

DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.80268

吸湿性对冻干果蔬产品及其品质特性的影响

The effect of hygroscopicity on quality characteristics of different freeze-drying fruit and vegetable products

李兴霞¹ 李越² 杨菲菲^{2,3} 胡佳琦^{2,3}

LI Xing-xia¹ LI Yue² YANG Fei-fei^{2,3} HU Jia-qi^{2,3}

张红琳³ 王海鸥³

ZHANG Hong-lin³ WANG Hai-ou³

(1. 烟台工程职业技术学院, 山东 烟台 264006; 2. 沈阳农业大学食品学院,

辽宁 沈阳 110161; 3. 南京晓庄学院食品科学学院, 江苏 南京 211171)

(1. Yantai Engineering & Technology College, Yantai, Shandong 264006, China; 2. Food College, Shenyang Agriculture University, Shenyang, Liaoning 110161, China; 3. College of Food Science, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing, Jiangsu 211171, China)

摘要:目的:探究不同冻干果蔬产品在贮藏过程中吸湿性及品质特性的变化。方法:以4种果蔬(马铃薯、杏鲍菇、苹果、白萝卜)为研究对象,观察4种冻干果蔬的微观结构、吸湿性、色泽及质构特性变化,并进行相关性分析。结果:新鲜果蔬细胞结构较为饱满,呈现规则细胞结构;冻干苹果片组织结构较为完整,细胞壁较厚,存在轻微破裂,孔径较大,吸湿性较强, L^* 值显著降低($P<0.05$);冻干马铃薯片孔隙结构呈正六边形,细胞内部存在着大量的淀粉颗粒,孔径较小,吸湿性较冻干苹果片的低,色泽变化较为显著($P<0.05$);冻干白萝卜片结构较为致密,表面光滑,但细胞出现皱缩变形,孔径大小不均匀,吸湿性较冻干马铃薯片的低,吸湿后物料色泽无显著变化($P>0.05$);冻干杏鲍菇片结构边界呈丝状,细胞壁破裂严重,细胞完整性较低,吸湿性较冻干白萝卜片的低,吸湿后色泽无显著变化($P>0.05$);物料具有的吸湿性与质构特性呈显著或极显著相关($P<0.05$),而吸湿与未吸湿的物料之间品质指标差异较为明显。结论:贮藏过程中未吸湿与吸湿后的物料质构差距较大,吸湿现象影响着产品的品质特性。

关键词:冻干;吸湿性;品质特性;聚类分析

Abstract: Objective: This study aimed to explore the changes of

hygroscopicity and quality characteristics of different freeze dried (FD) fruits and vegetables in the storage. **Methods:** Taking four kinds of fruits and vegetables, including potato, king oyster mushroom, apple and white radish, as the research objects, the changes of microstructure, hygroscopicity, color and texture characteristics of the four kinds of freeze-dried fruits and vegetables were observed, and the correlation analysis was conducted. **Results:** The results showed that the cell structure of fresh fruits and vegetables was plump and regular; The FD apple slices was observed with relatively complete tissue structure, thicker cell wall, slightly rupture, larger aperture, stronger hygroscopicity, and significantly reduced L^* value was ($P<0.05$). The pore structure of lyophilized potato slices was hexagonal, and there were a lot of starch particles in the cells. With small pores, the hygroscopicity was lower than that of lyophilized apple slices, and the color change was significant ($P<0.05$). The lyophilized radish slices had compact structure and smooth surface, while the cells were wrinkled and deformed, and the pore size was not uniform, and the hygroscopic property was lower than that of lyophilized potato slices; the color of the material had no significant change after hygroscopic ($P>0.05$). The structure boundary of lyophilized *Pleurotus eryngii* slices was filamentous, and the cell wall was broken seriously; the cell integrity was low, and the hygroscopicity was lower than that of lyophilized white radish slices. The color and luster of lyophilized white radish slices had no significant change ($P>0.05$). The difference in quality indexes between the material before and after moisture absorption was obvious, while there was a significant or extremely significant correlation between the hygroscopicity and texture properties of mate-

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:31872901);常州市农业科技支撑计划(编号:CE20202030)

作者简介:李兴霞,女,烟台工业职业技术学院副教授,博士。

通信作者:王海鸥(1978—),男,南京晓庄学院教授,博士。

E-mail: who1978@163.com

收稿日期:2022-04-29

rials ($P < 0.05$). **Conclusion:** There is a big difference in the texture of the material without moisture absorption and moisture absorption during the storage process, which affects the quality characteristics of the product.

