

郎旭敏, 徐亚元, 肖亚冬, 等. 不同组合干燥方式对胡萝卜脆片品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(2): 493-502.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2021.02.027

## 不同组合干燥方式对胡萝卜脆片品质的影响

郎旭敏<sup>1,2</sup>, 徐亚元<sup>1</sup>, 肖亚冬<sup>1</sup>, 李大婧<sup>1</sup>, 刘春泉<sup>1</sup>, 郑铁松<sup>2</sup>, 宋江峰<sup>1</sup>, 张钟元<sup>1</sup>

(1.江苏省农业科学院农产品加工所,江苏 南京 210014; 2.南京师范大学食品与制药工程学院,江苏 南京 210097)

**摘要:** 研究了热风-气流膨化干燥(AD-EPD)、旋转式微波-气流膨化干燥(MD-EPD)、振动旋转式微波-气流膨化干燥(VMD-EPD)、热风耦合振动旋转式微波-气流膨化干燥(AD+VMD-EPD)和热风联合旋转式微波-气流膨化干燥(AD+MD-EPD)5种不同组合干燥方式对胡萝卜脆片品质的影响,并分析了不同预干燥方式对色泽、水分以及温度均匀性的影响。结果表明:不同预干燥方式对水分和温度均匀性影响显著( $P<0.05$ ),其中VMD预干燥方式对水分和温度干燥均匀性改善最为显著。不同预干燥方式与EPD联合后,对胡萝卜脆片质构和营养品质影响显著( $P<0.05$ ),其中,VMD-EPD干燥方式显著降低胡萝卜脆片硬度,微观结构呈均匀多孔疏松状,且对总黄酮、 $V_c$ 及总类胡萝卜素有显著保护作用。通过不同组合干燥方式胡萝卜脆片品质的27个指标进行主成分分析,筛选出13个评价核心指标并建立综合品质评价模型,其中,综合得分最高的是VMD-EPD干燥方式。

**关键词:** 胡萝卜脆片; 组合干燥; 品质

**中图分类号:** TS255.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4440(2021)02-0493-10

## Effects of different combined drying methods on the quality of carrot chips

LANG Xu-min<sup>1,2</sup>, XU Ya-yuan<sup>1</sup>, XIAO Ya-dong<sup>1</sup>, LI Da-jing<sup>1</sup>, LIU Chun-quan<sup>1</sup>, ZHENG Tie-song<sup>2</sup>,  
SONG Jiang-feng<sup>1</sup>, ZHANG Zhong-yuan<sup>1</sup>

(1. Institute of Agro-product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. School of Food and Pharmaceutical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

**Abstract:** The effects of five different combined drying methods on the quality of carrot chips were studied, including hot air-explosion puffing drying (AD-EPD), rotating microwave-explosion puffing drying (MD-EPD), vibrating rotating microwave-explosion puffing drying (VMD-EPD), hot air coupled vibrating rotating microwave-explosion puffing drying (AD+VMD-EPD) and hot air combined rotating microwave-explosion puffing drying (AD+MD-EPD). The effects of different pre-drying methods on color, moisture and temperature uniformity were analyzed. The results showed that different pre-drying methods had significant effects on the uniformity of moisture and temperature ( $P<0.05$ ), and VMD pre-drying method was the most significant one. The texture and nutritional quality of carrot chips were significantly affected by different

pre-drying methods combined with EPD ( $P<0.05$ ). The VMD-EPD drying method significantly reduced, had significant protective effect on total flavonoids,  $V_c$  and total carotenoids, and the microstructure was porous and loose. Through the principal component analysis of 27 quality indices of carrot chips with different combined drying methods, 13 core indices were selected, and a com-

收稿日期: 2020-07-03

基金项目: 国家重点研发计划子课题(2017YFD0400901-4); 江苏省重点研发计划重点项目(BE-2018382); 江苏省基础研究计划(自然科学基金)青年基金项目(SBK20180307)

作者简介: 郎旭敏(1996-), 女, 江苏镇江人, 硕士研究生, 研究方向为农产品加工。(E-mail) 13182873611@163.com

通讯作者: 徐亚元, (E-mail) xuyayuanxy2008@126.com

prehensive quality evaluation model was established. Among them, VMD-EPD had the highest comprehensive score.

**Key words:** carrot chip; combined drying; quality

胡萝卜 (*Daucus carota* L.), 又名胡芦菔或甘荀, 伞形科胡萝卜属二年生草本植物<sup>[1]</sup>, 其根和嫩叶是可食用的常见蔬菜。胡萝卜含有丰富的营养成分, 如类胡萝卜素、蛋白质、脂肪、纤维素、维生素 B<sub>1</sub>、维生素 B<sub>2</sub>、维生素 B<sub>6</sub>、维生素 B<sub>12</sub> 以及各种无机盐等, 具有多项保健功能, 如抗氧化、促进生长发育、保护视力、抗癌防癌、提高免疫、促消化等<sup>[2]</sup>。脱水加工是胡萝卜主要加工方式之一, 加工后的产品便于运输和储存, 能延长货架期, 解决偏远山区的供给问题, 能有效调节蔬菜生产淡旺季节。随着生活水平的提高, 人们对脂肪类食品的需求减少, 而对果蔬的需求增加, 因此, 开发营养、健康、方便且耐储存的休闲果蔬脆产品对提升果蔬的附加值具有重要意义。

