

响应面法优化青椒微波-真空冷冻联合干燥工艺及品质分析

肖曼玉, 张秀玲*, 刘明华, 李晨

(东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150030)

摘要: 该研究采用微波-真空冷冻联合干燥方式对青椒进行干制, 研究微波功率、中间转换点含水率及真空冷冻干燥时间对青椒干燥产品维生素 C 含量、感官评分、复水比及 a^* 的影响。通过单因素试验和响应面法优化微波-真空冷冻联合干燥工艺, 并对青椒联合干燥产品的营养成分、风味进行了比较分析。最后研究了微波-真空冷冻联合干燥、微波干燥、真空冷冻干燥对青椒干燥品质的影响。结果表明, 联合干燥的最佳工艺条件为微波功率 381.17 W, 中间转换点含水率 61.81%, 真空冷冻干燥时间 12.04 h。3 种青椒联合干燥产品在营养成分和风味上分别具有一定差异性。微波-真空冷冻联合干燥和真空冷冻干燥的青椒产品在质构、青椒组织微观结构、部分理化指标方面均优于微波干燥的青椒产品。

关键词: 微波-真空冷冻联合干燥; 青椒; 营养成分; 风味; 微观结构

文章编号: 1673-9078(2022)04-191-200

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.4.0513

Process Optimization of Microwave-vacuum Freezing Combined Drying of Green Pepper by Response Surface Methodology and Its Quality

Analysis

XIAO Manyu, ZHANG Xiuling*, LIU Minghua, LI Chen

(College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In this study, green pepper was dried by the microwave-vacuum freezing combined drying method. The effects of microwave power, moisture content at the intermediate conversion point and vacuum freeze-drying time on the vitamin C content, sensory score, rehydration ratio and a^* of the dried green pepper were studied. The microwave-vacuum freezing combined drying process was optimized by the single factor experiments and response surface experiments, and the nutritional components and flavor of the green pepper products *via* combined drying were compared and analyzed. Finally, the effects of microwave-vacuum freezing combined drying, microwave drying and vacuum freeze drying on the drying quality of green pepper were studied. The results showed that the optimal process conditions for combined drying were microwave power 381.17 W, moisture content at the intermediate conversion point 61.81%, vacuum freeze drying time 12.04 h. The three kinds of combined drying green pepper products showed certain differences in nutritional contents and flavors. The green pepper products subjected to microwave-vacuum freezing combined drying and vacuum freeze drying were superior to those subjected to microwave drying in terms of texture, microstructure, and certain physicochemical indexes.

Key words: microwave - vacuum freeze drying; green pepper; nutrients; flavor; microstructure

引文格式:

肖曼玉,张秀玲,刘明华,等.响应面法优化青椒微波-真空冷冻联合干燥工艺及品质分析[J].现代食品科技,2022,38(4):191-200

XIAO Manyu, ZHANG Xiuling, LIU Minghua, et al. Process optimization of microwave-vacuum freezing combined drying of green pepper by response surface methodology and its quality analysis [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(4): 191-200

收稿日期: 2021-05-13

基金项目: 企业合作项目《紫苏系列产品相关技术的研究与开发》; 东北农业大学双一流学科团队《特色果蔬的贮藏加工与示范》项目

作者简介: 肖曼玉 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: 2485299230@qq.com

通讯作者: 张秀玲 (1968-), 女, 教授, 研究方向: 果蔬贮藏保鲜与加工, E-mail: zhangxiuling1968@126.com

青椒 (*Capsicum annuum* L.), 一年或多年生草本植物^[1]。果实较大, 具有辣味很淡或者不辣的特点^[2]。颜色种类多、营养丰富, 据相关研究表明, 每百克新鲜样品的可食用部分中, 含碳水化合物 3.7 g、脂肪 300 mg、蛋白质 1400 mg、维生素 C 64 mg、及胡萝卜素 0.5 mg^[3], 其中维生素 C 的含量达到番茄的 7~15 倍^[4], 有健胃消食、暖胃驱寒; 加快血液循环, 美容养颜; 减脂瘦身减脂瘦身; 驱痛降热等功效^[5]。青椒可分成青甜椒和青辣椒两类, 青辣椒主要分为羊角椒和牛角椒, 而青甜椒则是以灯笼椒为主要代表^[6]。据 2019 年中国辣椒种植市场分析报告得出, 我国已经成为全球第一的辣椒生产和消费大国^[7]。青椒主要集中在鲜食和腌制方面, 加工产品种类单一, 新鲜青椒不耐贮藏, 而腌制处理对原有色泽以及营养成分保留效果不佳, 并且多食腌制食品对人体健康也不利^[8,9]。目前青椒的干燥方法主要集中在热风干燥^[10]、真空冷冻干燥^[11]、微波干燥^[12]、自然晾晒和红外干燥^[13]等单一干燥方式, 而针对相关干燥工艺的研究更是少之又少。联合干燥对于青椒来说是一种新型加工方式, 微波干燥虽干燥速率较高, 但极易产生焦糊、皱缩、变色现象, 造成营养成分的大量流失, 感官品质极度下降; 真空冷冻干燥产品营养保留率高、感官品质较好, 但干燥速率慢、单位耗能多、经济适用性低。而本研究利用微波、真空冷冻联合干燥技术对青椒进行干制, 将以上两者优势相结合, 通过最佳工艺优化, 使营养成分得到了最大程度的保留, 为青椒联合干燥技术的选择及优化提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

当地超市购买的未经前处理包装的形态饱满, 无萎蔫, 色泽鲜艳均匀的尖椒、甜椒、彩椒, 随机取样椒用于试验。

1.2 仪 器 与 试 剂

三氯乙酸, 天津市科密欧化学试剂有限公司; 抗坏血酸, 天津市凯通化学试剂有限公司; 乙酸、乙酸钠, 天津市天力化学试剂有限公司; 聚乙烯吡咯烷酮, 天津市光复科技发展有限公司; 愈创木酚, 天津市光复精细化工研究所; 考马斯亮蓝 G250, 上海源叶生物科技有限公司。HBS-1096B 酶标分析仪, 昆山广测仪器设备有限公司; 5430 台式多功能高速离心机, Eppendorf 中国有限公司; LGJ-1A-50 型真空冷冻干燥机, 北京亚泰科隆仪器技术有限公司; G70D20CN1P-

