

不同脱水处理联合烹饪方式对黄瓜钱儿品质的变化及机制解析

王文琪¹, 李悦¹, 付成国², 徐雪霏³, 祝贺⁴, 贺阳^{1*}, 文连奎^{1*}

(1. 吉林农业大学食品科学与工程学院, 吉林长春 130118) (2. 长春健康职业学院健康饮食学院, 吉林长春 130000)
(3. 吉林省产品质量监督检验院, 吉林长春 130022) (4. 汽车经济技术开发区西湖实验学校, 吉林长春 130013)

摘要: 为了获得黄瓜钱儿更优烹饪品质对其进行加工及烹饪工艺优化。通过优化离心脱水、冻融脱水、热风干燥脱水与微波干燥脱水工艺, 并联合不同烹饪方式, 以色泽及质构作为烹饪品质评价标准, 以纤维素和果胶的含量、官能团及微观结构探究不同失水联合烹饪方式对黄瓜钱儿品质影响的机制。获得了最佳条件为装载量 $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 热风温度 70°C , 切片厚度 4 mm 的热风干燥联合凉拌处理后黄瓜钱儿品质最佳, 综合评分为 0.900, 热风干燥联合炒制处理后黄瓜钱儿品质较优, 综合评分为 0.450。黄瓜钱儿咀嚼性与纤维素、原果胶含量呈正相关, 与色差、可溶性果胶含量呈负相关。黄瓜钱儿色差与纤维素、原果胶、可溶性果胶含量呈负相关。热风干燥处理的黄瓜钱儿因亚甲基含量较高, 使其纤维素含量最高 (HD-P, HD-F 纤维素含量分别达到 1.44 ± 0.004 、 $1.46 \pm 0.012 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。凉拌和炒制对黄瓜钱儿纤维素结构影响不明显, 炒制显著破坏了果胶分子结构。该文得出热风干燥脱水联合凉拌或炒制处理是获得黄瓜钱儿最优烹饪品质的方式, 果胶及纤维素的含量是影响黄瓜钱儿质地品质的主要原因。为今后黄瓜钱儿的生产加工提供理论依据, 为黄瓜钱儿质地影响机制研究奠定基础。

关键词: 黄瓜钱儿; 加工; 烹饪; 品质; 机制

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.6.0405

Analysis of the Changes and Mechanism of Different Dewatering and Combined Cooking Methods on the Quality of Dried Cucumber Slices

WANG Wenqi¹, LI Yue¹, FU Chengguo², XU Xuefei³, ZHU He⁴, HE Yang^{1*}, WEN Liankui^{1*}

(1. School of Food Science and Engineering, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

(2. School of Healthy Diet, Changchun Vocational College of Health, Changchun 130000, China)

(3. Jilin Product Quality Supervision and Inspection Institute, Changchun 130022, China)

(4. Xihu Experimental School, Automobile Economic and Technological Development Zone, Changchun 130013, China)

Abstract: In order to obtain better cooking quality of dried cucumber slices, processing and cooking technology were optimized. By optimizing the process of centrifugal dehydration, freeze-thaw dehydration, hot air drying dehydration and microwave drying dehydration, and combining different cooking methods, the color and texture were used as the evaluation criteria for cooking quality, and the mechanism of the influence of different combined cooking methods on the quality of dried cucumber slices were investigated based on the content, functional groups and microstructure of cellulose and pectin. The optimal conditions were as follows: loading capacity of $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, hot air temperature of 70°C , slice thickness of 4 mm , hot air drying combined with cold mixing treatment, the best quality of dried cucumber, the comprehensive score was 0.900; hot air drying combined with stir-frying treatment, the best quality of dried cucumber slices, the comprehensive score was 0.450. The chewability of dried cucumber slices were positively correlated with cellulose and raw pectin content, but negatively correlated with color difference and soluble pectin content. The color difference of dried cucumber slices were negatively correlated with the contents of cellulose, raw pectin and soluble pectin. The cellulose content of hot-air dried cucumber slices was the highest due to its high methylene content (HD-P and HD-F cellulose content respectively reached 1.44 ± 0.004 and $1.46 \pm 0.012 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$). Cold mixing and stir-frying had no obvious effect

收稿日期: 2025-03-21; 修回日期: 2025-04-11; 接受日期: 2025-04-15

基金项目: 吉林省科技厅重点研发项目 (20230202047NC); 吉林省自然科学基金 (20230101196JC)

作者简介: 王文琪 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬贮藏加工工程, E-mail: wangwenqi508@163.com

通讯作者: 贺阳 (1986-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 长白山野生植物资源开发利用。E-mail: heyang200704@126.com; 共同通讯作者: 文连奎 (1962-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工新技术与新资源利用。E-mail: wenlankui@163.com

on cellulose structure of dried cucumber slices, but stir-frying significantly destroyed pectin molecular structure. The paper concluded that hot air drying and dehydration combined with cold mixing or stir-frying is the best way to obtain the optimal cooking quality of dried cucumber slices, and the content of pectin and cellulose is the main reason for affecting the texture quality of dried cucumber slices. It provides a theoretical basis for the production and processing of dried cucumber slices and lays a foundation for the study on the mechanism of texture influence of dried cucumber slices.

Key words : dried cucumber slices; dehydration; cooking; quality; mechanism

黄瓜钱儿是一种经典的干制蔬菜产品，具有较脆韧的口感，独具特色。在我国历史悠久，其本身具有美容、减肥、解毒清热、增加食欲等功效，目前已经被制成预包装食品出售^[1]。

蔬菜经脱水干制后，水分含量与酶的活性均降低，可溶性固体物含量提高，很大程度上抑制了微生物繁殖，便于长期保藏、实现换季供应，降低了蔬菜对贮藏条件的要求^[2]。不同失水处理会影响蔬菜干的理化指标，包括质构、微观结构、色泽与水分迁移等。Yan 等^[3]对甜菜根片进行热风干燥，将样品干燥至含水率为 $0.03 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，研究不同干燥温度对甜菜根片干燥特性和理化性质的影响，发现 60°C 干燥的甜菜根片与新鲜甜菜根片相比，总色差最小。干制蔬菜烹饪的方式包括凉拌、炒制、蒸制等，不同的烹饪方式对蔬菜色泽、营养物质等烹饪品质的影响不同，Bureau 等^[4]研究发现蒸制可以最大限度的保留西兰花中的叶酸，微波处理后的绿豆烹饪品质最佳，菠菜的最佳烹饪方式为蒸制和微波处理。蔬菜的口感主要取决于蔬菜的组织结构、蔬菜细胞的细胞壁细胞膜成分等，国内外对于干制蔬菜品质及形成机制方面的研究主要集中于干制方法、复水方法、纤维素和果胶的含量、官能团及微观结构等方面^[5,6]。目前不同脱水处理联合不同烹饪方式对黄瓜钱儿烹饪品质影响以及影响机制的研究未见报道。因此，本课题组优化了不同脱水工艺，并联合了凉拌、热炒两种烹饪方式，检测其色泽、质构、纤维素和果胶含量等用以评价烹饪对黄瓜钱儿品质及探究不同失水处理对黄瓜钱儿烹饪品质影响的机制。通过评价黄瓜钱儿脱水与烹饪品质，在黄瓜钱儿脱水与烹饪最佳工艺条件确定上具有创新性；通过探究纤维素和果胶的含量、官能团及微观结构，在解析影响黄瓜钱儿品质的机制方面具有创新性。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜黄瓜，购于长春市市场，产自山东寿光。所用化学试剂均为分析级，用于加工试剂均为食品级。

1.2 仪器与设备

CR-400 色差计，杭州彩谱科技有限公司；ST-Z16 质构仪，山东盛泰仪器有限公司；BC/BD-158 转换型冷藏冷冻箱，河南新飞电器有限公司；X3-233A 变频微波设备，广东美的电器制造有限公司；101A-2ET 电热鼓风干燥箱，上海实验仪器厂有限公司；LXJ-IIIB 大容量多管离心机，上海安亭科学仪器厂；T6 紫外可见分光光度计，北京普析通用仪器有限责任公司；VERTEX 70 傅里叶红外光谱仪，德国 Bruker 公司；SSX-550 扫描电子显微镜，日本岛津有限公司。

1.3 方法

1.3.1 黄瓜钱儿不同脱水工艺优化

1.3.1.1 黄瓜钱儿脱水工艺流程图

工艺流程见图 1。

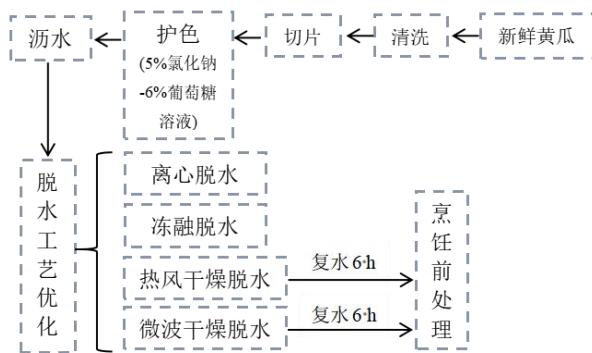


图 1 黄瓜钱儿脱水工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of the dehydration process

1.3.1.2 黄瓜钱儿不同脱水工艺优化设计

不同脱水工艺单因素设计：选取离心、冻融、热风干燥、微波干燥四种脱水方式，各因素均选择中间水平量作为常量（见表 1），以感官评价和咀嚼性为指标评价切片厚度对黄瓜钱儿品质的影响。选择显著的三个水平量进行 $L_9(3^4)$ 正交试验，以感官评价、咀嚼性加权后计算综合评分为评价指标，确定黄瓜钱儿离心脱水的最佳工艺参数。

表 1 不同脱水工艺单因素设计

Table 1 Single-factor design of different dehydration processes

脱水方式	因素	参数
离心脱水	离心转速	3 000、3 500、4 000、4 500、5 000 $r \cdot min^{-1}$
	离心时间	10、15、20、25、30 min
	切片厚度	2、3、4、5、6 mm
冻融脱水	冷冻时间	8、9、10、11、12 h
	解冻时间	8、9、10、11、12 h
	切片厚度	2、3、4、5、6 mm
热风干燥脱水	装载量	0.4、0.8、1.2、1.6、2.0 $kg \cdot m^{-2}$
	热风温度	60、65、70、75、80 °C
	切片厚度	2、3、4、5、6 mm
微波干燥脱水	装载量	0.8、1.6、2.4、3.2、4.0 $kg \cdot m^{-2}$
	微波功率	200、300、400、500、600 W
	切片厚度	2、3、4、5、6 mm

评价指标设计：随机挑选 10 人对复水后黄瓜钱儿的色泽、外形、口感和滋味进行评价，计算平均值后得出最终分数（见表 2）。

表 2 感官评价标准

Table 2 The sensory assessment criteria

评价指标	评价标准	分值
色泽 (20 分)	色泽鲜亮，呈现翠绿色	15~20
	色泽略黄	10~14
	色泽较黄	1~9
外形 (20 分)	无皱缩，接近新鲜状态	15~20
	稍有皱缩，较接近新鲜状态	10~14
	皱缩严重	1~9
口感 (40 分)	有弹性，有嚼劲	30~40
	弹性、嚼劲略差	15~29

评价指标	评价标准	分值
	弹性、嚼劲较差	1~14
	有浓郁香气, 微咸	15~20
滋味 (20 分)	香气不明显, 无特殊味道	10~14
	无香气, 无特殊味道	1~9

参考杨佳敏^[7]方法, 选用 P5 探头, 设置测前速度为 $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 测试速度为 $0.1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 测后速度为 $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 挤压距离为 2 mm, 两次挤压间隔为 5 s。

评价指标计算: 根据变异系数、权重计算公式, 得到各指标权重。经变异系数法分配权重后, 根据指标归一化 (隶属度值), 得到各试验中两个指标的隶属度值, 并得到各试验“综合评分”^[8]。各个指标的变异系数计算公式见 (1):

$$V_i = \frac{S_i}{X_i} \quad i=1,2 \quad (1)$$

式中:

