

不同分切形状对贵州小黄姜真空冷冻干燥效率及品质的影响

陈佳妮, 刘广宇, 葛永辉, 叶晓仪, 马立志, 王金华*

(贵阳学院食品与制药工程学院, 贵阳 550000)

摘 要: **目的** 比较不同分切形状对贵州小黄姜真空冷冻干燥效率及品质的影响。**方法** 以贵州小黄姜为原料, 研究真空冷冻干燥过程中姜片、姜丝、姜粒 3 种不同分切形状干燥效率及小黄姜品质的影响, 采用称量法测定复水率; 色差仪测定色泽变化; 质构仪检测硬度、弹性等参数; 营养成分分别采用 Folin-Ciocalteu 比色法、硝酸铝显色法和分光光度法测定小黄姜提取物中的多酚、黄酮、多糖和姜辣素含量。**结果** 切片厚度为 3~4 mm 的冻干姜片的干燥效率最高、复水率(577.08%)最佳、色差值(5.76)最低、硬度(494.98 g)最小、弹性(0.71 mm)和回复性(0.25 mm)最好、咀嚼性(145.26 g)最高、营养成分保留率最高, 多酚、黄酮、姜辣素、多糖保留率分别为 99.35%、70.52%、88.41%、96.27%, 且风味浓郁、感官评分最高。**结论** 不同分切形状对小黄姜真空冷冻干燥效率及产品品质具有显著影响, 片状的冻干效率更高, 营养成分损失较少, 可获得品质较好的冻干小黄姜。

关键词: 小黄姜; 真空冷冻干燥; 分切形状; 干燥效率; 品质

Effects of different cutting shapes on the vacuum freeze-drying efficiency and quality of Guizhou *Zingiber officinale* Roscoe vacuum freeze-drying

CHEN Jia-Ni, LIU Guang-Yu, GE Yong-Hui, YE Xiao-Yi, MA Li-Zhi, WANG Jin-Hua*

(School of Food and Pharmaceutical Engineering, Guiyang University, Guiyang 550000, China)

ABSTRACT: Objective To compare the effects of different cutting shapes on the vacuum freeze-drying efficiency and quality of Guizhou *Zingiber officinale* Roscoe. **Methods** Guizhou *Zingiber officinale* Roscoe was used as the raw material. The effects of drying efficiency of ginger slices, shredded ginger and ginger granules with 3 kinds of different cutting shapes and *Zingiber officinale* Roscoe quality during vacuum freeze-drying were studied the rehydration rate was determined by weighing method. The colorimeter was use for measuring that color change; the parameters such as hardness and elasticity were detected by the texture analyzer; nutritional components the content of polyphenol, flavonoid, polysaccharide and gingerol in *Zingiber officinale* Roscoe extract were determined by Folin-Ciocalteu colorimetric method, aluminum nitrate colorimetric method and spectrophotometry, respectively. **Results** The freeze-dried ginger slices with the thickness of 3-4 mm had the highest drying efficiency, the best rehydration rate (577.08%), the lowest color difference value (5.76), the smallest hardness (494.98 g), the best

基金项目: 黔科合支撑项目([2021]一般 138)、贵州省教育厅贵州省生物制药工程研究中心项目(黔教合 KY 字[2019]051)

Fund: Supported by the Department of Science and Technology of Guizhou Province ([2021] Commonly 138), and the Guizhou Biopharmaceutical Engineering Research Center Project of Guizhou Provincial Department of Education (Qinjiaohe KY [2019]051)

***通信作者:** 王金华, 硕士, 正高级实验师, 硕士生导师, 主要研究方向为果蔬精深加工、食品营养与安全。E-mail: 292723451@qq.com

***Corresponding author:** WANG Jin-Hua, Master, Senior Engineer, School of Food and Pharmaceutical Engineering, Guiyang University, Guiyang 550000, China. E-mail: 292723451@qq.com

elasticity (0.71 mm) and resilience (0.25 mm), the highest chewiness (145.26 g), the retention rate of the nutritional components was the highest, with the retention rates of polyphenol, flavone, gingerol and polysaccharide being 99.35%, 70.52%, 88.41% and 96.27%, and strong flavor with the highest sensory score. **Conclusion** Different cutting shapes have significant effects on the vacuum freeze-drying efficiency of *Zingiber officinale* Roscoe and product quality. The flaky freeze-drying has higher efficiency and less loss of nutritional components, so the freeze-dried *Zingiber officinale* Roscoe with good quality can be obtained.

KEY WORDS: *Zingiber officinale* Roscoe; vacuum freeze-drying; cutting shape; drying efficiency; quality

0 引 言

生姜(*Zingiber officinale* Roscoe)可以药食两用, 又名地辛和百辣云。我国生姜种植多分布于中部、西南部等^[1-3], 贵州省属于副热带东亚大陆季风区, 适宜生姜生长, 得天独厚的地理条件使得贵州生姜产业迅速发展。目前, 全省生姜种植面积超 50 万亩, 年产量达 100 万 t 以上。贵州生姜姜块个体较小, 又称小黄姜, 表皮呈淡黄色, 鲜姜带清香味, 切开后辣味浓郁、纤维细小、姜油丰富、味道鲜美, 具有良好的市场知名度。