D2 (S0) 型微波炉, 格兰仕微波生活电器有限公司; PA.XT PLUS 物性测试仪, 英国 Stable Micro System 公司; 日本 INSENT 味觉分析系统 (电子舌)、PEN3 电子鼻, 北京盈盛恒泰科技有限责任公司; CR-10 Plus 型色差仪, Konica Minolta, INC。

1.3 试 验 方 法

1.3.1 微波-真空冷冻联合干燥青椒前处理方法

选择形态饱满, 无萎蔫, 色泽鲜艳均匀的青椒, 然后用清水洗净表面泥沙和污物, 进行去蒂去籽处理, 切成 2 cm 长的正方形块, 于 90 °C 下, 烫漂 70 s, 冷水淋洗, 沥干表面水分。放于含有 0.3% 异抗坏血酸钠、0.03% 碳酸氢钠、0.07% 葡萄糖酸锌的护绿液中进行护绿处理, 然后在 40 °C 下护绿 40 min, 料液比 1:4。

1.3.2 单因素试验

1.3.2.1 微波功率对微波-真空冷冻联合干燥效果的影响

将烫漂、护绿后青椒样品, 在不同微波功率 (140、210、280、350、420 W) 进行微波干燥, 达到水分转换点 50% 后停止微波, 冷却至室温后, 在 -30 °C 低温冰箱里进行预冻, 然后放入真空冷冻干燥机中, 真空冷冻干燥机的真空度和干燥温度由真空冷冻干燥机自动调节, 进行真空冷冻干燥 12 h。

1.3.2.2 中间转换点含水率对微波-真空冷冻联合干燥效果的影响

将前处理完成的青椒样品, 在微波功率 280 W 条件下进行微波干燥, 达到水分转换点 (30%、40%、50%、60%、70%) 后停止微波, 冷却至室温后, 进行预冻, 然后真空冷冻干燥 12 h, 具体操作同 1.3.2.1。

1.3.2.3 真空冷冻干燥时间对微波-真空冷冻联合干燥效果的影响

将前处理完成的青椒样品, 在微波功率 280 W 条件下进行微波干燥, 达到水分转换点 50% 后停止微波, 冷却至室温后, 进行预冻, 然后真空冷冻干燥 (10 h、11 h、12 h、13 h、14 h), 具体操作同 1.3.2.1。

1.3.3 响 应 面 试 验

表 1 Box-Behnken 设计试验因素水平及编码

Table 1 Level and code of variables for Box-Behnken design

水平	因素		
	A 微波功率/W	B 中间转换点含水率/%	C 真空冷冻干燥时间/h
1	280	50	11
2	350	60	12
3	420	70	13

以微波功率 (W)、中间转换点含水率 (%)、真空冷冻干燥时间 (h) 为单因素进行研究分析, 根据试验结果进行表 1 响应面实验设计, 以维生素 C 含量 Y_1 、感官评价 Y_2 、复水比 Y_3 的综合分数 Y 为响应值, 确定微波-真空冷冻干燥联合工艺最佳参数。综合评分公式如下:

$$\text{综合分数} = Y_1 \times 0.4 + Y_2 \times 0.3 + Y_3 \times 0.3$$

1.3.4 微波、真空冷冻单一干燥与联合干燥的比较

微波干燥方法: 以彭林等^[14]的方法为参考, 并稍作改动。具体操作方法如下: 将清洗、去蒂去籽、烫漂、护绿后的青椒块, 沥干表面水分后进行微波干燥。微波干燥功率为 280 W, 干燥至水分含量在 10% 以下为止。真空冷冻干燥方法: 参考王瑞侠^[11]的方法, 略作改动, 具体方法如下: 将清洗、去蒂去籽、烫漂、护绿后的青椒块, 沥干表面水分后, 在 -30 °C 低温冰箱里进行预冻。真空冷冻干燥机具体参数为: 升华温度为 -5 °C, 解析温度为 40 °C, 干燥箱内真空度保持在 10 Pa 以内, 进行冷冻干燥。对三种干燥方式的青椒产品分别进行维生素 C、色泽、复水比、感官评价、质构及扫描电镜分析。

1.3.5 青椒干燥产品理化指标测定

1.3.5.1 维生素 C 含量的测定

参照 GB/T 5009.86-2016, 采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法^[15]进行测定。

1.3.5.2 色泽的测定

使用色差仪对干燥青椒产品进行色泽测定。用 a^* 值表示, a^* 代表红绿色, a^* 若为负值代表绿色, 反之为红色。以白板的参数为对照 ($L^*=82.6$ 、 $a^*=-0.7$ 、 $b^*=5.0$), 从密封袋中取出青椒块, 在同一光源下, 将青椒块置于色差仪测定口出, 然后按下测定键测定, 每个样品平行测定三次, 取平均值。

1.3.5.3 复水比

用 30 °C 恒温蒸馏水浸泡青椒干燥样品, 待充分吸水 (吸水后样品质量不再增加) 后取出, 沥干样品表面水分, 然后按下式计算, 试验至少重复测定 3 次, 取其平均值。

$$x = \frac{m_1}{m_2}$$

式中:

x ——复水比;

m_1 ——充分吸水后的青椒块质量;

m_2 ——未吸水前的干燥青椒块质量。

1.3.5.4 感官评价

感官评定人员共由 20 人 (男女各占一半, 为实验

室的老师和同学) 组成, 对不同干燥方法下的青椒干燥产品进行感官评分, 最终记录的感官评分为各组平均值。每个人独立进行评分确保不互相影响。

表 2 青椒干燥品感官评分表

Table 2 Sensory rating of dried *Capsicum annuum* L.

项目	评价标准	得分
外观 (35分)	形状完好、边缘无卷曲	20~35
	表面稍有皱缩、卷曲较少	10~19
	表面皱缩严重、卷曲较多	0~9
色泽 (35分)	颜色保留完好、无褐变	20~35
	颜色稍有减退、略带白边、基本无褐色	10~19
	颜色稍发白、出现褐变	0~9
风味 (30分)	青椒味浓郁, 无焦糊味、易被接受	15~35
	青椒味较淡、稍有焦糊味、可以接受	5~14
	焦糊味较重, 失去了原有的青椒味	0~4