V_i —第 i 项指标的变异系数;

S_i —第 i 项指标的标准差;

X_i —第 i 项指标的算数平均值。

各个指标的权重计算公式见 (2):

$$W_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad i=1, 2 \quad (2)$$

式中:

W_i —第 i 项指标的权重;

V_i —第 i 项指标的变异系数;

$\sum_{i=1}^n V_i$ — n 项指标的变异系数之和。

各个指标归一化的计算公式见 (3):

$$R_{in} = \frac{Y_{in} - Y_{i \min}}{Y_{i \max} - Y_{i \min}} \quad i=1,2; n=1,2,3,\dots,9 \quad (3)$$

式中:

R_{in} —第 n 次试验指标 R_i 的隶属度值;

Y_{in} —第 n 次试验指标 Y_i 的值;

$Y_{i \max}$ —第 n 次试验指标 Y_i 的最大值;

$Y_{i \min}$ —第 n 次试验指标 Y_i 的最小值。

结合权重综合评分计算公式见 (4):

$$U_n = \sum_{i=1}^2 W_i R_{in} \quad i=1,2; n=1,2,3,\dots,9 \quad (4)$$

式中:

U_n —第 n 次试验指标 Y_1 、 Y_2 的综合评分。

1.3.2 黄瓜钱儿不同脱水工艺联合不同烹饪方式样品制备

1.3.2.1 黄瓜钱儿凉拌处理

经优化的四个脱水工艺后进行烹饪前处理的样品各取 200 g (以其为基料), 分别依次加入质量分数为 1% 白醋, 0.5% 味精, 1% 盐, 0.5% 白糖, 0.3% 香油, 搅拌 2 min 使其均匀。

1.3.2.2 黄瓜钱儿炒制处理

经优化的四个脱水工艺后进行烹饪前处理的样品各取 200 g (以其为基料), 添加质量分数为 5% 油, 2% 盐,

旺火翻炒 3 min。

1.3.3 黄瓜钱儿不同脱水工艺联合不同烹饪方式品质分析

不同脱水工艺联合不同烹饪处理获得的样品进行色泽、质构、微观结构等品质分析。

1.3.3.1 色泽

采用色差仪进行检测^[9]。计算公式 (5) 如下:

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2} \quad (5)$$

式中:

L_0 、 a_0 、 b_0 ——分别为新鲜样品的亮度、红绿色度、黄蓝色度;

L 、 a 、 b ——分别为脱水后样品的亮度、红绿色度、黄蓝色度。

1.3.3.2 质构

操作方法同 1.3.1.1。

1.3.3.3 微观结构

根据李晓等^[10]方法检测黄瓜钱儿的微观结构。将黄瓜钱儿样品固定于双面胶导电碳膜上, 置于离子溅射仪样品台上喷金 30 s 后, 在扫描电子显微镜下进行扫描。

1.3.4 黄瓜钱儿烹饪品质影响机制分析

根据上述制法获得 11 个黄瓜钱儿样品: 新鲜样品 1 个; 以及新鲜样品和不同脱水处理联合凉拌、炒制烹饪处理的 10 个烹饪后样品。样品分别进行纤维素、果胶的提取, 然后对其纤维素及果胶含量、官能团、微观结构进行检测。

1.3.4.1 黄瓜钱儿纤维素结构分析

纤维素含量: 主要参考王恒沪^[11]方法提取并测定纤维素含量。标准曲线公式为 $y=0.6465x+0.2911$, $R^2=0.9986$ 。计算黄瓜钱儿中纤维素含量。

纤维素官能团: 称取 2 mg 干燥纤维素样品与 0.2 g 干燥的溴化钾混合研磨成细致粉末, 放在压片机上制成压片后进行傅里叶红外光谱测定。

纤维素微观结构: 操作方法同 1.3.3.3。

1.3.4.2 黄瓜钱儿果胶结构分析

果胶含量: 主要参考李佳乐等^[12]方法提取并测定果胶含量。标准曲线公式为 $y=0.0122x+0.165$, $R^2=0.9986$ 。计算黄瓜钱儿中果胶含量(以半乳糖醛酸 GalA 质量分数%表示), 公式 (6) 如下:

$$GalA = \frac{m' \times V}{V_s \times m \times 10^6} \times 100\% \quad (6)$$

式中:

m' ——标准曲线中查得的半乳糖醛酸质量;

V ——样品提取液总体积;

V_s ——测定时样品提取液体积;

m ——样品质量。

果胶官能团: 操作方法同 1.3.4.1: 纤维素官能团。

果胶微观结构: 操作方法同 1.3.3.3。

1.3.4.3 主成分分析

对先前检测的 11 个样品的色差、质构、纤维素含量、原果胶含量、可溶性果胶含量进行主成分分析并绘制载荷图。

1.3.5 数据处理

所有数据重复检测三次后得到, 取平均值±标准差, 采用变异系数法分配权重, 采用综合评分法计算综合评分, 数据采用 SPSS26 软件进行邓肯方差分析, 采用 Origin 2021 进行主成分分析及绘图。

2 结果与分析

2.1 黄瓜钱儿不同脱水工艺优化结果分析

2.1.1 黄瓜钱儿离心脱水工艺优化结果分析

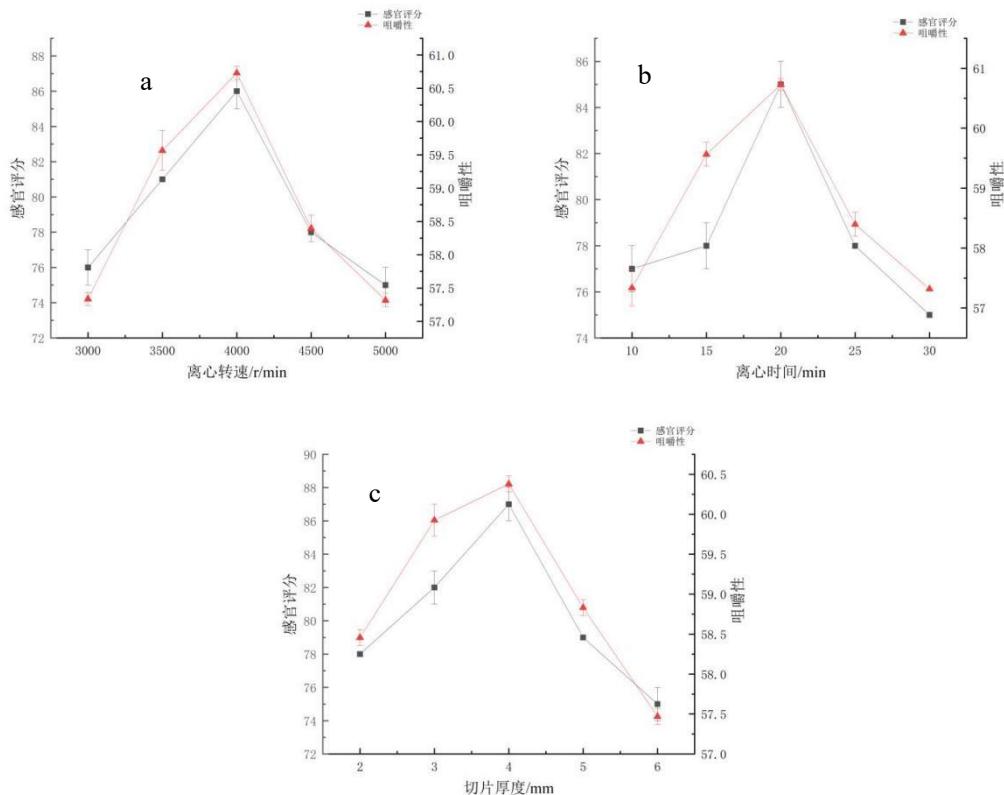


图2 黄瓜钱儿离心脱水工艺单因素试验结果

Fig.2 Results of single factor test on centrifugal dewatering process of dried cucumber slices

注: (a) 离心转速对感官评分和咀嚼性的影响, (b) 离心时间对感官评分和咀嚼性的影响, (c) 切片厚度对感官评分和咀嚼性的影响。

根据图 2a~c 单因素结果选择最优水平进行正交试验。综合评分结果见表 3, 各指标权重见表 4。方差分析与显著性分析结果见表 5。

表3 黄瓜钱儿离心脱水正交试验结果

Table 3 Results of centrifugal dehydration orthogonal test of dried cucumber slices

试验号	离心脱水因素			感官评分	隶属度值 1	咀嚼性	隶属度值 2	综合评分
	A 离心转速/(r·min⁻¹)	B 离心时间/min	C 切片厚度/mm					
1	1(3500)	1(15)	1(3)	74.00±1.00	0.000	120.92±6.75	0.335	0.144
2	1	2(20)	2(4)	81.00±1.00	0.778	123.23±10.63	0.526	0.669
3	1	3(25)	3(5)	75.00±1.00	0.111	120.01±6.62	0.259	0.175
4	2(4000)	1	2	80.00±1.00	0.667	128.96±10.54	1.000	0.810
5	2	2	3	83.00±0.00	1.000	127.26±11.47	0.859	0.939
6	2	3	1	75.00±1.00	0.111	120.15±10.27	0.640	0.339
7	3(4500)	1	3	76.00±0.00	0.222	124.61±8.31	0.270	0.243
8	3	2	1	76.00±1.00	0.222	122.67±9.19	0.479	0.333
9	3	3	2	79.00±2.00	0.556	116.88±9.84	0.000	0.316
K1	0.988	1.198	0.816					
K2	2.089	1.941	1.796					
K3	0.892	0.830	1.357					

k1	0.329	0.399	0.272
k2	0.696	0.647	0.599
k3	0.297	0.277	0.452
R	0.399	0.370	0.326
主次 顺序	A>B>C		

表4 黄瓜钱儿离心脱水工艺优化指标权重表

Table 4 Weight table of dried cucumber slices centrifugal dehydration process optimization index

指标	平均值	标准差	变异系数	权重
感官评分	77.667	3.162	0.041	0.570
咀嚼性	122.745	0.035	0.031	0.430

表5 方差分析与显著性分析结果

Table 5 Results of analysis of variance and significance test

来源	III型	df	均方	F	P	显著性
校正模型	0.669 ^a	6	0.111	60.404	0.016	
截距	1.750	1	1.750	948.477	0.001	
A	0.214	2	0.107	57.919	0.017	*
B	0.160	2	0.080	43.469	0.022	*
C	0.295	2	0.147	79.823	0.012	*
误差	0.004	2	0.002			
总计	2.423	9				
校正的总计	0.673	8				

注: *代表显著。

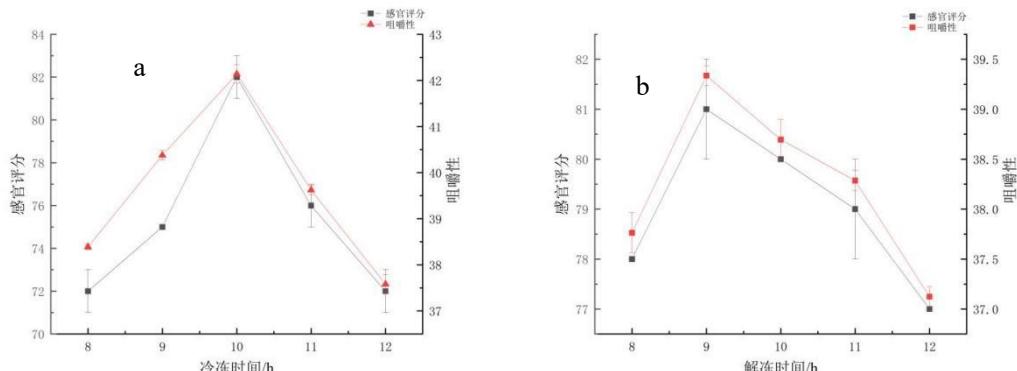
表6 验证试验结果分析表

Table 6 Analysis table of verification test results

试验号	组合	综合评分
1	A ₂ B ₂ C ₂	0.950
2	A ₂ B ₂ C ₃	0.939

由表3可知, 黄瓜钱儿离心脱水综合评分最高的工艺条件为A₂B₂C₃, 其中影响因素: 离心转速>离心时间>切片厚度。这是因为离心转速决定了黄瓜钱儿脱水时的离心力, 离心力是决定黄瓜钱儿能脱掉多少水分的主要原因, 而切片厚度相比于离心转速影响较小^[13]。由表5可知, 三因素差异均显著, 这表明离心转速、离心时间以及切片厚度对黄瓜钱儿离心脱水工艺均有显著影响。但综合实际K值及验证试验结果(表6)来看, 黄瓜钱儿离心脱水的最佳工艺条件为A₂B₂C₂。