传统的干燥技术对产品颜色、复水率、体积和孔隙率有影响, 如热风干燥时温度影响产品颜色和味道<sup>[3]</sup>以及贮藏品质<sup>[4]</sup>。单一干燥方法如热风、微波、气流膨化等获得的非油炸型胡萝卜休闲食品质地偏硬且均匀性不佳, 真空冷冻干燥的脆片质量虽高, 但干燥时间长、成本高且能耗大。真空干燥<sup>[5]</sup>可以较好地保持胡萝卜组织结构完整性, 并且减少营养物质的流失, 但存在耗能和加热温度控制的问题。热风干燥<sup>[6]</sup>胡萝卜时, 温度同样是干燥过程的重要因素, 对胡萝卜风味、色泽、营养等都有一定影响。微波干燥<sup>[7]</sup>能够减少微生物生长、酶活性和化学反应且节约成本, 但存在温度分布不均、护色能力差等缺点。远红外干燥是一种节能高效的干燥方法, 但在食品加工行业应用较少, 其干燥速率快、时间短。远红外干燥胡萝卜可减少有效成分损失, 改善品质及节约时间<sup>[8]</sup>。气流膨化干燥<sup>[9]</sup>又称爆炸膨化干燥 (Explosion puffing drying)、压差膨化干燥等, 其原理是利用物料在膨化和抽空过程中温度不同, 相变和气体的热压效应使物料内部的水分瞬间升温汽化、减压膨胀, 期间膨胀力带动组织中高分子物质的结构变性, 即利用物料在真空 (膨化) 状态下去除水分从而形成具有网状结构特征、定型的多孔状物质。气流膨化干燥所得的产品具有绿色天然、品质优良、营养丰富、易于贮存等优点, 但单一的气流膨化干燥无法使产品酥脆感达到人们的要求, 通过其他干燥方式或预处理方法与其相组合可提高膨

化效果, 增加酥脆感, 如彭健等<sup>[10]</sup>发现渗透处理能调控干燥过程质构变化, 有效提高气流膨化干燥胡萝卜脆条质构品质。联合干燥如微波-冷冻干燥<sup>[11]</sup>、真空冷冻-真空微波干燥<sup>[12]</sup>以及热风、微波和气流膨化等干燥方式相互组合的干燥方式能够降低能耗和成本, 改善产品品质。然而, 不同组合干燥方式对胡萝卜脆片品质及均匀性影响的研究尚未见报道。

因此, 本研究以胡萝卜为研究材料, 采用热风-气流膨化干燥 (AD-EPD)、旋转式微波-气流膨化干燥 (MD-EPD)、振动旋转式微波-气流膨化干燥 (VMD-EPD)、热风耦合振动旋转式微波-气流膨化干燥 (AD+VMD-EPD) 和热风联合旋转式微波-气流膨化干燥 (AD+MD-EPD) 这 5 种不同组合干燥方式对胡萝卜进行干燥, 借助质构、电镜扫描、红外热成像仪等手段探讨不同组合干燥方式对胡萝卜脆片感官、营养、色泽、质构、预干燥均匀性及微观结构的影响, 通过多元统计分析方法确定最佳组合干燥方式, 为胡萝卜脆片的加工提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

胡萝卜购于南京市玄武区安振强副食品销售中心。

Folin 酚试剂, 上海麦克林生化科技有限公司生产; 2,6-二氯靛酚、考马斯亮蓝 G-250 试剂, 上海蓝季科技发展有限公司生产; 盐酸, 成都市科龙化工试剂厂生产; 乙醇、碳酸氢钠、亚硝酸钠、硝酸铝、醋酸钠、正己烷、甲醇, 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司生产;  $\beta$ -胡萝卜素、没食子酸、抗坏血酸、芦丁标准品, 上海源叶生物科技有限公司生产。

KQ-S1000VDE 型三频数控超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司生产; XWJD6SW-2 型微波真空杀菌干燥设备, 南京孝马机电设备厂生产; 振动式微波真空干燥设备, 南京孝马机电设备厂生产; QDPH-5 型电加热式气流膨化设备, 天津市勒德新材料科技有限公司生产; CM-700d1 全自动色差计, 日本柯尼卡美能达公司生产; CT3 质构仪, 英国 CNS Farmell 公司生产; UV-6300 型紫外可见分光光度

计,上海美谱达仪器有限公司生产;Quanta-200 环境扫描电子显微镜,美国 FEI 公司生产。

## 1.2 试验方法

1.2.1 胡萝卜脆片不同组合干燥工艺 胡萝卜经清洗、切片制得厚度为 8 mm、直径为 34 mm 的圆柱,于 4 ℃ 冰箱贮藏备用。预干燥工艺分别为:AD、MD、VMD、AD+VMD 和 AD+MD。具体方法如下,AD:胡萝卜片平铺于样品盘,置于恒温鼓风干燥箱中,热风温度为 75 ℃,干燥至水分含量(水分转换点)为 75%左右;MD、VMD:干燥功率密度为 5 W/g,干燥至水分含量(水分转换点)为 75%左右;AD+VMD:热风温度为 75 ℃,振动式旋转微波功率密度为 5 W/g,干燥至水分含量(水分转换点)为 75%左右;AD+MD:热风温度为 75 ℃,微波功率密度为 5 W/g,干燥至水分含量(水分转换点)为 75%左右。

组合干燥工艺为:胡萝卜预干燥至水分转换点后放置于气流膨化罐中干燥至终点,即水分含量为 6%左右。气流膨化干燥条件为膨化温度 100 ℃,抽空温度 75 ℃,抽空时间 180 min,停滞时间 10 min。

### 1.2.2 指标测定

1.2.2.1 水分含量测定 根据 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准食品中水分的测定》直接干燥法测定水分含量。

1.2.2.2 干燥特性测定 干燥特性中干基含水率<sup>[13]</sup>依据下述公式计算:

$$M_t = \frac{m_t - m_g}{m_g}$$

式中: $M_t$ 为试验样品干燥至  $t$  时刻的干基含水率, $m_t$ 为试验样品干燥至  $t$  时刻的质量, $m_g$ 为试验样品干燥至恒质量时的质量。

1.2.2.3 水分有效扩散系数测定<sup>[14-15]</sup> 水分比(MR)反映样品水分含量与初始水分含量在  $t$  时刻的比值,与干燥速率的快慢有关,按如下公式计算:

$$MR = \frac{M_t}{M_0}$$

式中:MR 为水分比, $M_t$ 为干燥至  $t$  时刻的干基含水率, $M_0$ 为试样初始含水率。

水分有效扩散系数反映物料的脱水能力,按以下公式计算:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ -\frac{(2n+1)^2 2\pi^2 D_{eff} t}{4 L^2} \right]$$

公式简化后为:

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

式中: $D_{eff}$ 为水分有效扩散系数 ( $m^2/s$ ), $L$ 为切片厚度(m), $t$ 为干燥时间(s)。

1.2.2.4 硬度、脆度测定 硬度、脆度测定采用 CT3 质构仪。探头型号用 HDP/BSW,测试条件为:前期测试速度 1.0 mm/s,检测速度 1.0 mm/s,后期测试速度 10.0 mm/s,感应力 5 g,压缩距离 8 mm。将物料置于中空测试台上,测出其压力峰值-变形时间质构图,硬度为坐标图中最大压力峰值,单位为 g;脆度是下压探头第一次冲向样品过程中在坐标图上出现的第一个明显压力峰值。每个处理样品重复 6 次。