1.3.5.5 叶绿素含量的测定

采用紫外分光光度法^[15], 称取 1.0 g 青椒鲜样 (或 0.5 g 青椒干制品) 置于研钵中, 加入少量石英砂、碳酸钙粉末及 2~3 mL 无水乙醇, 不断研磨, 直至组织成白色后静置 3~5 min 进行提取, 过滤定容至 50 mL 容量瓶内, 于波长 663、645 nm 处分别测定吸光值 A_{663} 、 A_{645} , 试验平行三次, 数据取平均值。具体计算公式如下:

$$\text{叶绿素总量} (\rho_T) = 20.29A_{645} + 8.05A_{663}$$

1.3.5.6 可溶性糖含量的测定

采用苯酚-硫酸法^[15]。

1.3.5.7 可溶性蛋白质含量的测定

参照 GB 5009.5-2016, 参考考马斯亮蓝法^[15]进行测定。

1.3.5.8 电子鼻测定方法

参考 Lin 等^[16]的方法, 稍做改进。本试验共有三个样品 (每个样品平行试验 3 次)。准确称取干燥样品 0.5 g, 并研磨成粉, 然后放入体积为 20 mL 的顶空瓶内, 并将瓶口密封完整, 然后放入 45 °C 的恒温箱里孵育 5 min 后进行测量, 具体操作如下: 以 150 mL/min 的流速抽取顶空气体注入测试室。采集测定时间为 100 s, 有足够的时间让传感器获得稳定的值。记录 10 个传感器对每个样本的响应值, 测量结束后, 启动清洁相, 持续 200 s。

1.3.5.9 电子舌测定方法

参考梅桂林等^[17]的方法, 首先称取 5 g 干燥产品, 然后研磨成粉末, 加入 100 mL 的超纯水, 在 60 °C 恒温水浴锅内加热 30 min, 然后在 4000 r/min 离心 10 min, 待温度降至室温后取上清液进行测定, 测定时以 Ag/AgCl 作为参比电极, 每个样品平行测定三次。

1.3.5.10 青椒干燥产品质构特性的比较分析

将干燥青椒块放在质构仪的平板上, 选用 P/2 柱形探头对样品进行测试。试验方法参考 Jia 等^[18]的方法, 并稍作改动。具体测试参数为: 测前速度 3 mm/s, 测中速度 2 mm/s, 测后速度 10 mm/s, 起始力 2 N。以样品的硬度、脆度和酥度为实验指标, 对质构特性进行分析。

1.3.5.11 青椒干燥产品扫描电子显微镜的比较分析

3 种方式干燥后的样品, 用刀片从干燥的样品上切下大小约 2 mm 宽、1 mm 厚的小块^[19]。待测样品首先进行喷金处理, 然后在扫描电子显微镜下观察。以样品的表面和横切面为观察区域, 进行比较观察。

1.4 数据处理

所有试验均平行三次, 最终记录结果取平均值。使用 Excel 办公软件进行数据整理; 使用 SPSS 25.0 软件进行显著性分析; Design Expert 8.0.6 软件进行试验设计和响应面分析, 使用 Origin 2018 软件对试验单因素、电子舌等作图。

2 结果与讨论

2.1 微波-真空冷冻联合干燥单因素试验结果

分析

2.1.1 微波功率对联合干燥效果的影响

微波功率对联合干燥青椒产品的影响如图 1 所示, 感官评分可以直观的反应干燥产品的品质情况, 可从色泽、形态和气味等多方面进行评估。从图 1a 中可见各组间感官评分具有显著的差异性 ($p<0.05$), 感官评分先减小再增大, 这可能由于联合干燥间转换点含水率的确定, 导致不同微波功率需要不同的干燥时间去达到同一含水率, 微波干燥功率偏低时时间相应延长, 导致产品感官品相不好。维生素 C 含量随着微波功率的增加而迅速减小, 到后期变化趋势减小, 趋于平缓。这是因为微波功率的增加, 导致加热温度的增高, 而维生素 C 的稳定性差, 因此在温度增高的条件下, 维生素会有部分分解, 导致总含量的降低^[20]。复水比是评估干燥产品质量的重要指标, 它可以反映出因干燥而引起的结构变化和细胞损伤^[21]。从图 1b 中可以看出, 联合干燥中复水比的组间具有显著性差异 ($p<0.05$), 在微波功率达到 280 W 时, 复水比达到最大值, 然后缓慢下降。色差中 a^* 值呈逐渐降低趋势, a^* 代表红、绿值, 因青椒呈绿色, 所以 a^* 为负值, 且数值越小, 绿色越明显。由于微波功率的增加, 干燥