2.1.2 黄瓜钱儿冻融脱水工艺优化结果分析



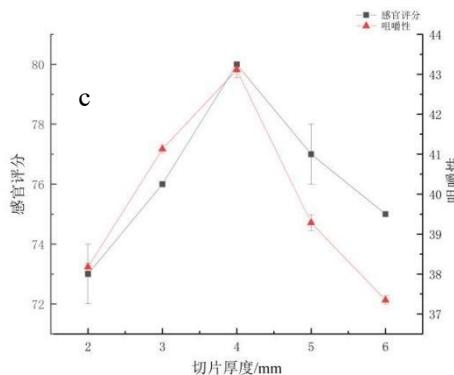


图3 黄瓜钱儿冻融脱水工艺单因素试验结果

Fig.3 Results of single factor experiment on freeze-thaw dehydration process of dried cucumber slices

注: (a) 冷冻时间对感官评分和咀嚼性的影响, (b) 解冻时间对感官评分和咀嚼性的影响, (c) 切片厚度对感官评分和咀嚼性的影响。

根据图3a~c单因素结果选择最优水平进行正交试验。结果见表7。工艺优化指标权重见表8, 方差分析与显著性分析结果见表9。

表7 黄瓜钱儿冻融脱水正交试验结果

Table 7 Results of freeze-thaw dehydration orthogonal test of dried cucumber slices

试验号	因素			感官评分	隶属度值1	咀嚼性	隶属度值2	综合评分
	A 冷冻时间/h	B 解冻时间/h	C 切片厚度/mm					
1	1(9)	1(9)	1(3)	75.00±1.00	0.417	130.27±11.91	0.253	0.344
2	1	2(10)	2(4)	76.00±0.00	0.500	143.91±11.53	1.000	0.722
3	1	3(11)	3(5)	70.00±1.00	0.000	130.91±1.41	0.288	0.128
4	2(10)	1	2	82.00±0.00	1.000	140.50±8.45	0.813	0.917
5	2	2	3	81.00±1.00	0.917	125.66±13.18	0.000	0.510
6	2	3	1	77.00±1.00	0.583	132.87±7.31	0.396	0.500
7	3(11)	1	3	71.00±1.00	0.083	138.46±14.36	0.701	0.358
8	3	2	1	74.00±2.00	0.333	134.68±6.80	0.494	0.405
9	3	3	2	73.00±1.00	0.250	139.75±7.48	0.772	0.482
K1	1.194	1.619	1.249					
K2	1.927	1.637	2.121					
K3	1.244	1.110	0.995					
k1	0.398	0.540	0.416					
k2	0.642	0.546	0.707					
k3	0.415	0.370	0.332					
R	0.228	0.176	0.375					
主次顺序	C>A>B							

表8 黄瓜钱儿冻融脱水工艺优化指标权重表

Table 8 Weight table of dried cucumber slices freeze-thaw dehydration process optimization index

指标	平均值	标准差	变异系数	权重
感官评分	75.444	4.096	0.054	0.556
咀嚼性	135.224	5.859	0.043	0.444

表9 方差分析与显著性分析结果

Table 9 Results of analysis of variance and significance test

来源	III型	df	均方	F	P	显著性
校正模型	0.404 ^a	6	0.067	13.683	0.070	
截距	2.117	1	2.117	429.901	0.002	
A	0.113	2	0.056	11.425	0.08	
B	0.060	2	0.030	6.069	0.141	
C	0.232	2	0.116	23.554	0.041	*
误差	0.010	2	0.005			
总计	2.531	9				
校正的总计	0.414	8				

注: *代表显著。

由表7可以得出, 黄瓜钱儿冻融脱水综合评分最高的工艺条件为A₂B₁C₂, 其中影响因素: 切片厚度>冷冻时间>解冻时间。由于切片厚度影响冷冻过程中形成冰晶的结构, 从而影响黄瓜钱儿的质地^[14], 而解冻过程中黄瓜钱儿在室温中静置, 对其组织结构影响较小^[15]。由表9可知, 切片厚度对黄瓜钱儿冻融脱水工艺影响较显著。综合K值及验证试验结果(表10)来看, 黄瓜钱儿离心脱水的最佳工艺条件为A₂B₂C₂。

表10 验证试验结果分析表

Table 10 Analysis table of verification test results

试验号	组合	综合评分
1	A ₂ B ₂ C ₂	0.918
2	A ₂ B ₁ C ₂	0.917

2.1.3 黄瓜钱儿热风干燥脱水工艺优化结果分析

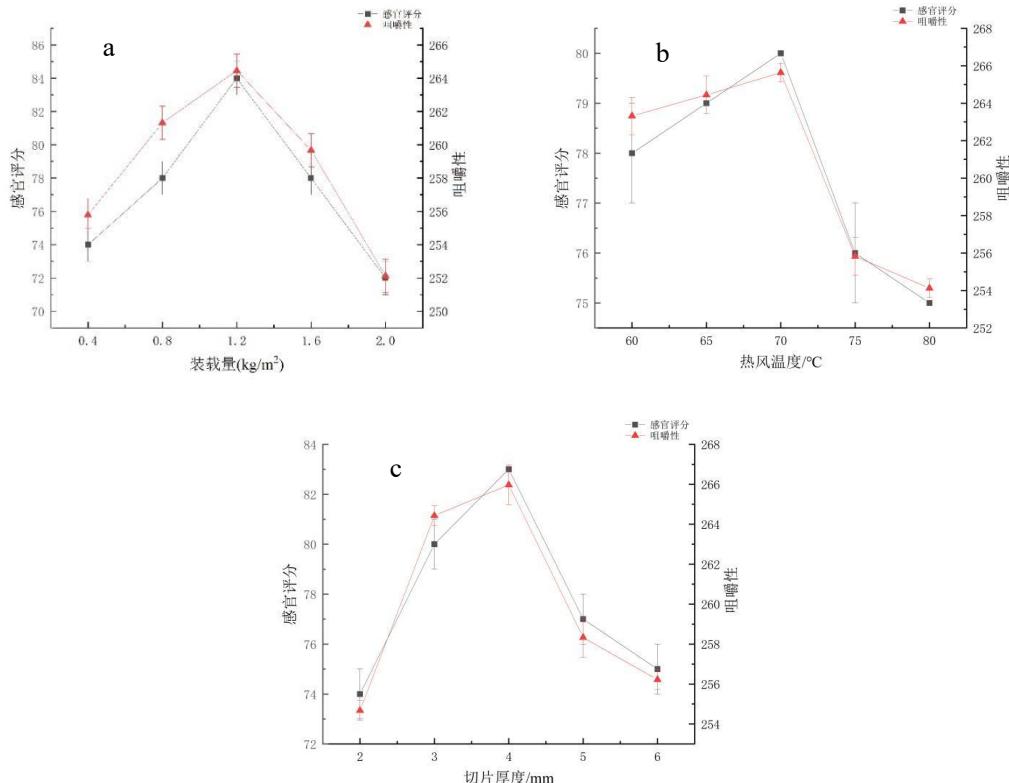


图4 黄瓜钱儿热风干燥脱水工艺单因素试验结果

Fig.4 Results of single factor test on hot-air drying and dehydration process of dried cucumber slices

注: a 装载量对感官评分和咀嚼性的影响, b 热风温度对感官评分和咀嚼性的影响, c 切片厚度对感官评分和咀嚼性的影响。

根据图 4a~c 单因素结果选择最优水平进行正交试验。结果见表 11。热风干燥工艺优化指标权重见表 12, 方差分析与显著性分析结果见表 13。

表 11 黄瓜钱儿热风干燥脱水正交试验结果

Table 11 Results of hot air dehydration orthogonal test of dried cucumber slices

试验号	因素			感官评分	隶属度值 1	咀嚼性	隶属度值 2	综合评分
	A 装载量/(kg·m ⁻²)	B 热风温度/°C	C 切片厚度/mm					
1	1(0.8)	1(65)	1(3)	72±0.00	0	250.395±7.03	0.363	0.156
2	1	2(70)	2(4)	80±1.00	0.8	268.297±6.22	1	0.886
3	1	3(75)	3(5)	78±2.00	0.6	262.401±5.42	0.790	0.682
4	2(1.2)	1	2	77±1.00	0.5	260.606±6.52	0.727	0.597
5	2	2	3	82±1.00	1	266.866±11.73	0.949	0.978
6	2	3	1	76±0.00	0.4	257.676±5.78	0.622	0.496
7	3(1.6)	1	3	73±1.00	0.1	240.176±10.35	0	0.057
8	3	2	1	74±1.00	0.2	252.529±6.76	0.439	0.303
9	3	3	2	75±1.00	0.3	254.556±4.20	0.511	0.391
K1	1.724	0.811	0.955					
K2	2.071	2.167	1.874					
K3	0.751	1.569	1.717					
k1	0.575	0.270	0.318					
k2	0.690	0.722	0.625					
k3	0.250	0.523	0.572					
R	0.440	0.452	0.306					
主次顺序	B>A>C							

表 12 黄瓜钱儿热风干燥工艺优化指标权重表

Table 12 Weight table of dried cucumber slices hot air dehydration process optimization index

指标	平均值	标准差	变异系数	权重
感官评分	76.222	3.456	0.045	0.570
咀嚼性	257.056	8.805	0.034	0.430

表 13 方差分析与显著性分析结果

Table 13 Results of analysis of variance and significance test

来源	III型	df	均方	F	P	显著性
校正模型	0.782 ^a	6	0.130	74.684	0.013	
截距	2.297	1	2.297	1316.782	0.001	
A	0.312	2	0.156	89.545	0.011	*
B	0.308	2	0.154	88.294	0.011	*
C	0.161	2	0.081	46.213	0.021	*
误差	0.003	2	0.002			
总计	3.082	9				
校正的总计	0.785	8				

注: *代表显著。

表 14 验证试验结果分析表

Table 14 Analysis table of verification test results

试验号	组合	综合评分
1	A ₂ B ₂ C ₂	0.980
2	A ₂ B ₂ C ₃	0.978

由表 11 可以得出, 黄瓜钱儿热风干燥综合评分最高的工艺条件为 A₂B₂C₃, 其中影响因素: 热风温度>装载量>切片厚度。这是因为烘箱内鼓起的热风是黄瓜钱儿热风干燥脱水的主要动力, 热风温度直接影响黄瓜钱儿的脱水程度^[16]。由表 13 可知, 装载量、热风温度、切片厚度对黄瓜钱儿热风干燥工艺影响均显著。综合 K 值及验证试验结果 (表 14) 来看 A₂B₂C₂ 为最佳工艺。

