DOI:10.16861/j.cnki.zggc.2026.0179

不同干燥方式对贵州小黄姜品质的影响

蒋娅萍,张 想,王成财,黄运安

(贵州食品工程职业学院 贵阳 551400)

摘 要:为系统探究不同干燥方式对贵州小黄姜品质的影响,并筛选适宜的干燥工艺,本文以新鲜黔姜 2 号小黄姜为试验材料,分别采用热风干燥(HAD)、真空干燥(VD)、微波干燥(MD)、冷冻干燥(FD)和红外干燥(ID)5 种干燥处理,并测定不同干燥方式下小黄姜姜片的干燥时间、干燥比、复水比、明度(*L**)、红绿值(*a**)、黄蓝值(*b**)、总色差(Δ*E*)、褐变指数(BI)、白度指数(WI)、硬度、总酚含量、总黄酮含量、姜黄素含量、姜辣素含量及 DPPH(1,1-二苯基-2-三硝基苯肼)、ABTS$^+$[2,2'-联氮-双-(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)]自由基清除率等 16 项指标,通过主成分构建小黄姜干燥品质综合评价模型并进行量化评分。结果表明,与其他处理相比,FD 处理的姜片总酚、总黄酮、姜辣素含量及 DPPH、ABTS$^+$自由基清除率均最高,褐变最轻、品质最优,但干燥时间达 18.35 h;VD 处理色泽与细胞结构保持良好,姜辣素、姜黄素含量较 HAD 处理分别提高了 34.30%、97.08%,综合表现稳定;ID 处理 DPPH、ABTS$^+$自由基清除率均仅次于 FD 处理,总酚、总黄酮及姜黄素、姜辣素含量均与 VD 无显著差异,但复水比较 VD 显著降低了 12.45%;MD 处理干燥时间最短,姜辣素、姜黄素含量较 HAD 分别提高 53.51%、164.96%,但细胞结构破坏严重,褐变指数(BI)达 70.33;HAD 处理姜片品质最差,姜辣素含量(*w*,后同)仅为 9.69 mg·g^{-1},活性物质流失明显。基于主成分得分构建的综合评价模型表明,FD 处理综合得分最高,VD 处理次之。综合考虑冷冻干燥能耗与时间成本偏高,而真空干燥在小黄姜形态保持、酚类物质及活性成分保留方面表现良好,且经济性更优,因此,从综合效益来看,真空干燥可作为贵州小黄姜较为适宜的干燥方法。

关键词:贵州小黄姜;干燥方法;品质;主成分分析;综合评价

中图分类号:S632.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-2871(2026)10-197-10

Effects of different drying methods on the quality of Guizhou small yellow ginger

Jiang Yaping, Zhang Xiang, Wang Chengcai, Huang Yun'an

(*Guizhou Vocational College of Foodstuff Engineering, Guiyang 551400, Guizhou, China*)

Abstract: This study aimed to systematically investigate the effects of different drying methods on the quality of Guizhou small yellow ginger(*Zingiber officinale* Roscoe)and screen the suitable drying process. Fresh Qianjiang No. 2 small yellow ginger was used as the test material and subjected to five drying treatments: Hot air drying(HAD), vacuum drying(VD), microwave drying(MD), freeze drying(FD), and infrared drying(ID). Sixteen indicators of ginger slices under different drying regimes were determined, including drying time, drying ratio, rehydration ratio, lightness(*L**), red-green coordinate(*a**), yellow-blue coordinate(*b**), total color difference(Δ*E*), browning index(BI), whiteness index(WI), hardness, total phenol content, total flavonoid content, curcumin content, gingerol content, as well as DPPH(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl) and ABTS$^+$ [2, 2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)] radical scavenging rates. A comprehensive evaluation model for drying quality of small yellow ginger was constructed and applied for quantitative scoring based on principal component analysis(PCA). The results showed that FD treatment achieved the highest total phenol, total flavonoid and gingerol content, as well as the highest DPPH and ABTS$^+$ radical scavenging rate, with the slightest browning and optimal overall quality, while its drying time reached 18.35 h. VD treatment exhibited favorable color retention and cell structure integrity. Compared with HAD treatment, the gingerol and curcumin content of VD treatment increased by 34.30% and 97.08%, respectively, presenting stable comprehensive performance. The DPPH and ABTS$^+$ radical scavenging rate of ID treatment were second only to FD treatment. No significant difference in total phenol, total flavonoid, curcumin and gingerol content was found between ID and VD treatments, whereas the rehydration ra-

收稿日期:2026-03-04;**修回日期:**2026-04-10

基金项目:贵州食品工程职业学院院级科研课题(GZSP-2025-1)

作者简介:蒋娅萍,女,助教,研究方向为食品科学与工程。E-mail:3021896299@qq.com

通信作者:黄运安,男,讲师,研究方向为食品营养与加工。E-mail:hya127@163.com

tio of ID treatment was significantly reduced by 12.45% relative to VD treatment. MD treatment had the shortest drying time. Its gingerol and curcumin contents were 53.51% and 164.96% higher than those of HAD treatment, respectively; nevertheless, severe cell structure damage was detected with a browning index（BI）of 70.33. HAD treatment yielded the poorest quality of ginger slices, with gingerol content（*w*, the same below）of only 9.69 mg·g^{-1} and remarkable loss of active components. The comprehensive evaluation model established on principal component scores demonstrated that FD treatment obtained the highest comprehensive score, followed by VD treatment. Given the high energy consumption and time cost of freeze drying, vacuum drying performs well in morphological retention and retention of phenolic substances and active components with superior economic efficiency. Therefore, vacuum drying can be selected as a suitable drying method for Guizhou small yellow ginger from the perspective of comprehensive benefits.

