干燥方式和原料配比对胡萝卜-马铃薯再造型复合脆片品质的影响

候春辉[1,2]，易建勇[2]，毕金峰[2]，刘常金[1]，周林燕[2]，彭健[2]
（1.天津科技大学食品工程与生物技术学院，天津 300457）
（2.中国农业科学院农产品加工研究所农业部农产品加工重点实验室，北京 100193）

摘要：本研究以胡萝卜和马铃薯为原料制备复合果蔬脆片，分别采用热风（AD）、真空冷冻（FD）、热风联合压差闪蒸（AD-DIC）、真空冷冻联合压差闪蒸（FD-DIC）4 种不同的方式进行干燥，探究干燥方式和原料配比对胡萝卜-马铃薯复合脆片干燥特性与品质的影响。结果显示，在同一种干燥方式下，随着胡萝卜比例的增加，复合脆片的脆硬度、玻璃化转变温度（T_g）、总糖含量、维生素 C 含量逐渐下降，色泽“*a**”、“*b**”值和总类胡萝卜素含量逐渐增加；在同一原料配比条件下，与 AD 或 FD 脆片相比，经 DIC 脆片的“*a**”值、“*b**”值、总类胡萝卜素与维生素 C 含量均较低，硬度小，脆度大。综合分析，FD-DIC、AD-DIC 两种干燥方式无论是从生产成本还是产品品质方面都可作为制备胡萝卜-马铃薯再造型复合脆片的适宜干燥方式，但 FD-DIC 干燥产品的综合品质更佳；且当马铃薯和胡萝卜的质量比为 1:1 时脆片品质较好，质量比为 3:7 次之。

关键词：胡萝卜；马铃薯；再造型；原料配比；干燥方式；品质
文章篇号：1673-9078(2017)11-140-147 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.11.021

Effects of Drying Methods and Raw Material Ratio on the Quality of Restructured Carrot-Potato Chips

HOU Chun-hui[1,2], YI Jian-yong[2], BI Jin-feng[2], LIU Chang-jin[1], ZHOU Lin-yan[2], PENG Jian[2]
(1.Tianjin University of Science & Technology College of Food Engineering and Biotechnology, Tianjin 300457, China)
(2.Institute of Food Science and Technology, CAAS, Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China)

Abstract: The effects of drying methods and raw material ratio on drying characteristics and quality of restructured carrot-potato chips were investigated using hot air drying (AD), freezing drying (FD), combined hot air and instant controlled pressure drop drying (AD-DIC), combined freezing drying and instant controlled pressure drop drying (FD-DIC) respectively. The results showed that the hardness and crispness, glass transition temperature, contents of total sugar and vitamin C of the restructured chips decreased gradually with the increase of the carrot ratio \with the same drying mode, while the '*a**' value, '*b**' value and the total carotenoid content increased gradually. Compared with AD or FD, the values of '*a**', '*b**', hardness, total content of carotenoid and vitamin C in restructured chips prepared by AD-DIC and FD-DIC were lower but the crispness was higher at the same raw material ratio.AD-DIC and FD-DIC could be used as the appropriate drying methods for preparation of restructured carrot-potato chips in terms of production cost or product quality. High quality of the products prepared by FD-DIC was achieved at potato-carrot ratio of 1:1 (*m/m*), followed by the ratio of 3:7 (*m/m*).

Key words: carrot; potato; restructured; raw material ratio; drying methods; quality

我国是世界上最大的胡萝卜和马铃薯生产国和消费国。来自 FAO 的数据表明，2014 年我国胡萝卜总产量近 1700 万吨，占世界总产量的 1/3，种植面积接近世界胡萝卜总种植面积的 40%[1]。胡萝卜富含类胡萝卜素、B 族维生素和钙、铁、钾等物质，经常食用可增强免疫力、补肝明目、降低血脂[2]。2014 年，我国马铃薯总产量约为 8000 万吨，占世界马铃薯总产量的四分之一，继续保持了自上世纪 90 年代以来全球最大的马铃薯生产国的地位[3]。

目前，市场上销售的胡萝卜脆条和薯片等果蔬脆

收稿日期：2017-04-05
基金项目：“十三五”国家重点研发计划课题（2016YFD0400700、2016YFD0400704）
作者简介：候春辉（1993-），女，硕士研究生，研究方向：果蔬食品制造
通讯作者：刘常金（1969-），男，博士，副教授，研究方向：农产品加工与贮藏工程及传统风味食品

片产品大多采用低温真空油浴工艺生产，低温真空油浴工艺生产的脱水果蔬脆片口感酥脆，但是产品中含油率高达到 10%~35%[4]，长期食用容易导致油脂摄入过量，进而引发肥胖或者其他心血管疾病。随着人们对营养健康的日益重视，采用非油炸干制技术生产的营养、健康、美味、安全和方便的果蔬脆片市场变得广阔。2016 年中国居民膳食指南提出，每天的膳食应包括谷薯类、蔬菜水果类、畜禽鱼蛋奶类和大豆坚果类等食物，平均每天摄入 12 种以上食物，每周 25 种以上，然而传统的饮食很难保证摄入的食物种类齐全，开发复合型果蔬休闲食品是解决这一问题的有效途径。再造型复合果蔬脆片，是将多种果蔬原料通过机械方式混合在一起后重新造型，并对其进行干燥加工而成的复合果蔬脆片。复合果蔬脆片提高并均衡了产品营养价值，满足了人们对多种不同营养成分的需求，经常食用可为人们提供日常饮食中摄入少量的膳食纤维、维生素和酚类等营养物质，增加营养成分的多样性。