1.2.2.5 收缩率测定 称取样品 5 g,将其浸入 60 ml 水中,10 s 内读出体积变化量( $V_1 - V_0$ )。

$$\rho = W / (V_1 - V_0)$$

式中: $\rho$ 为质量体积分数( $kg/m^3$ ), $W$ 为样品质量(g), $V_0$ 、 $V_1$ 分别为放入样品前、后量筒里水的体积(ml)。

$$s = \frac{\rho_0 (X_d + 1)}{\rho_d (X_0 + 1)}$$

式中: $s$ 为收缩率,无因次量; $\rho_0$ 和 $\rho_d$ 分别为新鲜样品和干制样品的质量体积分数( $kg/m^3$ ); $X_0$ 和 $X_d$ 分别为鲜样及干制品的干基含水率(%)。 $s$ 值越小,样品体积收缩越大<sup>[16]</sup>。

1.2.2.6 膨化率测定 采用小米法<sup>[17]</sup>,物料体积的测量以小米为置换介质,分别测定胡萝卜脆片气流膨化干燥前后的体积  $V$ ,并按如下公式计算膨化率( $P$ )。

$$P = \frac{V_3 - V_1}{V_2 - V_1} \times 100\%$$

式中: $P$ 为膨化率, $V_1$ 为小米的体积( $cm^3$ ), $V_2$ 为小米和干燥前胡萝卜片的体积( $cm^3$ ), $V_3$ 为小米和干燥后胡萝卜脆片的体积( $cm^3$ )。

1.2.2.7 色泽<sup>[18]</sup>测定 采用 CM-700d1 全自动色差计,以白板色泽为标准,测定样品色泽。测得样品的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ ,其中  $L^*$  为亮度, $L^* = 0$  为黑色, $L^* = 100$  为白色; $a^*$  为红度,  $+a^*$  为偏红色,  $-a^*$  为偏绿色; $b^*$  为黄度,  $+b^*$  为黄色,  $-b^*$  为偏蓝色,  $\Delta E$  为颜色变化值。每个样品重复测试 5 次取平均值,总色差  $\Delta E$

计算公式如下:

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

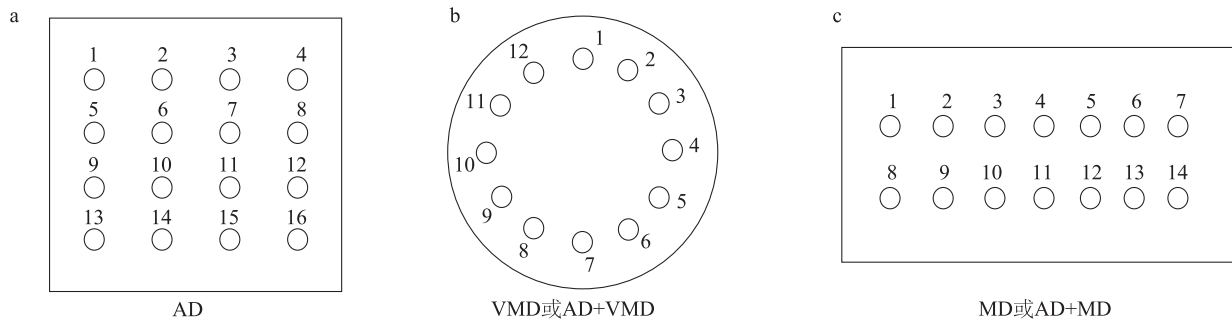
式中  $\Delta E$  表示总差值,  $L_0^*$ 、 $a_0^*$ 、 $b_0^*$  表示新鲜胡萝卜的测定值,  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  表示不同干燥方式处理后胡萝卜脆片的测定值。

1.2.2.8 营养成分保留率测定 抗坏血酸( $V_c$ )含量依据 GB 5009.86-2016《食品安全国家标准食品中抗坏血酸的测定》中第 3 个方法 2,6-二氯酚滴定法测定。总酚<sup>[19]</sup>含量测定依据 Folin-Ciocalteu 比

色法。总黄酮<sup>[20]</sup>含量测定依据  $\text{NaNO}_2\text{-Al}(\text{NO}_3)_3\text{-NaOH}$  法。总类胡萝卜素<sup>[21]</sup>含量测定依据分光光度法。营养成分保留率按下述公式计算:

营养成分保留率 = 干燥后样品营养成分含量 (mg/g) / 新鲜样品营养成分含量 (mg/g)  $\times 100\%$

1.2.2.9 水分、色泽、温度均匀性<sup>[22]</sup>测定 图 1 表示 AD、MD、VMD、AD+VMD 和 AD+MD 预干燥时胡萝卜片摆放的位置分布图。



AD:胡萝卜片平铺于样品盘上,置于恒温鼓风干燥箱中,热风温度为  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,干燥至水分含量(水分转换点)为  $75\%$ 左右;MD、VMD:干燥功率密度为  $5\text{ W/g}$ ,干燥至水分含量(水分转换点)为  $75\%$ 左右;AD+VMD:热风温度为  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,振动式旋转微波功率密度为  $5\text{ W/g}$ ,干燥至水分含量(水分转换点)为  $75\%$ 左右;AD+MD:热风温度为  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,微波功率密度为  $5\text{ W/g}$ ,干燥至水分含量(水分转换点)为  $75\%$ 左右。

图 1 不同预干燥样品摆放位置

Fig.1 Position of samples in different pre-drying methods

AD 方式水分均匀性测定:将胡萝卜片按图 1a 中 1~16 位置摆放均匀,干燥  $55\text{ min}$  后测定每个位置样品水分含量,通过方差和标准差分析判断水分均匀性。MD 方式水分均匀性测定:将胡萝卜片按图 1c 中 1~14 位置摆放均匀,干燥  $13\text{ min}$ ,水分均匀性的检测和判断同 AD 方式。VMD 和 AD+VMD 水分均匀性测定:将胡萝卜片按图 1b 中 1~12 位置摆放均匀,VMD 干燥  $8\text{ min}$ ,AD+VMD 干燥  $10\text{ min}$ ,水分均匀性的检测和判断同 AD 方式。AD+MD 方式水分均匀性测定:样品先经 AD 干燥  $30\text{ min}$ ,再经 MD 干燥  $5\text{ min}$  后检测水分均匀性,测定方法同 MD 方式。