Keywords: freeze-drying; hygroscopicity; texture properties; cluster analysis

果蔬干制是果蔬加工的主要方式之一,可明显降低新鲜果蔬的水分含量和微生物活性,减少新鲜果蔬在运输和贮藏过程中的物理和化学变化,延长产品保质期。真空冷冻干燥(Freeze-drying, FD)技术是在较低的温度下将湿物料冻结成固态,真空状态下物料中的水分不经液态直接升华为气态,最终使物料脱水的干燥技术,从而获得具有疏松多孔结构的干燥制品^[1]。由于FD过程中物料处于低温、真空和低氧的环境,微生物的大量繁殖与酶的活性得到了有效控制,原料中生物活性成分和热敏性成分的损耗减少,产品的色泽和外观形状基本不变,物料中的营养成分最大程度地得到了保留^[2]。如周鸣谦等^[3]研究发现FD技术与其他干燥方式相比,FD技术所得产品的复水性、色泽、硬度、比容均为最佳,具有较高的产品品质;薛艾莲等^[4]研究发现FD制备的板栗生、熟粉水分含量最低,其淀粉和游离酚含量均最高,粉体具有较白的色泽;王莹莹等^[5]研究发现FD样品结构完整,在短时间内具有较高的干燥速率以及较低的含水率。因此,FD技术生产的果蔬干制品可满足现代消费者对于营养健康食品的需求,且FD技术在果蔬干制方面的应用十分广泛,显示出了良好的市场价值和发展潜能^[6]。

FD虽然很好地保持了物料的营养、色泽、结构等,但FD产品在贮藏过程中易吸收空气中的水分,影响产品品质^[7]。Li等^[8]研究发现胡柚经微波真空干燥后的吸湿性与真空冷冻干燥后的不同,真空冷冻干燥的具有较强的吸湿性,产品水分含量低且冻干过程中的水分汽化使结构呈现多孔海绵状结构,与空气中水分的接触面积增大,使产品更易吸湿;李明娟等^[9]研究发现真空冷冻干制品的吸湿性会影响干制品的硬脆度,进而影响产品品质,此外,在贮藏过程中吸湿也会造成微生物的繁殖,影响产品的食用安全性。物料本身的组织结构和基质组分都对冻干产品的吸湿性产生较大影响^[10]。罗登林等^[11]研究发现天然菊粉与长链菊粉的吸湿性存在差异;钟碧銮等^[12]发现在不同的湿度环境中,不同品种鱼胶的吸湿性存在差异。因此,研究拟以4种果蔬(新鲜马铃薯、杏鲍菇、苹果、白萝卜)为对象,通过观察4种冻干产品的微观结构、吸湿性、色泽及质构特性,分析冻干果蔬贮藏过程中吸湿性对品质特性的影响,并进行相关性分析。旨在为果蔬冻干生产企业提高产品贮藏稳定性提供技术支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜马铃薯、杏鲍菇、苹果、白萝卜:购于南京大润发

超市;

氯化钠:分析纯,西陇科学股份有限公司。

1.2 仪器与设备

真空冷冻干燥机:SCIENTZ-50F型,宁波新芝生物科技股份有限公司;

电脑色差仪:NR200型,深圳市三恩时科技有限公司;

质构仪:TMS-PRO型,美国FTC公司;

扫描电子显微镜:EVO-LS10型,德国蔡司公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备 将新鲜的马铃薯、杏鲍菇、苹果和白萝卜分别进行清洗去皮,切成厚5 mm、直径15 mm的圆柱果蔬片。开启冷冻干燥机制冷机组,将冻干仓隔板温度设定为 -40°C ,在冻干机料盘上平铺一层果蔬片样品,置于隔板上预冻8 h,当物料冻结到 -30°C 以下后开启真空机组,维持冻干仓压强20 Pa左右,启动“温度-时间”隔板升温程序对物料进行冷冻干燥直至干燥完全^[13-14]。

