	0.12528	0.963	0.00617	0.04320	0.15197
	70	0.984	0.00236	0.01651	0.11949	0.969	0.00530	0.03180	0.14930
平均值		0.978	0.00308	0.02852	0.12274	0.967	0.00523	0.03908	0.14405

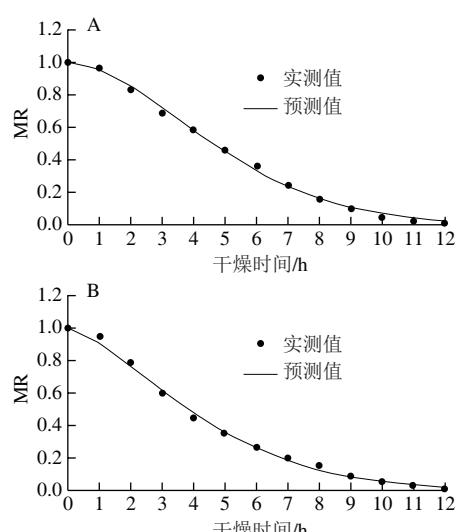
续表3

模型	温度/℃	热风干燥				远红外干燥			
		R ²	χ ²	SSE	RMSE	R ²	χ ²	SSE	RMSE
Diffusion approximation	50	0.999	0.00012	0.00129	0.05256	0.999	0.00009	0.00087	0.04958
	60	0.999	0.00015	0.00139	0.05822	0.998	0.00039	0.00276	0.07640
	70	0.999	0.00017	0.00120	0.06207	0.999	0.00021	0.00128	0.06687
平均值		0.999	0.00015	0.00129	0.05762	0.999	0.00023	0.00164	0.06428
Quadratic	50	0.992	0.00124	0.01240	0.09255	0.992	0.00122	0.01096	0.09340
	60	0.994	0.00093	0.00744	0.08855	0.991	0.00165	0.00987	0.10506
	70	0.995	0.00080	0.00477	0.08728	0.994	0.00124	0.00620	0.09921
平均值		0.994	0.00099	0.00820	0.08946	0.992	0.00137	0.00901	0.09922
Cubic	50	0.992	0.00137	0.01234	0.09244	0.992	0.00136	0.01090	0.09323
	60	0.995	0.00089	0.00625	0.08478	0.993	0.00172	0.00860	0.10151
	70	0.997	0.00069	0.00347	0.08090	0.994	0.00151	0.00602	0.09848
平均值		0.995	0.00083	0.00735	0.08604	0.993	0.00153	0.00851	0.09774

通过对表3中9种模型R²值对比可知, 刺梨冻果热风干燥R²>0.99的模型为Page模型、Wang and Sing模型、Diffusion approximation模型、Quadratic模型和Cubic模型。其中Diffusion approximation模型拟合后R²=0.999, 拟合程度最高, χ²为0.000 15, SSE为0.001 29, RMSE为0.057 62, 均优于其他模型, 故Diffusion approximation模型为预测刺梨冻果热风干燥特性最适合的数学模型。Page模型在刺梨冻果远红外干燥中有最高的拟合度, R²为0.999, χ²为0.000 16, SSE为0.001 22, RMSE为0.057 22, 故Page模型为预测刺梨冻果远红外干燥特性最适合的数学模型。

2.2.2 模型验证结果

为了对所选择的模型进一步验证, 取建模以外的实验数据对该模型进行拟合分析。分别取500 g刺梨鲜果与冻果分别进行50 ℃热风、远红外干燥, 得到的每组实验数据的平均值作为实测值样本, 分别验证刺梨鲜果热风干燥Page模型(A)、刺梨鲜果远红外干燥Page模型(B)、刺梨冻果热风干燥Diffusion approximation模型(C)和刺梨冻果远红外干燥Page模型(D)的结果见图4。