近年来，国内外对再造型复合脆片的研究逐渐增多，主要对再造型脆片的配方配比、预干燥后含水量、挤压膨化[6]、微波膨化等工艺参数[5]进行了研究，以期得到膨化度、脆度和感官评分高的休闲产品。Zhang 等人[7]在采用热风干燥、微波真空干燥以及微波冻干技术干燥复合甘蓝脆片时得到结论，微波真空干燥是最快的干燥方式，而用微波冻干技术能够得到具有最佳品质的果蔬脆片。综合来看，目前市场上的复合果蔬脆片多以挤压膨化、热风或微波等单一干燥加工方式为主，并添加大量淀粉类、面粉和谷物粉等成分来改善物料的粘合性，而产品中的果蔬原料比例不高，一般低于 20%~30%，这是本研究所要改善的问题。瞬时压差闪蒸又称变温压差膨化，作为一种生产果蔬脆片的新技术，可用于生产酥脆度好、果蔬含量高的复合果蔬脆片，但目前暂无相关研究。

本研究选用最常见的大宗蔬菜-胡萝卜和马铃薯为主要果蔬原料，通过研究瞬时压差闪蒸联合干燥技术及胡萝卜马铃薯的配比对再造型复合脆片品质的影响，为再造型复合果蔬脆片的品质优化与配方设计提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

马铃薯（品种：大白花）和胡萝卜（品种：黑田五寸），购于北京上地小营批发市场。

1.2 仪器设备

电子天平，CPA-125，德国 Sartorius 公司；电热恒温鼓风箱：DHG-9123A，上海精宏实验设备有限公司；变温压差膨化干燥设备，QDPH10-1，天津市勤德新材料科技有限公司；手持色差仪，CM-700d，日本柯尼卡美能达有限公司；物性分析仪，Ta.XT2i/50，英国 SMS 公司；真空冷冻干燥设备，Alpha1-4Lplus，德国 CHRIST 公司；紫外分光光度计，UV-1800，日本岛津公司；扫描电镜，SU8010，日本日立公司。

1.3 试验工艺

1.3.1 原料预处理

马铃薯、胡萝卜原料→清洗→去皮、切块(1 cm×1 cm×1 cm 小块)→100 ℃蒸煮 30 min→复配→打浆→摊片→干燥

蒸煮可以使物料中的淀粉充分糊化[8]，复配比例详见表 1。

1.3.2 干燥方式和干燥条件

表 1 选取的原料配比和干燥方式

Table 1 Selected formula and drying methods

干燥方式	原料配比（马铃薯:胡萝卜，*m/m*）				
	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组
AD	10:0	7:3	1:1	3:7	0:10
AD-DIC	10:0	7:3	1:1	3:7	0:10
FD	10:0	7:3	1:1	3:7	0:10
FD-DIC	10:0	7:3	1:1	3:7	0:10

（1）热风干燥（Hot Air Drying，AD）：将上述得到的样品放在热风干燥箱内，干燥温度 70 ℃，干燥至脆片干基含水量 7.5±2.0%时取出，冷却，装袋。

（2）热风联合瞬时压差闪蒸干燥（Combined Hot Air Drying and Instant Controlled Pressure Drop Drying，AD-DIC）：将预处理得到的再造型浆片先在热风 70 ℃条件下进行预干燥，干燥至干基含水量 25.0±2.0%时取出，待水分平衡一段时间，放入膨化压力罐内，膨化温度 90 ℃，停滞时间 10 min，抽空温度为 65 ℃，抽空时间为 1 h，果蔬脆片在此过程中被迅速膨化，膨化后的果片继续放在压力罐中，待到其温度降至室温取出。

（3）真空冷冻干燥（Freezing Drying，FD）：将预处理得到的再造型浆片在-80 ℃条件下进行预冻，预冻 12 h，取出后立即进行真空冷冻干燥 18 h。冷阱温度为-49 ℃，真空度约为 0.37 mbar，托盘温度为 35 ℃。

（4）真空冷冻联合瞬时压差闪蒸干燥（Combined

Freezing Drying and Instant Controlled pressure Drop Drying，FD-DIC）：用真空冻干机对再造型浆片进行预干燥，预干燥至干基含水量 25±2.0%时，取出，进行瞬时压差闪蒸干燥，干燥条件同上。

1.4 试验指标及测定方法

1.4.1 水分的测定

按照国标方法[10]在 105 ℃烘箱中烘干至恒重进行测量。

1.4.2 质构的测定

采用 TA-XT2i 物性分析仪测定脆片的硬度和脆度。参数设置如下：探头为 0.25 s，测定前速度、测试速度和测定后速度分别为 1.0 mm/s、1.0 mm/s 和 10.0 mm/s，触发力度 100 g，检测距离 5 mm。每组样品测定 8 次，去掉最大最小值，求取平均值，图像的最大峰值即为硬度，峰值越高，硬度越大；原点到达第一个断裂点的距离为脆度，距离越短，脆度越大[11]。

1.4.3 色泽的测定

采用美能达色差仪测定，结果以 L^*值（代表明暗，色差 L^*值越大，表示亮度越高，反之，表示越暗）、a^*值（红绿）、b^*值（黄蓝）、色差 ΔE 值[12]来表示。L_0、a_0 和 b_0 值是取自复配打浆后新鲜浆液的数值。

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

1.4.4 微观结构的测定

电子显微镜观察制作程序[13]：样品→采样→固定→喷金→电镜扫描→电镜图谱（在扫描电镜下采用不同放大倍数观察并采集图谱）。

1.4.5 玻璃化转换温度（Glass Transition Temperature，T_g）的测定

用差示量热扫描仪测定，样品从 30 ℃以 20 ℃/min 速度降到-70 ℃，平衡 5 min 后，再以 20 ℃/min 速度升至 100 ℃，利用 DSC 自带 TA 分析软件得到玻璃化转变初始点，中间点及终点，一般将玻璃化转变中间点作为 T_g[14]。每个过程样品的玻璃化转变温度，测定 3 次。