时间的缩短, 颜色破坏降低, 所以 a^* 值在降低。综上所述, 微波功率选择 280~420 W 进行响应面试验。

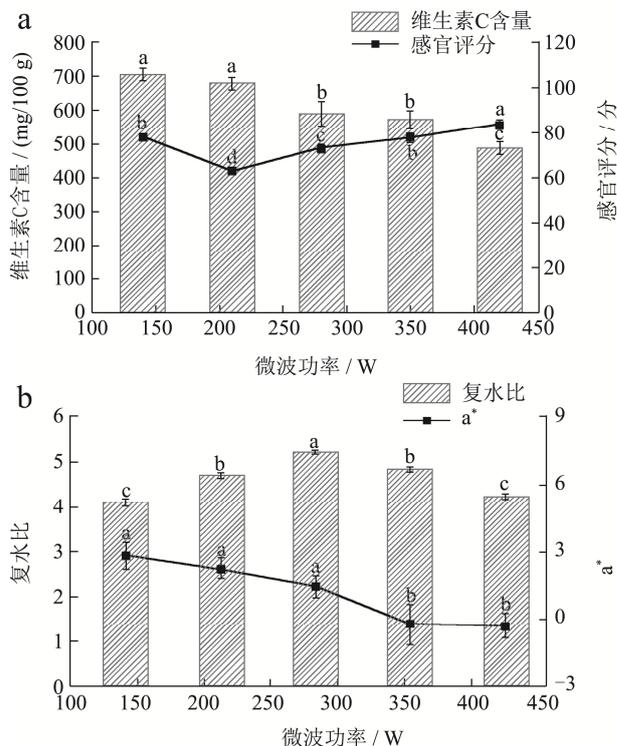


图1 微波功率对联合干燥产品的影响

Fig.1 Effect of microwave power on combined drying products

注: 同一指标数据组间字母不同表示差异性显著, $p<0.05$,

下同。

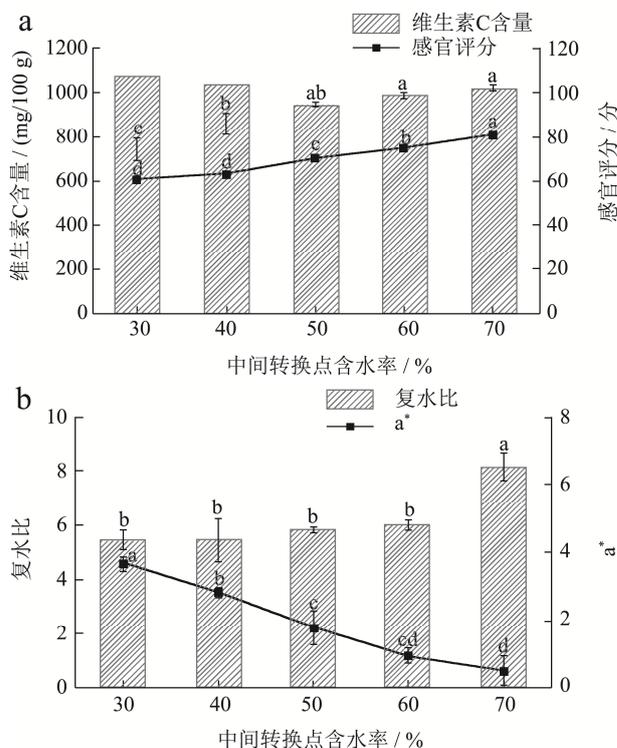


图2 中间转换点含水率对联合干燥产品的影响

Fig.2 Effect of moisture content of intermediate conversion

point on combined drying products

2.1.2 中间转换点含水量对联合干燥效果的影响

中间转换点含水率是联合干燥中的最重要因素，因为水分含量的多少，可以在感官评分和色泽上有明显的区分。从图2中，分析得出，四种评价指标的组间分别具有各自的显著差异性 ($p < 0.05$)。维生素C的含量和感官评分都呈总体上升趋势，且上升趋势较为平缓，尤其是维生素C变化最为突出。其中，当中间转换点含水率在70%时，复水比具有明显的增高趋势，这可能是由于微波时间短，对青椒的组织破坏和细胞破坏的程度比较小，且因在水分含量较高时转入真空冷冻干燥，青椒干燥后的微观结构中会有较大空隙，具有很强的吸水性，因此呈现此变化趋势，而 a^* 也随着中间转换点含水量的增加而逐渐变小，绿色保留效果好。综合考虑，选择中间转换点含水率为50%~70%的范围进行响应面优化。

2.1.3 真空冷冻干燥时间对联合干燥效果的影响

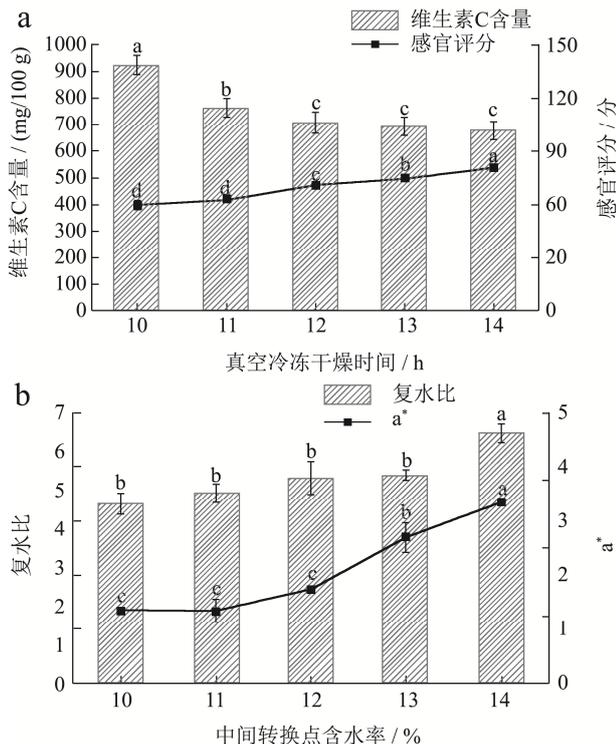


图3 真空冷冻干燥时间对联合干燥产品的影响

Fig.3 Effect of vacuum freeze-drying time on combined drying products

图3为真空冷冻干燥时间对青椒干燥产品维生素C含量、感官评分、复水比和 a^* 的影响。从图中可知，感官评分在缓慢升高，真空冷冻干燥是在真空条件下进行，并且随着时间的增加青椒并没有发生太大的褐变和形态的破坏，并且时间的增加使得水分含量降低，青椒产品更加的酥脆。真空冷冻时间从10~14 h，复水比从4.67增加到了6.48，并且10~13 h的变化稳定。

因为真空冷冻干燥时间越长，青椒干燥产品最后的含水量越低，且冻干后的青椒产品结构也更加的松散，对于水分的吸收更加充分，所以对于复水更加有利。而 a^* 的值随着真空冷冻干燥时间的增加，真空冷冻干燥时间的增加，使得褐变更严重，绿色损失，所以 a^* 趋于红值变化，不断增加到正数。维生素C总含量逐渐降低，在12~14 h的时候变化幅度减小。因此考虑选择真空冷冻干燥11~13 h研究优化联合干燥工艺。

2.2 微波-真空冷冻联合干燥响应面试验结果

分析

2.2.1 响应面试验设计及结果

在单因素试验结果的基础上，应用响应面法优化联合干燥工艺，采用 Box-Behnken 试验设计，选择微波功率 (A)、中间转换点含水率 (B)、真空冷冻干燥时间 (C) 作为试验因素，以综合分数为响应值，进行三因素三水平的响应面试验，如表3。

表3 响应面试验设计及结果

Table 3 Box-Behnken design and results

试验号	A	B	C	综合分数
1	-1	-1	0	110.95
2	0	1	-1	141.52
3	0	0	0	230.61
4	1	0	1	176.51
5	1	1	0	192.03
6	0	1	1	144.92
7	0	0	0	207.39
8	0	-1	1	136.07
9	0	-1	-1	132.67
10	-1	0	-1	134.33
11	0	0	0	206.82
12	0	0	0	201.37
13	-1	0	1	138.59
14	-1	1	0	139.38
15	1	0	-1	168.95
16	0	0	0	196.94
17	1	-1	0	143.47

2.2.2 回归模型拟合及方差分析

利用 Design-Expert 8.0.6 软件进行回归拟合，得到回归模型方程为：综合分数=208.63+19.71A+11.84B+2.33C+5.03AB+0.82AC+0.002BC-23.18A²-38.99B²-30.85C²。