Key words：Guizhou small yellow ginger; Drying method; Quality; Principal component analysis; Comprehensive evaluation

生姜（*Zingiber officinale* Roscoe）是一种多年生植物，原产于东南亚，现分布于世界各地[1]。其根茎中富含姜辣素、姜黄素、酚类化合物等活性成分，属传统药食同源植物，这些物质不仅赋予生姜独特的风味与辛辣口感，更具备抗氧化、抗炎、抑菌等多种生理功能，在食品加工、医药保健等领域具有广阔的应用前景[2]。贵州省地处云贵高原，独特的气候条件与土壤环境为小黄姜的种植提供了天然优势，所产小黄姜肉质饱满、香气浓郁，活性成分含量显著高于普通生姜品种，是西南地区特色农产品加工的重要原料[3]。然而，生姜水分含量高达 85%~95%，采后呼吸作用旺盛，易发生腐烂变质，常温下贮藏期不足 7 d，严重限制了其产业化发展与市场流通[4]。因此干燥成为保障其品质、延长货架期及便于储运的关键加工环节。

干燥主要通过脱除物料内部水分，抑制微生物生长与酶促反应，从而实现果蔬的长期保存[5]。不同的干燥方式因传热传质机制的差异，对物料的物理结构、化学成分及生物活性产生显著且特异性影响。自然晒干作为传统干燥方式，虽具有无需设备投资、操作简便等优势，但存在明显局限性：干燥过程高度依赖自然气候条件，周期长达数天至数十天，且物料易受环境粉尘、微生物及虫害污染，导致产品水分含量不均、品质稳定性差，难以满足工业化生产对标准化的要求[6]。为克服上述缺陷，热风干燥、冷冻干燥、真空干燥、微波干燥及红外干燥等现代干燥技术逐步应用于果蔬加工领域，其核心目标为在提升脱水效率、缩短干燥周期的基础上，最大限度地保留产品的营养品质、功能活性成分及感官特性。目前，针对姜干燥的研究多集中于单一或多种干燥方法的比较与优化。孙洁如[7]通过热风干燥以及工艺优化得到生姜的最佳恒温干燥工艺；Ding 等[8]通过评估风干、微波干燥、真空干燥和冷冻干燥方式对生姜挥发性物质的影响，发现不同干燥方式均改变了生姜挥发性成分组成，其中部分烯烃类和苯类物质相对含量升高。An 等[9]比较真空干燥、冷冻干燥、红外干燥、微波干燥和间歇微波对流干燥对生姜品质的影响，结果表明，冷冻干燥、红外干燥和间歇微波对流干燥有利于姜酚、总黄酮类等酚类热敏成分的保留。Huang 等[10]研究发现微波干燥和硅胶干燥均可应用于生姜干燥，并有助于较大程度地保留生姜的风味和外观；肖新生等[11]进一步证实了不同干燥技术的传热传质机制存在显著差异，对不同生姜品种的干燥特性、功能成分保留率、微观结构及食用品质的影响也各不相同。

贵州小黄姜作为西南地区特色药食同源农产品，兼具优良风味与多种生物活性，产业开发潜力显著。目前，关于不同干燥方式对黔姜 2 号小黄姜营养品质、抗氧化活性及加工特性影响的系统性研究仍较为匮乏，制约了其高品质干制产品的开发。因此，本研究以贵州小黄姜黔姜 2 号为原料，系统比较冷冻干燥（freeze drying，FD）、热风干燥（hot air drying，HAD）、真空干燥（vacuum drying，VD）、微波干燥（microwave drying，MD）及红外干燥（infrared drying，ID）5 种干燥方法对其干燥特性、微观结构、主要活性成分保留及抗氧化活性的影响，并通过主成分降维综合分析法筛选重要品质指标，选择最佳干燥方式，以期为贵州高品质干制小黄姜产品的工艺选择提供理论依据与数据支持，也为地方特色药食同源产品的精深加工与高值化利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2025 年 11 月至 2026 年 1 月在贵州省贵阳市清镇市贵州食品工程职业学院实验室进行。供试贵州小黄姜品种为黔姜 2 号，耐寒性强，

适合贵州喀斯特地貌高海拔地区种植，小黄姜成熟样品采自贵州省黔南布依族苗族自治州惠水县涟江街道长征村小黄姜种植示范基地，由惠水县涟江街道长征村股份经济合作社提供。

1.2　试验设计

挑选无腐烂的新鲜小黄姜，清洗干净，进行切片处理，厚度为 3 mm。试验小黄姜样品均来自同一批次。所有干燥试验均进行 3 次重复。

1.2.1　热风干燥（HAD）　选择 WG-20 电热恒温鼓风干燥箱（西安麒麟实验仪器有限公司）。称取经前处理后的姜片 20 g，均匀平铺于鼓风干燥网上，放入电热恒温鼓风干燥箱，55 ℃干燥至恒质量。

1.2.2　真空干燥（VD）　选择 BZF-30B 真空干燥机（上海博迅实业有限公司）。称取经前处理后的姜片 20 g，均匀平铺于真空干燥盘中，放入真空干燥箱，55 ℃干燥至恒质量。

1.2.3　微波干燥（MD）　选择 RWBX-6S 微波干燥机（南京苏恩瑞干燥设备有限公司）。称取经前处理后的姜片 20 g，均匀平铺于微波干燥网上，放入微波干燥箱，设置干燥温度为 55 ℃，下限温度 50 ℃，上限温度 60 ℃，干燥至恒质量。

1.2.4　冷冻干燥（FD）　选择 FD-IA-80 冷冻干燥机（湖南湘仪实验室仪器开发有限公司）。称取经前处理后的姜片 20 g，均匀平铺于冷冻真空干燥盘中，在−18 ℃的预冻温度和−80 ℃的最终干燥温度下，冷冻干燥至恒质量。

1.2.5　红外干燥（ID）　选择 MB-EHR12 陶瓷红外-热风联合干燥器（镇江美博红外科技有限公司）。称取经前处理后的姜片 20 g，均匀平铺于红外干燥网上，固定辐射距离为 20 cm，进行干燥，干燥至恒质量。

1.3　测定指标及方法

1.3.1　干燥时间　记录姜片分别经 5 种干燥方法干燥至恒质量所需的时间（h）。

1.3.2　干燥效率的测定　干燥前与干燥后姜片样品质量之比即为干燥比[12]；复水前与复水后质量比值即为复水比[12]。

1.3.3　干燥后姜片形态结构的观察与测定　微观结构采用 GeminiSEM300 型场发射扫描电子显微镜（德国 Carl Zeiss Microscopy GmbH）观察；硬度采用 TA.XTC-18 质构分析仪（上海保圣实业发展有限公司）测定；L^*（明度）、a^*（红绿值）、b^*（黄蓝值）采用 DS-100 型便携式分光测色仪[彩谱科技（浙江）有限公司]测定；总色差（ΔE）[12]、褐变指数（browning index，BI）[12]、白度指数（whiteness index，WI）[13]参照公式（1）、（2）、（3）、（4）进行计算。

$$\Delta E=\sqrt{(L^*-L_0^*)^2+(a^*-a_0)^2+(b^*-b_0)^2}\ ;\quad(1)$$

$$x=\frac{a^*+1.75L^*}{5.645L^*+a^*-3.012b^*};\quad(2)$$

$$BI=\frac{100\times(x-0.31)}{0.17}\ ;\quad(3)$$

$$WI=100-\sqrt{(100-L^*)^2+a^{*2}+b^{*2}}\ 。\quad(4)$$

式中：L^*_0、a_0、b_0 分别表示鲜姜的明度、红绿值、黄蓝值。

1.3.4　干燥后姜片主要活性成分含量测定　采用福林-酚法[9]测定姜片总酚含量；采用 $NaNO_2$-Al$(NO_3)_3$-NaOH 比色法[9]测定姜片总黄酮含量；采用香草醛-盐酸比色法[12]测定姜片姜辣素含量；采用比色法[14]测定姜片姜黄素含量。