2.1.4 黄瓜钱儿微波干燥脱水工艺优化结果分析

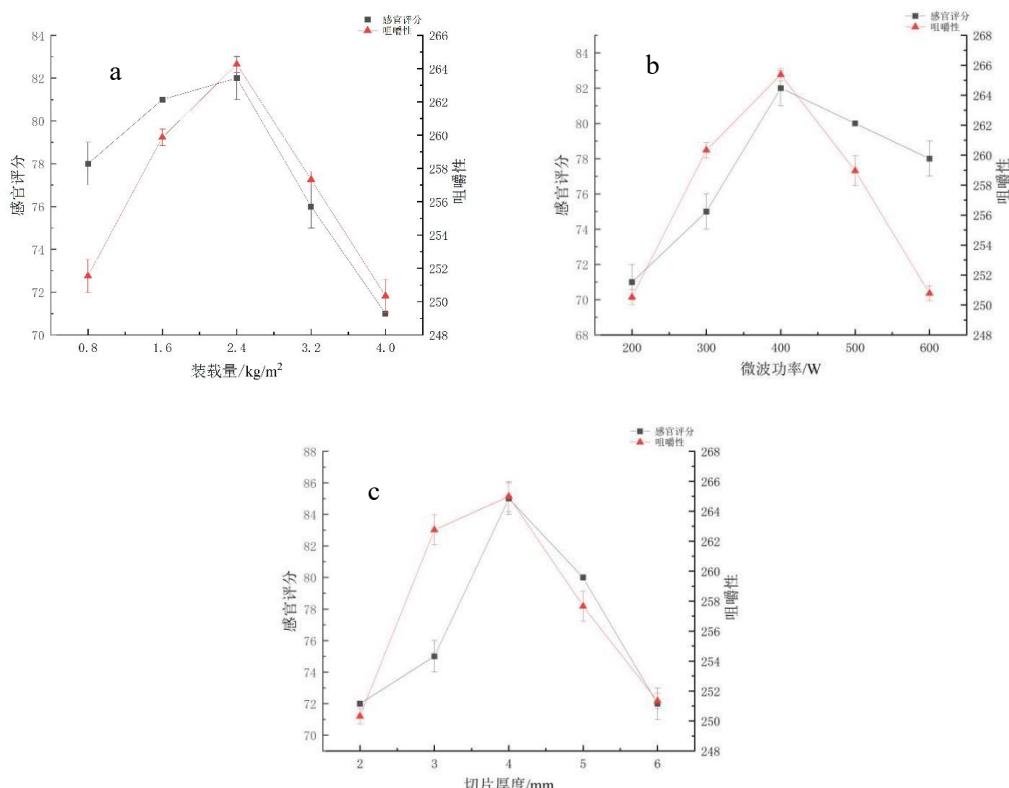


图 5 黄瓜钱儿微波干燥脱水工艺单因素试验结果

Fig.5 Results of single factor experiment on microwave drying and dehydration process of dried cucumber slices

注: (a) 装载量对感官评分和咀嚼性的影响, (b) 微波功率对感官评分和咀嚼性的影响, (c) 切片厚度对感官评分和咀嚼性的影响。

根据图 5a~c 单因素结果选择最优水平进行正交试验。结果见表 15。黄瓜钱儿热风干燥工艺优化指标权重见表 16, 方差分析与显著性分析结果见表 17。

表 15 黄瓜钱儿微波干燥脱水正交试验结果

Table 15 Results of microwave dehydration orthogonal test of dried cucumber slices

试验号	因素			感官评分	隶属度值 1	咀嚼性	隶属度值 2	综合评分
	A 装载/(kg·m ⁻²)	B 微波功率/W	C 切片厚度/mm					
1	1(1.6)	1(300)	1(3)	75±0.00	0.429	75.496±10.61	0.677	0.551
2	1	2(400)	2(4)	77±1.00	0.571	70.203±9.14	0.127	0.352
3	1	3(500)	3(5)	71±1.00	0.143	68.983±7.10	0	0.072
4	2(2.4)	1	2	80±1.00	0.786	78.607±5.10	1	0.891
5	2	2	3	76±2.00	0.5	71.844±5.55	0.297	0.400

现代食品科技			Modern Food Science and Technology			2026, Vol.42, No.6	
6	2	3	1	69±0.00	0	69.316±7.84	0.035
7	3(3.2)	1	3	83±1.00	1	78.047±6.37	0.942
8	3	2	1	76±1.00	0.5	75.020±11.66	0.627
9	3	3	2	74±2.00	0.357	73.155±8.37	0.433
K1	0.976	2.413	1.131				
K2	1.308	1.315	1.638				
K3	1.929	0.484	1.444				
k1	0.325	0.804	0.377				
k2	0.436	0.438	0.546				
k3	0.643	0.161	0.481				
R	0.318	0.643	0.169				
主次	B>A>C						
顺序							

表 16 黄瓜钱儿微波干燥工艺优化指标权重表

Table 16 Weight table of dried cucumber slices microwave dehydration process optimization index

指标	平均值	标准差	变异系数	权重
感官评分	75.667	4.243	0.056	0.507
咀嚼性	66.429	3.616	0.054	0.493

表 17 方差分析与显著性分析结果

Table 17 Results of analysis of variance and significance test

来源	III型	df	均方	F	P	显著性
校正模型	0.824 ^a	6	0.137	36.775	0.027	
截距	1.972	1	1.972	528.061	0.002	
A	0.156	2	0.078	20.884	0.046	*
B	0.624	2	0.312	83.581	0.012	*
C	0.044	2	0.022	5.861	0.146	
误差	0.007	2	0.004			
总计	2.803	9				
校正的总计	0.831	8				

注: *代表显著。

由表 15 可以得出, 黄瓜钱儿微波干燥综合评分最高的工艺条件为 A₃B₁C₃, 影响因素: 微波功率>装载量>切片厚度。这是因为微波辐射传能是黄瓜钱儿微波干燥脱水的主要动力, 微波功率直接影响黄瓜钱儿的脱水程度^[17]。由表 17 可知, 装载量、微波功率对黄瓜钱儿微波干燥工艺影响较显著。综合 K 值及验证试验结果(表 18)来看, 黄瓜钱儿微波干燥的最佳工艺条件为 A₃B₁C₂。

表 18 验证试验结果分析表

Table 18 Analysis table of verification test results

试验号	组合	综合评分
1	A ₃ B ₁ C ₂	0.973
2	A ₃ B ₁ C ₃	0.971

2.2 不同脱水工艺联合凉拌黄瓜钱儿品质结果分析

2.2.1 色泽

从表 19 可以看出, 不同失水处理联合凉拌处理后各组较新鲜样品均有色差, 这可能是由于经过不同脱水加工及凉拌过程中食盐等的共同影响, 造成黄瓜钱儿细胞收缩, 使光线透过率降低的缘故^[18]。HD-P 的最小可能是 12

由于热风干燥相较其他脱水处理联合凉拌对呈色物质破坏最小^[19]。MWD-P 的最大可能是由于微波干燥使物料短时间内大幅度升温, 产生部分焦糊, 凉拌使焦糊物质分散所致^[20]。

表 19 不同脱水工艺联合凉拌对黄瓜钱儿色泽的影响

Table 19 Effect of different dehydration treatments combined with mixing on the color of dried cucumber

样品	<i>L</i> *值	<i>a</i> *值	<i>b</i> *值	ΔE
F-P	60.03±1.14 ^a	-4.83±0.67 ^b	24.75±0.83 ^{bc}	-
CD-P	40.72±1.29 ^{bc}	-7.56±0.32 ^c	25.92±0.90 ^{ab}	19.54±0.08 ^b
FTD-P	41.37±1.31 ^{bc}	-7.59±0.68 ^c	23.46±0.86 ^c	18.91±0.14 ^c
HD-P	42.50±0.79 ^b	-3.17±0.53 ^a	27.29±0.76 ^a	17.79±0.26 ^d
MWD-P	40.23±1.17 ^c	-7.90±0.80 ^c	20.08±0.83 ^d	20.57±0.04 ^a

注: *L**值代表亮度, *a**值代表红绿色度, *b**值代表黄蓝色度; F-P 代表新鲜凉拌样品, CD-P 代表离心脱水凉拌样品, FTD-P 代表冻融脱水凉拌样品, HD-P 代表热风干燥复水凉拌样品, MWD-P 代表微波干燥复水凉拌样品; 不同字母表示差异显著 ($P<0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P>0.05$)。

2.2.2 质构

表 20 不同脱水工艺联合凉拌对黄瓜钱儿质构的影响

Table 20 Effect of different dehydration treatments combined with mixing on the texture of dried cucumber slices

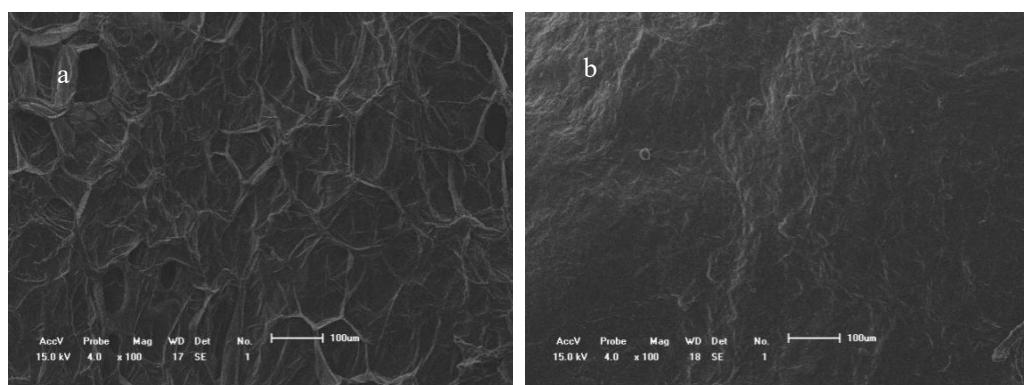
样品	咀嚼性/N	弹性	硬度/N	粘聚性/N.sec	胶着性/N	回复性
F-P	211.314±14.189 ^b	0.631±0.036 ^b	2931.481±228.218 ^a	0.212±0.012 ^b	199.510±13.425 ^c	0.156±0.003 ^a
CD-P	119.148±9.277 ^c	0.468±0.026 ^c	616.407±41.742 ^b	0.521±0.034 ^a	248.749±14.587 ^b	0.144±0.002 ^b
FTD-P	121.509±9.315 ^c	0.400±0.023 ^d	645.793±43.583 ^b	0.431±0.028 ^{ab}	264.480±15.161 ^{ab}	0.121±0.002 ^c
HD-P	238.741±13.546 ^a	0.737±0.042 ^a	481.040±35.669 ^b	0.631±0.040 ^a	286.055±16.981 ^a	0.144±0.002 ^b
MWD-P	67.279±4.364 ^d	0.623±0.035 ^b	183.683±10.576 ^c	0.562±0.035 ^a	95.753±6.217 ^d	0.155±0.003 ^a

注: F-P 代表新鲜凉拌样品, CD-P 代表离心脱水凉拌样品, FTD-P 代表冻融脱水凉拌样品, HD-P 代表热风干燥复水凉拌样品, MWD-P 代表微波干燥复水凉拌样品; 不同字母表示差异显著 ($P<0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P>0.05$)。

从表 20 可以看出, 与新鲜样品和其他处理组相比, HD-P 的咀嚼性、弹性、粘聚性及胶着性最高, 这可能是由于热风干燥加速了游离水的迁移, 且凉拌过程中食盐的作用导致纤维素、果胶的结构发生改变^[21]。MWD-P 的咀嚼最低, 这可能是由于微波干燥在短时间内微波辐射和高温作用, 以及凉拌过程中食盐等的影响, 导致样品内果胶等物质破坏严重^[22]。

2.2.3 微观结构

由图 6 可知, 不同脱水处理导致样品表面出现褶皱, 凉拌处理加剧了褶皱现象, 这可能是由于食盐等调料的添加使细胞脱水、组织皱缩^[23]。与其他脱水组相比图 6b 的表面相对平整, 这可能是由于在离心脱水联合凉拌处理过程中样品细胞没有受到低温或高温破坏。图 6c 与 a 的结构相似, 这可能由于冻融脱水联合凉拌处理对样品紧密度破坏较小, 冰晶刺破细胞使其表面较均匀^[24]。图 6d 与 e 的表面褶皱严重, 这可能由于热风干燥与微波干燥联合凉拌处理的过程中, 长时间加热使样品内外产生压力差^[25], 并破坏纤维素、果胶结构, 食盐等加剧其软烂程度所致。