表4为青椒联合干燥的综合分数 (Y) 的方差分析。回归模型的 F 值为 12.59, p 值为 0.0015, 为高度

显著。失拟项为 0.5112，不显著，表明该试验结果与数学模型拟合效果好。 R^2_{Adj} 为 0.8670，表明方程观察值和预测值之间的相关性，该模型可以很好拟合实验

数据。根据 F 值可知，各个因素对青椒联合干燥综合分数影响的大小顺序为：微波功率 (A) > 中间转换点含水率 (B) > 真空冷冻干燥时间 (C)。

表 4 回归方程的方差分析表

Table 4 Variance analysis table of regression equation

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	Sig
模型	18448.79	9	2049.87	12.59	0.0015	**
A	3108.9	1	3108.90	19.09	0.0033	**
B	1120.63	1	1120.63	6.88	0.0343	*
C	43.36	1	43.36	0.27	0.6218	
AB	101.34	1	101.34	0.62	0.4561	
AC	2.72	1	2.72	0.017	0.9008	
BC	1.6×10^{-5}	1	1.6×10^{-5}	9.824×10^{-8}	0.9998	
A ²	2263.19	1	2263.19	13.90	0.0074	**
B ²	6399.35	1	6399.35	39.29	0.0004	**
C ²	4006.91	1	4006.91	24.6	0.0016	**
残差	1140.01	7	162.86			
失拟项	462.5	3	154.17	0.91	0.5112	不显著
R ²	0.9418					
R ² _{Adj}	0.8670					

注：***差异极度显著 ($p < 0.0001$)；**差异高度显著 ($0.0001 < p < 0.01$)；*差异显著 ($0.01 < p < 0.05$)。

2.2.3 响应面各因素交互作用分析

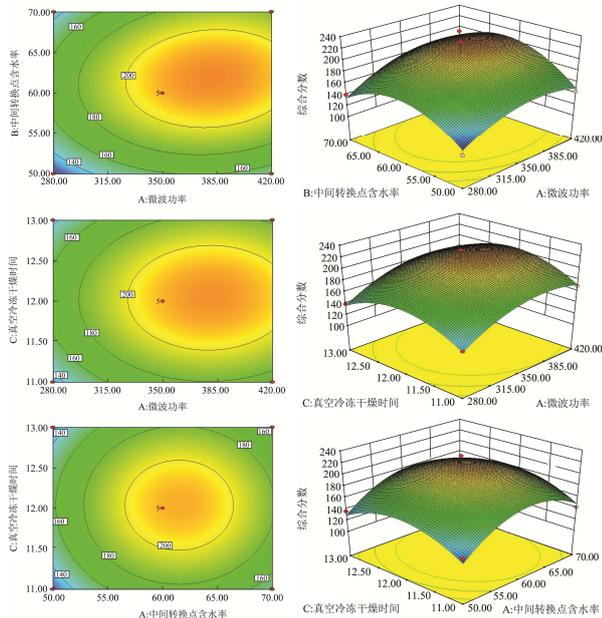


图 4 各因素交互作用对青椒联合干燥综合分数影响的等高线图和响应面图

Fig.4 Contour map and response surface diagram of the various factors on the combined drying fraction of green pepper

图 4 为各因素交互作用对青椒联合干燥综合分数影响的等高线图和响应面图，可从图中更直观的看到各因素之间的相互作用。表面越陡峭，因素对响应值

的影响就越大，而等高线的椭圆则表明因素之间的交互作用是明显的。相反，则不明显。由图 4 中响应面曲面图，可以看出各曲面图坡度变化程度不大，随着各影响因素变化，联合干燥青椒的综合分数变化不明显，结合表 4 的方差分析，可以看出 AB、AC、BC 的交互作用并不显著。

2.2.4 验证试验

利用响应面软件，得出联合干燥的最佳工艺条件为：微波功率 381.17 W，中间转换点含水率 61.81%，真空冷冻干燥时间 12.04 h，此时的综合分数预测值为 214.14。为验证这些结果，并且方便实际操作，选择微波功率 380 W，中间转换点含水率为 62%，真空冷冻干燥时间为 12 h，进行三次实验，得到青椒联合干燥的综合分数为 207.16，与预测值差异为 3.26%，说明该模型符合实验数据。

2.3 青椒联合干燥产品理化特性研究

2.3.1 青椒联合干燥产品基本营养成分

如表 5 所示，三种青椒干燥样品的基本营养成分情况。最终的营养成分含量以干基含量表示，虽然在加工处理的时候会有营养的流失，但营养成分含量仍保留较多。在维生素 C 含量上，三种青椒无显著性差异 ($p > 0.05$)。叶绿素含量上三种青椒存在显著性差异 ($p < 0.05$)，甜椒的叶绿素含量最高，为 1.10 mg/g，

其次是尖椒和彩椒。在可溶性糖含量的比较上,尖椒和甜椒的差异性不显著,相差结果不大,而彩椒的可溶性糖含量最多。彩椒的可滴定酸大于甜椒和尖椒,而尖椒和甜椒之间无显著差异性。尖椒的颜色较佳,和甜椒相差不大,都呈现绿色。甜椒颜色偏暗,但是优于彩椒,次于尖椒。

表 5 基本理化指标分析表

项目	尖椒	甜椒	彩椒
维生素 C / (mg/100 g)	553.83±3.49 ^a	546.86±16.77 ^a	578.26±37.43 ^a
叶绿素/(mg/g)	0.63±0.01 ^b	1.10±0.13 ^a	0.25±0.01 ^c
可溶性糖/%	78.53±12.48 ^b	68.63±5.07 ^b	105.72±10.36 ^a
可滴定酸/%	0.96±0.20 ^b	1.02±0.09 ^b	1.77±0.11 ^a
色泽(L [*])	-31.2±1.49 ^a	-42.7±0.95 ^b	-48.0±0.97 ^c
色泽(a [*])	-1.63±0.23 ^b	-1.5±0.7 ^b	37.07±0.15 ^a

2.3.2 青椒联合干燥产品风味测定

2.3.2.1 青椒联合干燥产品电子鼻分析

图 5 为不同品种青椒干燥产品电子鼻 PCA 分析图,PCA 基于电子鼻传感器获得的复杂气味信息,通过数学降维和线性变换,获得了几组不相关但可以反映原始样本信息的二维散点图,作为一种统计工具,用于解释样本之间的差异,并从主要影响样本空间分布的变量中提取信息^[22,23]。根据图 5 可以看出不同品种青椒干燥产品第一主成分的贡献率为 93.114%,第二主成分 4.7422%,两种主要成分的贡献率总和为 97.856%,表明了二者主成分包括了青椒干燥产品中大部分的香气信息,且 PC1 对彩椒与其他两种青椒有比较强的区分作用,而第二主成分对于三种青椒的区分不明显。三种青椒干燥产品主成分不同区域坐标清晰,具有一定的差异性。