色泽均匀性测定:胡萝卜摆放位置和干燥时间与水分均匀性测定一致,测定每个位置样品的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值,通过方差和标准差分析判断色泽均匀性。

温度均匀性测定:胡萝卜摆放位置和干燥时间与水分均匀性测定一致,测定每个位置样品受热后的温度,取表面平均温度,通过方差和标准差分析

判断温度均匀性。

1.2.2.10 扫描电镜观察 采用扫描电子显微镜,将胡萝卜脆片切成  $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$  的立方块,固定在扫描电镜的样品套件上,真空条件下在样品上进行喷金覆盖,调节聚光焦距,放大一定倍数观察样品,并拍照。

1.2.2.11 综合评分 依据方差贡献表和旋转后的主成分载荷值,筛选出合适的主要成分即胡萝卜脆片核心评价指标,根据主成分载荷值与特征值和方差贡献率,计算线性系数和综合系数。各个指标依据综合系数采用归一化法确定每项指标的权重值,再根据原始数据的离差标准化<sup>[23]</sup>及权重系数计算综合加权分数。

### 1.3 数据统计分析

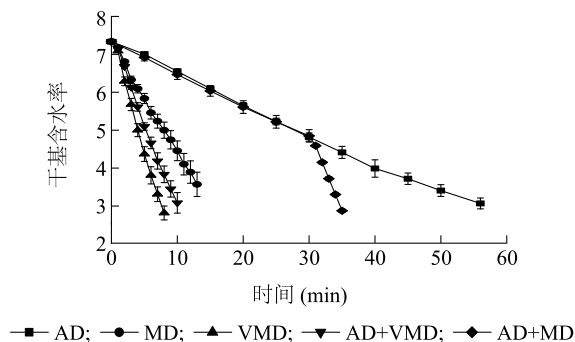
每个样品重复测定 3 次,结果以平均值 $\pm$ 标准差( $SD$ )表示。采用 Excel2010 对数据进行整理。采用 SPSS 16.0 软件作单因素试验统计分析及其组间差异的 Duncan's 多重比较分析。采用 Origin 9.0 软件作图。



## 2 结果与分析

### 2.1 不同预干燥方式对胡萝卜片干燥特性的影响

由图 2 可知,VMD 方式干燥至水分转换点( $2.82\%\pm 0.18\%$ )时所需时间最短,为 8 min。VMD、AD+VMD、MD 方式的干基含水率与干燥时间存在良好的线性关系。将不同预干燥的  $\ln MR$  与  $t$  经 OriginPro 8.0 线性拟合得出水分有效扩散系数( $D_{\text{eff}}$ )(表 1),VMD 方式的  $D_{\text{eff}}$  值  $3.13\times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ,仅次于 AD+MD 方式,此干燥方式干燥时间短、速率快。5 种预干燥方式中,AD 方式在热量传递时受到阻力因此干燥时间最长,而 VMD 方式利用电磁波穿透力强的特性,使物料吸收电磁波能量并渗透至整体<sup>[24]</sup>,同时利用振动装置,使得胡萝卜片在微波干燥过程中处于振动状态,最大程度实现胡萝卜片传质传热过程,缩短了干燥时间,也更适用于实际生产。



AD 等预干燥方式见图 1 注。

图 2 不同预干燥方式对胡萝卜脆片干燥特性的影响

Fig.2 Effects of different pre-drying methods on the drying characteristics of carrot chips

表 1 不同预干燥方式的水分有效扩散系数

Table 1 Effective diffusion coefficient of water in different pre-drying methods

干燥方式	线性回归方程	$D_{\text{eff}}(10^{-8} \text{ m}^2/\text{s})$
AD	$\ln MR = -1.64 \times 10^{-2} t + 0.06$	1.47
MD	$\ln MR = -5.65 \times 10^{-2} t + 0.04$	1.10
VMD	$\ln MR = -13.10 \times 10^{-2} t + 0.12$	3.13
AD+VMD	$\ln MR = -9.40 \times 10^{-2} t + 0.10$	2.50
AD+MD	$\ln MR = -2.42 \times 10^{-2} t + 0.15$	3.98

预干燥方式见图 1 注。 $MR$ :水分比; $t$ :干燥时刻; $D_{\text{eff}}$ :水分有效扩散系数。

### 2.2 不同组合干燥方式对胡萝卜脆片品质特性的影响

胡萝卜脆片品质指标主要包括营养保留率、色差、质构、复水比等,指标测定结果见表 2。色泽测定结果表明,不同预干燥及气流膨化干燥后的胡萝卜片色泽差异显著( $P<0.05$ ),这说明不同组合干燥方式保持胡萝卜本身色泽程度的差异显著。相较于 AD、MD 和 AD+MD 3 预干燥方式,AD+VMD 预干燥方式对色泽变化程度的影响最小,其次是 VMD 预干燥方式,原因可能是二者干燥至水分转换点的时间短,水分散失快,从而色泽变化不明显<sup>[25]</sup>。AD+VMD 预干燥方式和 VMD 预干燥方式二者之间差异不明显,均可维持胡萝卜本身的色泽。

硬度和脆度能够反映脆片在食用时的口感,5 种不同组合干燥方式对胡萝卜脆片硬度和脆度的影响显著( $P<0.05$ )。AD-EPD 干燥的样品硬度和脆度值最大,可能与 AD 预干燥时传热过程中水分散失慢、细胞收缩及气流膨化闪蒸膨胀形成多孔网状结构<sup>[26]</sup>有关;VMD-EPD 干燥的样品硬度最低,脆度适中,可能是因为 VMD 预干燥过程中电磁波与振动相结合使水分散失快、细胞膨胀<sup>[27]</sup>,气流膨化干燥后形成多孔疏松状结构<sup>[26]</sup>,这也与电镜图中 VMD-EPD 干燥的样品微观结构相一致。收缩率的变异系数达到 32.61%,其中 AD+MD-EPD 的收缩率最大,表明 AD+MD-EPD 干燥过程中样品体积收缩最小。AD-EPD 干燥的样品膨化率最大,表明膨化效果最好。MD-EPD 的复水比最高,表明此方式干燥后复水效果最好。