1.4.6 总类胡萝卜素（Total Carotenoids）的测定

取 0.2 g 胡萝卜复合脆片的粉末，加入同质量的 NaCl 或 $CaCl_2$，再加入 50 mL 提取液（50%正己烷，25%丙酮，25%乙醇，0.1% BHT）。混合液在 4 ℃下搅拌 20 min 后，加入 15 mL 蒸馏水，再放在 4 ℃条件下搅拌 10 min。使用分液漏斗将包含胡萝卜素的有机相和水相分离，有机相可经过加有无水硫酸钠的砂芯漏斗过滤脱水，定容至 25 mL，并在 450 nm 波长下测吸光度，正己烷作对照[16]。

$$\text{总类胡萝卜素含量}(\mu g/g) = \frac{A \times V \times 10^4}{E^{1\%} \times m} \quad (2)$$

其中：A 为 450 nm 处的吸光值，V 为提取液总体积(mL)，m 为测定用提样品的质量(g)，$E^{1\%}$(2560)为 β-胡萝卜素在正己烷中的消光系数。

1.4.7 总糖的测定

称取试样约 100.0 mg 于烧杯中，先加入 10 mL 6 mol/L 的 HCl，水 15 mL，搅匀后在沸水浴上加热 30 min，冷却后加入 5 mL 浓度为 6 mol/L 的 NaOH 溶液，振荡摇匀后，转移至 100 mL 容量瓶中定容，过滤后，取 10 mL 上清液稀释至 100 mL，即为定容 1000 mL 的总糖水解液。按照苯酚-硫酸法[17]进行测，以标准曲线计算待测样品的总糖含量。所得标准曲线为 y=0.01064x-0.00715（r^2=0.99847），质量浓度范围为 0~90 μg/mL。

1.4.8 维生素 C（Vc）的测定

根据 GB 5009.86-2016《食品安全国家标准食品中抗坏血酸的测定》中 2,6-二氯靛酚滴定法[15]。

1.5 数据分析

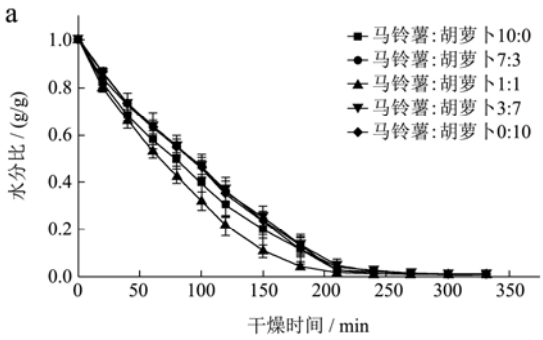
本试验中采用 SPSS 21.0 软件进行数据分析处理；试验分析图采用 Origin 9.0 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 原料配比对胡萝卜-马铃薯复合脆片热风干燥特性的影响

本研究在热风干燥温度 70 ℃条件下，分别探讨马铃薯与胡萝卜 10:0、7:3、1:1、3:7 和 0:10（m/m）五种不同配比对复合果蔬脆片干燥特性的影响。图 1a 和图 1b 分别为不同配比的复合果蔬脆片在 70 ℃条件下的热风干燥特性曲线与干燥速率曲线。由图 1a 可知，不同配比的复合脆片的干燥特性无显著性差异（p>0.05），除马铃薯胡萝卜为 1:1（m/m）的样品水分下降最快，其余配比的复合脆片的脱水速率都是随着胡萝卜的比例增加水分下降速率依次减慢，所需的干燥时间也依次增加，其中 1:1 配比的复合脆片的干燥时间最短。由图 1b 可知，随着马铃薯的比例减小或胡萝卜的比例增加，复合脆片的初始干基含水率依次增大，其中纯马铃薯片的初始干基含水率最小为 5.52 kg/kg，纯胡萝卜片的初始干基含水率最大 13.0 kg/kg。所有配比的复合脆片在初始阶段的干燥速率最大，随着干燥时间的延长，干基含水量下降的同时其干燥速

率逐渐下降。由于初始水分含量的不同[18]，初始水分含量低（即马铃薯比例大）的复合脆片，在热风干燥后期的干燥速率下降较快，产品较早达到恒重；而初始水分含量高（即胡萝卜比例大）的脆片后期干燥速率依然较大，需要较长时间才能达到恒重，所以胡萝卜比例大的复合脆片后期较难用热风完成干燥。采用热风联合瞬时压差闪蒸干燥则是解决这个问题的一种较好方式。



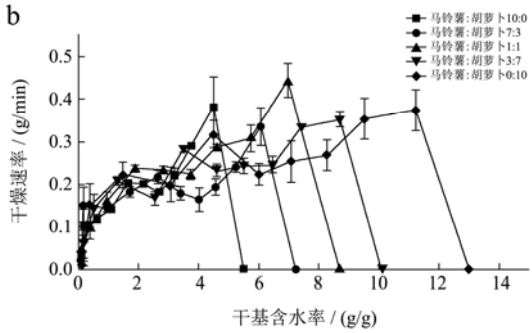


图 1 不同配比复合脆片热风干燥特性曲线(a)与热风干燥速率曲线(b)

Fig.1 Hot air-drying characteristic curves (a) and hot air drying rate curves (b) of restructured chips with different raw material ratio

2.2 原料配比与干燥方式对胡萝卜-马铃薯复合脆片色泽的影响

表 2 原料配比和干燥方式对复合脆片色泽的影响

Table 2 Effects of raw material ratio and drying methods on color value of the restructured chips