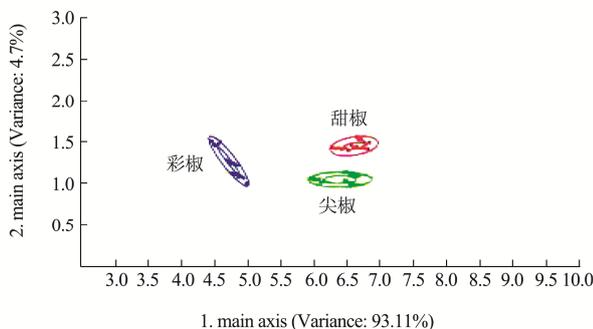


图 5 三种青椒干燥产品电子鼻 PCA 分析图

Fig.5 Analysis of electronic nose PCA of three kinds of dried green pepper products

2.3.2.2 青椒联合干燥产品电子舌分析

图 6 为三种青椒干燥产品电子舌雷达图,电子舌

的机理与电子鼻相似,它可以通过电子传感器检测味觉特性^[24]。电子舌有 8 种味觉感应器,分别为酸味、苦味、涩味、后味-B、后味-A、鲜味、丰富度、咸味。通过传感器的响应值,可充分地反映出产品的味道特点。如图 6 所示,三种青椒干燥产品均在鲜味和丰富度响应值最大,在酸味和后味-B 处的响应值最小。尖椒和甜椒的电子舌传感器响应值强度上并没有太大差异,味道具有一定的相似性,而彩椒除酸味外其他味道响应值均小于尖椒和甜椒。所以在味道分析中三种青椒产品具有一定差异性。

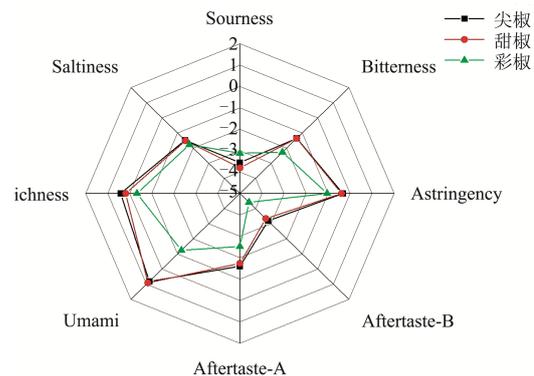


图 6 三种青椒干燥产品电子舌雷达图

Fig.6 Electronic tongue radar map of three kinds of dried green pepper products

2.4 微波、真空冷冻单一干燥与联合干燥的比较

2.4.1 微波及真空冷冻干燥方法的确定

2.4.1.1 微波干燥方法

以彭林等^[14]的方法为参考。具体操作结果如下:将清洗、去蒂去籽、烫漂、护绿后的青椒块,沥干表面水分后进行微波干燥。微波干燥功率为 280 W,微波时间 50 min,达到水分含量 9.5%。

2.4.1.2 真空冷冻干燥方法及干燥曲线

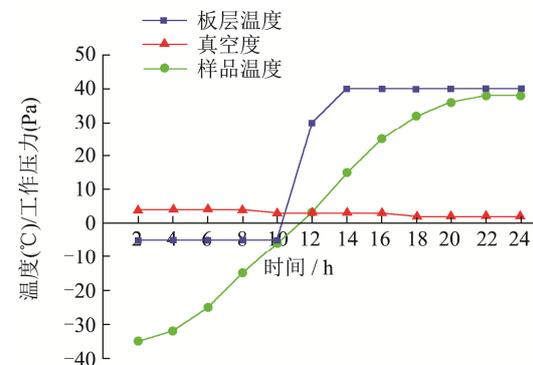


图 7 青椒真空冷冻干燥曲线

Fig.7 Vacuum freeze-drying curve of green pepper

以王瑞侠^[11]的方法作为参考,图 7 为青椒真空冷冻干燥曲线,从图中可知,真空冷冻干燥全过程体系内的真空度都维持在了 10 Pa 以内。物料的温度开始

较低,但随着加热板温度的不断升高,物料温度缓慢上升,加热板前期温度保持在-5℃,并且维持8h,当物料温度接近加热板温度时,升华干燥结束。在2h内将加热板温度上升到40℃,进行解析干燥,解析干燥温度较高,是为了去除样品内的不易流失的那部分水分。加热板达到40℃后维持8h,这一过程中物料温度进一步升高,当物料温度再次与板层温度接近时,解析干燥完成,整个真空冷冻干燥结束。

2.4.2 青椒干燥产品基本理化指标的比较分析

表6 不同干燥方式对青椒基本理化指标的影响

Table 6 Effects of different drying methods on basic physicochemical indexes of green pepper

项目	微波干燥	真空冷冻干燥	联合干燥
维生素C/(mg/100g)	632.52±4.40 ^b	659.26±4.84 ^a	654.22±2.93 ^a
复水比	5.77±0.11 ^c	8.89±0.54 ^b	11.24±0.08 ^a
感官评分	61±1.0 ^b	92±1.0 ^a	91±1.0 ^a
色泽(a*)	5.43±0.80 ^a	-5±0.10 ^c	-2±0.17 ^b

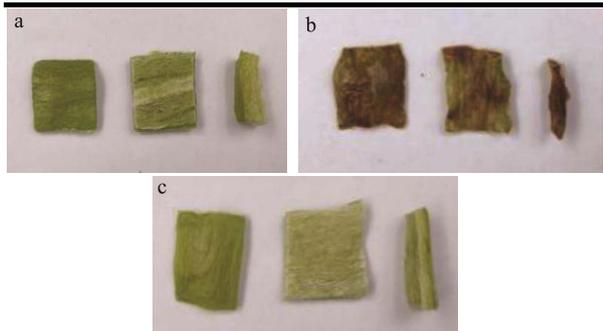


图8 不同干燥方式产品外观图

Fig.8 Sensory images of products with different drying methods

注:(a)真空冷冻干燥青椒产品;(b)微波干燥青椒产品;(c)微波-真空冷冻联合干燥青椒产品。

从表6中可知,不同干燥方式对于青椒干燥产品的理化指标有明显区别。在维生素C含量上,真空冷冻干燥与联合干燥的差异性不显著($p>0.05$),但两者与微波干燥存在显著性差异,并且高于微波干燥。在复水比上,三种干燥方式之间存在显著性差异($p<0.05$),联合干燥效果最优,其次是真空冷冻干燥和微波干燥,分别为两种干燥的1.26倍和1.95倍。微波干燥对于维生素C和细胞组织结构破坏严重。图8a、8b、8c分别为三种干燥方式的青椒样品图,因此在感官评分上微波干燥评分最低,因此其对于水分含量大的青椒来说,微波干燥并不适用。在颜色上,也可以看出真空冷冻干燥的叶绿素含量最高,并且保存也是最好的,其次为联合干燥,微波干燥的颜色最不好,褐变以及焦糊现象明显。