新鲜生姜不易长期贮存, 易腐烂变质^[4], 严重制约产业的发展。干制是生姜保藏的主要方法之一, 目前对生姜的干制方法主要有传统热风干燥、微波干燥及真空冷冻干燥^[5-6]。热风干燥、微波干燥在加工过程中温度较高^[7], 会导致物料褐变、活性成分损失严重。真空冷冻干燥技术能更有效保持食品本身的色、香、味、形, 同时更大限度地保留食品中的营养物质^[8-9], 但冷冻干燥技术存在设备贵、能耗大的缺点。通过不同的前处理方法, 可以有效地解决干制过程中干燥时间长、干制品品质不稳定等问题, 而分切是前处理中的重要步骤。果蔬作为一种特殊的多孔介质, 在干燥过程中会发生形变, 物料的形状影响干燥食品的收缩性质、产品的品质和能源需求^[10-11]。已有研究对果蔬形状进行探究, 例如 CUN 等^[12]研究发现分切厚度的大蒜在不同干燥方式下的复水特性具有显著性影响; DEFRAEYE^[13]通过模拟不同水果形状和大小的对流干燥过程, 提出紧凑性作为参数, 发现较小分切形状的物料干燥效率更高且质量更好; 在真空冷冻干燥过程中不同分切形状对铁皮石斛^[14]、蒲菜^[15]的干燥效果具有显著性影响。目前关于生姜真空冷冻干燥更多是对工艺的研究, 而针对前处理对生姜干燥效果的影响研究较少。因此本研究通过绘制干燥曲线、分析营养成分含量变化情况, 着重研究生姜常见分切方式(姜片、姜丝和姜粒)对小黄姜真空冷冻干燥效率及品质的影响, 旨在为贵州小黄姜的深度开发利用提供理论和技术支持, 促进贵州小黄姜产业的健康发展。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

小黄姜(*Zingiber officinale* Roscoe): 贵州省安顺市镇

宁县小黄姜种植基地。

没食子酸、芦丁、香草醛、葡萄糖(纯度 $\geq 98\%$, 北京索莱宝科技有限公司); 福林酚、无水碳酸钠、蒽酮、硫酸、无水乙醇、亚硝酸钠、硝酸铝、氢氧化钠(分析纯, 成都市科隆化学品有限公司)。

1.1.2 主要仪器设备

ZL-1m² 型真空冷冻干燥机(广东中冷科技有限公司); LE204E/02 型电子天平(精度 0.0001 g, 梅特勒-托利多仪器上海有限公司); TA XT plus 型质构仪(英国 Stable Micro Systems 公司); CR-10 型色差仪(柯尼卡美能达有限公司); HN-8 型数显恒温水浴锅(上海力辰邦西仪器有限公司); UV-2550 型紫外分光光度计(日本岛津公司); Multiskan Sky 型全波长酶标仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司)。

1.2 方 法

1.2.1 小黄姜真空冷冻干燥工艺流程

小黄姜的干燥工艺流程如图 1 所示。干燥过程中真空冷冻干燥机预冻温度设置为 -50°C , 预冻时间 5 h; 采用阶段升温方式进行冻干, 真空度 10 Mpa 以下。根据前期实验可知, 该条件下, 真空冷冻干燥 48 h, 生姜干含水率达到 5%以下, 可达干燥终点。

1.2.2 冻干小黄姜复水率的测定

根据文献[16]并作修改。称取一定质量的冻干小黄姜按照质量比为 1:20 浸泡在矿泉水中, 30 min 后再迅速煮沸至 100°C 并保持沸腾 10 min, 取出后沥干水分称重, 计算出该时间下的复水率。复水率(R, %)计算公式如式(1):

$$R = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \quad (1)$$

式中, m_1 表示冻干产品的质量, g; m_2 表示冻干产品复水后的质量, g。

1.2.3 冻干小黄姜色泽变化的测定

采用色差计法测定。 L^* 代表黑白值, a^* 代表红绿值, b^* 代表黄蓝值。 ΔE 表示冻干小黄姜色泽与新鲜小黄姜相比色差值, 计算公式为式(2):

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad (2)$$

式中, L_0 、 a_0 和 b_0 分别表示新鲜小黄姜的 L^* 、 a^* 和 b^* ; L 、 a 和 b 分别表示冻干小黄姜的 L^* 、 a^* 和 b^* 。

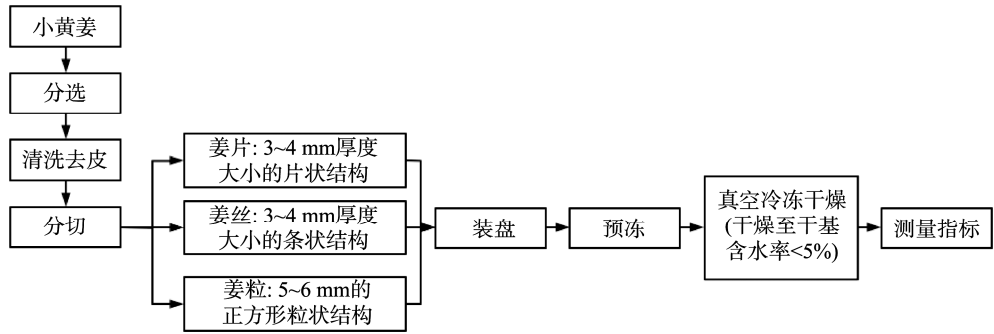


图 1 小黄姜真空冷冻干燥工艺流程图

Fig.1 Process flow diagram of vacuum freeze-drying of *Zingiber officinale* Roscoe

1.2.4 冻干小黄姜质构测定

根据文献[17],采用 TA XT plus 质构仪进行测定,每组样品取 10 个平行进行测定,最终结果取平均值。

1.2.5 冻干小黄姜营养成分测定

根据文献[18]采用 Folin-Ciocalteu 比色法测定多酚含量,以没食子酸为标准物绘制标准曲线,得线性方程 $Y=0.0506X+0.1028$, $r^2=0.9948$ 。总酚含量以没食子酸当量 (mg/g)表示。