营养指标测定结果表明:5 种组合干燥方式对胡萝卜脆片营养保留率影响显著( $P<0.05$ )。在 MD-EPD 方式中,EPD 干燥前后总酚和总黄酮的保留效果最好,其次是 VMD-EPD 方式。有研究结果表明总酚和总黄酮的变化与干燥过程中水分蒸发有关<sup>[28]</sup>,AD-EPD 和 AD+MD-EPD 干燥时间较长、水分蒸发慢,总酚和总黄酮在干燥过程中损失较多,MD-EPD、VMD-EPD、AD+VMD-EPD 干燥时间短、水分蒸发快,与 AD-EPD 和 AD+MD-EPD 相比,总酚和总黄酮损失程度显著降低。在 AD+MD-EPD 方式中,EPD 干燥前后  $V_c$  的损失最小。 $V_c$  的热敏性极强,干燥过程中  $V_c$  的变化与温度、氧化有关<sup>[29]</sup>,温度越高,干燥时间越长, $V_c$  越容易被破坏,AD+VMD-EPD 干燥时间短,EPD 干燥前后  $V_c$  损失少。AD-

EPD 干燥样品总类胡萝卜素的损失最小,其次是 MD-EPD、VMD-EPD 方式,可能是因为类胡萝卜素的降解与氧气和高温相关<sup>[30]</sup>,AD 方式的热量是由外向内传递,速度较慢,物料内部温度较低,故 AD

方式对总类胡萝卜素的影响最小。MD、VMD 方式在干燥时温度较 AD 方式高,故 MD、VMD 干燥对总类胡萝卜素的影响与 AD 干燥相比较大。

表 2 不同干燥方式的胡萝卜脆片品质指标

Table 2 Quality index of carrot chips in different drying methods

指 标	AD-EPD	MD-EPD	VMD-EPD	AD+VMD-EPD	AD+MD-EPD
$L^*$	49.90±0.77a	44.24±0.52c	48.60±0.18b	49.49±0.36ab	50.12±0.52a
$a^*$	28.02±0.40a	20.22±0.27d	24.33±0.27c	26.16±0.94b	28.61±0.11a
$b^*$	35.16±0.99b	32.41±1.02c	31.40±0.12c	35.25±0.89b	37.40±0.86a
$\Delta E$	18.67±1.85b	11.29±1.98c	9.07±0.50cd	8.21±1.14d	22.84±0.55a
$L^{*'}$	49.22±0.41b	50.13±0.03ab	50.57±0.35a	51.02±1.18a	47.11±0.75c
$a^{*'}$	35.31±0.42a	12.55±0.12d	33.20±0.37b	25.16±0.57d	30.32±0.24c
$b^{*'}$	40.37±1.68a	14.25±0.58c	39.79±0.80a	36.60±1.65b	36.54±0.97b
$\Delta E'$	26.52±3.58a	17.17±0.78c	20.26±1.25b	9.90±1.97d	22.20±1.03b
硬度(g)	2 826.00±6.93a	1 408.67±142.05bc	1 115.33±54.60d	1 185.33±248.07cd	1 442.00±16.00b
脆度(g)	1 483.33±19.73a	900.00±8.00b	744.67±11.02c	942.00±106.71b	578.00±6.00d
收缩率(%)	40.78±2.12b	32.96±1.15c	33.71±1.15c	16.40±1.22d	45.43±1.02a
膨化率(%)	75.56±0.96a	67.43±1.33b	49.59±0.71d	62.86±3.43c	67.43±1.33b
复水比(%)	582.71±9.43bc	741.77±18.89a	561.26±23.71cd	525.38±10.62d	612.78±42.31b
总酚保留率 1(%)	58.71±0.49d	38.30±1.40e	60.43±0.88c	69.21±0.48a	66.67±1.10b
总黄酮保留率 1(%)	64.38±2.70b	48.09±0.89d	61.01±0.49c	63.68±0.59bc	86.38±2.27a
$V_c$ 保留率 1(%)	50.09±0.11c	94.34±9.28a	66.78±0.14b	55.64±9.66c	33.34±0.08d
总类胡萝卜素保留率 1(%)	93.88±2.33a	73.93±4.23c	79.83±0.31b	63.55±1.64d	50.31±2.04e
总酚保留率 2(%)	16.24±0.27c	15.56±0.30d	16.12±0.07c	16.66±0.11b	17.75±0.19a
总黄酮保留率 2(%)	20.18±0.36c	43.23±1.00a	25.29±0.22b	18.50±0.34d	19.60±0.21c
$V_c$ 保留率 2(%)	33.28±0.10c	66.59±0.19a	49.91±0.13b	49.93±0.16b	16.64±0.05d
总类胡萝卜素保留率 2(%)	88.91±2.77a	67.76±0.73b	70.23±0.85b	60.84±2.57c	46.05±1.33d

AD、MD、VMD、AD+VMD、AD+MD 预干燥方式见图 1 注;EPD:气流膨化干燥。同一行不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $\Delta E$  表示气流膨化前色泽, $L^{*'}$ 、 $a^{*'}$ 、 $b^{*'}$ 、 $\Delta E'$  表示气流膨化后色泽。总酚保留率 1、黄酮保留率 1、 $V_c$  保留率 1、总类胡萝卜素保留率 1 表示气流膨化前各指标保留率,总酚保留率 2、黄酮保留率 2、 $V_c$  保留率 2、总类胡萝卜素保留率 2 表示气流膨化后各指标保留率。

### 2.3 不同组合干燥方式对胡萝卜片预干燥均匀性的影响

通过不同方式预干燥后样品的水分、温度及色泽的方差和标准差分析,判断出不同预干燥方式胡萝卜脆片的均匀性,方差分析和标准差值越小说明均匀性越好,反之则越差。不同预干燥方式对色泽均匀性影响差异不显著,AD 方式对  $L^*$  均匀性有一定改善,而 MD 方式对  $a^*$  均匀性有一