配比（马铃薯:胡萝卜）	加工方式	*L**	*a**	*b**	Δ*E*
10:0	AD	59.23±1.07^{a}	2.11±0.54^{a}	29.05±1.32^{a}	21.39±1.08^{a}
	AD-DIC	62.37±4.52^{a}	2.36±0.19^{a}	26.16±1.94^{b}	18.21±1.43^{b}
	FD	87.22±1.18^{b}	0.19±0.14^{b}	15.26±0.71^{c}	21.34±1.09^{a}
	FD-DIC	86.86±0.46^{b}	0.15±0.07^{b}	15.12±0.10^{c}	20.94±0.45^{a}
7:3	AD	53.21±0.31^{a}	20.13±0.08^{a}	35.68±0.13^{a}	7.49±0.18^{a}
	AD-DIC	53.55±1.23^{a}	19.39±1.34^{a}	34.60±2.25^{a}	8.51±1.57^{a}
	FD	73.97±2.72^{b}	17.29±0.17^{b}	41.67±0.61^{b}	22.21±2.71^{b}
	FD-DIC	76.53±0.07^{b}	16.68±0.33^{c}	41.93±0.48^{b}	24.76±0.07^{b}
1:1	AD	53.48±1.14^{a}	25.43±0.15^{a}	37.23±0.45^{a}	20.41±0.28^{a}
	AD-DIC	49.92±2.49^{b}	23.02±0.55^{b}	34.72±1.13^{b}	22.27±1.17^{b}
	FD	71.29±0.37^{c}	23.38±0.34^{b}	50.13±0.87^{c}	22.28±0.52^{b}
	FD-DIC	73.20±0.92^{c}	21.23±0.70^{c}	50.50±0.74^{c}	23.84±0.96^{b}
3:7	AD	50.32±0.32^{a}	28.13±0.91^{a}	36.18±0.55^{a}	24.72±0.42^{a}
	AD-DIC	45.73±0.46^{b}	27.72±0.59^{a}	32.55±0.85^{b}	27.62±0.81^{b}
	FD	67.12±0.21^{c}	25.32±1.20^{b}	51.44±1.38^{c}	23.43±0.39^{c}
	FD-DIC	68.72±0.99^{d}	24.66±1.71^{b}	53.29±1.60^{c}	24.12±0.65^{a}
0:10	AD	53.56±0.49^{a}	37.17±0.94^{a}	42.43±0.96^{a}	29.20±0.79^{a}
	AD-DIC	46.83±0.69^{b}	31.08±1.19^{b}	37.47±0.67^{b}	31.55±0.64^{b}
	FD	59.35±0.18^{c}	40.15±0.56^{c}	62.48±0.45^{c}	19.69±0.41^{c}
	FD-DIC	60.06±0.89^{c}	36.89±0.70^{a}	61.01±1.50^{c}	19.31±0.24^{c}

注：同一列数据标注的不同小写字母表示差异显著（p<0.05）。

色泽是评价干燥产品品质的重要指标。表 2 为不同配比与干燥方式对胡萝卜复合脆片色泽的影响。由表 2 可知，同一原料配比的 AD 与 AD-DIC 脆片色泽数值有显著性差异（p<0.05），除马铃薯胡萝卜 10:0 配比的 AD-DIC 脆片的 *L**值、*a**值比 AD 脆片的值高，其余配比的 AD 脆片的 *L**值、*a**值、*b**值均比 AD-DIC 脆片的数值大，说明和热风干燥脆片相比，AD-DIC 脆片的亮度低，红色和黄色值也比较低，可能是因为

经 DIC 处理的闪蒸温度比较高，类胡萝卜素降解相对较多，所以红黄色值会下降，而且与鲜样相比的 ΔE 值较大。同样的情况也出现在同一原料配比的 FD 与 FD-DIC 脆片的色泽值之间，原因亦和以上相同。同一配比下的 AD、AD-DIC 与 FD、FD-DIC 脆片之间的色泽值相差较大，FD 脆片比 AD 脆片更亮、更偏向黄色，由于在将新鲜浆液预冻期间原料（尤其是胡萝卜）的颜色会逐渐褪去而偏向于白色[19]，所以经过冻干的脆片颜色会变浅，偏向淡黄色。在同一种干燥方式下，随着胡萝卜比例的增加 L^*值减小，a^*值与 b^*值增加，ΔE 值也趋向于变大。总体而言，马铃薯胡萝卜 1:1 比例下的复合脆片的 ΔE 值相对较稳定，没有显著性差异（$p>0.05$），其亮度、红黄值都适中，容易让人们接受。

2.3 原料配比与干燥方式对胡萝卜-马铃薯复合脆片脆硬度及 T_g 的影响

由表 3 可知，FD 与 FD-DIC 脆片的干基含水率较低在 5.5±2.0%之间，AD 与 AD-DIC 脆片的干基含水率都在 7.5±2.0%之间。在同一配比条件下，与 AD 脆片相比，AD-DIC 脆片的硬度呈现降低的趋势，脆度趋于增加；除配比 7:3 外，其余配比的 FD-DIC 脆片比 FD 脆片的硬度小，脆度大。因为经过 DIC 干燥的脆片经历了蒸汽瞬间从物料中蒸发掉的过程，造成物料内的空隙增多或增大，物料的堆积密度变小[20]，所以复合脆片的硬度变小，脆度变大。随着马铃薯比例的减小、胡萝卜比例的增大，复合脆片的硬度和脆度均呈现变小的趋势，当马铃薯比例较大时脆片硬度较大，而胡萝卜占比例较高时脆片硬度过小，基本无酥脆口感，所以马铃薯胡萝卜 1:1 比例的复合脆片的脆硬度相对较佳，尤其是 FD-DIC 脆片的脆度最好。