2.4.3 青椒干燥产品质构特性的比较分析

表7为不同的干燥方式对青椒质构特性的影响。质构可较好的体现一个产品品质的好坏。在硬度、酥性和脆性三个指标上,三种干燥方式都无显著差异性($p>0.05$)。微波干燥的硬度最大,可能是由于微波干燥温度较高,想要达到水分含量为10%以下,处理时间过长,导致青椒表面的水分损失大于内部失水,所以在青椒的表面形成了硬壳,致使最后微波干燥的青椒硬度值偏大。因为硬度的增加,其酥性则有所降低,为三种干燥方式的最小值,因此要想产品具有良好的酥性,必须要降低产品的硬度,此结果与孔宇等^[25]的研究结果一致。对于青椒产品的脆性,三种干燥方式之间差异性不显著。

表7 不同干燥方式对青椒质构特性的影响

Table 7 Effects of different drying methods on the texture characteristics of green pepper

项目	微波干燥	真空冷冻干燥	联合干燥
硬度	51.33±9.45 ^a	43.34±5.82 ^a	46.37±3.49 ^a
脆性	1 ^a	1 ^a	1 ^a
酥性	2 ^a	4 ^a	3 ^a

2.4.4 青椒干燥产品扫描电子显微镜的比较分析

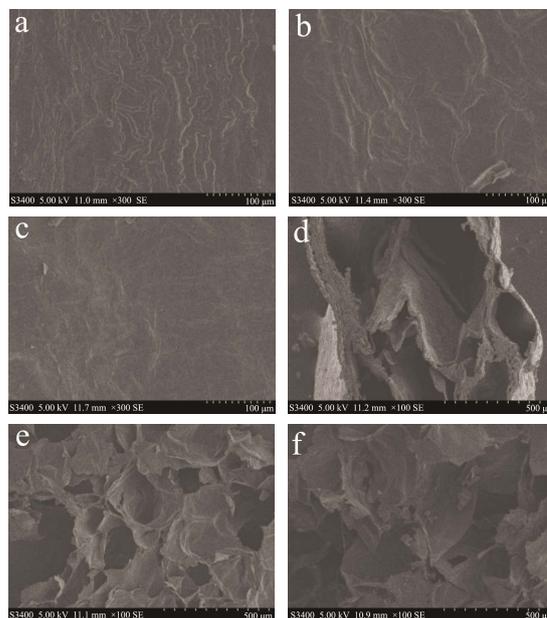


图9 不同干燥方式对青椒组织微观结构的影响

Fig.9 Effects of different drying methods on microstructure of green pepper

注:(a)微波干燥青椒样品表面微观结构图;(b)真空冷冻干燥青椒样品表面微观结构图;(c)联合干燥青椒样品表面微观结构图;(d)微波干燥青椒样品横切面微观结构图;(e)真空冷冻干燥青椒样品横切面微观结构图;(f)联合干燥青椒样品横切面微观结构图。

图9为不同干燥方式对青椒组织微观结构的影

响。图 9a、9b、9c 分别为微波干燥、真空冷冻干燥、联合干燥的青椒样品的表面微观结构图。图 9d、9e、9f 分别为微波干燥、真空冷冻干燥、联合干燥的青椒样品的横切面微观结构图。从表面结构图中可以看出,微波干燥样品表面具有很多细小的纹路,没有真空冷冻干燥和联合干燥样品的表面光滑。可能是因为微波干燥温度高,水分散失太快,造成表面细胞的破裂,组织的持水能力下降,表面形成紧密收缩,所以形成了表面的皱缩和很多小型破碎网状结构^[26]。从干燥青椒样品的横切面微观结构图中可以看出,微波干燥的样品的空隙过大,果肉几乎全部损失,且出现了果肉和果皮分离的现象,真空冷冻干燥和联合干燥的样品均有孔状结构出现,真空冷冻干燥的样品孔洞更密集,而联合干燥的青椒样品有片状结构的出现。后两种干燥方式的果肉损失更少,并且果实更紧实。

3 结论

通过单因素及响应面研究结果表明,各因素对微波-真空冷冻联合干燥工艺的影响程度为微波功率>中间转换点含水率>真空冷冻干燥时间,在微波功率 381.17 W,中间转换点含水率 61.81%,真空冷冻干燥时间 12.04 h 的条件下联合干燥的青椒产品最优;青椒产品在电子鼻和电子舌的风味分析上都得出一致的结论,青椒产品风味上具有一定的差异性;青椒产品组织微观结构破坏最小,因而营养成分损失较小。最综上所述,联合干燥不仅能很好的保留原料营养成分,而且能大大缩短干燥时间,减少能源消耗,在未来果蔬干燥行业最具良好发展前景。