定改善,AD+VMD 方式对  $b^*$  均匀性有一定改善(表 3)。AD 方式的水分均匀性不佳,而 VMD 预干燥后胡萝卜片水分均匀性与其他 4 种干燥方式相比有较大改善,原因可能是物料对电磁波的吸收均匀性与物料在电磁场中的位置相关<sup>[31]</sup>,VMD 预干燥时由于载物盘转动与振动作用带动物料吸收不同位置的微波能,从而改善水分均匀性。

表3 胡萝卜片预干燥均匀性方差和标准差分析

Table 3 Variance and standard deviation analysis of uniformity of carrot chips in different pre-drying methods

预干燥方式	水分含量 (%)		温度 (°C)		$L^*$		$a^*$		$b^*$	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
AD	7.88	2.81	12.41	3.52	1.57	1.25	6.64	2.58	8.39	2.90
MD	5.70	2.39	6.54	2.56	1.69	1.30	2.16	1.47	3.89	1.97
VMD	0.28	0.53	4.08	2.02	2.46	1.57	6.01	2.45	4.14	2.04
AD+VMD	0.70	0.84	16.93	4.11	1.82	1.35	5.23	2.29	2.68	1.64
AD-MD	1.02	1.01	2.78	1.67	1.65	1.28	5.38	2.32	6.49	2.55

预干燥方式见图1注。

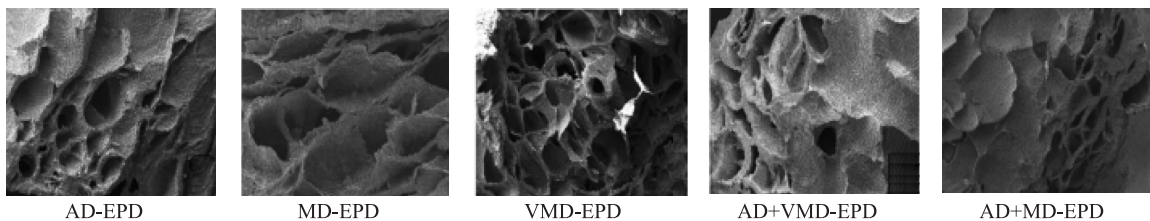
## 2.4 不同组合干燥方式对胡萝卜脆片显微结构的影响

由图3可知不同组合干燥的胡萝卜脆片的微观特性差异显著。AD-EPD、AD+VMD-EPD和AD+MD-EPD干燥的胡萝卜脆片都呈一部分有较大空隙另一部分的空隙排列紧密似黏状。MD-EPD干燥的胡萝卜脆片蓬松性较明显,空隙直径较大,细胞之间存在断裂现象;而VMD-EPD干燥的胡萝卜脆片组织结构疏松且排列密集,空隙直径较小。总体来看,MD-EPD和VMD-EPD方式的蓬松度、疏松度都较为明显,这与MD-EPD和VMD-EPD干燥后胡萝卜脆片硬度、脆度较为适中的结果相一致。

## 2.5 胡萝卜脆片品质评价指标筛选

采用主成分分析方法<sup>[32-35]</sup>可以达到降维和满

足原始数据信息的要求,用较少的综合指标代替原来较多的评价指标,相互之间无相关性。采用SPSS16.0分析软件,数据经标准化后使用主成分分析法得到主成分的初始特征值及累积贡献率(表4)和经方差极大正交旋转后的胡萝卜脆片各品质指标主成分载荷矩阵(表5)。主成分数量根据累积方差贡献率不低于80%的原则确定。由表4可知,前4个主成分的特征值大于1,主成分贡献率分别为41.06%、22.68%、19.76%和16.51%,方差累积贡献率为100%,基本反映了初始指标的信息,因此,可由初始指标降为4个主成分对胡萝卜脆片品质进行评价。经方差极大正交旋转后,各因子的载荷值更接近于0或1,能够解释和归纳<sup>[36]</sup>各主成分因子。



AD、MD、VMD、AD+VMD、AD+MD 预干燥方式见图1注;EPD:气流膨化干燥。

图3 不同组合干燥方式对胡萝卜脆片扫描电子显微结构的影响(×30倍)

Fig.3 Effects of different combined drying methods on scanning electron microstructure of carrot chips (×30 times)

表4 主成分的初始特征值及累积贡献率

Table 4 Initial characteristic values and cumulative contribution of principal components

成分	初始特征值			提取载荷平方和			旋转载荷平方和		
	总计	方差(%)	累积(%)	总计	方差(%)	累积(%)	总计	方差(%)	累积(%)
1	13.33	47.60	47.60	13.33	47.60	47.60	11.50	41.06	41.06
2	6.95	24.83	72.43	6.95	24.83	72.43	6.35	22.68	63.74
3	4.88	17.44	89.87	4.88	17.44	89.87	5.53	19.76	83.49
4	2.84	10.13	100.00	2.84	10.13	100.00	4.62	16.51	100.00

表 5 胡萝卜脆片各品质指标主成分载荷矩阵

Table 5 Principal component load matrix of quality index in carrot chips

评价指标	成分			
	1	2	3	4
$D_{\text{eff}}$	0.60	-0.72	0.24	-0.26
$L^*$	0.99	-0.03	0.11	0.12
$a^*$	0.90	-0.04	0.26	0.35
$b^*$	0.52	-0.34	0.16	0.77
$\Delta E$	0.27	-0.12	0.78	0.55
$L^{*'} $	-0.21	0.37	-0.79	-0.45
$a^{*'} $	0.88	0.25	0.35	-0.19
$b^{*'} $	0.97	0.13	0.09	-0.17
$\Delta E'$	0.16	0.40	0.90	0.04
水分均匀性	-0.43	0.67	0.26	0.55
$L^*$ 均匀性	0.12	-0.08	-0.16	-0.98
$a^*$ 均匀性	0.95	0.23	0.15	-0.13
$b^*$ 均匀性	0.29	0.37	0.81	0.35
温度均匀性	0.19	0.51	-0.74	0.40
硬度	0.19	0.76	0.39	0.49
脆度	0.10	0.93	-0.08	0.36
收缩率	0.02	0.01	0.99	0.11
膨化率	-0.08	0.32	0.22	0.92
复水比	-0.96	0.29	0.03	0.02
总酚保留率 1	0.95	-0.28	-0.16	0.03
总黄酮保留率 1	0.69	-0.52	0.43	0.27
$V_c$ 保留率 1	-0.87	0.24	-0.28	-0.31
类胡萝卜素保留率 1	-0.08	0.97	0.08	-0.22
总酚保留率 2	0.65	-0.64	0.26	0.33
总黄酮保留率 2	-0.99	0.05	0.04	-0.13
$V_c$ 保留率 2	-0.71	0.24	-0.57	-0.35
类胡萝卜素保留率 2	-0.04	1.00	0.02	-0.08