1.3.5　干燥后姜片抗氧化活性的测定　参照苏州格锐思生物科技有限公司生产的试剂盒（G0127F、G0128F）说明书分别测定姜片的 DPPH 和 $ABTS^+$自由基清除率。

1.4　数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2010 软件进行数据处理，采用 Origin 2020 软件绘图，采用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件进行差异显著性分析及主成分分析。

2　结果与分析

2.1　不同干燥方式对小黄姜干燥时间和干燥比的影响

由表 1 可知，FD 处理干燥时间最长，干燥比最高，分别为 18.35 h、9.40，均显著高于其他处理，说明该工艺脱水程度最高，干燥姜片的水分含量最低。MD 处理干燥时间最短，为 1.82 h，显著低于其他处理，干燥比显著高于 HAD、VD、ID。VD 处理姜片的干燥比最小，显著低于其他处理。

表 1　不同干燥方式的干燥时间、干燥比

Table 1　Drying time, drying ratio of different drying methods

处理 Treatment	干燥时间 Drying time/h	干燥比 Drying ratio
HAD	9.65±0.32 b	8.09±0.18 c
VD	8.84±0.10 b	7.82±0.13 d
MD	1.82±0.08 d	8.92±0.13 b
FD	18.35±0.83 a	9.40±0.04 a
ID	5.62±0.55 c	8.31±0.11 c

注：同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

2.2　不同干燥方式对小黄姜姜片形态结构的影响

2.2.1　*形态结构*　由图1可知，经5种干燥方式制备的姜片，其微观结构均可见典型的环形维管束和淀粉颗粒；但受干燥过程中水分迁移与热量传递方式的影响，各样品的细胞结构均出现了不同程度的塌陷与变形。

FD处理的姜片呈奶白色，无明显收缩，最大程度地保留了姜片的原始形态和细胞完整性；扫描电子显微镜观察显示，其形成均匀多孔的海绵状结构；由图2可知，FD处理复水比最高，显著高于其他处理。VD与ID处理的姜片均色泽鲜亮，收缩程度较轻，细胞形态相对完整，横切面“水分通道”结构有助于水分快速逸出，在一定程度上减轻了褐变。HAD处理的姜片呈浅黄褐色，中度收缩且边缘略卷曲；扫描电子显微镜观察显示，其细胞紧密收缩、孔径小且分布不均，存在轻微的熔融粘连现象；由图2可知，其复水性能显著低于FD、VD与ID。而MD处理对姜片的结构与色泽破坏最为显著，扫描电子显微镜观察显示，细胞大面积破裂粘连，形成不规则塌陷的孔洞结构。综合来看，FD处理在保留微观结构完整性与色泽品质上表现最优。

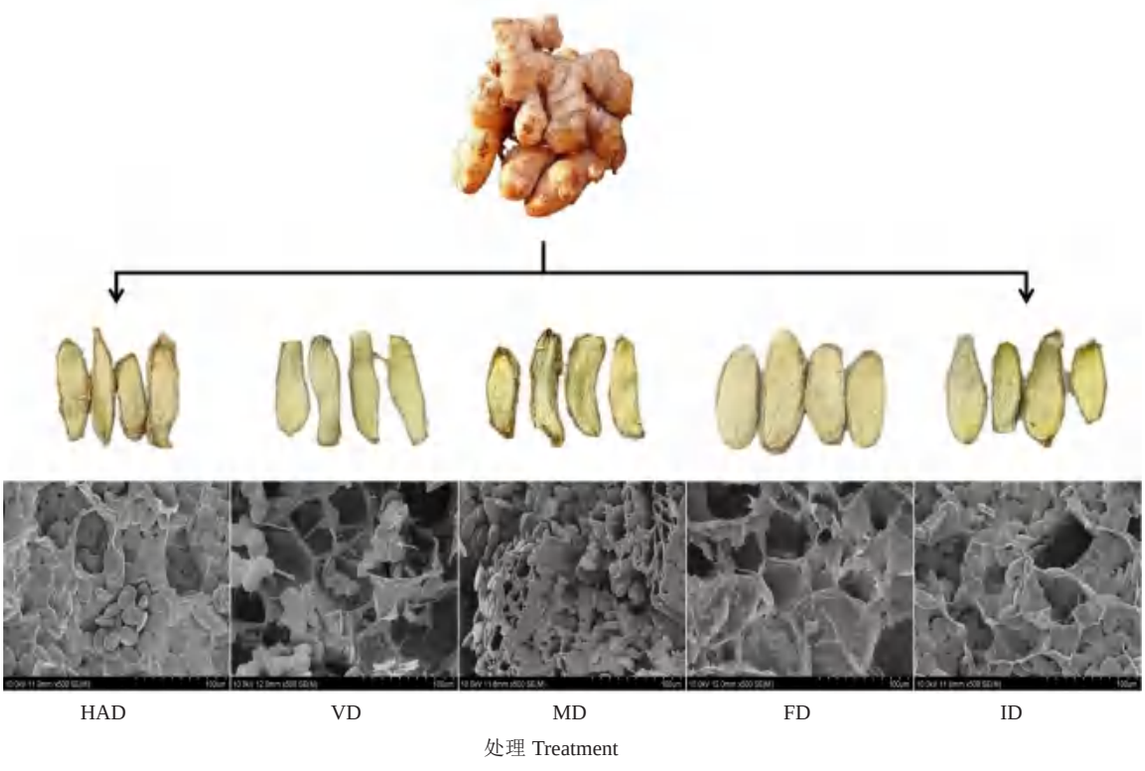
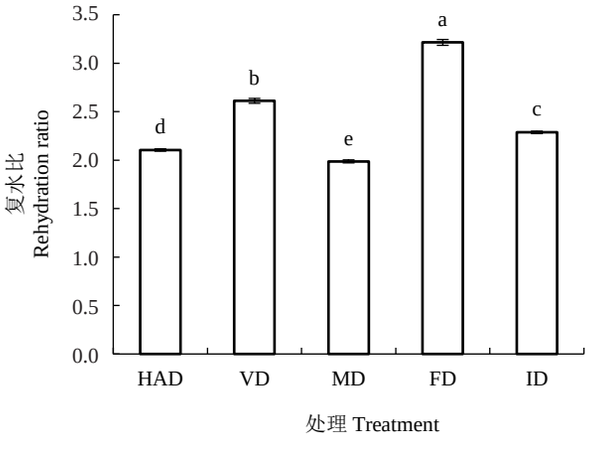


图1　不同干燥方式下小黄姜姜片的数码照片和扫描电子显微镜图像（×500）

Fig. 1　Digital photographs and scanning electron micrographs of Xiaohuang ginger with different drying methods（×500）



注：不同小写字母表示不同处理在0.05水平差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference among different treatments at 0.05 level. The same below.