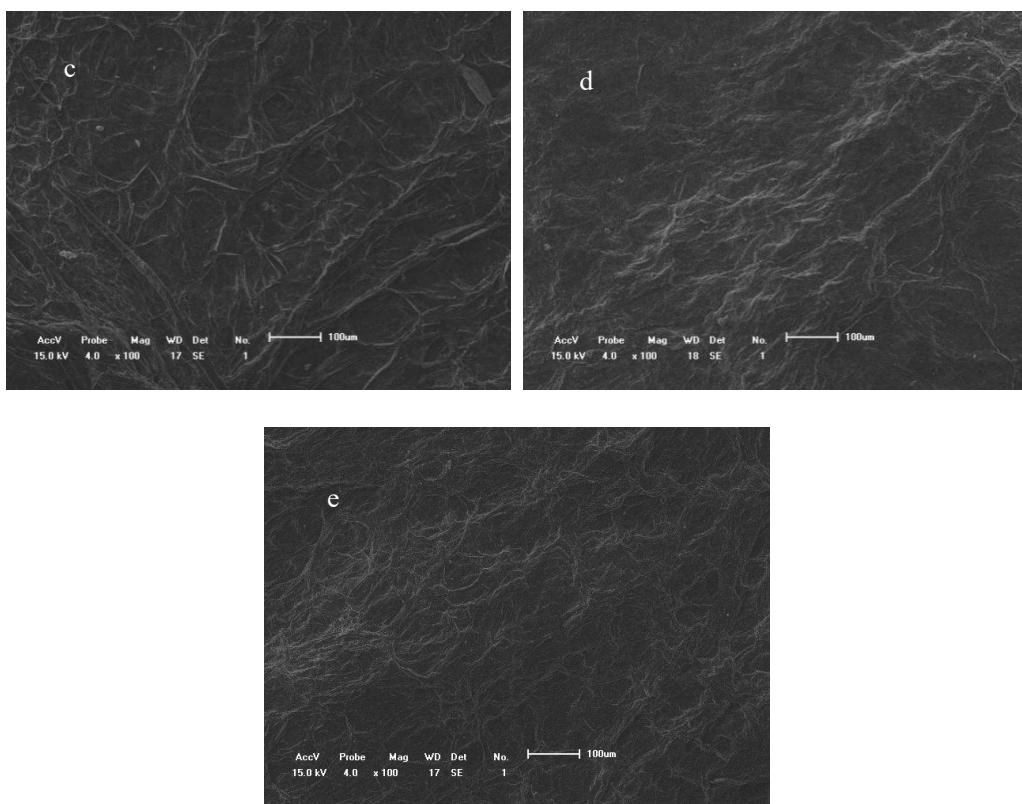


图 6 不同脱水工艺联合凉拌黄瓜钱儿扫描电子显微镜图片

Fig.6 Scanning electron microscopic images of mixed dried cucumber slices under different water loss treatments

注: (a) 代表新鲜凉拌样品, (b) 代表离心脱水凉拌样品, (c) 代表冻融脱水凉拌样品, (d) 代表热风干燥复水凉拌样品, (e) 代表微波干燥复水凉拌样品。

2.3 不同脱水工艺联合炒制黄瓜钱儿品质结果分析

2.3.1 色泽

从表 21 可以看出, 炒制后各处理组较新鲜样品均有色差, 这可能是由于炒制高温破坏了黄瓜钱儿中的叶绿素等物质^[26]。HD-F 的 ΔE 最低, 这可能由于热风干燥联合炒制过程对叶绿素破坏最小^[27]。MWD-F 的 ΔE 最高, 这可能由于微波辐射快速高温对呈色物质及果胶破坏严重, 导致其色泽较暗。

表 21 不同脱水工艺联合炒制对黄瓜钱儿色泽的影响

Table 21 Effect of different dehydration treatments combined with frying on the color of dried cucumber slices

样品	L^* 值	a^* 值	b^* 值	ΔE
F-F	62.57±1.06 ^a	-5.21±0.48 ^b	25.73±0.70 ^b	-
CD-F	43.25±1.25 ^c	-5.66±0.51 ^{bc}	26.25±0.82 ^b	19.33±0.15 ^b
FTD-F	47.21±1.14 ^b	-6.46±0.38 ^{cd}	24.92±0.67 ^b	15.43±0.06 ^c
HD-F	48.98±1.09 ^b	-6.63±0.64 ^d	29.14±0.71 ^a	14.08±0.03 ^d
MWD-F	41.68±1.22 ^c	-2.00±0.36 ^a	21.56±0.74 ^c	21.54±0.15 ^a

注: L^* 值代表亮度, a^* 值代表红绿色度, b^* 值代表黄蓝色度; F-F 代表新鲜炒制样品, CD-F 代表离心脱水炒制样品, FTD-F 代表冻融脱水炒制样品, HD-F 代表热风干燥复水炒制样品, MWD-F 代表微波干燥复水炒制样品; 不同字母表示差异显著 ($P<0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P>0.05$)。

2.3.2 质构

从表 22 可以看出, 黄瓜钱儿经炒制后, 各项质构特性均降低, 这可能由于炒制使黄瓜钱儿液泡收缩, 细胞脱水、压力降低, 咀嚼性、硬度下降^[28]。HD-F 的咀嚼性、弹性、粘聚性及胶着性最高, 这可能由于热风干燥联合炒制过程水分向外扩散, 表面结合矿物质, 导致其咀嚼性、硬度增加^[29]。MWD-F 的咀嚼性、胶着性最低, 可

能由于微波辐射使水分在低压下蒸发, 导致其组织结构松散, 孔隙变大^[30], 且炒制时黄瓜钱儿受到的机械损伤使其咀嚼性降低。

表 22 不同脱水工艺联合炒制对黄瓜钱儿质构的影响

Table 22 Effect of different dehydration treatments combined with frying on the texture of dried cucumber slices

样品	咀嚼性/N	弹性	硬度/N	粘聚性/(N.sec)	胶着性/N	回复性
F-F	100.821±7.347 ^b	0.353±0.021 ^b	2644.113±221.342 ^a	0.201±0.014 ^d	191.994±10.234 ^c	0.142±0.003 ^b
CD-F	68.389±3.872 ^c	0.269±0.023 ^c	555.178±37.428 ^b	0.512±0.034 ^b	237.416±13.776 ^b	0.138±0.002 ^b
FTD-F	72.522±4.886 ^c	0.222±0.026 ^c	583.291±38.615 ^b	0.440±0.027 ^c	254.441±14.581 ^{ab}	0.117±0.002 ^c
HD-F	114.497±6.459 ^a	0.414±0.034 ^a	431.787±30.123 ^b	0.636±0.038 ^a	276.203±15.169 ^a	0.142±0.002 ^b
MWD-F	58.100±3.571 ^d	0.346±0.025 ^b	164.775±10.787 ^c	0.559±0.035 ^b	92.146±5.222 ^d	0.150±0.003 ^a

注: F-F 代表新鲜炒制样品, CD-F 代表离心脱水炒制样品, FTD-F 代表冻融脱水炒制样品, HD-F 代表热风干燥复水炒制样品, MWD-F 代表微波干燥复水炒制样品; 不同字母表示差异显著 ($P<0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P>0.05$).

2.3.3 微观结构

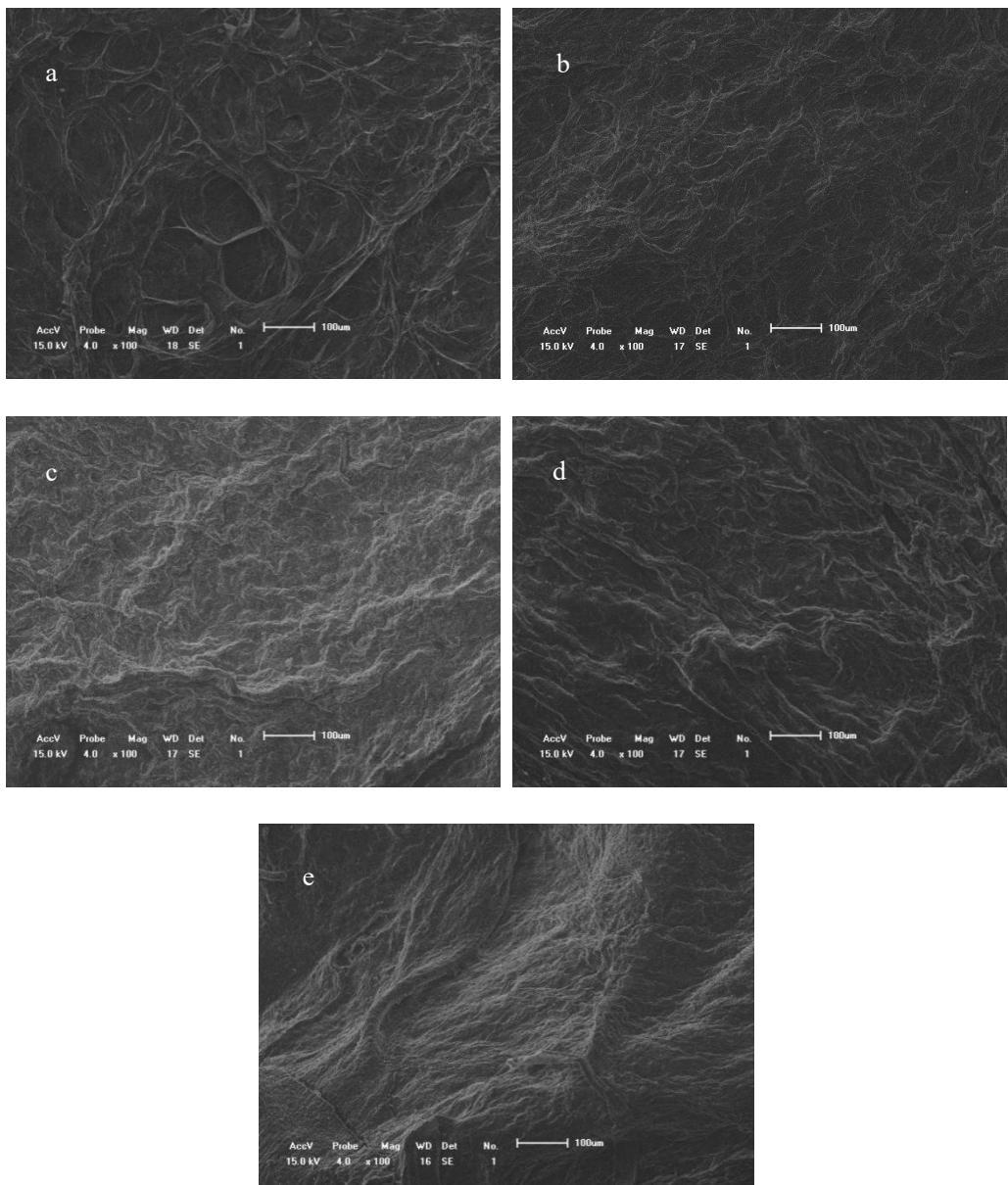


图 7 不同脱水工艺联合炒制黄瓜钱儿扫描电子显微镜图片

Fig.7 Scanning electron microscope images of fried dried cucumber slices under different dehydration treatments

注: (a) 代表新鲜炒制样品, (b) 代表离心脱水炒制样品, (c) 代表冻融脱水炒制样品, (d) 代表热风干燥复水炒制样品, (e) 代表微波干燥复水炒制样品。

由图 7 可知, 各处理组经过炒制后, 均出现了皱缩现象, 这可能由于黄瓜钱儿中果胶在加热炒制过程中发生分解, 使细胞分散、组织结构坍塌^[31]。与图 7a 相比 b 表面疏松多孔, 这可能由于离心脱水联合炒制处理使小分子物质溶出, 其表面孔隙明显^[32]。图 7c 与 d 结构相似, 褶皱严重, 这可能由于低温与高温条件使样品结构收缩严重, 纤维素与果胶大量溶出所致。图 7e 的表面较平整, 这可能由于微波干燥联合炒制处理时连续高温破坏了纤维素与果胶的结构^[33]。