根据文献[19]采用亚硝酸钠与硝酸铝显色法测定黄酮含量,以芦丁为标准物绘制标准曲线,得线性方程 $Y=4.5308X-0.0144$, $r^2=0.9998$,总黄酮含量以芦丁当量 (mg/g)表示。

根据文献[20]采用蒽酮-硫酸法测定多糖含量,以葡萄糖为标准物绘制标准曲线,得线性方程 $Y=5.0178X+0.0298$, $r^2=0.997$,多糖含量以葡萄糖当量(mg/g)表示。

根据文献[21-22]采用香草醛法测定姜辣素含量,以香草醛为标准物绘制标准曲线,得线性方程 $Y=0.0726X-0.1933$, $r^2=0.998$,姜辣素含量以香草醛当量 (mg/g)×2.003(香草醛与姜辣素之间的换算系数)表示。

1.2.6 冻干小黄姜感官评价

对冻干小黄姜进行感官评价,评价关键是小黄姜冻干后能否保持新鲜产品的特性,包括气味、形态、色泽等,组织 10 名有经验的专业人员为评定小组,按照表 1 的标准评定,根据不同的等级对其进行评定打分。

1.3 数据处理

采用 SPSS (Version 26.0)进行显著性和相关性分析,采用 Graph Pad (Version 8.0)和 OriginPro 2021 作图,对实验数据进行统计和分析。

2 结果与分析

2.1 不同分切形状对小黄姜冷冻干燥曲线的影响

真空冷冻干燥过程一般分为预冻、升华干燥、解析干燥 3 个过程^[23]。小黄姜的速冻曲线如图 2 所示:从初温 20~−50℃为预冻阶段、−50~−10℃为升华阶段、10~70℃

表 1 冻干小黄姜的感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria of freeze-dried *Zingiber officinale* Roscoe

指标	评定标准	评分/分
气味	具有小黄姜独特香辣味	4~5
	香辣味较低	2~3
	无香辣味	0~1
形态	外观完整、无皱缩卷边、表面孔状密且多	4~5
	外观较完整、稍有皱缩卷边、表面孔状较少	2~3
	外观不完整、皱缩卷边、表面孔状较少且大	0~1
色泽	色泽鲜黄	4~5
	色泽偏白	2~3
	色泽黯淡	0~1
质地	脆感极佳	4~5
	脆感一般	2~3
	脆感较差	0~1

为解析阶段,升华阶段和解析阶段采用阶段升温方式进行。由图 2 可以看出:不同分切形状的小黄姜在同一干燥条件下,其温度随时间的变化规律各不相同。样品在预冻阶段快速达到预定温度,冻结速率接近,在升华、解析干燥过程中,温度随时间稳步增加,但始终低于隔板温度,具有传热温差,这是因为真空冷冻干燥是通过传热传质的机制进行干燥,既要满足热量的不断供给、又要促使物料中的水分不断排出。其中姜片在前 32 h 的干燥过程中,温度与隔板温度最为接近,原因可能是姜片与隔板接触面积大,在干燥过程中,传热较为迅速使得干燥从物料的表面逐步向物料内部推移,游离状态的水分迅速蒸发。在 32~48 h 之间,姜片和姜丝的冻干曲线无明显差别,可能是因为此时间段为姜片和姜丝的解析阶段,此阶段中,物料内部还存部分水未被冻结且吸附能力高,需要提供更高的温度才能从物料中解析出来,姜片和姜丝两者的厚度相同,内部水分迁移到表面的距离相同,其中姜片与隔板的接触面积较大,但姜丝的总体积小,所以姜片与姜丝在干燥过程中温度相近。由图 2 可以看出姜粒的干燥曲线较姜片和姜丝有明显的区别,可能是因为姜粒厚度大,与隔板接触面

积小, 在干燥过程中热量从外部传递到内部的所需时间更长, 导致姜粒中心升温慢。陈柏楠等^[24]研究发现隔板温度和物料厚度是影响干燥速率的重要因素, 这与菠萝^[25]、大蒜^[26]等真空冷冻干燥的结果类似。因此在真空冷冻干燥时, 对于一定体积的物料应尽量增大样品与隔板接触的表面积, 减少厚度, 这样能够提高样品的干燥速率。综上所述, 片状小黄姜在冻干过程中效率更高。

2.2 不同分切形状冻干小黄姜复水率的影响

复水率为新鲜果蔬食品干制品在水中浸泡一定时间

后吸水恢复的能力, 是检验干制品品质的重要指标之一^[27], 通常用重量的增加程度表示, 干制品复原到新鲜状态的程度越高表明干制品质量越好, 物料内部组织结构受破坏程度越小^[28]。由图3可知, 冻干姜片复水率明显优于姜丝和姜粒($P<0.05$), 为577.08%。冻干姜丝和冻干姜粒复水率无显著性差异($P>0.05$)。根据干燥曲线可知, 片状小黄姜在冻干过程中传热较快, 在升华阶段, 冰晶因反复冻融而增长的情况较少, 对小黄姜细胞及质构破坏最小, 保留了小黄姜结构的最佳形态。