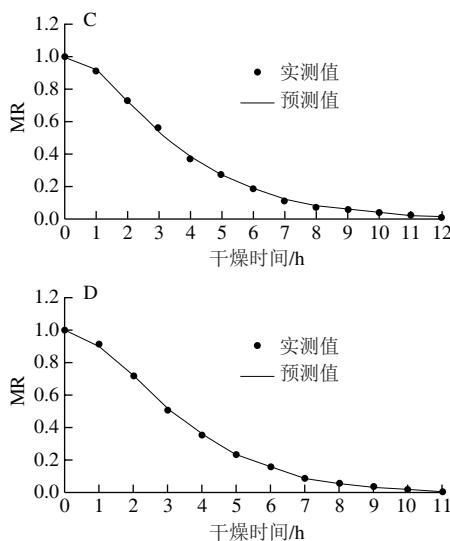


图4 刺梨鲜果热风干燥Page (A)、刺梨鲜果远红外干燥Page (B)、刺梨冻果热风干燥Diffusion approximation (C) 和刺梨冻果远红外干燥Page (D) 模型拟合

Fig. 4 Page model fitting of hot air drying of fresh fruit (A), Page model fitting of far infrared drying of fresh fruit (B), Diffusion approximation model fitting of hot air drying of frozen fruit (C) and Page model fitting of far infrared drying of frozen fruit (D)

由图4可知,4种条件下所得的模型方程与实测值基本相符,采用Page模型拟合的鲜果热风干燥(A)、鲜果远红外干燥(B)、冻果远红外干燥(D)的决定系数 R^2 分别为0.997、0.997和0.999;采用Diffusion approximation模型拟合的冻果热风干燥(C)的决定系数 $R^2=0.999$,说明模型可以用来预测刺梨干燥过程中水分含量的变化,但是干燥条件和干燥方式对物料干燥特性影响很大,所对应的最佳干燥模型也不同,因此需要针对性选择。

2.3 不同干燥方式刺梨鲜果与冻果品质分析

2.3.1 不同干燥方式刺梨鲜果与冻果理化指标综合评定

在以上实验中,以褐变度为指标选择出热风、远红外干燥最佳温度50℃进行干燥,分别对2种条件下得到的鲜果与冻果干制品进行成分分析,得到表4,并对得到的数据进行综合评价。

表4 50℃条件下不同干燥方式对刺梨鲜果、冻果品质的影响
Table 4 Effects of different drying methods at 50℃ on the quality of fresh and frozen fruit

干燥条件	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
	复水比	褐变度	VC含量 损失率/%	总酚含量 损失率/%	还原糖含量 损失率/%	总黄酮含量 损失率/%
鲜果、热风	5.75±0.11 ^a	0.104±0.000 ^b	59.54±0.53 ^a	62.19±0.97 ^a	17.11±0.77 ^a	11.64±0.14 ^b
鲜果、远红外	6.83±0.09 ^b	0.103±0.000 ^b	58.15±0.53 ^a	60.68±0.79 ^a	15.59±0.36 ^b	10.69±0.22 ^c
冻果、热风	6.54±0.12 ^b	0.109±0.000 ^a	31.41±0.58 ^b	49.99±1.02 ^b	15.20±0.34 ^b	13.15±1.23 ^a
冻果、远红外	7.41±0.05 ^a	0.103±0.000 ^b	29.39±0.46 ^b	39.54±0.81 ^c	13.58±0.55 ^c	11.09±0.53 ^b

注: 同列肩标小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

由表4可知,热风干燥的刺梨冻果褐变度0.109,显著高于另外3组样品($P<0.05$)。冻果远红外干燥的复水比比为7.41,显著高于另外3组样品($P<0.05$)。冻