2.4 黄瓜钱儿烹饪品质影响机制分析

2.4.1 纤维素结果与分析

2.4.1.1 纤维素含量结果与分析

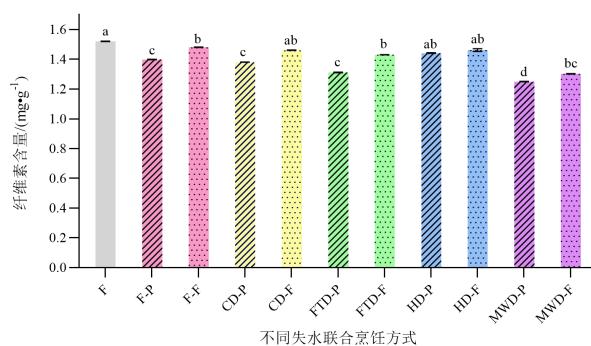


图 8 不同失水联合烹饪处理黄瓜钱儿纤维素含量

Fig.8 Cellulose content in dried cucumber slices treated with different dehydration and cooking treatments

注: F 代表新鲜样品, F-P 代表新鲜凉拌样品, F-F 代表新鲜炒制样品, CD-P 代表离心脱水凉拌样品, CD-F 代表离心脱水炒制样品, FTD-P 代表冻融脱水凉拌样品, FTD-F 代表冻融脱水炒制样品, HD-P 代表热风干燥复水凉拌样品, HD-F 代表热风干燥复水炒制样品, MWD-P 代表微波干燥复水凉拌样品, MWD-F 代表微波干燥复水炒制样品, 不同字母代表组间差异显著 ($P<0.05$)。

由图 8 整体对比可知, 鲜黄瓜钱儿纤维素含量相对最高, 说明失水联合烹饪改变了纤维素原来的组织结构。与其他失水处理组相比, 所有 HD 组的纤维素含量最高, 这可能是由于长时间的高温加热使黄瓜钱儿细胞壁分生质的纤维化程度高、数量多所致^[25]。MWD 组的纤维素含量最低, 可能受酶在高温下催化发生热降解所致^[12]。CD 组的纤维素含量较高, 对比其他冷热处理, 离心对于黄瓜钱儿中纤维素的破坏最小。FTD 组的纤维素含量较低, 低温增加了纤维素酶的活性, 加速了纤维素的分解, 导致纤维素含量降低^[23]。纤维素含量越高, 黄瓜钱儿咀嚼性越大。HD 组的纤维素含量最高, 其中 HD-P、HD-F 纤维素含量分别达到 1.44 ± 0.004 mg·g⁻¹、 1.46 ± 0.012 mg·g⁻¹, 这可能是口感最佳的原因。HD 组内凉拌和炒制对纤维素的影响无显著差异, 说明热风干燥脱水是影响最终烹饪品质的关键所在。其他组则表现出凉拌和炒制的显著差异。然而不同脱水方式和烹饪方式对纤维素含量影响的程度需要进一步分析确定。

2.4.1.2 纤维素官能团结果与分析

由图 9 可知, 与新鲜样品组相比, 各脱水处理组在 1740 cm^{-1} 附近增加了一个吸收峰, 这可能是由于脱水过程中改变了纤维素结构, 羧基形成酯键所致^[34]。与其他处理组相比, HD 组和 MWD 组在 1430 cm^{-1} 附近缺少一个吸收峰, 这表明高温对纤维素具有一定破坏作用。HD 组在 1400 cm^{-1} 附近亚甲基振动的振幅最大, 纤维素含量最高, 在 $1000\text{~}1200\text{ cm}^{-1}$ 附近的官能团振动幅度最小, 这可能是由于长时间高温破坏了纤维素的糖苷键。FTD 组在 1400 cm^{-1} 附近羧基振动的振幅最小, 纤维素含量最低, 这可能是由于低温增强了纤维素酶活性, 使纤维素含量降低。

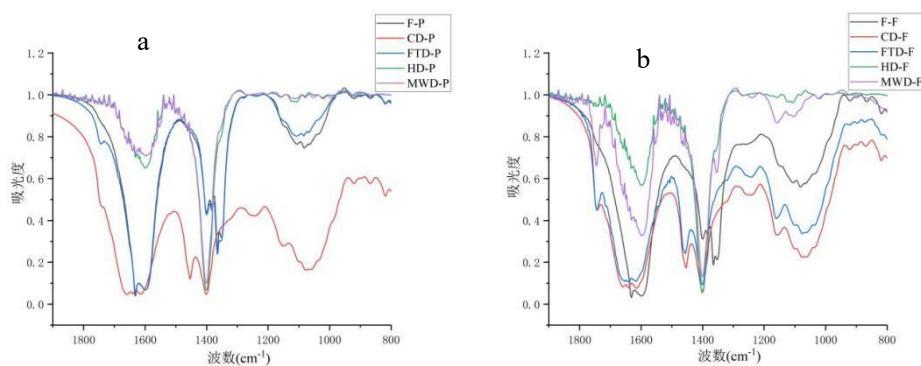
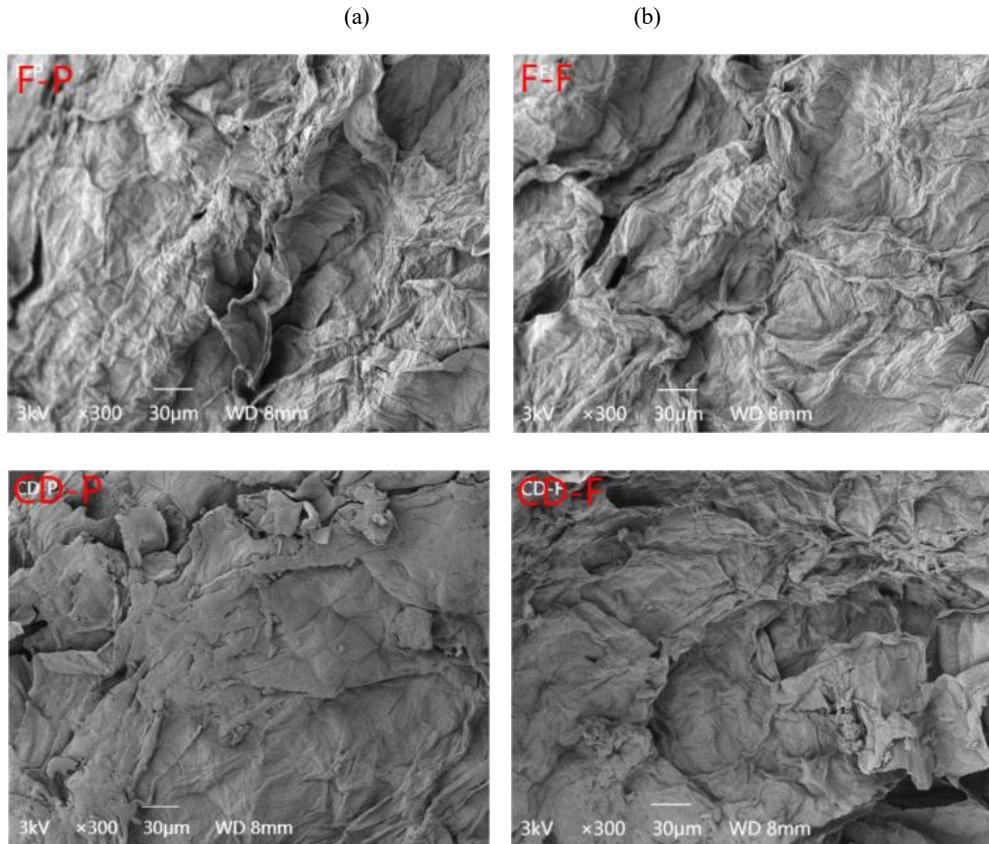


图9 不同失水联合烹饪处理黄瓜钱儿纤维素傅里叶红外光谱图

Fig.9 Fourier transform infrared spectroscopy of dried cucumber slices cellulose with different dehydration and cooking treatments

注: F-P 代表新鲜凉拌样品, F-F 代表新鲜炒制样品, CD-P 代表离心脱水凉拌样品, CD-F 代表离心脱水炒制样品, FTD-P 代表冻融脱水凉拌样品, FTD-F 代表冻融脱水炒制样品, HD-P 代表热风干燥复水凉拌样品, HD-F 代表热风干燥复水炒制样品, MWD-P 代表微波干燥复水凉拌样品, MWD-F 代表微波干燥复水炒制样品。

2.4.1.3 纤维素微观结构结果与分析



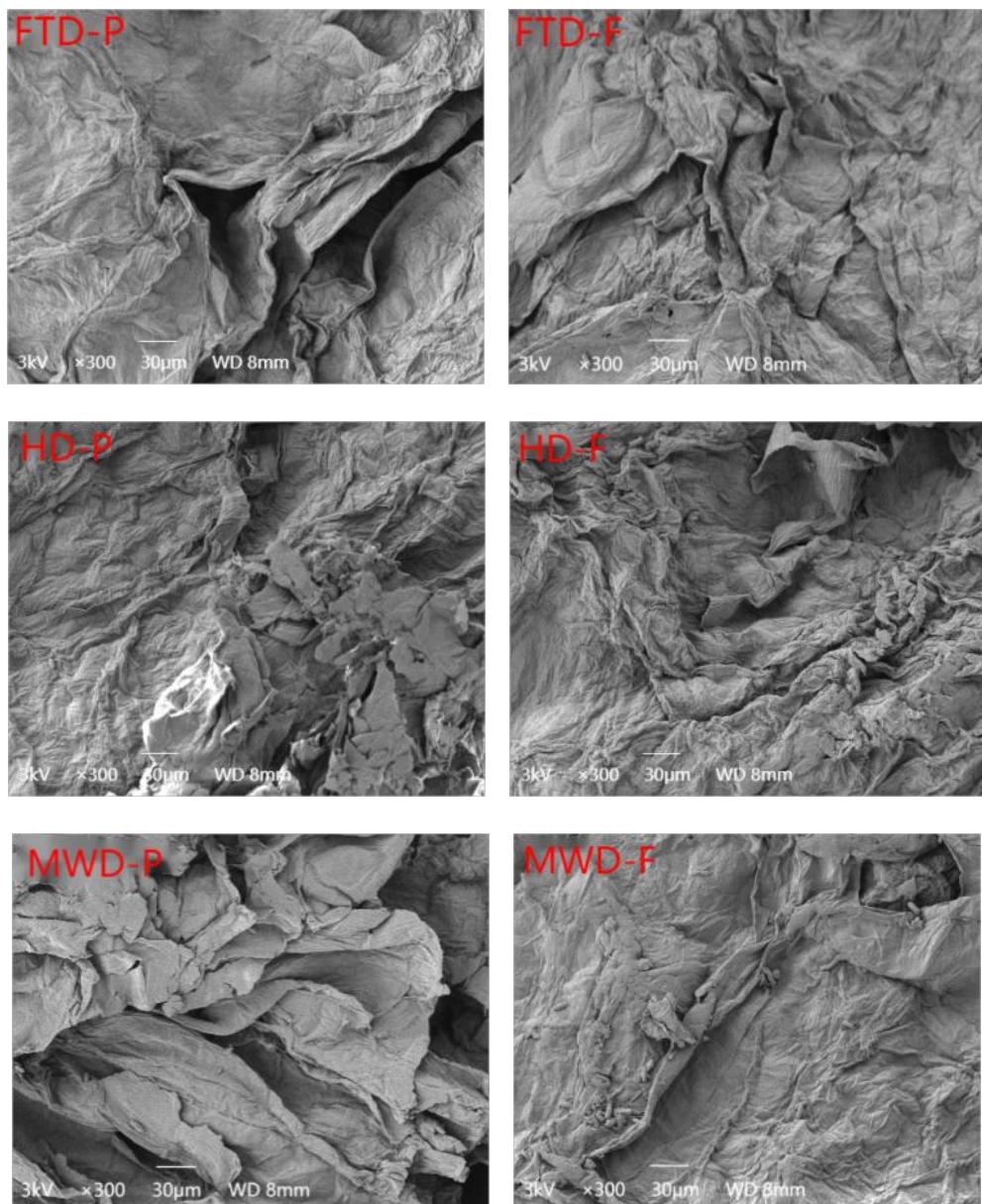


图 10 不同失水联合烹饪处理黄瓜钱儿纤维素扫描电子显微镜图片

Fig.10 Scanning electron microscope images of fried cucumber slices cellulose under different dehydration and cooking treatments