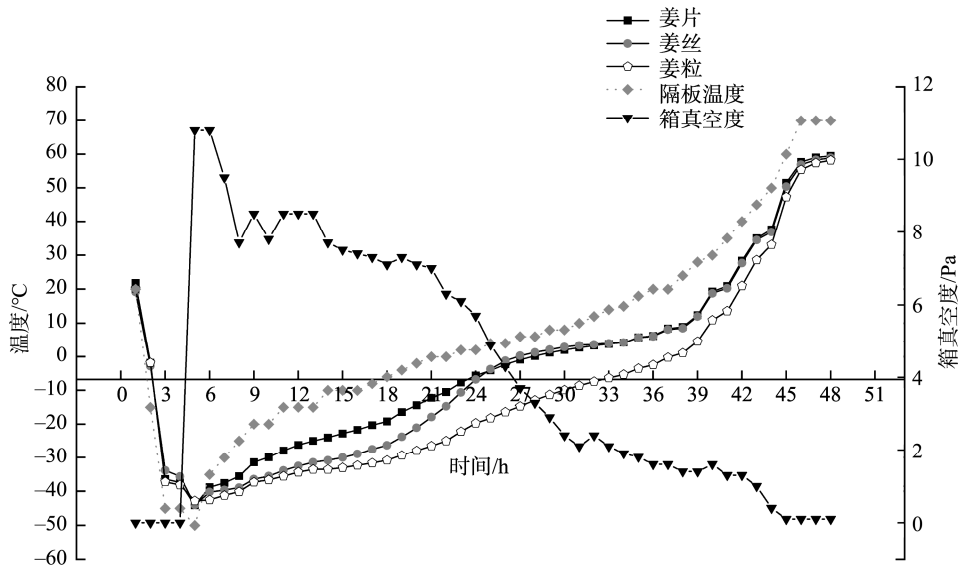
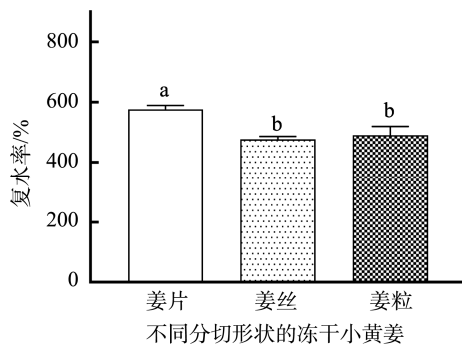


图2 不同分切形状小黄姜冷冻干燥曲线

Fig.2 Freeze-drying curves of *Zingiber officinale* Roscoe with different cutting shapes



注: 不同字母表示组间差异显著($P<0.05$), 下同。

图3 不同分切形状对冻干小黄姜复水率的影响($n=10$)

Fig.3 Effects of different cutting shapes on rehydration rates of freeze-dried *Zingiber officinale* Roscoe ($n=10$)

2.3 不同分切形状对冻干小黄姜色泽的影响

色泽是检测冻干脆片的一个重要品质^[29], 不同分切形状对冻干小黄姜冻干色泽影响的结果如图4所示。由图4可以看出不同分切形状的小黄姜冷冻干燥后 L^* (亮度值)、 a^* (红度值)与同组分切形状的新鲜小黄姜均无显著性差异

($P>0.05$), 说明冷冻干燥对小黄姜亮度值与红度值影响不大。不同分切形状的小黄姜干燥后 b^* (黄度值)较新鲜小黄姜显著降低, 3种分切形状均呈下降趋势, 但不同分切形状的冻干小黄姜之间 b^* 差异不显著, 可能是因为小黄姜中的姜黄素在干燥过程中发生损失, 导致冻干小黄姜色泽相比较于新鲜小黄姜偏白。在色差方面, 由图4d可看出, 经干燥之后, 不同分切形状小黄姜 ΔE (色差值)的大小依次为姜丝>姜粒>姜片, 姜丝和姜粒色差值差异不显著($P>0.05$)。综上所述, 片状对小黄姜冻干过程中色泽影响最小, 色差值为5.76。

2.4 不同分切形状对冻干小黄姜质构的影响

对不同分切形状的冻干小黄姜质构进行分析, 结果见表2。硬度为样品在第一次下压区段内的最大力量值, 表示样品断裂所需的最大力, 单位为“g”, 是常用来评价果蔬品质的重要指标之一^[30-31]; 弹性表示冻干小黄姜受到外力作用后恢复到原来的能力^[32]; 咀嚼性表示冻干小黄姜咀嚼至能够吞咽状态所需要的能量^[33]。3种不同分切形状的冻干小黄姜, 硬度方面, 大小依次为: 姜粒>姜丝>姜片, 三者差异显著($P<0.05$), 其中姜粒的硬度最高, 为1290.26 g, 姜片的硬度最小, 为494.98 g。