果远红外干燥VC含量的损失率最少,为29.39%,其次是冻果热风干燥,鲜果热风干燥VC含量损失率最大,为冻果远红外干燥的2.03倍。由于酚类物质在干燥过程中自动氧化成醌类,与亲核物质结合并经重排产生二酚二聚体,最终形成褐色多聚体^[33],导致总酚含量减少;刺梨还原糖干燥过程中为羰基化合物反应底物,发生Maillard反应,含量也有所下降^[34]。4种干燥条件中,冻果远红外干燥总酚含量损失率(39.54%)和还原糖含量损失率(13.58%)最低,且均与其他3组差异显著($P<0.05$)。远红外干燥对总酚与还原糖的影响小于热风干燥,彭邦远^[35]、郭刚军^[36]等在研究不同干燥方式对刺梨果渣、辣木叶品质影响中也有类似结果。冻果热风干燥总黄酮含量损失率最高(13.15%),与其他组相比差异显著($P<0.05$),其次为鲜果热风干燥(11.64%),损失最低的为鲜果远红外干燥(10.69%)。李彦勋等^[37]对比了远红外干燥与热风干燥对淮山片活性成分的影响,发现远红外干燥黄酮含量损失率低于热风干燥,与刺梨干燥结果一致。

根据TOPSIS法的基本原理,将不同干制条件下得到的干制品各个指标都量化成可比较的规范化标准值,借助多目标决策问题的“理想解” X^+ 和“负理想解” X^- ,按照 C_i 大小排序,比较不同干制条件下成品的品质差异。

表5 规范化决策矩阵

Table 5 Standardized decision matrix

干燥条件	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
鲜果、热风	0.4317	0.5032	0.3203	0.4056	0.4446	0.4956
鲜果、远红外	0.5128	0.5081	0.3280	0.4157	0.4880	0.5397
冻果、热风	0.4910	0.4801	0.6072	0.5046	0.5004	0.4387
冻果、远红外	0.5564	0.5081	0.6489	0.6380	0.5602	0.5202

根据刺梨鲜果与冻果不同干燥方法的各个指标计算和评判的规范化变化矩阵(表5),从而得到指标的理想解和负理想解即为最优值向量和最劣值向量。

指标的理想解(最优值向量): $X^+ = (0.5564, 0.5081, 0.6489, 0.6380, 0.5602, 0.5202)$

指标的负理想解(最劣值向量): $X^- = (0.4317, 0.4801, 0.3203, 0.4056, 0.4446, 0.4387)$

按照指标的理想解与负理想解,计算各指标值与最优值和最劣值的距离及其与最优值的相对接近程度 C_i ,并按值大小进行排序,其中 C_i 值在0~1之间,该值越接近1表示评价对象越接近最优水平,即 C_i 值越大,干制品品质最佳,否则反之。

从表6可以得出,刺梨冻果远红外干燥方法 C_i 值为0.9580,最接近理想解,说明了50℃冻果远红外干燥干制品理化品质最佳。这与彭邦远等^[35]在刺梨果渣干燥品质分析中的结论相似。

表 6 TOPSIS计算结果
Table 6 Results of TOPSIS

干燥条件	D^+	D^-	C_i	名次
鲜果、热风	0.439 2	0.061 4	0.122 7	4
鲜果、远红外	0.399 4	0.140 0	0.259 5	3
冻果、热风	0.195 9	0.314 2	0.616 0	2
冻果、远红外	0.019 5	0.445 3	0.958 0	1

2.3.2 不同干燥方式刺梨鲜果与冻果电子鼻检测

电子鼻对获取样本的气味信息非常敏感，挥发性化合物的微小变化可能导致传感器响应的差异^[38]。因此，对50 °C条件下鲜果热风干燥、鲜果远红外干燥、冻果热风干燥、冻果远红外干燥干制样品与鲜果样品进行电子鼻风味特征差异比较，对样品的传感器信号数据进行分析，获取每个传感器的最大响应值，并把每个样12个传感器最大响应值的平均值按照间隔30°均匀排列在圆周上，形成雷达图，如图5所示。