图2　不同干燥方式对小黄姜复水比的影响

Fig. 2　Effects of different drying methods on rehydration ratio of Xiaohuang ginger

2.2.2　*硬度*　由图3可知，MD处理姜片硬度最高，达1 511.81 N，显著高于其他处理，较HAD、VD、ID处理分别显著提高29.09%、61.26%、142.90%。FD处理的硬度最低，仅为262.70 N，这可能是因为冷冻干燥后的姜片呈现海绵状质地（图1）。热干燥（如MD、HAD）处理则导致姜片严重收缩，形成致密坚硬的结构（图1），因此经MD、HAD处理的姜片硬度均显著高于结构疏松的姜片（VD、FD、ID）。

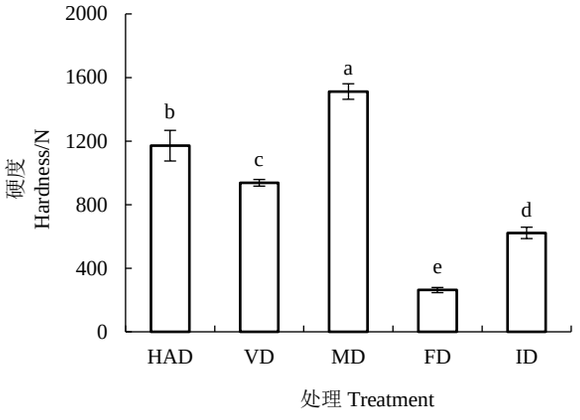


图 3　不同干燥方式对小黄姜硬度的影响

Fig. 3　Effects of different drying methods on hardness of Xiaohuang ginger

2.2.3　*色差分析*　由表 2 可知，不同干燥方式对小黄姜姜片色泽指标的影响存在显著差异。其中 FD 处理 *L**值最高，显著高于其他处理，MD 处理最低；各处理姜片红绿度 *a**值均为正值，MD 处理最高，显著高于其他处理，FD 处理最低，说明冷冻干燥可有效抑制姜片褐变变红；姜片黄蓝度 *b**值同样以 MD 处理最高，FD 处理最低，表明微波干燥会使小黄姜姜片黄色调显著加深，而冷冻干燥姜片色泽更浅。姜片总色差 Δ*E* 以 FD 处理最高，显著高于其他处理，MD 处理最低，说明微波干燥姜片与原料整体色泽差异最小，冷冻干燥姜片色泽变化最明显。褐变指数 BI 为 MD＞ID＞HAD＞VD＞FD，白度指数 WI 则与之相反，FD 处理最高，显著高于其他处理，MD 处理最低。综合各项色泽指标可知，FD 处理能最大程度地维持小黄姜姜片较低的褐变程度与较高白度，色泽品质最优；MD 处理褐变最严重，整体色泽偏暗偏红黄，品质相对较差；VD、HAD 和 ID 处理的色泽效果介于二者之间。

2.3　不同干燥方式对小黄姜主要活性成分含量的影响

2.3.1　*姜辣素*　不同干燥方式下小黄姜姜片姜辣素含量如图 4 所示，FD 处理姜辣素含量最高，达到 15.12 mg·g^{-1}。MD 处理次之，含量为 14.88 mg·g^{-1}，二者间无显著差异，但均显著高于其他处理；VD 与 ID 处理姜片姜辣素含量处于中等水平；HAD 处理的姜辣素含量最低，仅为 9.69 mg·g^{-1}，与 HAD 处理相比，FD、MD、VD、ID 处理姜辣素含量分别显著提高 56.03%、53.51%、34.30%和 27.84%，表明低温或快速干燥方式更有利于姜辣素的保留。

2.3.2　*姜黄素*　如图 5 所示，不同干燥方式对姜片

表 2　不同干燥方式对小黄姜色泽的影响

Table 2　Effects of different drying methods on color of Xiaohuang ginger

处理 Treatment	*L**	*a**	*b**	Δ*E*	BI	WI
HAD	48.96±0.96 b	0.93±0.06 bc	21.03±0.93 b	10.14±0.73 c	55.77±2.67 c	44.78±0.77 c
VD	49.70±1.34 b	0.82±0.14 c	19.31±1.12 c	11.80±0.86 b	49.03±2.80 d	46.10±1.10 b
MD	45.58±0.19 d	1.35±0.20 a	23.14±1.89 a	6.44±1.09 e	70.33±7.17 a	40.83±0.66 e
FD	52.49±0.22 a	0.37±0.03 d	15.26±1.06 d	16.48±0.88 a	34.09±2.92 e	50.08±0.51 a
ID	47.01±0.26 c	1.10±0.12 b	21.81±0.77 ab	8.14±0.58 d	61.93±3.27 b	42.68±0.46 d

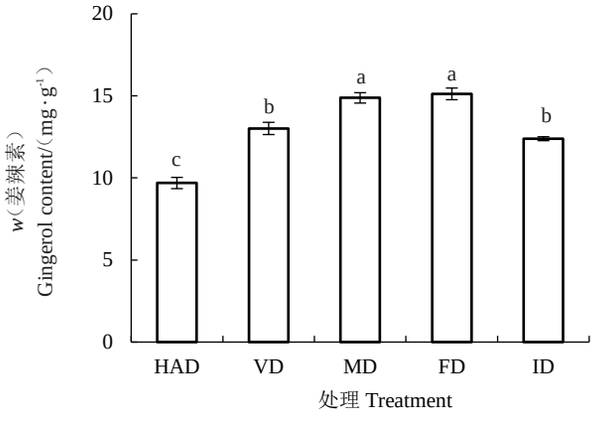


图 4　不同干燥方式对小黄姜姜辣素含量的影响

Fig. 4　Effects of different drying methods on gingerol content of Xiaohuang ginger