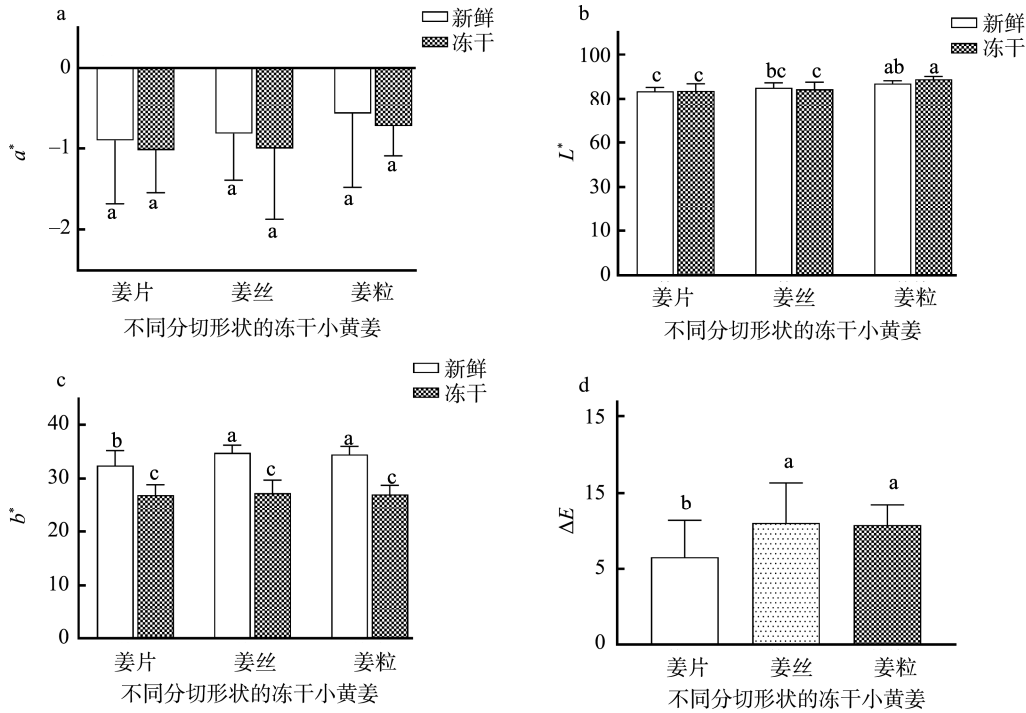


图 4 不同分切形状对冻干小黄姜色泽的影响(n=10)

Fig.4 Effects of different cutting shapes on color of freeze-dried *Zingiber officinale* Roscoe (n=10)

表 2 不同分切形状对冻干小黄姜质构的影响(n=10)

Table 2 Effects of different cutting shapes on texture of freeze-dried *Zingiber officinale* Roscoe (n=10)

样品	硬度/g	回复性/mm	弹性/mm	咀嚼性/g
姜片	494.98±73.80 ^c	0.25±0.06 ^a	0.71±0.13 ^a	145.26±37.91 ^a
姜丝	1002.31±99.43 ^b	0.08±0.01 ^b	0.56±0.12 ^a	115.37±33.80 ^{ab}
姜粒	1290.26±150.99 ^a	0.04±0.01 ^c	0.52±0.32 ^a	100.41±9.15 ^{bc}

注：同一列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)，表 3 同。

可能因为姜粒的干燥速率慢，导致物料内部整体结构紧密，孔隙大小不均匀，也可能是因为姜粒的体积与表面积之比低，物料更紧凑^[13]。在回复性方面，姜片的回复性最高，为 0.25 mm，说明冻干姜片在经过压缩后更容易恢复到变形前的程度。在弹性方面，三者无差异(P>0.05)，但姜片的弹性最高，为 0.71 mm。咀嚼性被定义为弹性、硬度、凝聚性三者乘积，咀嚼性越低表示产品越不耐咀嚼，更容易变软，姜片的咀嚼性最高，为 145.26 g，与姜丝差异不显著(P>0.05)，姜粒的咀嚼性仅为 100.41 g，但姜丝与姜粒差异不显著(P>0.05)。赵艳雪等^[34]研究不同分切厚度对山楂片质构的影响，相较于其他厚度，3 mm 的山楂片质构较为适中，感官性指标较好。盛金凤等^[35]研究发现切片厚度对柿子质构影响显著，综合感观评价，厚度 1.00 cm 的柿子片得分最低，根据不同实验的结果表明：质构指标并不是根据单个指标进行评定，其中质构的评价与物料的截面积具有正相关性^[36]，综合以上数据，冻干姜片的质构优于冻干

姜丝和姜粒。可能原因是姜片在干燥过程中较好地保持了新鲜小黄姜的状态，对其品质影响最小。

2.5 不同分切形状对冻干小黄姜营养成分的影响

真空冷冻干燥能够最大限度保留原料营养功能^[37]，且有利于保持样品的品质。对不同分切形状冻干小黄姜中多酚、黄酮、多糖、姜辣素等生物活性物质进行分析，结果见图 5 和表 3。由图 5a 和表 3 可知，不同分切形状冻干小黄姜多酚含量存在一定差异，其中冻干姜片与姜粒差异不明显，与鲜姜比，多酚保留率均较高，分别为 99.35%和 98.18% (P>0.05)，高于姜粒的 76.30% (P<0.05)；由图 5b 和表 3 可知，不同分切形状冻干小黄姜总黄酮含量差异显著性(P<0.05)，与鲜姜比，姜片、姜丝、姜粒的总黄酮保留率分别为 70.52%、65.51%、62.67%；生姜含有大量的活性多糖^[38]。由图 5c 和表 3 可知，冻干姜片的多糖含量显著高于姜丝和姜粒(P<0.05)，冻干姜丝和姜粒中的多糖含量无显著差异性(P>0.05)。与鲜姜相比，冻干姜片、姜丝、姜粒多

糖的保留率分别为 96.27%、82.44%和 81.72%。姜辣素是生姜辣味的主要呈味物质^[39], 是姜酚、姜脑等辛辣物质的总称。由图 5d 和表 3 可知, 3 种不同分切形状冻干小黄姜的姜辣素含量差异不显著($P>0.05$), 与鲜姜比, 保留率约为 88%。综上所述, 小黄姜的冻干过程中, 分切形状会影响小黄姜中的营养成分, 其中片状结构能更好地保留冻干

小黄姜中的营养物质, 可能与其冻干效率有关。冻干小黄姜片中多酚和多糖的保留率要高于黄酮和姜辣素, 可能是由于在冻干过程中细胞内的游离水升华干燥过程中会带走部分营养成分, 在实验过程中也发现冷阱凝霜中有乳白色的物质, 可能为流失的营养成分, 具体情况有待进一步深入的研究。