各指标见表 2 注。提取方法为主成分分析, 旋转方法为具有 Kaiser 标准化的正交旋转法。

## 2.6 胡萝卜脆片品质核心评价指标权重确定

表 6 为筛选出的核心指标通过计算综合系数和归一化法<sup>[37]</sup>后确定的权重值。胡萝卜脆片核心评价指标为气流膨化干燥后总黄酮保留率、 $a^{*'}$ 、气流膨化干燥后  $V_c$  保留率、气流膨化干燥后总类胡萝卜素保留率、硬度、 $D_{\text{eff}}$ 、水分均匀性、收缩率、 $b^*$  均匀性、 $\Delta E$ 、温度均匀性、 $L^*$  均匀性和  $b^*$ , 其对应的权重系数依次是 -0.19、0.22、-0.21、0.12、0.25、0.01、0.11、0.15、0.25、0.20、0.06、-0.12 和 0.16,

说明  $a^{*'}$ 、硬度、 $b^*$  均匀性、收缩率、 $\Delta E$  和  $b^*$  对胡萝卜脆片的干燥方式具有较大响应。

## 2.7 不同组合干燥方式的胡萝卜脆片综合品质评价模型

将 5 个不同组合干燥方式的胡萝卜脆片核心指标经过离差标准化处理后, 与所对应的指标权重作为内积, 得到如下数学模型:

$$Z = -0.19 \times \text{气流膨化干燥后总黄酮保留率} + 0.22 \times a^{*'} - 0.21 \times \text{气流膨化干燥后 } V_c \text{ 保留率} + 0.12 \times \text{气流膨化干燥后总类胡萝卜素保留率} + 0.25 \times \text{硬度} + 0.01 \times D_{\text{eff}} + 0.11 \times \text{水分均匀性} + 0.15 \times \text{收缩率} + 0.25 \times b^* \text{ 均匀性} + 0.20 \times \Delta E + 0.06 \times \text{温度均匀性} - 0.12 \times L^* \text{ 均匀性} + 0.16 \times b^*$$

不同组合干燥方式的胡萝卜脆片品质得分结果如表 7 所示, 排名第一的为 VMD-EPD 方式, 其次是 AD+VMD-EPD 方式。

## 3 结 论

本研究对不同组合干燥方式的胡萝卜片预干燥特性、预干燥均匀性以及胡萝卜脆片质构、色泽、营养、微观结构等品质指标进行了分析, 不同组合干燥方式的胡萝卜脆片的各品质间存在显著差异。VMD-EPD 干燥方式对预干燥特性、预干燥均匀性以及胡萝卜脆片色泽、质构、营养保留率有明显影响 ( $P < 0.05$ ), VMD 预干燥方式干燥时长最短、效率高, VMD-EPD 方式可以较好地维持胡萝卜本身色泽, VMD-EPD 干燥的胡萝卜脆片硬度最低脆度适中, 膨化后的微观结构与其他干燥方式相比多孔疏松状明显且均匀, VMD-EPD 干燥的胡萝卜脆片总黄酮、 $V_c$  及总类胡萝卜素保留率较高, 且 VMD 预干燥可以有较好的水分和温度均匀性。

通过 5 种组合干燥方式制得胡萝卜脆片的品质指标主成分分析, 筛选出 13 个评价核心指标, 即气流膨化干燥后总黄酮保留率、 $a^{*'}$ 、气流膨化干燥后  $V_c$  保留率、气流膨化干燥后总类胡萝卜素保留率、硬度、 $D_{\text{eff}}$ 、水分均匀性、收缩率、 $b^*$  均匀性、 $\Delta E$ 、温度均匀性、 $L^*$  均匀性和  $b^*$ 。建立综合品质评价模型, 计算各组合干燥方式下胡萝卜脆片的综合得分, 得分最高的是 VMD-EPD 方式, AD+VMD-EPD 方式次之。VMD-EPD 方式所需时间短, 更适合实际生产, 且 VMD-EPD 干燥后的胡萝卜脆片微观结构中孔状结构分布均匀且大小相差较小, 蓬松感明显, 最



终确定 VMD-EPD 方式更适合加工胡萝卜脆片产品。本试验结果可为实际生产中提高胡萝卜脆片品质,降低生产能耗,提升胡萝卜附加值提供理论依据。

表 6 13 个核心指标主成分权重分布表

Table 6 Distribution table of principal component weight of 13 core indicators

评价指标	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	综合系数	指标权重
总黄酮保留率 2	-0.99	0.05	0.04	-0.13	-0.12	-0.19
$a^{*}$	0.88	0.25	0.35	-0.19	0.14	0.22
$V_c$ 保留率 2	-0.71	0.24	-0.57	-0.35	-0.14	-0.21
总类胡萝卜素保留率 2	-0.04	1.00	0.02	-0.08	0.08	0.12
硬度	0.19	0.76	0.39	0.49	0.16	0.25
$D_{eff}$	0.60	-0.72	0.24	-0.26	0.01	0.01
水分均匀性	-0.43	0.67	0.26	0.55	0.07	0.11
收缩率	0.02	0.01	0.99	0.11	0.10	0.15
$b^{*}$ 均匀性	0.29	0.37	0.81	0.35	0.16	0.25
$\Delta E$	0.27	-0.12	0.78	0.55	0.13	0.20
温度均匀性	0.19	0.51	-0.74	0.40	0.04	0.06
$L^{*}$ 均匀性	0.12	-0.08	-0.16	-0.98	-0.08	-0.12
$b^{*}$	0.52	-0.34	0.16	0.77	0.11	0.16
特征值	11.50	6.35	5.53	4.62		
贡献率	41.06	22.68	19.76	16.51		

表 7 不同组合干燥方式的胡萝卜脆片品质评价得分及排名

Table 7 Quality evaluation scores and ranking of carrot chips by different combined drying methods