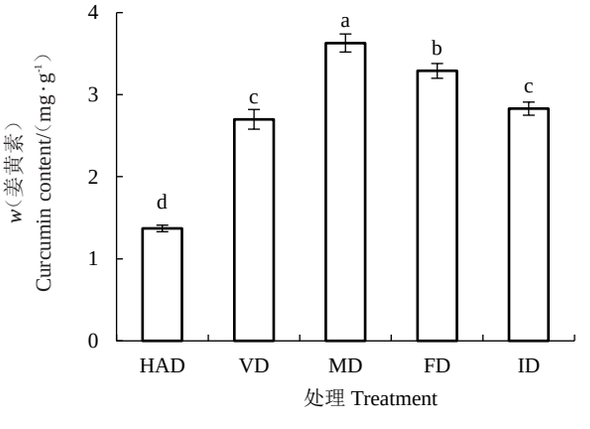


图 5　不同干燥方式对小黄姜姜黄素含量的影响

Fig. 5　Effects of different drying methods on curcumin content of Xiaohuang ginger

姜黄素含量具有显著影响，含量由高到低依次为：MD>FD>ID>VD>HAD。相较于 HAD 处理，MD、FD、ID、VD 处理的姜黄素含量分别显著提高 164.96%、140.15%、106.57%和 97.08%，其中，MD 处理姜黄素含量最高，对姜黄素的保留效果最好。

2.3.3　*酚类物质*　如图 6 所示，不同干燥方式对小黄姜姜片中总酚与总黄酮含量均有显著影响。总酚含量为 19.41~28.99 mg·g^{-1}，总黄酮含量为 7.30~12.41 mg·g^{-1}。其中，FD 处理姜片的总酚、总黄酮含量均最高，均显著高于其他处理，其总酚含量较 HAD、VD、MD、ID 处理分别显著提高了 44.41%、28.52%、49.33%、25.58%，总黄酮含量分别提高了 70.03%、31.39%、31.40%、26.94%；HAD 处理总酚与总黄酮含量均较低，活性物质保留效果较差。

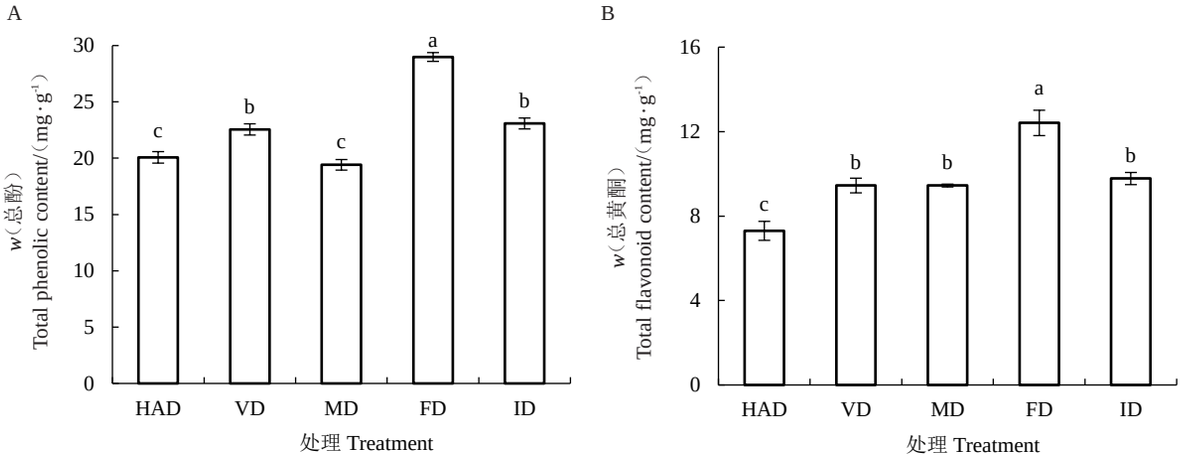


图 6　不同干燥方式对小黄姜总酚（A）和总黄酮（B）含量的影响

Fig. 6　Effects of different drying methods on total phenolic content（A） and total flavonoid content（B） of Xiaohuang ginger

2.4　不同干燥方式对小黄姜抗氧化活性的影响

如图 7 所示，在不同的干燥方法下，FD 处理姜片 DPPH 和 ABTS$^+$自由基清除率均最高，分别为 88.89%和 96.18%，均显著高于其他处理，显示出良好的抗氧化能力；ID 处理次之，其 DPPH 自由基清除率较 MD、VD、HAD 分别显著提高了 9.67、4.22、1.86 百分点，ABTS$^+$自由基清除率较 MD、VD、HAD 分别显著提高了 6.20、5.17、3.70 百分点。MD 处理 DPPH 和 ABTS$^+$自由基清除率均最低，抗氧化活性最差。

2.5　不同干燥方式下小黄姜品质综合评价

2.5.1　*相关性分析*　对不同干燥方式下姜片干燥时间、干燥比、复水比、L*、a*、b*、ΔE、BI、WI、硬度、总酚含量、总黄酮含量、姜黄素含量、姜辣素含量以及 DPPH、ABTS$^+$自由基清除率进行相关性分析，结果如图 8 所示。干燥时间与复水比、L*、ΔE、WI 均呈显著正相关，与 a*、b*、BI 均呈显著负相关；复水比与 L*、ΔE、WI、总酚含量均呈显著正相关，与 a*、