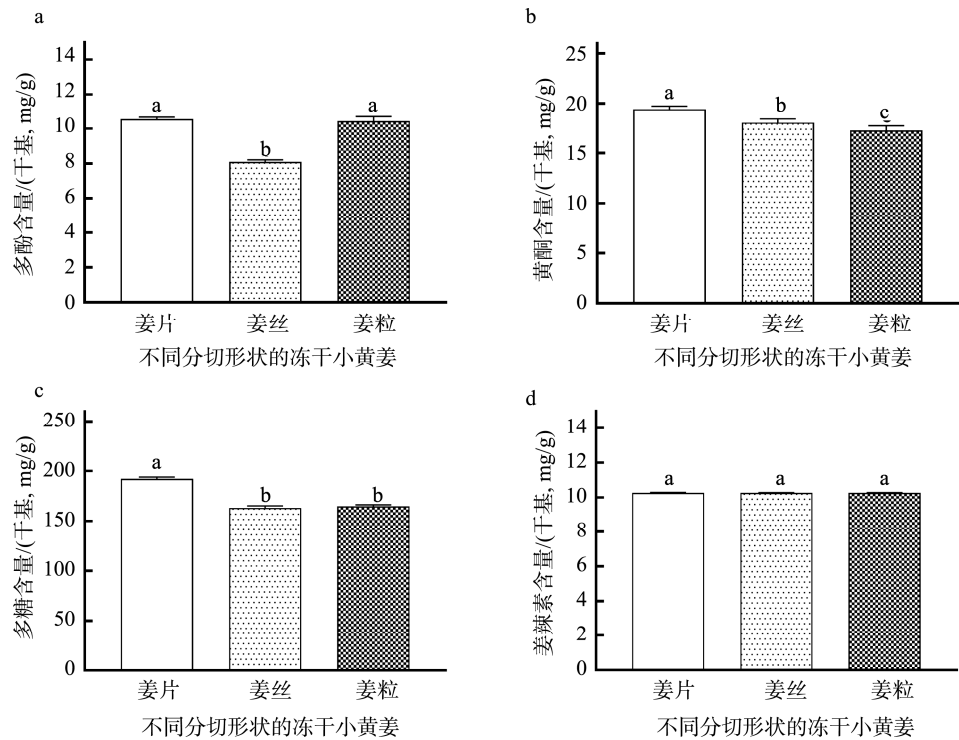


图 5 不同分切形状对冻干小黄姜营养成分的影响($n=6$)
Fig.5 Effects of different cutting shapes on nutritional components of freeze-dried *Zingiber officinale* Roscoe ($n=6$)

表 3 不同分切形状冻干小黄姜营养成分保留率($n=6$)
Table 3 Retention rates of nutritional components in freeze-dried *Zingiber officinale* Roscoe with different cutting shapes ($n=6$)

样品	多酚保留率 /%	黄酮保留率 /%	多糖保留率 /%	姜辣素保留率 /%
姜片	99.35 ^a	70.52 ^a	96.27 ^a	88.41 ^a
姜丝	76.30 ^b	65.51 ^b	82.44 ^b	88.11 ^a
姜粒	98.18 ^a	62.67 ^c	81.72 ^b	88.06 ^a

2.6 不同分切形状对冻干小黄姜感官品质的影响

不同分切形状的冻干小黄姜中气味、质地、色泽、形态的感官评分情况如图 6 所示, 姜片、姜丝、姜粒之间存在差异。片状小黄姜经过干燥后, 香辣味浓郁, 外观完整无皱缩卷边, 颜色呈黄色且偏白, 脆感极佳, 感官评分较高; 条状小黄姜经过干燥后, 香辣味和颜色变差, 外观较为细碎不完整, 脆感适中, 感官评分较低。根据感官评定人员反馈 3 种不同分切形状小黄姜感官评价依次为: 姜片>姜粒>姜丝, 综上所述, 片状结构在真空冷冻干燥过程中能较好地保持小黄姜的基本形态。

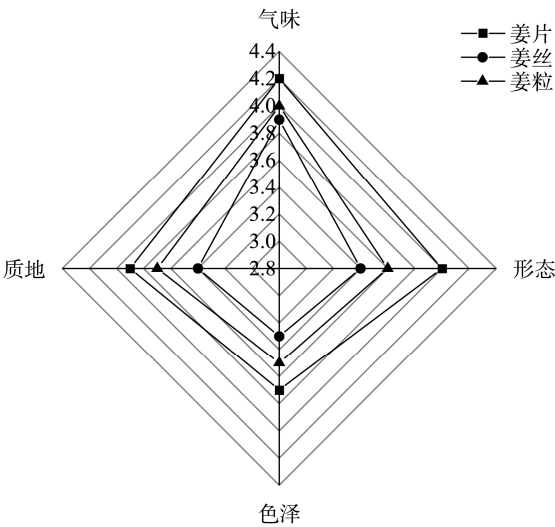


图 6 不同分切形状对冻干小黄姜感官品质的影响
Fig.6 Effects of different cutting shapes on sensory quality of freeze-dried *Zingiber officinale* Roscoe

3 结 论

本研究对比了不同分切形状小黄姜在真空冷冻干燥过程中的干燥曲线,结合复水率、色泽、质构、营养成分(多酚、黄酮、多糖和姜辣素)和感官评价等品质参数,实验结果表明:厚度为 3~4 mm 的片状小黄姜冻干效率最高,产品品质显著高于姜丝、姜粒,在干燥过程中能更好地保持新鲜小黄姜原有的色泽、形状和营养成分。由此可知,在真空冷冻干燥过程中,片状形态更有利于小黄姜的冷冻干燥加工。在后续研究中将进一步探究不同前处理方式对真空冷冻干燥小黄姜品质的影响。