注: (a) 代表凉拌各处理组样品, (b) 代表炒制各处理组样品; F-P 代表新鲜凉拌样品, F-F 代表新鲜炒制样品, CD-P 代表离心脱水凉拌样品, CD-F 代表离心脱水炒制样品, FTD-P 代表冻融脱水凉拌样品, FTD-F 代表冻融脱水炒制样品, HD-P 代表热风干燥复水凉拌样品, HD-F 代表热风干燥复水炒制样品, MWD-P 代表微波干燥复水凉拌样品, MWD-F 代表微波干燥复水炒制样品。

由图 10 可知, 同一脱水处理烹饪前处理组、凉拌处理组和炒制处理组之间差异均不显著, 相同烹饪方式下各脱水处理组之间稍有变化, 但差异不明显, 说明凉拌和炒制对纤维素结构影响不明显。相较于其他脱水处理组, WMD 组由于较高的温度和介电过程导致细胞内容物溶出, 均匀性较弱, 细胞结构完全塌陷, 这可能是导致其咀嚼性较差的原因^[20]。

2.4.2 果胶结果与分析

2.4.2.1 果胶含量结果与分析

由图 11a 可知, 与其他脱水处理组相比, CD 组、FTD 组、MWD 组的原果胶含量较高, HD 组的原果胶含量相对较低, 且各组炒制后的原果胶含量大多显著降低, 这可能是由于高温对果胶结构破坏较大, 发生了降解反应, 原果胶含量降低^[26]。由图 11b 可知, 除 HD 组外, 与新鲜样品相比各脱水处理组可溶性果胶含量显著升高, 这可能是由于脱水过程中加剧了对黄瓜钱儿细胞结构的破坏以及聚半乳糖酸酶的催化作用, 导致果胶分子链缩短, 可

溶性果胶含量增加^[22]。HD 组的可溶性果胶含量最低, 这可能是由于长时间高温处理能延缓可溶性果胶含量增加。MWD 组的可溶性果胶含量较高, 这可能是由于加热对果胶侧链破坏严重所致^[33]。CD 组的可溶性果胶含量较高, 这可能是由于离心使小分子物质被释放, 高转速使原果胶被破坏, 转变为可溶性果胶。FTD 组的可溶性果胶含量较高, 这可能是冻结过程中冰晶的形成破坏了原果胶结构, 使其向可溶性果胶转换所致。

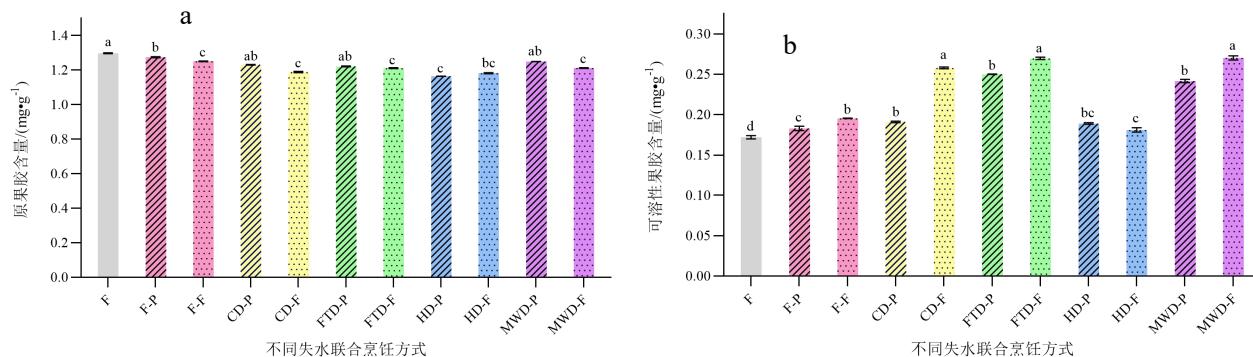


图 11 不同失水联合烹饪处理黄瓜钱儿果胶含量

Fig.11 Protopectin content in dried cucumber slices treated with different dehydration and cooking treatments

注: (a) 代表不同失水联合烹饪处理黄瓜钱儿原果胶含量, (b) 代表不同失水联合烹饪处理黄瓜钱儿可溶性果胶含量; F 代表新鲜样品, F-P 代表新鲜凉拌样品, F-F 代表新鲜炒制样品, CD-P 代表离心脱水凉拌样品, CD-F 代表离心脱水炒制样品, FTD-P 代表冻融脱水凉拌样品, FTD-F 代表冻融脱水炒制样品, HD-P 代表热风干燥复水凉拌样品, HD-F 代表热风干燥复水炒制样品, MWD-P 代表微波干燥复水凉拌样品, MWD-F 代表微波干燥复水炒制样品, 不同字母代表组间差异显著 ($P<0.05$)。

2.4.2.2 果胶官能团结果与分析

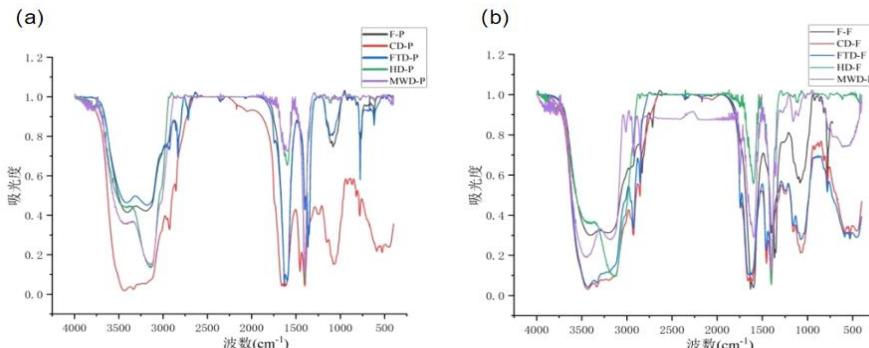


图 12 不同失水处理下黄瓜钱儿果胶傅里叶红外光谱图

Fig.12 Fourier transform infrared spectroscopy of dried cucumber slices pectin under different dehydration treatments

注: (a) 代表凉拌后各处理组样品, (b) 代表炒制后各处理组样品; F-P 代表新鲜凉拌样品, F-F 代表新鲜炒制样品, CD-P 代表离心脱水凉拌样品, CD-F 代表离心脱水炒制样品, FTD-P 代表冻融脱水凉拌样品, FTD-F 代表冻融脱水炒制样品, HD-P 代表热风干燥复水凉拌样品, HD-F 代表热风干燥复水炒制样品, MWD-P 代表微波干燥复水凉拌样品, MWD-F 代表微波干燥复水炒制样品。

由图 12 可知, 果胶在 $4000\text{~}500\text{ cm}^{-1}$ 波数内具有吸收峰。在 3200 cm^{-1} 附近引起的吸收峰是由于可溶性果胶的 O-H 伸缩振动, 这是由于半乳糖醛酸聚合物的分子间及分子内氢键引起的^[5]。可溶性果胶的特征峰分别出现在 1600 cm^{-1} 附近, 1400 cm^{-1} 附近, 1100 cm^{-1} 附近, 分别是由于 CH_2OH 和 CH_3OH 、 C=O 的伸缩振动、C-H 的伸缩振动引起的^[34]。与新鲜样品组相比, 烹饪后 HD 组的羧基在 1400 cm^{-1} 附近振幅最大, 这可能是由于加热使果胶甲酯化程度升高, 水溶性果胶含量增加所致, 这与其咀嚼性高有关^[21]。FTD 组的羧基在 1400 cm^{-1} 附近振幅较低, 这可能是由于低温增加了果胶甲酯酶的活性, 使果胶流失, 含量降低。

2.4.2.3 果胶微观结构结果与分析

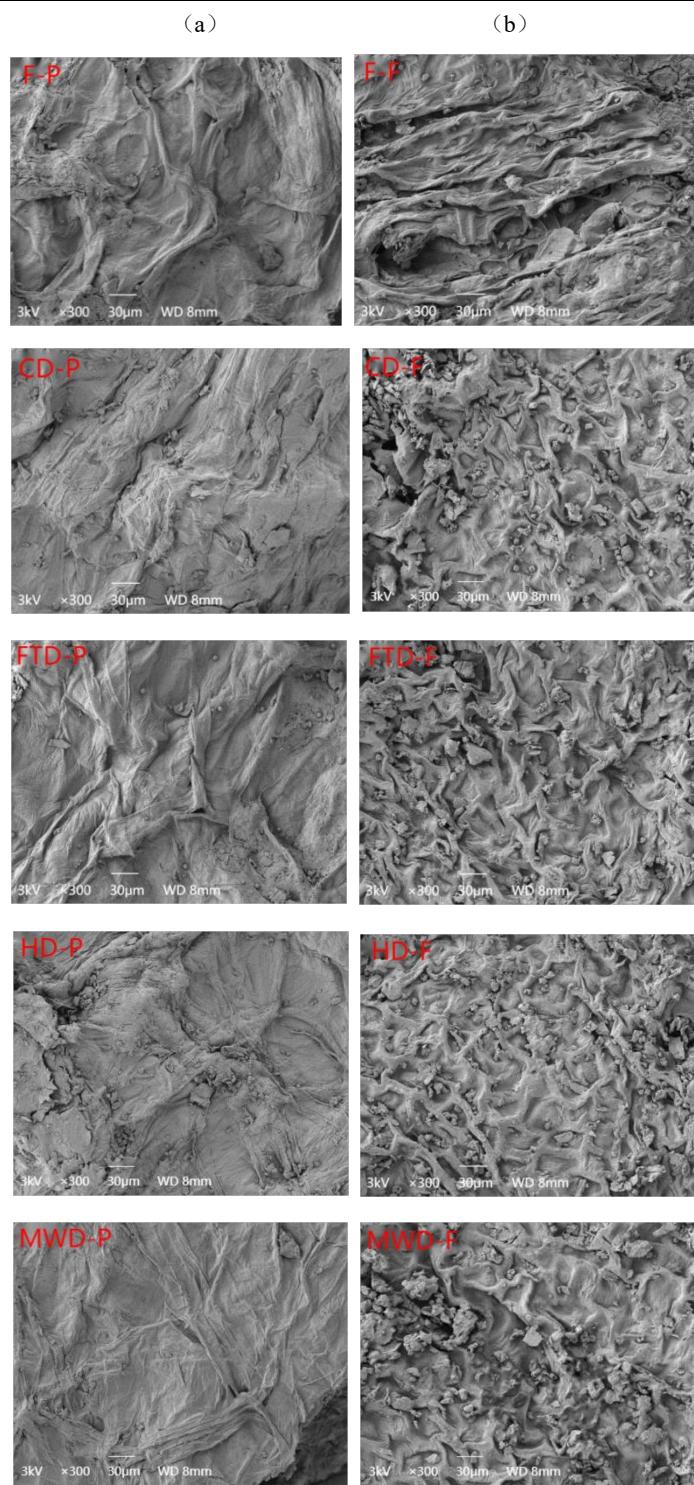


图 13 不同失水及烹饪处理黄瓜钱儿果胶扫描电子显微镜图片

Fig.13 Scanning electron microscope images of fried cucumber slices pectin under different dehydration and cooking treatments