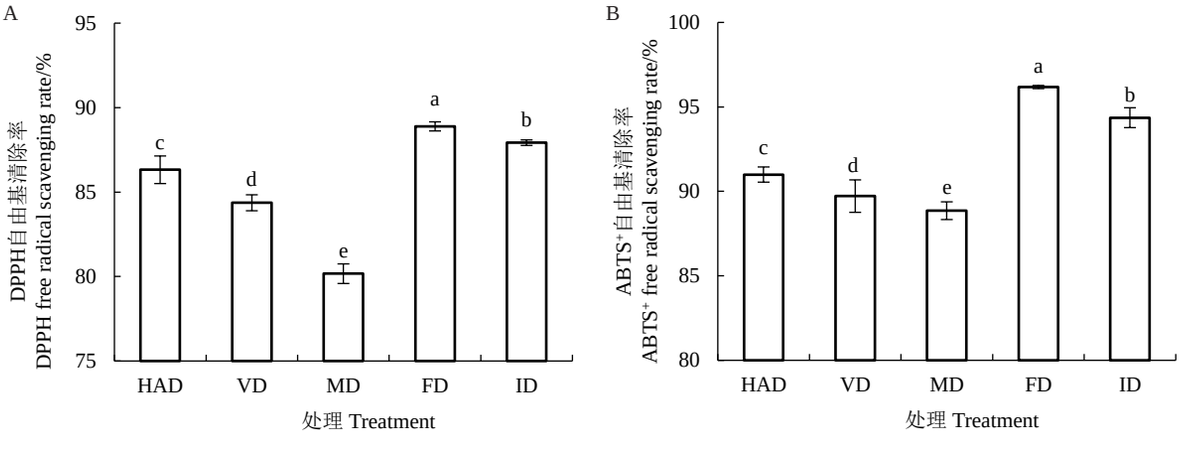
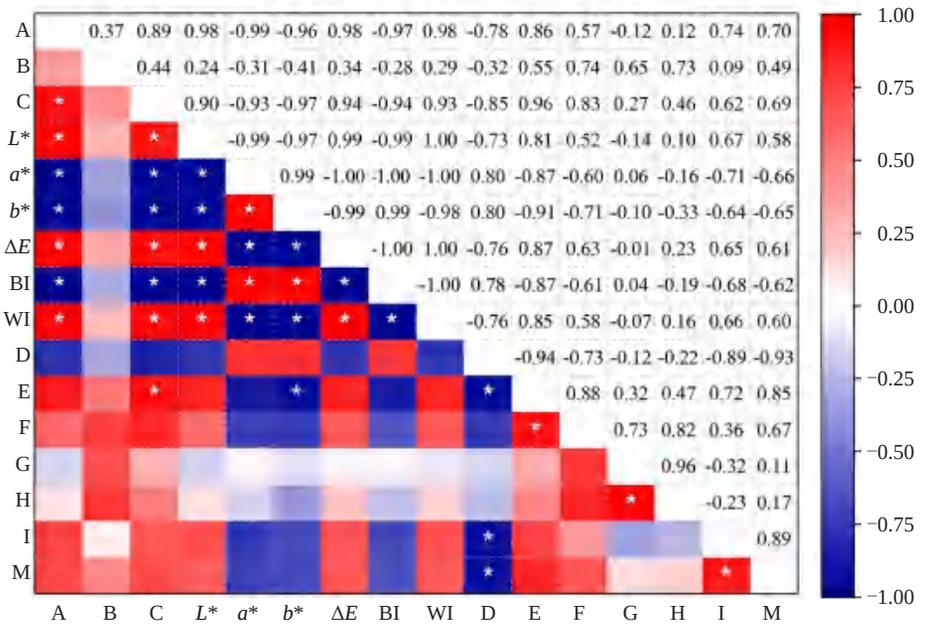


图 7　不同干燥方式对小黄姜 DPPH 自由基清除率（A）和 ABTS$^+$自由基清除率（B）的影响

Fig. 7　Effects of different drying methods on DPPH free radical scavenging rate（A） and ABTS$^+$ free radical scavenging rate（B） of Xiaohuang ginger

b*、BI 均呈显著负相关。色泽指标之间，L*与 ΔE、WI 均呈显著正相关，与 a*、b*、BI 均呈显著负相关；a*与 b*、BI 均呈显著正相关，与 ΔE、WI 均呈显著负相关；b*与 BI 呈显著正相关，与 ΔE、WI 总酚含量均呈显著负相关；ΔE 与 WI 呈显著正相关，与 BI 呈显著负相关；BI 与 WI 呈显著负相关。硬度与总酚含量、DPPH 自由基清除率、ABTS$^+$自由基清除率均呈显著负相关；总酚含量与总黄酮含量呈显著正相关；姜黄素含量与姜辣素含量呈显著正相关；DPPH 自由基清除率与 ABTS$^+$自由基清除率呈显著正相关。综上所述，各指标之间存在较强的相关性，因此可采用主成分进行进一步分析。

2.5.2　主成分分析　为明确不同干燥处理对小黄姜品质的综合影响，对检测的 16 个指标进行主成分分析。如表 3 所示，根据特征值大于 1 共提取出 3 个主成分，累计贡献率达 97.173%，可基本反映所有指标的信息。



注：A. 干燥时间；B. 干燥比；C. 复水比；L*. 明度；a*. 红绿值；b*. 黄蓝值；ΔE. 总色差；BI. 褐变指数；WI. 白度指数；D. 硬度；E. 总酚含量；F. 总黄酮含量；G. 姜黄素含量；H. 姜辣素含量；I. DPPH 自由基清除率；M. ABTS$^+$自由基清除率。*表示在 0.05 水平显著相关。

Note: A. Drying time; B. Drying ratio; C. Rehydration ratio; L*. Lightness; a*. Red-green value; b*. Yellow-blue value; ΔE. Total color difference; BI. Browning index; WI. Whiteness index; D. Hardness; E. Total phenolic content; F. Total flavonoid content; G. Curcumin content; H. Gingerol content; I. DPPH radical scavenging rate; M. ABTS$^+$ radical scavenging rate. * represents significant correlation at 0.05 level.

图 8　不同干燥方式下姜片各指标间的相关性热图

Fig. 8　Correlation heatmap of quality parameters of ginger slices under different drying methods

由表 3 可知，在第 1 主成分中，干燥时间、复水比、L*、a*、b*、ΔE、WI、BI、硬度、总酚含量均具有较高的载荷绝对值，说明第 1 主成分综合反映了干燥姜片的形态结构与酚类物质指标。在第 2 主成分中，姜黄素与姜辣素的载荷绝对值较高，说明第 2 主成分主要反映干燥姜片的活性成分指标；在第 3 主成分中，DPPH、ABTS$^+$自由基清除率载荷绝对值较高，表明第 3 主成分主要体现干燥姜片的抗氧化活性差异。

此外，由表 3 主成分矩阵得到主成分与干燥时间、干燥比、复水比、L*、a*、b*、ΔE、BI、WI、硬度、总酚含量、总黄酮含量、姜黄素含量、姜辣素含量以及 DPPH、ABTS$^+$自由基清除率的线性表达式如下所示：

$$Y_1=0.282X_1-0.257X_2+0.291X_3+0.277X_4-0.288X_5-0.293X_6+0.286X_7-0.286X_8+0.283X_9-0.273X_{10}+0.291X_{11}+0.229X_{12}+0.037X_{13}+0.094X_{14}+0.228X_{15}+0.240X_{16};$$

$$Y_2=-0.137X_1-0.247X_2+0.085X_3-0.149X_4+0.109X_5+0.057X_6-0.094X_7+0.128X_8-0.124X_9-0.003X_{10}+0.113X_{11}+0.358X_{12}+0.558X_{13}+0.519X_{14}-0.222X_{15}+0.016X_{16};$$

$$Y_3=0.138X_1+0.202X_2+0.125X_3+0.248X_4-0.168X_5-0.151X_6+0.213X_7-0.162X_8+0.215X_9+0.355X_{10}-0.107X_{11}-0.052X_{12}+0.047X_{13}+0.190X_{14}-0.470X_{15}-$$