参考文献

- [1] 谭玉梅, 江洪波, 高梦祥, 等. 生姜现代药理学特性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(15): 4908–4916.
- [2] TAN YM, JIANG HB, GAO MX, *et al.* Research progress of modern pharmacological characteristics of ginger [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(15): 4908–4916.
- [3] 龚弟鸿, 冷建春, 杨友均. 生姜应用技术与调节和降低血糖的活性功能[J]. 中国调味品, 2020, 45(9): 190–193.
- [4] GONG DH, LENG JC, YANG YJ. Application technology of ginger and its active function of regulating and lowering blood glucose [J]. China Cond, 2020, 45(9): 190–193.
- [5] SUCAI S, MINYAN D, MUKRESH K. Anti-inflammatory and renal protective effect of gingerol in high-fat diet/streptozotocin-induced diabetic rats via inflammatory mechanism [J]. Inflammopharmacology, 2019, 27(6): 1243–1254.
- [6] 张龙, 赵鑫淇, 任梓菲, 等. 超声联合过氧乙酸清洗对生姜品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(10): 3068–3074.
- [7] ZHANG L, ZHAO XQ, REN ZF, *et al.* Effect of ultrasonic combined with peracetic acid cleaning on ginger quality [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(10): 3068–3074.
- [8] GUO J, ZHANG W, WU H, *et al.* Microwave-assisted decomposition coupled with acidic food condiment as an efficient technology for ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) processing [J]. Sep Purif Technol, 2015, 146: 219–226.
- [9] PATI JR, HOTTA SK, MAHANTA P. Effect of waste heat recovery on drying characteristics of sliced ginger in a natural convection dryer [J]. Proced Eng, 2015, 105: 145–152.
- [10] 李长见, 丁洪流, 纪丽君, 等. 不同干燥方法对苹果中毒死蜱残留的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(18): 6530–6536.
- [11] LI CJ, DING HL, JI LJ, *et al.* Effects of different drying methods on chlorpyrifos residues in apples [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(18): 6530–6536.
- [12] 毕金峰, 冯舒涵, 金鑫, 等. 真空冷冻干燥技术与产业的发展及趋势[J]. 核农学报, 2022, 36(2): 414–421.
- [13] BI JF, FENG SH, JIN X, *et al.* Current status development trend of freeze drying and industry [J]. Nucl Agric Sci, 2022, 36(2): 414–421.
- [14] 牛淑萍, 艾麦提·巴热提. 食品中的真空冷冻干燥技术研究[J]. 中国食品, 2022, (1): 118–120.
- [15] NIU SP, AIMAITI BRT. Study on vacuum freeze-drying technology in food [J]. China Food, 2022, (1): 118–120.
- [16] TAKAHARU T, HIROFUMI T, HARUKI S, *et al.* Study on shrinkage deformation of food in microwave-vacuum drying [J]. Dry Technol, 2015, 33(1516): 1830–1836.
- [17] TELIS VRN, TELIS-ROMERO J, GABAS AL, *et al.* Solids rheology for dehydrated food and biological materials [J]. Dry Technol, 2005, 23(4): 759–780.
- [18] CUN SZ, YA BF, LEI Z, *et al.* Rehydration characteristics of vacuum freeze- and hot air-dried garlic slices [J]. LWT, 2021. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111158
- [19] DEFRAEYE T. Impact of size and shape of fresh-cut fruit on the drying time and fruit quality [J]. J Food Eng, 2017, 210: 35–41.
- [20] 袁秋萍, 何国庆, 余威府, 等. 铁皮石斛松真空冷冻生产工艺[J]. 食品工业, 2020, 41(1): 79–82.
- [21] YUAN QP, HE GQ, YU WF, *et al.* The vacuum freeze-drying production process of *Dendrobium candidum* floss [J]. Food Ind, 2020, 41(1): 79–82.
- [22] 万国福, 谷敏, 陶书中, 等. 蒲菜真空冷冻干燥工艺研究初探[J]. 食品工业, 2015, 36(2): 112–114.
- [23] WAN GF, GU R, TAO SZ, *et al.* Study on technology of *Typha latifolia* vacuum freeze-drying [J]. Food Ind, 2015, 36(2): 112–114.
- [24] 王亚辉, 邓红, 张瑛, 等. 生姜真空冷冻干燥工艺条件优化[J]. 农产品加工, 2008, (4): 73–77.
- [25] WANG YH, DENG H, ZHANG Y. Optimization of vacuum freeze-drying process of ginger [J]. Farm Prod Process, 2008, (4): 73–77.
- [26] 冯亚超. 速冻子姜片关键加工工艺及冻藏品质变化研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2016.
- [27] FENG YC. Key processing technology of quick-frozen baby ginger slices and quality change during the frozen storage [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2016.
- [28] 褚敏哲, 贺泽民, 贺宇, 等. 鲜姜水提液多酚含量及其抗氧化活性研究[J]. 中国调味品, 2016, 41(8): 65–67.
- [29] CHU MZ, HE ZM, HE Y, *et al.* Study on polyphenol content in extract solution of fresh ginger and its antioxidant activity [J]. China Cond, 2016, 41(8): 65–67.
- [30] 吴茹. 青钱柳叶总黄酮提取、分离纯化及抗氧化抑菌活性研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2015.
- [31] WU R. Extraction, separation and purification of total flavonoids from *Cyclocarya paliurus* leaves and their antioxidant and bacteriostatic activities [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2015.
- [32] 张浩. 富硒青钱柳多糖提取及降血糖研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [33] ZHANG H. Extraction of selenium-enriched *Cyclocarya paliurus* polysaccharide and its hypoglycemic effect [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [34] 李米, 陈尚龙, 张建萍, 等. 姜辣素提取工艺及其对亚硝酸盐的清除作用研究[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(13): 175–179.
- [35] LI M, CHEN SL, ZHANG JP, *et al.* Study on extraction process of gingerol and its nitrite scavenging effect [J]. Anhui Agric Sci, 2021, 49(13): 175–179.
- [36] 项敏. 生姜中姜辣素的提取与分离工艺研究[D]. 武汉: 武汉工程大学,