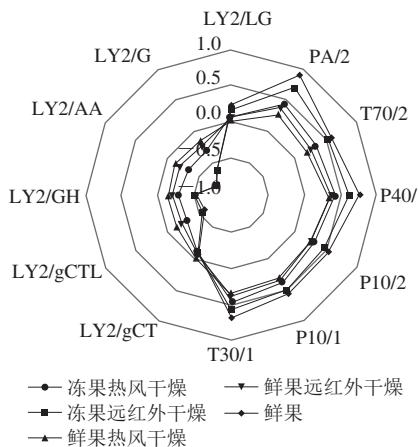


图 5 4 种刺梨干制品及鲜果对照组电子鼻指纹图谱

Fig. 5 Electronic nose fingerprints of four dried products and fresh fruit

由图5可知，在Sensor chamber 2中6个传感器T30/1、P10/1、P10/2、P40/1、T70/2、PA/2的响应强度较大，主要对烃类、醇类、芳香化合物、有机溶剂敏感^[39]，与刺梨果中的特征性风味化合物种类相吻合^[40]，FOX3000电子鼻指纹分析系统较好地区分了不同干制样品间挥发性物质的差异。

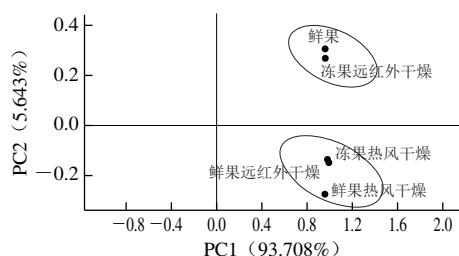


图 6 4 种刺梨干制品及鲜果对照组电子鼻信息的主成分分析

Fig. 6 Principal component analysis of electronic nose data for four dried products and fresh fruit

采用SPSS 数据处理软件对不同样品传感器最大响应值进行主成分分析(principal component analysis, PCA)，由图6可知，PC1和PC2的贡献率分别为93.708% 和5.643%，总贡献率为99.351%，主成分1、2包含样品的大部分信息。5种样品数据点互不重叠，区分明显，说明PCA能够很好地区分不同样品的挥发性风味。5个样品根据距离的远近分为两类，冻果远红外干燥组相较于另外3组，与鲜果对照组更为接近，为第1类。冻果热风干燥组、鲜果远红外和热风干燥组主成分具有相似性，为第2类。从分类来看，冻果远红外干燥组与鲜果风味最为接近，说明了冻果50 °C远红外干燥样品的鲜果特征性挥发性风味物质保留程度大于其他样品，其风味更优。

3 结 论

不同干燥方式及温度条件对刺梨鲜果与冻果品质影响差异显著。通过对Newton等9种常见的薄层干燥模型进行非线性拟合，Page模型对鲜果热风干燥、远红外干燥和冻果远红外干燥拟合度最高，Diffusion approximation模型对冻果热风干燥拟合度最好，以上模型可以用来描述和预测刺梨的干燥进程。

热风干燥、远红外干燥在温度为50 °C时褐变度最低，干燥品质最好，因此对热风、远红外50 °C干燥条件下的刺梨鲜果和冻果干制品进行品质分析和风味评价，并结合TOPSIS法进行综合评判，干燥方式接近理想解的顺序是：冻果远红外干燥>冻果热风干燥>鲜果远红外干燥>鲜果热风干燥，其中冻果远红外条件下干燥，刺梨干制品各指标最优，复水比为7.41，褐变度为0.103，VC含量损失率为29.39%，总酚含量损失率为39.54%，还原糖含量损失率为13.58%，总黄酮含量损失率为11.09%。电子鼻结合PCA结果表明冻果远红外干燥组与鲜果风味最为接近，说明了冻果50 °C远红外干燥样品的鲜果特征性挥发性风味物质保留程度大于其他样品，其风味更优。综上所述，经色泽、营养、风味等综合评价，与其他干燥方式相比，刺梨果经过-18 °C完全冻结至结晶后进行远红外干燥，外观色泽稳定，能最大限度保存刺梨中营养物质，鲜果特征风味保留程度最高。