由表 3 可知，由于淀粉的玻璃化转变温度较高，所以随着马铃薯比例增大，复合脆片的 T_g 也会变大，在常温下体系状态也会变得稳定，产品易于贮藏。而马铃薯胡萝卜比例在 3:7、0:10 时 T_g 较低（10~26 ℃），说明该脆片在室温下状态不稳定，硬脆度容易变化，需要低温下贮藏。马铃薯胡萝卜配比 10:0、7:3 的复合脆片，经过不同的干燥之后其 T_g 无显著差异（$p>0.05$），但其余配比的复合脆片，干燥方式之间的 T_g 有显著性差异（$p<0.05$），尤其是 FD 脆片的 T_g 低于 AD 脆片的 T_g，这可能与脆片的含水量高低有关。此外，T_g 的降低还与化学成分变化有关，例如果胶等细胞壁物质的降解也可能引起 T_g 下降[21]。

表 3 原料配比和干燥方式对复合脆片硬脆度与 Tg 的影响

Table 3 Effects of raw material ratio and drying methods on hardness, crispness and *Tg* of the restructured chips

配比(马铃薯:胡萝卜)	加工方式	干基含水率/(g/100 g)	硬度/N	脆度/mm	T_g/℃
10:0	AD	7.90±0.98^{a}	14.58±0.26^{b}	0.27±0.01^{a}	59.54±6.55^{a}
	AD-DIC	6.70±0.68^{a}	6.56±0.36^{a}	0.24±0.02^{a}	52.32±3.16^{a}
	FD	4.03±0.40^{b}	24.54±1.50^{d}	0.73±0.04^{b}	51.38±1.56^{a}
	FD-DIC	3.89±0.30^{b}	17.37±1.10^{c}	0.66±0.06^{b}	50.46±1.38^{a}
7:3	AD	7.17±1.46^{a}	9.00±0.34^{c}	0.55±0.05^{b}	49.37±0.81^{a}
	AD-DIC	8.19±1.32^{a}	6.45±0.36^{a}	0.32±0.06^{a}	51.55±1.07^{a}
	FD	4.75±0.35^{b}	11.76±0.12^{d}	0.59±0.10^{b}	49.21±3.87^{a}
	FD-DIC	3.43±0.54^{b}	7.96±0.35^{b}	0.62±0.02^{b}	46.56±4.72^{a}
1:1	AD	6.27±1.59^{a}	5.81±0.92^{a}	0.48±0.08^{ab}	50.25±1.08^{a}
	AD-DIC	7.74±0.41^{a}	8.07±0.50^{b}	0.46±0.02^{a}	42.05±1.16^{b}
	FD	5.60±0.34^{b}	8.27±0.67^{b}	0.58±0.05^{b}	46.68±2.58^{c}
	FD-DIC	3.36±0.34^{c}	7.91±0.52^{b}	0.39±0.08^{a}	47.67±1.95^{ac}
3:7	AD	9.23±1.53^{a}	3.65±0.24^{a}	0.59±0.08^{ab}	16.50±3.17^{a}
	AD-DIC	8.91±0.28^{ab}	6.28±0.26^{c}	0.53±0.06^{a}	23.89±3.71^{b}
	FD	7.38±0.10^{b}	9.22±0.71^{d}	0.68±0.03^{b}	10.59±1.03^{a}
	FD-DIC	4.60±0.02^{c}	5.39±0.43^{b}	0.60±0.04^{ab}	26.47±5.20^{b}
0:10	AD	8.00±1.37^{a}	3.56±0.19^{b}	1.07±0.07^{b}	15.45±6.32^{ab}
	AD-DIC	9.31±0.95^{b}	2.66±0.22^{a}	0.61±0.07^{a}	21.08±2.35^{b}
	FD	7.80±0.50^{a}	3.36±0.18^{b}	1.89±0.02^{d}	9.53±0.53^{a}
	FD-DIC	7.90±1.28^{a}	3.34±0.14^{b}	1.74±0.12^{c}	13.10±5.53^{ab}

注：同一列数据标注的不同小写字母表示差异显著（$p<0.05$）。

2.4 原料配比与干燥方式对胡萝卜-马铃薯复合脆片总糖、总类胡萝卜素和 Vc 含量的影响

营养指标是评价复合果蔬脆片价值高低最重要的评判标准。由表 4 可知，随着马铃薯比例的增加，胡萝卜比例的减少，总糖含量呈下降趋势，但是同一原料配比条件下不同干燥方式之间的总糖含量基本一致，尤其是配比 1:1、3:7（*m/m*）的脆片，4 种干燥方式之间的总糖含量并没有显著差异（$p>0.05$）。总类胡萝卜素含量随胡萝卜比例的增加而增加，在同一种原料配比条件下，FD 脆片一般比 AD 脆片的类胡萝卜含量高，胡萝卜比例超过 30%后经过压差闪蒸联合干燥的脆片比单一使用热风或冻干的脆片类胡萝卜素含量低，可能原因是热风和压差闪蒸干燥的温度较高，会使胡萝卜素降解或受到破坏，从而使总类胡萝卜素含量下降[22]。维生素 C 含量是随着胡萝卜比例的增加而减少，不同干燥方式之间的复合脆片 Vc 含量高低和总类胡萝卜素的含量分布规律相同，原因亦一样。

表 4 原料配比和干燥方式对复合脆片总糖、总类胡萝卜素和 Vc 含量的影响

Table 4 Effects of raw material ratio and drying methods on total sugar, total carotenoid and vitamin C content of the restructured chips