表 3 各处理小黄姜理化指标的主成分载荷矩阵与方差贡献率

Table 3 Load matrix and variance contribution rate of PCA for physicochemical parameters in different treatments

理化指标 Physicochemical parameter	第 1 主成分 Principal component 1	第 2 主成分 Principal component 2	第 3 主成分 Principal component 3
干燥时间 Drying time	0.945	−0.244	0.150
干燥比 Drying ratio	−0.860	−0.439	0.220
复水比 Rehydration ratio	0.970	0.150	0.140
*L**	0.926	−0.264	0.269
*a**	−0.960	0.190	−0.180
*b**	−0.980	0.100	−0.160
Δ*E*	0.958	−0.167	0.231
BI	−0.956	0.227	−0.176
WI	0.947	−0.221	0.234
硬度 Hardness	−0.914	−0.006	0.386
总酚含量 Total phenols content	0.970	0.200	−0.120
总黄酮含量 Total flavonoids content	0.767	0.637	−0.056
姜黄素含量 Curcumin content	0.124	0.991	0.051
姜辣素含量 Gingerol content	0.314	0.923	0.207
DPPH 自由基清除率 DPPH free radical scavenging rate	0.763	−0.395	−0.511
$ABTS^+$自由基清除率 $ABTS^+$ free radical scavenging rate	0.802	0.028	−0.568
方差贡献率 Variance contribution rate/%	70.052	19.737	7.384
累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%	70.052	89.789	97.173

$0.5230X_{16}$。

式中，X_1~X_{16}分别为标准化后的干燥时间、干燥比、复水比、*L**、*a**、*b**、Δ*E*、BI、WI、硬度、总酚含量、总黄酮含量、姜黄素含量、姜辣素含量、DPPH 自由基清除率、$ABTS^+$自由基清除率。小黄姜的综合评价函数模型为：$Y=0.700\ 52Y_1+0.197\ 37Y_2+0.073\ 84Y_3$。

利用该数学模型进行综合评价，综合得分越高，干燥后的小黄姜的综合品质越好。由表 4 可知，5 种干燥方法中，FD 处理小黄姜品质最优，VD 处理次之。

表 4 各处理小黄姜品质的综合分析

Table 4 Comprehensive analysis of Xiaohuang ginger quality among different treatments

处理 Treatment	第 1 主成分 Principal component 1	第 2 主成分 Principal component 2	第 3 主成分 Principal component 3	综合得分 Comprehensive score	排名 Rank
HAD	−1.05	−2.17	−0.24	−1.18	4
VD	0.59	0.05	0.78	0.48	2
MD	−3.81	1.85	0.56	−2.26	5
FD	4.93	−0.03	0.75	3.50	1
ID	−0.67	0.30	−1.85	−0.55	3

3 讨论与结论

果蔬干燥时间以及干燥比是衡量其干燥程度的重要参数之一[12]。本试验结果表明 MD 处理干燥时间最短，可能是微波干燥利用电磁波作用于物料，使内部水分子在交变场中发生偶极转向，通过分子间摩擦产生热量，从而迅速升高物料温度并加快水分脱除。ID 处理可能是因为红外干燥是基于电能转化的红外辐射对物料进行加热，其辐射能同时穿透物料表层与内部，因此其干燥时间也较短[15]。该结果与 L*i 等[16]的研究结果一致，其结果表明微波真空冷冻干燥的干燥时间最短，红外干燥次之，冷冻干燥的时间最长。

干燥后样品的宏观形态与微观结构是表征其物理性质的关键依据，二者共同决定了样品的外观状态、孔隙特征及质构表现等核心物理属性[17]。本试验结果表明，FD 处理姜片的 *L** 与 WI 值均最高，BI 值、硬度均最低，可能是由于冷冻干燥过程中水分以冰晶形式升华，最大程度地保留了细胞原始结

构。Ren 等[5]也研究发现冷冻干燥姜片的 *L**值最高，褐变程度最低，颜色最接近新鲜样品，硬度最低，可较大程度地保留原始组织结构。与之相反，MD 与 ID 处理姜片的 *L**值较低，这两种干燥方式较强的热效应可能导致美拉德反应或抗坏血酸褐变[18]，从而使色泽变暗。ID 处理姜片的硬度显著高于 FD 处理，可能是因为热干燥过程中热量由表及里传递，细胞失水收缩速度较快，进而引发细胞壁与组织骨架坍塌，组织收缩程度大，因此硬度更高[19]。

姜辣素是生姜和干姜提取物中的主要刺激性成分，是发挥多种药理和生理作用的代谢物，主要包括姜酚、姜烯酚以及姜酮等[20]。姜黄素则是生姜中的一种天然色素物质，具有降血脂、抗炎等药理作用[21]。本研究中，FD 处理姜片的姜辣素含量最高，可能是因为多酚氧化酶的活性随着温度的降低而降低，减少了姜辣素的氧化降解，且冰晶升华对细胞结构破坏较小，有利于姜辣素保留[22]。FD 处理姜片呈现白色调，则可能与其低温、低氧环境下褐变反应受到抑制有关。本研究中 MD 处理姜黄素含量最高。Suresh 等[23]研究表明，姜黄素易受热降解为阿魏酸、香草醛和香草酸，因此 MD 处理可能因为干燥时间短，从而避免了姜黄素因受热时间过长而降解，使姜黄素含量较高。肖新生等[16]的研究表明，MD 处理下江永香姜的姜黄素含量最高，并认为 MD 处理干燥时间短、速率快，可减少姜黄素的热降解，与本研究结果一致。

小黄姜干燥处理后的总酚含量为 19.41~28.99 mg·g^{-1}，与 Mustafa 等[24]通过干燥姜片后测得结果基本一致。在不同的干燥方式下，FD 处理姜片总酚与总黄酮含量均最高，可能是冷冻干燥对姜片的细胞结构破坏较小，最大程度地保留了酚类物质。Mphahlele 等[25]的研究也表明，冷冻干燥样品的总酚、总黄酮含量及抗氧化能力均高于其他干燥方式。此外，ID 处理姜片的酚类物质含量、DPPH 自由基清除率、ABTS^{+}自由基清除率均高于 VD、MD、HAD，可能是因为红外线干燥可以释放和激活样品中的低分子天然抗氧化剂（如酚酸和类黄酮等），使其抗氧化活性增强[26]。

综合分析结果表明，FD 处理小黄姜综合品质最优，可能是冷冻干燥有效避免了热敏性成分的降解与氧化，最大程度地保留了姜的天然多孔结构和细胞完整性，从而全面维持了其形态结构、营养物质含量与抗氧化活性。而 VD 处理则是从内到外对物料进行加热，物料的内外温差较小，避免了常规加热中出现的内外加热不一致的状况，因此 VD 处理小黄姜的综合品质仅次于 FD，高于 ID、HAD、MD，与肖新生等[11]的研究结果一致，其研究也表明江永香姜采用 VD 处理后综合品质最高。未来研究将聚焦干燥工艺参数优化，建立多因素协同调控的参数优化模型，从而提升研究的实际应用价值与产业化指导意义。