干燥方式	得分	排名
AD-EPD	0.43	4
MD-EPD	0.27	5
VMD-EPD	0.93	1
AD+VMD-EPD	0.83	2
AD+MD-EPD	0.78	3

干燥方式见表 2 注。

## 参考文献:

- [1] 焦宇知. 功能性无糖双歧杆菌胡萝卜酸奶的研制[J]. 食品科技, 2008 (1): 53-56.
- [2] 阮婉贞. 胡萝卜的营养成分及保健功能[J]. 中国食物与营养, 2007 (6): 51-53.
- [3] WANKHADE P K, SAPKAL R S, SAPKAL V S. Drying characteristics of okra slices on drying in hot air dryer[J]. Procedia Engineering, 2013, 51:371-374.
- [4] 马 越,王 丹,郑清云,等. 热风干燥温度对脱水胡萝卜品质的影响[J]. 食品工业, 2017, 38(11): 83-86.
- [5] 范 浩,马培勇,邢献军,等. 胡萝卜真空干燥特性及动力学

- [J]. 真空科学与技术学报, 2018, 38(1): 20-26.
- [6] 刘 品. 胡萝卜片热风干燥特性研究[D]. 郑州:中原工学院, 2019.
- [7] AGNIESZKA N O, STEPIEN B, BIESIADA A. Effectiveness of the fountain-microwave drying method in some selected pumpkin cultivars[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 77:276-281.
- [8] 马国军,刘 英,李武强,等. 基于响应面法优化胡萝卜切片远红外干燥工艺[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(12): 106-112.
- [9] 马文静,张 瑞,周荣雪,等. 膨化技术及其在谷物淀粉制品中的应用研究进展[J]. 食品工业, 2018, 39(11): 226-230.
- [10] 彭 健,毕金峰,易建勇. 渗透对压差闪蒸胡萝卜脆条质构调控研究[C]//中国食品科技技术学会. 中国食品科学技术学会第十五届年会论文摘要集. 青岛:中国食品科技技术学会, 2018.
- [11] HUANG L L, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Comparison of four drying methods for re-structured mixed potato with apple chips [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 103(3): 279-284.
- [12] 朱翠平,张钟元,李大婧,等. 不同干燥方式对牛蒡脆片品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(7): 181-184.
- [13] 马 超,张建昌,李新胜,等. 不同干燥工艺对苹果粉品质的影响研究[J]. 中国果菜, 2015(8): 15-19.
- [14] 田 华,韩艳婷. 苦瓜微波干燥特性及动力学模型[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(23): 125-129.

- [15] 刘旺星,陈雄飞,余佳佳,等. 胡萝卜微波干燥特性及动力学模型[J]. 食品工业科技, 2019, 40(9): 68-72.
- [16] 胡庆国. 毛豆热风与真空微波联合干燥过程研究[D]. 无锡: 江南大学, 2006.
- [17] HUANG L L, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Studies on decreasing energy consumption for a freeze-drying process of apple slices[J]. Drying Technology, 2009, 27(9): 938-946.
- [18] MEDENI M. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 48(2): 169-175.
- [19] 时晓娟,李朋收,魏 颖,等. 黄精多糖提取工艺及药理作用研究进展[J]. 中医药导报, 2015, 21(23): 103-105.
- [20] 喻祖文,张旺凡. 多倍体黄精中多糖和皂苷的提取及含量测定[J]. 中国现代中药, 2011, 13(5): 20-22.
- [21] 颜少宾,张好艳,马瑞娟,等. 桃果实类胡萝卜素测定方法的研究[J]. 果树学报, 2012, 29(6): 1127-1133.
- [22] 颜伟强. 颗粒状切割块茎类蔬菜微波喷动均匀干燥特性及模型研究[D]. 无锡:江南大学, 2011.
- [23] 叶素桃,张思佳,彭亚绵,等. 单因子指数法在土壤重金属污染模型的应用研究[J]. 数学学习与研究, 2016(11): 141.
- [24] 陈春莲,徐小峰,彭秀分,等. 微波干燥对果蔬制品的影响[J]. 农产品加工(上半月), 2019(10): 34-37, 40.
- [25] 丁媛媛,毕金峰,木泰华,等. 不同干燥方式对甘薯产品品质的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(16): 108-112.
- [26] 毕金峰,魏益民. 果蔬变温压差膨化干燥技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 308-312.
- [27] FANG S Z, WANG Z F, HU X S, et al. Shrinkage and quality characteristics of whole fruit of Chinese jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) in microwave drying[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2010, 45(12): 2463-2469.
- [28] 冯爱国,李国霞,李春艳. 食品干燥技术的研究进展[J]. 农业机械, 2012(18): 90-93.
- [29] 高红芳,许牡丹,刘红梅. 真空低温干燥法生产高V<sub>C</sub>香酥脆枣的可行性研究[J]. 食品科技, 2010, 35(10): 143-146.
- [30] REINER I, DIAMANTE L M, SAVAGE G P, et al. Effect of temperature on the drying characteristics, color, antioxidant and beta-carotene contents of two apricot varieties[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2011, 46(2): 275-283.
- [31] 黄家鹏. 微波喷动高效干燥对典型蔬菜品质的影响及其调控研究[D]. 无锡:江南大学, 2016.
- [32] 聂继云,李明强,张桂芬,等. 白梨品质评价指标的聚类分析[J]. 中国果树, 2000(2): 19-20.
- [33] 张腊腊,韩明虎,胡浩斌,等. 基于主成分分析的苹果品质综合评价[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(3): 209-213.
- [34] 程晓明,程婧晔,胡文静,等. 23个小麦品种春化特性主成分分析及聚类分析[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(8): 64-68.
- [35] 郑本川,崔 成,李浩杰,等. 长江流域甘蓝型油菜育种亲本农艺性状的遗传变异、相关及主成分分析[J]. 南方农业学报, 2019, 50(10): 2196-2204.
- [36] 黄 英,张 波,武晓娟,等. 基于主成分分析的绿豆沙加工用品种筛选[J]. 食品科学, 2012, 33(13): 104-107.
- [37] 张 懋. 特种脱水蔬菜加工贮藏和复水学专论(国家自然科学基金资助项目)[M]. 北京: 科学出版社, 1997.

(责任编辑:张震林)