配比（马铃薯:胡萝卜）	加工方式	总糖（g/100 g.d.b）	总类胡萝卜素（mg/100 g.d.b）	Vc（mg/100 g.d.b）
10:0	AD	78.79±0.27^{a}	0.12±0.05^{a}	16.62±3.36^{a}
	AD-DIC	74.63±0.92^{b}	0.17±0.01^{a}	14.25±2.68^{a}
	FD	74.31±1.92^{b}	0.09±0.01^{b}	19.00±6.71^{a}
	FD-DIC	80.65±0.84^{a}	0.09±0.01^{b}	11.87±3.35^{a}
7:3	AD	66.84±1.43^{a}	2.71±0.36^{a}	14.25±4.03^{a}
	AD-DIC	69.38±0.97^{a}	3.16±0.41^{a}	9.50±4.03^{a}
	FD	56.34±0.42^{b}	4.60±0.04^{b}	14.25±0.01^{a}
	FD-DIC	68.72±0.16^{a}	5.75±0.28^{c}	9.98±2.02^{a}
1:1	AD	58.83±1.90^{a}	5.29±0.74^{a}	14.72±0.67^{bc}
	AD-DIC	58.85±5.28^{a}	4.79±0.40^{a}	10.21±0.34^{ab}
	FD	58.63±0.08^{a}	12.09±1.00^{b}	15.67±2.01^{c}
	FD-DIC	63.84±1.84^{a}	12.07±1.27^{b}	9.50±2.69^{a}a
3:7	AD	56.59±1.87^{a}	10.47±1.46^{a}	14.25±0.01^{ab}
	AD-DIC	55.34±1.37^{a}	9.20±1.08^{a}	7.12±3.36^{a}
	FD	55.29±7.23^{a}	18.55±1.55^{b}	16.62±3.36^{b}
	FD-DIC	50.75±0.28^{a}	15.18±0.58^{b}	8.07±2.02^{a}
0:10	AD	42.74±2.82^{a}	30.82±1.82^{b}	11.87±3.35^{ab}
	AD-DIC	45.60±0.29^{a}	21.68±2.49^{a}	7.12±0.67^{a}a
	FD	30.80±4.55^{b}	30.78±0.55^{b}	15.20±1.34^{b}
	FD-DIC	42.23±1.49^{a}	28.32±2.93^{b}	9.02±0.67^{a}

注：同一列数据标注的不同小写字母表示差异显著（$p<0.05$）。

2.5 原料配比与干燥方式对胡萝卜-马铃薯复合脆片微观结构的影响

图 2 为不同原料配比对 AD-DIC、FD-DIC 脆片的微观结构的影响，其中图 2a~e 为不同配比的 FD-DIC 复合脆片的微观结构，图 2f~j 为不同配比的 AD-DIC 复合脆片的微观结构。如图 2a~e 所示，在 FD-DIC 脆片中，随着胡萝卜比例的增大，孔隙增大，数量变少，其中马铃薯胡萝卜 1:1 配比的复合脆片微观结构孔隙较多，分布也比较均匀，这可能是其在 FD-DIC 方式下的所有配比脆片中最脆的原因[23]。如图 2f~j 所示，在 AD-DIC 复合脆片中，随着胡萝卜比例的增加，孔隙数量逐渐减少，尤其是马铃薯胡萝卜 0:10 配比的复合脆片几乎不出现孔隙；并且随着胡萝卜比例增加孔隙逐渐变大，胡萝卜比例达到 50%时孔隙最大，之后随着胡萝卜比例的增加，孔隙逐渐变小，其中马铃薯胡萝卜 3:7 的复合脆片孔隙数量最多。AD-DIC 与 FD-DIC 脆片的微观结构有明显区别，这是由于冻干过程是固体到气体的升华过程，保持了脆片在预冻期

间物料的结构和形状，所以 FD-DIC 脆片就形成许多孔隙[24]，而且形状基本保持不变。

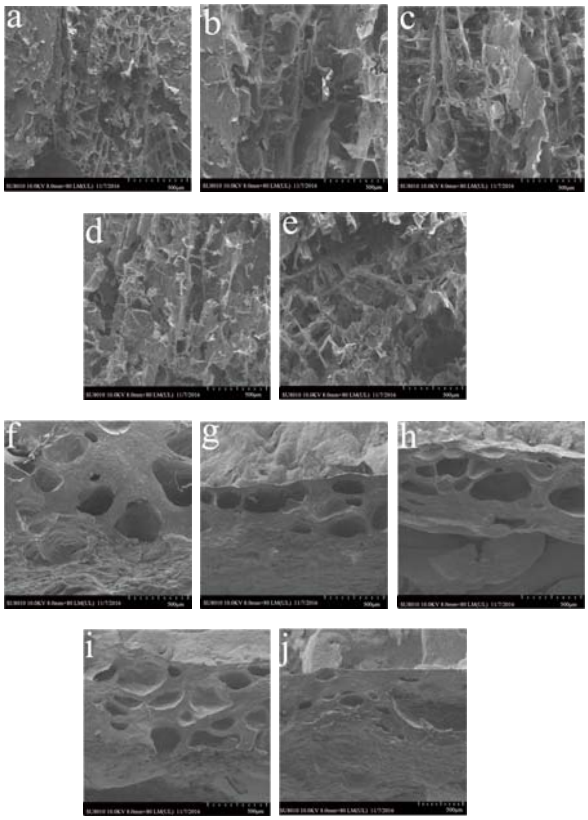


图 2 不同原料配比的热风−压差、真空冷冻−压差闪蒸胡萝卜脆片电镜扫描图

Fig.2 Scanning electron microscopy (SEM) of carrot-potato chips with different raw material ratio prepared by AD-DIC, FD-DIC