综上所述，不同干燥方式小黄姜的干燥特性（干燥时间、干燥比）、形态结构（微观结构、色泽、复水比、硬度）、活性物质（总酚、总黄酮、姜黄素、姜辣素）含量及抗氧化活性（DPPH 自由基清除率、ABTS^{+}自由基清除率）均有显著差异。综合得分由高到低依次为冷冻干燥>真空干燥>红外干燥>热风干燥>微波干燥。考虑到冷冻干燥能耗和时间成本偏高，而真空干燥处理的小黄姜形态结构完整，酚类物质及活性物质含量较高，且时间成本更为经济，因此确定真空干燥是贵州小黄姜适宜的干燥工艺。本研究可为小黄姜干燥工艺的筛选与优化提供关键数据支撑，对提升其加工品品质与附加值具有明确的指导意义。

参考文献

[1] Ok S，Jeong W S. Optimization of extraction conditions for the 6-shogaol-rich extract from ginger（*Zingiber officinale* Roscoe）[J]. Preventive Nutrition and Food Science，2012，17（2）：166-171.

[2] Kiyama R. Nutritional implications of ginger：Chemistry，biological activities and signaling pathways[J]. The Journal of Nutritional Biochemistry，2020，86：108486.

[3] 汤盼盼. 贵州山区小黄姜机械化高效高产技术[J]. 长江蔬菜，2024（3）：20-24.

[4] Olusoga S，Olakunle P O J，Batola L* A. Effects of storage methods on sprouting and nutritional quality of ginger（*Zingiber officinale* Rosc.）rhizomes in different storage periods[J]. International Journal of Agriculture，2016，1（1）：51-60.

[5] Ren Z F，Yu X J，Yagoub A E A，et al. Combinative effect of cutting orientation and drying techniques（hot air，vacuum，freeze and catalytic infrared drying）on the physicochemical properties of ginger（*Zingiber officinale* Roscoe）[J]. L*WT-Food Science and Technology，2021（144）：111238.

[6] Kubra R I，Rao M J L*. Effect of microwave drying on the phytochemical composition of volatiles of ginger[J]. International Journal of Food Science & Technology，2012，47（1）：53-60.

[7] 孙洁如. 生姜热风干燥工艺及品质控制研究[D]. 山东泰安：山东农业大学，2020.

[8] Ding S H，An K J，Zhao C P，et al. Effect of drying methods on volatiles of Chinese ginger（*Zingiber officinale* Roscoe）[J]. Food and Bioproducts Processing，2012，90（3）：515-524.

[9] An K D，Zhao D，Wang Z，et al. Comparison of different drying methods on Chinese ginger（*Zingiber officinale* Roscoe）：Changes in volatiles，chemical profile，antioxidant properties，and microstructure[J]. Food Chemistry，2016（197）：1292-1300.

[10] Huang B K，Wang G W，Chu Z Y，et al. Effect of oven drying microwave drying，and silica gel drying methods on the volatile components of ginger（*Zingiber officinale* Roscoe）by HS- SPME- GC- MS[J]. Drying Technology，2012，30（3）：248-255.

[11] 肖新生，周文君，奉美桃，等.基于主成分分析的不同干燥方式对江永香姜营养品质和抗氧化活性的影响[J].食品工业科技，2024，45（23）：310-321.

[12] 马卓云.岳西小黄姜干燥工艺及有效成分联合提取的研究[D].江苏无锡：江南大学，2024.

[13] Dominique R，Hélène S，Dalila P，et al. Browning susceptibility of new hybrids of yam（*Dioscorea alata*）as related to their total phenolic content and their phenolic profile determined using L*C- UV- MS[J]. L*WT- Food Science and Technology，2022（162）：113410.

[14] 王雪，位思清，李宁阳，等.生姜护色及热风干燥工艺条件优化[J].中国调味品，2018，43（10）：11-16.

[15] Ning X F，Feng Y L*，Gong Y J，et al. Drying features of microwave and far-infrared combination drying on white ginseng slices[J]. Food Science Biotechnology，2019，28（4）：1065-1072.

[16] L*i C Y，Ren G Y，Zhang L* D，et al. Effects of different drying methods on the drying characteristics and drying quality of cistanche deserticola[J]. L*WT- Food Science and Technology，2023（184）：115000.

[17] Wang J，Bai T，Wang D，et al. Pulsed vacuum drying of Chinese ginger（*Zingiber officinale* Roscoe）slices：Effects on drying characteristics，rehydration ratio，water holding capacity，and microstructure[J]. Drying Technology，2019，37（3）：301-311.

[18] Michalska A，Wojdylo A，Honke J，et al. Drying-induced physico-chemical changes in cranberry products[J]. Food Chemistry，2018（240）：448-455.

[19] Wang J，L*aw C L*，Nema P K，et al. Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slices[J]. Journal of Food Engineering，2018（224）：129-138.

[20] Mahboubi M. *Zingiber officinale* Rosc. essential oil，a review on its composition and bioactivity[J]. Clinical Phytoscience，2019（5）：1-12.

[21] 吕金丽，罗凯，吕树鸣，等.15份不同生境生姜种质资源品质差异性评价[J].中国瓜菜，2026，39（2）：152-162.

[22] Chumroenphat T，Somboonwatthanakul I，Saensouk S，et al. Changes in curcuminoids and chemical components of turmeric（*Curcuma longa* L*.）under freeze-drying and low-temperature drying methods[J]. Food Chemistry，2021（339）：128121.

[23] Suresh D，Gurudutt K N，Srinivasan K. Degradation of bioactive spice compound：curcumin during domestic cooking[J]. European Food Research and Technology，2009，228（4）：807-812.

[24] Mustafa I，Chin N L*，Fakurazi S，et al. Comparison of phytochemicals，antioxidant and anti-inflammatory properties of sun-，oven- and freeze-dried ginger extracts[J]. Foods，2019，8（10）：456.

[25] Mphahlele R R，Fawole O A，Makunga N P，et al. Effect of drying on the bioactive compounds，antioxidant，antibacterial and antityrosinase activities of pomegranate peel[J]. BMC Complementary and Alternative Medicine，2016，16（1）：143.

[26] Adak N，Heybeli N，Ertekin C. Infrared drying of strawberry[J]. Food Chemistry，2017（219）：109-116.