参考文献：

- [1] 彭邦远, 张洪礼, 孙小静, 等. 热处理刺梨汁香气物质的SPME-GC-MS检测与主成分分析[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 230-236. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201806036.
- [2] 董李娜, 潘苏华. 刺梨的研究进展[J]. 江苏中医药, 2007, 39(8): 78-80. DOI:10.3969/j.issn.1672-397X.2007.08.04.
- [3] 曾芳芳, 罗自生. 刺梨营养成分的研究进展[J]. 浙江农业科学, 2015, 56(11): 1753-1757. DOI:10.16178/j.issn.0528-9017.20151116.
- [4] YANG W J, YU J, PEI F, et al. Effect of hot air drying on volatile compounds of *Flammulina velutipes* detected by HS-SPME-GC-

- MS and electronic nose[J]. *Food Chemistry*, 2016, 196(1): 860-866. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.09.097.
- [5] ONWUDE D I, HASHIM N, CHEN G. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 57: 132-145. DOI:10.1016/j.tifs.2016.09.012.
- [6] XU C C, LI Y F, YU H N. Effect of far-infrared drying on the water state and glass transition temperature in carrots[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 136: 42-47. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2014.03.022.
- [7] ZHAO Yuanyuan, BI Jinfeng, YI Jianyong, et al. Comparison of dynamic water distribution and microstructure formation of shiitake mushrooms during hot air and far infrared radiation drying by low-field nuclear magnetic resonance and scanning electron microscopy[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(6): 2826-2834. DOI:10.1002/jsfa.9494.
- [8] 黄锋, 陈清, 王乐, 等. 片烟增湿与干燥的薄层动力学模型[J]. *中国烟草学报*, 2014, 20(6): 34-40. DOI:10.3969/j.issn.1004-5708.2014.06.006.
- [9] 吴绍峰, 邱兵涛, 彭桂兰. 魔芋薄层干燥试验及数学模型的建立[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(8): 105-110. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2016.08.019.
- [10] MIDILLI A, KUCUK H, YAPAR Z. A new model for single-layer drying[J]. *Drying Technology*, 2002, 20(7): 1503-1513. DOI:10.1081/drt-120005864.
- [11] DINANI S T, HAMDAMI N, SHAHEDI M, et al. Mathematical modeling of hot air/electrohydrodynamic (EHD) drying kinetics of mushroom slices[J]. *Energy Conversion & Management*, 2014, 86(5): 70-80. DOI:10.1016/j.enconman.2014.05.010.
- [12] ZHANG Q, LITCHFIELD J B. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer[J]. *Drying Technology*, 1991, 9(2): 383-395. DOI:10.1080/07373939108916672.
- [13] GUNHAN T, DEMIR V, HSNVIOHLU E, et al. Mathematical modelling of drying of bay leaves[J]. *Energy Conversion and Management*, 2005, 46(11/12): 1667-1679. DOI:10.1016/j.enconman.2004.10.001.
- [14] TOGRUL I T, PEHLIVAN D. Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process[J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 65(3): 413-425. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2004.02.001.
- [15] AKPINAR E K, BICER Y, CETINKAYA F. Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 75(3): 308-315. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2005.04.018.
- [16] 苏金明, 阮沈勇, 王永利. MATLAB工程数学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 12.
- [17] 刘俊国, 王维民, 谌素华, 等. 速冻香蕉护色剂的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(2): 129-134. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802-ts.201502022.
- [18] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB/T 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-2.
- [19] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 57-59; 62.
- [20] 邵兴峰, 王鸿飞. 果品蔬菜贮藏与加工实验指导[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 35-37.
- [21] 吴素玲, 孙晓明, 张卫明, 等. 紫外分光光度法测定刺梨黄酮含量的研究[J]. *粮油食品科技*, 2006, 14(5): 54-56. DOI:1007-7561.2006.05.023.