注：a~e 分别为 FD-DIC 方式下马铃薯:胡萝卜 10:0、7:3、1:1、3:7 和 0:10 的电镜扫描图，放大倍数为 80 倍；f~j 分别为 AD-DIC 方式下马铃薯:胡萝卜 10:0、7:3、1:1、3:7 和 0:10 的电镜扫描图，放大倍数为 80 倍。

图 3 以马铃薯胡萝卜 1:1 比例的原料配比为例，比较同一原料配比下不同干燥方式对胡萝卜复合脆片微观结构的影响。如图 3a~d 所示，经过 AD-DIC 的脆片比单独使用 AD 的脆片的孔隙数量多，并且孔隙比较大，这可能是瞬时压差闪蒸对物料膨化的效果。FD 脆片的孔隙分布比较密集，孔隙数量也较多；经过 FD-DIC 的脆片微观结构的孔隙较 FD 脆片大，孔隙分布也较均匀。AD 脆片与 FD 脆片的微观结构有明显差别，由于进行了预冻和冻干过程，保护了它完整的微观结构，所以 FD 与 FD-DIC 脆片的微观结构疏松，空隙较大且均匀[23]，而 AD 脆片在干燥过程中结构塌陷，微观结构没有被保持住，所以孔隙较少且分布不均匀。图 3e~h 为对应的不同干燥方式下的复合脆片实物图，由图可知经过冻干的脆片外观比较平整，而且颜色偏白偏亮；经过热风干燥的脆片皱缩比较严重，还有卷曲的现象，但口感比较酥脆，有咀嚼感。

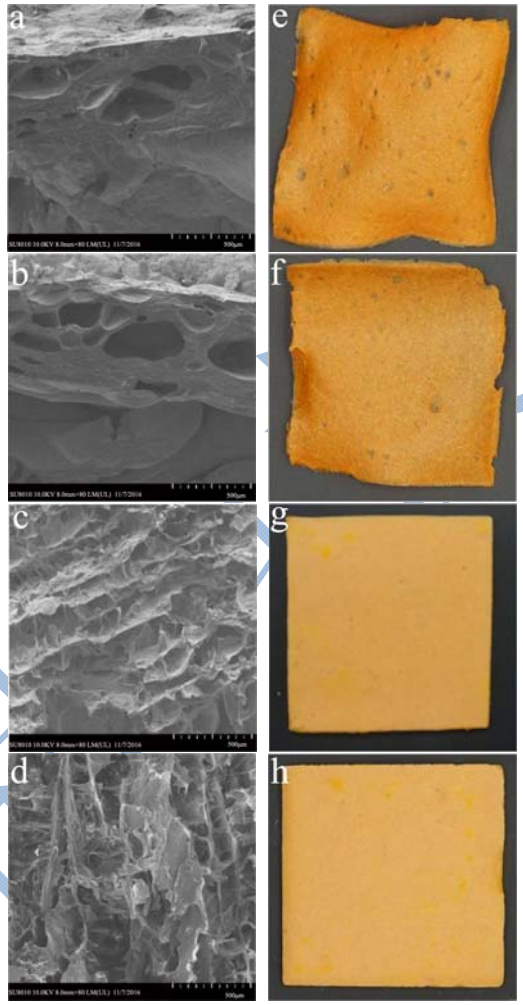


图 3 同一原料配比的不同干燥方式的胡萝卜复合脆片的电镜扫描与产品图

Fig.3 Scanning electron microscopy (SEM) and pictures of carrot-potato chips with different drying methods at the same raw material ratio

注：a 和 e 为 AD 脆片；b 和 f 为 AD-DIC 脆片；c 和 g 为 FD 脆片；d 和 h 为 FD-DIC 脆片，放大倍数为 80 倍。

3 结论

本实验研究了原料配比与干燥方式对胡萝卜-马铃薯复合脆片品质特性的影响。同一干燥方式下，马铃薯与胡萝卜的配比对复合脆片的产品品质有显著影响，尤其是对色泽、脆硬度和微观结构的影响较大。综合各种品质指标可以得出，马铃薯胡萝卜 1:1 的品质最好，3:7 配比次之。然而本文仅研究了胡萝卜和马铃薯两种主料对再造型果蔬脆片品质的影响，对添加更多其他果蔬原料和辅料后的品质有待进一步研究。此外，同一原料配比条件下，干燥方式对胡萝卜复合脆片的品质也有显著性影响，热风干燥的复合脆

片品质较差，产品无酥脆口感，但与瞬时压差闪蒸干燥联合能显著提高产品的脆度；真空冷冻干燥的复合脆片品质较佳，主要表现为外观形态平整，不易皱缩，营养成分保持好，但真空冷冻生产成本与耗能太高，产出效率低，然而与瞬时压差闪蒸干燥联合既可以生产出与真空冷冻干燥外观形态相同的复合脆片又可以节约成本、提高效率。综上所述，真空冷冻联合瞬时压差闪蒸干燥生产的复合脆片的综合品质最好，且相比传统冻干工艺能耗大幅降低，该工艺可以用于制备品质优良的复合果蔬脆片。但综合考虑，热风联合瞬时压差闪蒸干燥的胡萝卜-马铃薯复合脆片外观、形态虽然不如真空冷冻联合压差闪蒸生产的产品，但因其有酥脆的口感，并且采用热风作为预干燥手段，生产成本较低，生产效率高，可作为一种经济高效的复合果蔬脆片加工技术进行推广。

参考文献

[1] 刘李峰.我国胡萝卜产业发展现状分析[J].上海蔬菜,2006,2:4-6
LIU Li-feng. Analysis on the development of carrot industry in China [J]. Shanghai Vegetables, 2006, 2: 4-6