- 2015.
- XIANG M. Study on extraction and separation technology of gingerol from ginger [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2015.
- [23] 张丽文, 罗瑞明, 李亚蕾, 等. 食品真空冷冻联合干燥技术研究进展[J]. 中国调味品, 2017, 42(3): 152–156.
- ZHANG LW, LUO RM, LI YL, *et al.* Research progress of combined vacuum freezing and drying technology of food [J]. China Cond, 2017, 42(3): 152–156.
- [24] 陈柏楠, 杨豪, 包韞辉, 等. 不同工艺真空冷冻干燥桂花品质比较分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(2): 205–212.
- CHEN BN, YANG H, BAO YH, *et al.* Comparative analysis of quality of *Osmanthus fragrans* by vacuum freeze-drying with different processes [J]. Mod Food Sci Technol, 2021, 37(2): 205–212.
- [25] 陈佳楠. 菠萝切片真空冷冻干燥工艺研究及优化[D]. 天津: 天津商业大学, 2022.
- CHEN JN. Study and optimization of vacuum freeze-drying technology of pineapple slices [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2022.
- [26] 冯亚斌. 基于真空冷冻干燥效率及品质控制的大蒜预处理技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- FENG YB. Study on garlic pretreatment technology based on vacuum freeze-drying efficiency and quality control [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.
- [27] 赵圆圆, 易建勇, 毕金峰, 等. 干燥方式对复水香菇感官、质构及营养品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(3): 101–108.
- ZHAO YY, YI JY, BI JF, *et al.* Sensory, texture and nutritional quality of dried shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) as affected by different drying methods [J]. Food Sci, 2019, 40(3): 101–108.
- [28] 张杰, 侯小歌, 李新欣. 大蒜3种脱水加工工艺比较[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(4): 1398–1404.
- ZHANG J, HOU XG, LI XX. Comparison of three dehydration processes of garlic [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(4): 1398–1404.
- [29] 马有川. 预处理对苹果脆片真空冷冻干燥特性和品质的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- MA YC. Effect of pretreatment on vacuum freeze-drying characteristics and quality of apple chips [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- [30] KADIRI O, GBADAMOSI SO, AKANBI CT. Texture profile analysis and stress relaxation characteristics of protein fortified sweet potato noodles [J]. J Texture Stud, 2020, 51(2): 314–322.
- [31] RENATA S, MARIUSZ R, MARIAN G, *et al.* Influence of cold and frozen storage on the chemical content, hydration properties and texture parameters of horse meat [J]. Med Weter, 2019, 75(2): 6207–2019.
- [32] 陈伟, 陈建设. 食品的质构及其性质[J]. 中国食品学报, 2021, 21(1): 377–384.
- CHEN W, CHEN JS. Food texture and properties [J]. Chin Inst Food Sci Technol, 2021, 21(1): 377–384.
- [33] 吴昊, 王艺颖, 丁君, 等. 壳聚糖/竹叶抗氧化物复合处理对鲜切生姜保鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(10): 283–288.
- WU H, WANG YY, DING J, *et al.* Effect of chitosan/bamboo leaf antioxidant treatments on the quality of fresh-cut ginger during storage [J]. Food Sci, 2016, 37(10): 283–288.
- [34] 赵艳雪, 余金橙, 刘士琪, 等. 山楂切片冷冻干燥动力学与品质特性研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(2): 53–60.
- ZHAO YX, YU JC, LIU SQ, *et al.* Study on freeze-drying kinetics and quality characteristics of hawthorn slices [J]. Food Res Dev, 2021, 42(2): 53–60.
- [35] 盛金凤, 王雪峰, 雷雅雯, 等. 干燥温度和切片厚度对柿子片干燥特性与品质影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(3): 58–65.
- SHENG JF, WANG XF, LEI YW, *et al.* Effects of drying temperature and slice thickness on drying characteristics and quality of persimmon slices [J]. Food Res Dev, 2022, 43(3): 58–65.
- [36] 王猛, 王辛, 陈洁, 等. 鲜湿面条的宽度和厚度变化对其质构品质的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2009, (9): 16–19.
- WANG M, WANG X, CHEN J, *et al.* Effects of width and thickness changes on texture quality of fresh noodles [J]. Gere Feed Ind, 2009, (9): 16–19.
- [37] MERIVAARA A, ZINI J, KOIYUNOTKO E, *et al.* Preservation of biomaterials and cells by freeze-drying: Change of paradigm [J]. J Control Release, 2021, 336: 480–498.
- [38] 廖登未, 黄德春, 程抒劼, 等. 姜多糖提取方法工艺优化及分析[J]. 食品与机械, 2018, 34(9): 152–156.
- LIAO DW, HUANG DC, CHENG SJ, *et al.* Optimization of polysaccharides extracted and analysis from *Zingiber officinalis* [J]. Food Mach, 2018, 34(9): 152–156.
- [39] 廖钦洪, 姜玉松, 李会合, 等. 乙醇提取生姜姜辣素的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2017, 38(21): 162–166.
- LIAO QH, JIANG YS, LI HH, *et al.* Optimization of the ethanol extraction process of the gingerol from ginger [J]. Sci Technol Food Ind, 2017, 38(21): 162–166.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

作者简介



陈佳妮, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工理论及工程化研究。
E-mail: 270284935@qq.com



王金华, 硕士, 正高级实验师, 硕士生导师, 主要研究方向为果蔬精深加工、食品营养与安全。
E-mail: 292723451@qq.com