- [22] 刘丹, 江帆, 丁小艳, 等. 黔产刺梨果中总多酚的含量测定及其干燥方式考察[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2016, 22(23): 20-23. DOI:10.13422/j.cnki.syfjx.2016230020.
- [23] HAMMAMI C, RENÉ F, MARIN M. Process-quality optimization of the vacuum freeze-drying of apple slices by the response surface method[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 1999, 34(2): 145-160. DOI:10.1046/j.1365-2621.1999.00247.x.
- [24] YUE Z L. TOPSIS-based group decision-making methodology in intuitionistic fuzzy setting[J]. *Information Sciences*, 2014, 277: 141-153. DOI:10.1016/j.ins.2014.02.013.
- [25] CHEN S M, CHENG S H, LAN T C. Multicriteria decision making based on the TOPSIS method and similarity measures between intuitionistic fuzzy values[J]. *Information Sciences*, 2016, 367/368: 279-295. DOI:10.1016/j.ins.2016.05.044.
- [26] 王凤贺, 丁治春, 陈鹏泉, 等. 油茶籽热风干燥动力学研究[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(S1): 426-432.
- [27] 朱香燕, 张珺, 何义雁, 等. 热风与远红外干燥温度对苦瓜全粉品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(7): 265-269; 325. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.7.042.
- [28] ALHAMDAN A, HASSAN B, ALKAHTANI H, et al. Cryogenic freezing of fresh date fruits for quality preservation during frozen storage[J]. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2015, 17(1): 9-16. DOI:10.1016/j.jssas.2015.12.001.
- [29] SAPERS G M, DOUGLAS F W. Measurement of enzymatic browning at cut surfaces and in juice of raw apple and pear fruits[J]. *Journal of Food Science*, 1987, 52(5): 1258-1285. DOI:10.1111/j.1365-2621.1987.tb14057.x.
- [30] PIGA A, DEL CARO A, CORDA G. From plums to prunes: influence of drying parameters on polyphenols and antioxidant activity[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(12): 3675-3681. DOI:10.1021/jf021207+.
- [31] 朱丹, 李世燕, 任跃英, 等. 毛酸浆发酵过程中的非酶褐变原因解析[J]. *食品科学*, 2016, 37(15): 204-208. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201615034.
- [32] 段柳柳, 段续, 任广跃. 怀山药微波冻干过程的水分扩散特性及干燥模型[J]. *食品科学*, 2019, 40(1): 23-30. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2014.07.019.
- [33] WATERHOUSE A L, LAURIE V F. Oxidation of wine phenolics: a critical evaluation and hypotheses[J]. *American Journal of Enology and Viticulture*, 2006, 57(3): 306-313. DOI:10.1016/j.scienta.2005.07.007.
- [34] JALBOUT A F, SHIPAR M A H. Formation of glyoxal in hydroxyacetalddehyde and glycine nonenzymatic browning Maillard reaction: a computational study[J]. *Food Chemistry*, 2007, 103(2): 359-368. DOI:10.1016/j.foodchem.2006.07.061.
- [35] 彭邦远, 张瑜, 张洪礼, 等. 刺梨果渣的干燥模型建立及品质分析[J]. *食品科学*, 2017, 38(11): 161-167. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201711026.
- [36] 郭刚军, 胡小静, 徐荣, 等. 干燥方式对辣木叶营养、功能成分及氨基酸组成的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(11): 46-52. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201811007.
- [37] 李彦勋, 邹金浩, 郭时印, 等. 不同干燥方式下淮山片理化性质的比较分析[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(2): 179-185. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.2.025.
- [38] LOUTFI A, CORADESCHI S, MANI G K, et al. Electronic noses for food quality: a review[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 144: 103-111. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2014.07.019.
- [39] FENG T, ZHUANG H N, YE R, et al. Analysis of volatile compounds of *Mesona Blumes* gum/rice extrudates via GC-MS and electronic nose[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 160(1): 964-973. DOI:10.1016/j.snb.2011.09.013.
- [40] 张丹, 韦广鑫, 曾凡坤. 贵州不同产地无籽刺梨的基本营养成分及香气物质比较[J]. *食品科学*, 2016, 37(22): 166-172. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201622025.