[2] Singh B, Panesar P S, Nanda V. Utilization of carrot pomace for the preparation of a value added product [J]. World Journal of Dairy & Food Sciences, 2006, 40(3): 465-477

[3] 谢玲.中国马铃薯产业保持较快增长[N].中国食品报,2013-8-28(8)
XIE Ling. China's potato industry maintain rapid growth [N]. China Food Journal, 2013-8-28(8)

[4] 刘敦华,徐桂花.真空低温膨化苹果脆片的研制[J].宁夏农学院学报,2000,21(2):85-87
LIU Dun-hua, XU Gui-hua. Research on apple chips with vacuum low-temperature puff [J]. Journal of Ningxia Agricultural College, 2000, 21(2): 85-87

[5] 钟倩霞,李远志,吴绮华,等.再造型马铃薯脆片微波膨化工艺研究[J].食品科技,2005,1(9):23-26
ZHONG Qian-xia, LI Yuan-zhi, WU Qi-hua, et al. Study on the processing techniques of reshaped potato crispy chips by microwave drying [J]. Food Science and Technology, 2005, 1(9): 23-26

[6] 方勇,王红盼,杨文建,等.金针菇复配发芽糙米挤压膨化工艺及产品品质特性[J].中国农业科学,2016,49(4):727-738
FANG Yong, WANG Hong-pan, YANG Wen-jian, et al. Extrusion process of germinated brown rice compounded of *Flammulina Velutipes* and extrudant quality properties [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(4): 727-738

[7] Zhang F, Zhang M, Aruns M, et al. Drying characteristics and quality of restructured wild cabbage chips processed using different drying methods [J]. Drying Technology, 2010, 29(6): 682-688

[8] Qiao F, Huang L L, Wen S X, et al. A study on microwave vacuum dried re-structured lychee (*Litchi Chinensis,* Sonn.) mixed with purple sweet potato (*Ipomoea Batatas*) snacks [J]. Food & Bioproducts Processing, 2012, 90(4): 653-658

[9] 白河清,岳兰昕,张兵兵,等.复合型油炸甘薯脆片加工工艺研究[J].粮食加工,2013,2:57-60
BAI He-qing, YUE Lan-xin, ZHANG Bing-bing, et al. Study of process of compounded fried sweet potato chips [J]. Grain Processing, 2013, 2: 57-60

[10] GB 5009.3-2016,食品安全国家标准食品中水分的测定[S]
GB 5009.86-2016, Food Safety National Standard for Determination of Moisture Contentin Foods [S]

[11] 陈晓旭,易建勇,毕金峰,等.火龙果热风联合变温压差膨化干燥工艺优化[J].农产品加工,2014,7(7):21-28
CHEN Xiao-xu, YI Jian-yong, BI Jin-feng, et al. Response surface optimization of combination of hot-air and explosion puffing drying for pitaya [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2014, 7(7): 21-28

[12] 曾目成.猕猴桃片新型联合干燥技术研究[D].北京:中国农业科学院,2014
ZENG Mu-cheng. Research on the novel combination drying technology of kiwifruit slices [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2014

[13] 方芳,毕金峰,李宝玉,等.不同干燥方式对哈密瓜干燥产品品质的影响[J].食品与发酵工业,2010,5:68-72
FANG Fang, BI Jin-feng, LI Bao-yu, et al. Effets of different drying methods on quality of hamimel on products [J]. Food and Fermentation Industries, 2010, 5: 68-72

[14] 苏鹏,王欣,刘宝林,等.水分含量及添加剂对面团玻璃化转变温度的影响[J].食品科学,2007,28(8):97-100
SU Peng, WANG Xin, LIU Bao-lin, et al. Effects of water content and several common food additives on glass transition temperature of dough [J]. Food Science, 2007, 28(8): 97-100

[15] GB 5009.86-2016,食品安全国家标准食品中抗坏血酸的测定[S]
GB 5009.86-2016, Food Safety National Standard for Determination of Ascorbic Acid in Foods [S]

[16] Vásquezcaicedo A L, Sruamsiri P, Carler R, et al. Accumulation of all trans-beta-carotene and its 9-cis and 13-cisstereoisomers during postharvest ripening of nine Thai

mango cultivars [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2005, 53(12): 27-35

[17] 郭雷,吕明生,王淑军,等.苯酚-硫酸法测定樱桃酒中总糖[J].食品研究与开发,2010,31(6):130-132
GUO Lei, LV Ming-sheng, WANG Shu-jun, et al. Determination of total sugar from cherry wine by phenol-sulfuric acid method [J]. Food Research and Development, 2010, 31(6): 130-132

[18] Markowski M, Zielińska M. Kinetics of water absorption and soluble-solid loss of hot-air-dried carrots during rehydration [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2011, 46(6): 1122-1128

[19] Huang 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

[20] Kawas M L, Moreira R G. Effect of degree of starch gelatinization on quality attributes of fried tortilla chips [J]. Journal of Food Science, 2001, 66(2): 300-306

[21] Justine P, Connie B R. Two simultaneous mechanisms causing glass transition temperature reductions in high molecular weight freestanding polymer films as measured by transmission ellipsometry [J]. Physical Review Letters, 2011, 107(23): 1-5

[22] Hiranvarachat B, Devahastin S, Chiewchan N. Effects of acid pretreatments on some physicochemical properties of carrot undergoing hot air drying [J]. Food & Bioproducts Processing, 2011, 89(2): 116-127

[23] Devahastin S. Fractal characterization of some physical properties of a food product under various drying conditions [J]. Drying Technology, 2007, 25(1): 135-146

[24] Voda A, Homan N, Witek M, et al. The impact of freeze-drying on microstructure and rehydration properties of carrot [J]. Plos One, 2011, 49(2): 687-693

现代食品科技