参考文献

- [1] 孙海燕.1-MCP、MAP 和热处理对青椒贮藏生理及品质的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2006
SUN Haiyan. Effects of 1-MCP, MAP and heat treatment on storage physiology and quality of green pepper [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2006
- [2] 王博华.鲜切青椒保鲜技术的研究[D].福州:福建农林大学,2013
WANG Bohua. Study on fresh-keeping technology of fresh-cut green pepper [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013
- [3] 张雪婷,张秀玲,柳晓晨,等.CMC 和川陈皮素复合涂膜对青椒保鲜效果的影响[J].食品科技,2018,43(9):65-70
ZHANG Xueting, ZHANG Xiuling, LIU Xiaochen, et al. The effect of CMC and Chuanchenpisu compound coating on the fresh-keeping effect of green pepper [J]. Food Technology, 2018, 43(9): 65-70
- [4] Sónia M C, Jorge A S, José A L, et al. Effect of thermal blanching and of high pressure treatments on sweet green and red bell pepper fruits (*Capsicum annuum* L.) [J]. Food Chemistry, 2007, 107(4): 1436-1449
- [5] Kaur R, Kaur K, Ahluwalia P. Effect of drying temperatures and storage on chemical and bioactive attributes of dried tomato and sweet pepper [J]. LWT - Food Science and Technology, 2020, 117: 108604
- [6] Shen Y, Gao M X, Yang L, et al. Suitability analysis of fresh-cut vegetable processing for twenty main green capsicum cultivars in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(S2): 359-368
- [7] Zhang X L, Zhong C S, Mujumdar A S, et al. Cold plasma pretreatment enhances drying kinetics and quality attributes of chili pepper (*Capsicum annuum* L.) [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 241: 51-57
- [8] Xu H S, Ding S H, Zhou H, et al. Quality attributes and related enzyme activities in peppers during storage: effect of hydrothermal and calcium chloride treatment [J]. International Journal of Food Properties, 2019, 22(1): 1475-1491
- [9] Kim S H, Chung K R, Yang H J, et al. Sunchang gochujang (Korea red chili paste): the unfolding of authenticity [J]. Journal of Ethnic Foods, 2016, 3(3): 201-208
- [10] 郑清云,王丹,马越,等.热风干燥温度对青椒品质的影响[J].食品与机械,2015,31(3):158-161
ZHENG Qingyun, WANG Dan, MA Yue, et al. The effect of hot air drying temperature on the quality of green pepper [J]. Food and Machinery, 2015, 31(3): 158-161
- [11] 王瑞侠.绿甜椒真空冷冻干燥工艺研究[D].合肥:合肥工业大学,2012
WANG Ruixia. Research on vacuum freeze drying technology of green sweet pepper [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012
- [12] 朱学飞,张雪莉.基于数字 PID 控制的辣椒微波干燥实验研究[J].中国设备工程,2020,9:119-121
ZHU Xuefei, ZHANG Xueli. Experimental research on microwave drying of pepper based on digital PID control [J]. China Equipment Engineering, 2020, 9: 119-121
- [13] 陈宇昱,王颖瑞,周辉,等.四种干燥方式对小米椒理化性质及抗氧化能力的影响[J].食品工业科技,2020,41(19):45-51, 59
CHEN Yuyu, WANG Yingrui, ZHOU Hui, et al. Effects of four drying methods on the physical and chemical properties

- and antioxidant capacity of millet pepper [J]. Food Industry Technology, 2020, 41(19): 45-51, 59
- [14] 彭林,王玲,李馨影,等.基于几何加权法的辣椒微波干燥工艺优化[J].食品与发酵工业,2019,45(2):136-142
PENG Lin, WANG Ling, LI Xinying, et al. Optimization of microwave drying process of pepper based on geometric weighting method [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(2): 136-142
- [15] 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,2013,7
CAO Jiankang, JIANG Weibo, ZHAO Yumei. Experimental Guidance on Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables [M]. Beijing : China Light Industry Publishing House, 2013, 7
- [16] Lin H, Yan Y H, Zhao T, et al. Rapid discrimination of Apiaceae plants by electronic nose coupled with multivariate statistical analyses [J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2013, 84(5): 1-4
- [17] 梅桂林,陈娜,姚洁,等.基于电子鼻、电子舌技术的白术药材等级鉴别研究[J].广州化工,2020,48(21):76-78,84
MEI Guilin, CHEN Na, YAO Jie, et al. Research on grade identification of *Atractylodes macrocephala* based on electronic nose and electronic tongue technology [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2020, 48(21): 76-78, 84
- [18] Jia Y, Khalifa I, Hu L, et al. Influence of three different drying techniques on persimmon chips' characteristics: a comparison study among hot-air, combined hot-air-microwave, and vacuum-freeze drying techniques [J]. Food and Bioproducts Processing, 2019, 118: 67-76
- [19] A Y A, B S H, C H N B, et al. Improvements of drying rate and structural quality of microwave-vacuum dried carrot by freeze-thaw pretreatment - science direct [J]. LWT, 2019, 100: 294-299
- [20] 汤梦情.微波真空与真空冷冻组合干燥对芦笋营养与品质的影响[J].食品研究与开发,2019,40(5):76-81
TANG Mengqing. Effects of combined microwave vacuum and vacuum freeze drying on the nutrition and quality of asparagus [J]. Food Research and Development, 2019, 40(5): 76-81
- [21] 邓媛元.热风-真空冷冻联合干燥对脆性龙眼果干品质及益生活性的影响[J].中国农业科学,2020,53(10):2078-2090
DENG Yuanyuan. Effect of combined hot air-vacuum freeze drying on the quality and beneficial life of brittle longan dried fruit [J]. Chinese Agricultural Sciences, 2020, 53(10): 2078-2090
- [22] Dongdong, Wang J, Wang B, et al. Ripeness prediction of postharvest kiwifruit using a MOS e-nose combined with chemometrics [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(2): 419
- [23] Dong, W, Hu, et al. Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME-GC-MS [J]. Food Chemistry, 2019, 272: 723-731
- [24] Yin Xiaoyu, Lv Yichao, Wen Rongxin, et al. Characterization of selected Harbin red sausages on the basis of their flavour profiles using HS-SPME-GC/MS combined with electronic nose and electronic tongue [J]. Meat Science, 2020, 172(4): 108345
- [25] 孔宇,韩冉,王汝华,等.薯片酥脆度的感官评价和仪器分析及其相关性研究[J].农产品加工,2016,6:36-38
KONG Yu, HAN Ran, WANG Ruhua, et al. Sensory evaluation and instrumental analysis of crispness of potato chips and their correlation research [J]. Processing of Agricultural Products, 2016, 6: 36-38
- [26] Ando Y, Hagiwara S, Nabetani H, et al. Improvements of drying rate and structural quality of microwave-vacuum dried carrot by freeze-thaw pretreatment [J]. LWT - Food Science and Technology, 2018, 100: 294-299

(上接第 146 页)

- [28] Gunter C, Ozgen S, Karlsson B, et al. Calcium application at preemergence and during bulking may improve tuber quality and grade [J]. Hort Science, 2000, 35: 498
- [29] 王秋明,朱璇,曹康,等.负压渗透钙处理对芒果贮藏品质的影响[J].食品工业科技,2007,3:200-204
WANG Qiuming, ZHU Xuan, CAO Kang, et al. Effect of negative pressure osmotic calcium treatment on storage quality of mango [J]. Science and Technology of Food Industry, 2007, 3: 200-204