注: (a) 代表凉拌各处理组样品, (b) 代表炒制各处理组样品, F-P 代表新鲜凉拌样品, F-F 代表新鲜炒制样品, CD-P 代表离心脱水凉拌样品, CD-F 代表离心脱水炒制样品, FTD-P 代表冻融脱水凉拌样品, FTD-F 代表冻融脱水炒制样品, HD-P 代表热风干燥复水凉拌样品, HD-F 代表热风干燥复水炒制样品, MWD-P 代表微波干燥复水凉拌样品, MWD-F 代表微波干燥复水炒制样品。

由图 13 可知, 同一脱水处理的炒制处理组与烹饪前组和凉拌组之间差异显著, 相同烹饪方式下各脱水处理组之间差异均不显著, 说明炒制对果胶结构影响明显可能是由于炒制处理过程破坏了果胶的分子间交联^[33]。各脱水处理组样品炒制后果胶形态与 F 组样品炒制后果胶形态有明显不同, 表明脱水处理对果胶形态结构影响较大。

2.4.3 主成分分析

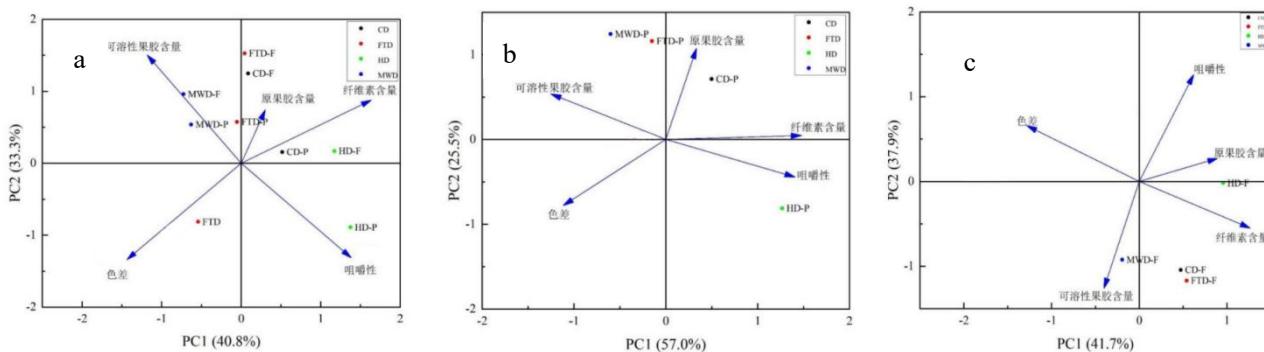


图 14 PCA 载荷图

Fig.14 PCA score loading plot

注: (a) 代表凉拌后及炒制后各处理组样品, (b) 代表凉拌后各处理组样品, (c) 代表炒制后各处理组样品; F 代表新鲜样品, F-P 代表新鲜凉拌样品, F-F 代表新鲜炒制样品, CD-P 代表离心脱水凉拌样品, CD-F 代表离心脱水炒制样品, FTD-P 代表冻融脱水凉拌样品, FTD-F 代表冻融脱水炒制样品, HD-P 代表热风干燥复水凉拌样品, HD-F 代表热风干燥复水炒制样品, MWD-P 代表微波干燥复水凉拌样品, MWD-F 代表微波干燥复水炒制样品。

根据主成分分析结果图 14a 可知, 第一主成分 PC1 与纤维素含量、原果胶含量、咀嚼性呈正相关, 与色差、可溶性果胶含量呈负相关, 解释总方差的 40.8%, 第二主成分 PC2 与纤维素含量、原果胶含量、可溶性果胶含量呈正相关, 与色差、咀嚼性呈负相关, 解释总方差的 33.3%。另外, HD-P 周围优势指标最多, 离优势指标距离最近。这可能是由于热风干燥联合凉拌处理使黄瓜钱儿的纤维素、果胶在细胞壁的沉积增加, 导致其纤维化程度高、咀嚼性高^[33]。综合比较来看, 热风干燥脱水联合凉拌处理黄瓜钱儿品质最佳。根据图 14b 可知, HD-P 周围优势指标最多, 离优势指标距离最近, 代表相较于其他脱水方式联合凉拌处理, 热风干燥脱水方式最佳。根据图 14c 可知, HD-F 周围优势指标最多, 离优势指标距离最近, 代表相较于其他脱水方式联合炒制处理, 热风干燥脱水方式最佳。

3 结论

本文确定了装载量 $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 热风温度 70°C , 切片厚度 4 mm 的热风干燥联合凉拌处理后黄瓜钱儿品质最佳, 指导生产的过程中, 可以根据个人喜好选择凉拌或炒制的烹饪方式。另外, 黄瓜钱儿咀嚼性与纤维素、原果胶含量呈正相关, 与色差、可溶性果胶含量呈负相关。黄瓜钱儿色差与纤维素、原果胶、可溶性果胶含量呈负相关。热风干燥处理的黄瓜钱儿因亚甲基含量较高, 使其纤维素含量最高(HD-P、HD-F 纤维素含量分别达到 1.44 ± 0.004 、 $1.46 \pm 0.012 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。凉拌和炒制对黄瓜钱儿纤维素结构影响不明显, 炒制显著破坏了果胶分子结构。因此黄瓜钱儿的果胶及纤维素的含量是影响黄瓜钱儿品质的主要原因。在脱水加工过程中一些蔬菜的纤维素和果胶结构会发生变化, 对干制蔬菜品质产生影响, 细胞膜在脱水过程中会受到严重破坏, 未来的研究应在考虑干燥速率的同时尽量避免脱水过程对细胞膜的破坏, 提高干制蔬菜的品质, 使其食用效果更佳。

参考文献

- [1] 山东呈鲜食品科技有限公司.包装箱(黄瓜钱):CN201830143841.7[P].2018-06-05.
- [2] 侯瑞明,吕利贞.脱水蔬菜的干制方法及其控制分析[J].农产品加工,2017,24:59-61.
- [3] YAN L, LIU Y, DUAN Z H, et al. Effect of hot air drying temperatures on drying characteristics and physicochemical properties of beetroot (*Beta vulgaris*) slices [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 615(1): 24057.
- [4] BUREAU S, MOUHOUBI S, TOULOUMET L, et al. Are folates, carotenoids and vitamin C affected by cooking? Four domestic procedures are compared on a large diversity of frozen vegetables [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(2): 735-741.
- [5] 张宝杰,郑彧,刘美奇,等.山楂生、炒品果胶结构表征和体外降脂作用研究[J].食品安全质量检测学报,2023,14(21):253-262.
- [6] WANG B X, JIA Y L, LI Y, et al. Dehydration-rehydration vegetables: Evaluation and future challenges [J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100935.

- [7] 杨佳敏.不同干燥方式对黄瓜质构特性的影响[J].现代食品,2019,12:185-191.
- [8] 屈展平,张小燕,宋淑亚,等.变异系数法评价预处理方式对黄秋葵热风干燥品质特性的影响[J].食品与机械,2022,38(4):150-155.
- [9] 冯蕾.基于电子鼻及低场核磁共振的黄瓜与樱桃番茄新鲜度智能检测研究[D].无锡:江南大学,2019.
- [10] 李晓,王文亮,王月明,等.3种不同腌渍方式对腌渍黄瓜品质的影响[J].核农学报,2020,34(11):2484-2491.
- [11] 王恒沪.柿饼的品质评价体系建立及干燥对其质地的影响研究[D].南宁:广西大学,2020.
- [12] 李佳乐,张敏,胡均如,等.梯度热水处理减轻贮后黄瓜冷害与细胞壁代谢的关系[J].食品与发酵工业,2022,48(3):233-240.
- [13] NIRMALI B, LAXMIKANT S B. Effect of ultrasound and centrifugal force on carambola (*Averrhoa carambola* L.) slices during osmotic dehydration [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 34: 37-44.
- [14] ZHAO C, KASHIF A, EUN J. Effects of various drying conditions and methods on drying kinetics and retention of bioactive compounds in sliced persimmon [J]. LWT, 2021, 143: 111149.
- [15] LI X, ZHOU Y, DONG H, et al. Effects of ultrasonication and freeze - thaw pretreatments on the vacuum freeze-drying process and quality characteristics of apricot (*Prunus armeniaca* L. cv. Diaoganxing) [J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101357.
- [16] KUDADAM J K, ATONGBIIK M A. Exploring effects of slice thickness, pretreatment and drying air temperature on nutritional, functional and pasting properties of *Gardenia erubescens* Stapf. & Hutch. fruit powder [J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2022, 8: 100283.
- [17] WANG S J, XIONG S Y. Microwave drying characteristics of kidney beans and the effect of different microwave powers on the dried quality of kidney beans [J]. Advanced Materials Research, 2013, 2606: 781-784.
- [18] GARCIA L M, CECCANTI C, NEGRO C, et al. Effect of drying methods on phenolic compounds and antioxidant activity of *Urtica dioica* L. leaves [J]. Horticulturae, 2021, 7(1): 10.
- [19] WANG A, WANG Y, KAN H, et al. Comparison of different drying techniques for *Zanthoxylum bungeanum* leaves: Changes in color, microstructure, antioxidant capacities, and volatile components [J]. LWT, 2023, 188: 115469.
- [20] 韦珍珍,段振华,唐小闲,等.微波干燥工艺对月柿果片色泽质构及感官品质的影响[J].现代食品科技,2022,38(3):168-175+14.
- [21] CHU Q, LI L, DUAN X, et al. Effect mechanism of different drying methods on the quality and browning for daylily [J]. LWT, 2023, 182: 114862.
- [22] WEI Z Z, DUAN Z H, TANG X X, et al. Effect of microwave drying technology on the color, Texture and sensory quality of Persimmon slices [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(3): 168-175+14.
- [23] 刘青松,刘传舜,王振,等.干燥方式对苹果果胶含量及品质特性的影响[J].食品工业科技,2024,45(8):88-96.
- [24] VALENZUELA J L. Advances in postharvest preservation and quality of fruits and vegetables [J]. Foods, 2023, 12(9): 1830.
- [25] 杨亮.苦瓜片热风与红外干燥特性及品质评价[D].重庆:西南大学,2020.
- [26] 王玉莹,王平,郭磊,等.烹饪方式对蔬菜中功能成分的影响[J].曲阜师范大学学报(自然科学版),2018,44(4):87-90.
- [27] MIGLIO C, CHIAVARO E, VISCONTI A, et al. Effects of different cooking methods on nutritional and physicochemical characteristics of selected vegetables [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(1): 139-147.
- [28] AN N N, SUN W H, LI B Z, et al. Effect of different drying techniques on drying kinetics, nutritional components, antioxidant capacity, physical properties and microstructure of edamame [J]. Food Chemistry, 2022, 373(Mar.30 Pt.B):131412.1-131412.11.
- [29] SAFAROV J E, SULTANOVA S A, MIRKOMILOV A M. Energy saving technology for drying garlic (*Allium sativum*) [J]. Technical science and innovation, 2024, 2024(3): 10-14.
- [30] 鲍诗晗,李诗雯,何玉英,等.烹饪方式对胡萝卜感官品质及营养素含量的影响[J].食品与发酵工业,2020,46(8):149-156.
- [31] LUIS V, RAGYA K, BORIS N, et al. Application of different drying methods for evaluation of phytochemical content and physical properties of broccoli, kale, and spinach [J]. LWT, 2022, 155: 112892.
- [32] 谢浩鹏,刘帮迪,郭雪霞,等.钙盐结合糖溶液渗透脱水处理对四种小浆果反复冷冻融化品质的影响[J].保鲜与加工,2023,23(7):8-18.
- [33] 刘波.超声微波协同胡萝卜粒离心脱水能力及品质研究[D].无锡:江南大学,2022.
- [34] 王红利.不同干燥方式下甘蓝干制品的品质分析和评价研究[D].南京:南京农业大学,2020.