1.3.2 营养成分含量测定

(1) 水分:按GB 5009.3—2016执行。

(2) 碳水化合物:根据萘酚比色法测定^[15]。

(3) 粗蛋白:按GB/T 5009.5—2016执行。

(4) 粗脂肪:按GB/T 5009.9—2016执行。

1.3.3 微观扫描电子显微镜观察 取若干果蔬片样品,用3%戊二醛(pH 7.2)固定48 h,然后分别用30%,50%,70%,85%,95%,100%的乙醇对样品进行梯度脱水,每级15 min。75%叔丁醇过渡干燥,100%叔丁醇置换2次,用100%叔丁醇将样本冷藏($0\sim 4^{\circ}\text{C}$)固化10 min,放入临界 CO_2 干燥仪中干燥2~3 h。用碳导电胶将处理后的果蔬片粘在样品托上,采用离子溅射仪在样本的横断面上喷金,最后利用扫描电镜观察果蔬片横截面的微观结构。

1.3.4 吸湿性的测定 将4种冻干果蔬片置于已称重的干燥皿中,将平皿放置在盛有饱和氯化钠溶液(环境相对湿度75.5%)的玻璃干燥器中,称量放置不同时间后平皿的质量,每种样品重复10次,称量结果取平均值。吸湿率为前后质量差占吸湿前质量的百分比^[13],数学计算式为:

$$A_r = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

A_r ——脆片吸湿性,%;

m_0 ——脆片吸湿前质量,g;

m_1 ——脆片吸湿后质量,g。

1.3.5 色泽的测定 运用色差仪测定4种冻干果蔬片吸湿贮藏0,1,2,3 d后的 L^* 、 a^* 、 b^* 颜色值,以标准白色板为参照,计算样品与标准白色版的色差值^[16]。试验平行3次。按式(2)计算样品的色差值。

$$\Delta E = \sqrt{(L-L^*)^2 + (a-a^*)^2 + (b-b^*)^2}, \quad (2)$$

式中:

ΔE ——样品与标准白板之间的色差;

L^* 、 a^* 、 b^* ——样品的测定值;

L 、 a 、 b ——标准白色板的测定值。

1.3.6 质构特性 采用质构仪进行测定,测试条件:探头型号为 P/50 平底柱形探头,测前速率 1 mm/s,测试速率 1 mm/s,测后速率 4 mm/s,压缩位移 2 mm,触发值 10 g。测定 4 种冻干果蔬片常温贮藏 0,1,2,3 d 的硬度、内聚性、弹性、胶黏性、咀嚼性等,每个样品平行测定 5 次,结果取平均值^[17]。

1.4 数据处理

利用 SPSS 16.0 软件进行数据显著性分析,显著性水平 $P < 0.05$;运用 Origin 2021 软件进行热图分析和分层聚类。

2 结果与分析

2.1 不同新鲜果蔬营养成分含量

由表 1 可知,4 种新鲜果蔬的营养成分含量之间存在差异,其中白萝卜水分含量最高(93.4%),其次是杏鲍菇(88%)和苹果(86%),最低为马铃薯(79.8%);马铃薯与苹果的碳水化合物含量较高分别为 16.6%与 13.5%;蛋白质含量由高到低分别为杏鲍菇、马铃薯、白萝卜、苹果;脂肪含量由高到低分别为杏鲍菇、苹果、马铃薯、白萝卜。

2.2 不同果蔬的微观结构

由图 1(a)可知,新鲜苹果的孔隙结构较完整,细胞结构较为饱满,孔径较大;由图 1(b)可知,冻干苹果片总体组织结构较为紧密,细胞结构呈现较为明显的皱缩现象,细胞壁较厚,孔隙结构呈不规则形状;由图 1(c)可知,新鲜杏鲍菇的孔径较小,孔隙结构较多,细胞壁较薄,呈现丝状结构;由图 1(d)可知,冻干杏鲍菇片整体结构致密,细胞结构被破坏,但仍呈现丝状结构,细胞排列杂乱,网络结构边界相对纤细,细胞壁出现皱缩卷曲现象,细胞完整性降低;由图 1(e)可知,新鲜马铃薯的孔隙结构较大,孔径较大,细胞壁中包裹着大量的淀粉颗粒;由图 1(f)可知,冻干后马铃薯组织整体结构较为清晰,连接较为紧密,细胞壁较薄呈正六边形,多孔结构内存在大量椭圆形

的淀粉颗粒,较新鲜马铃薯中淀粉颗粒减少,这些淀粉颗粒被薄膜包裹,紧贴细胞壁内侧,颗粒分明;由图 1(g)可知,新鲜白萝卜的孔隙结构较为明显,孔径较大,呈四边形结构,细胞结构较为饱满,呈规则排列;由图 1(h)可知,从整体上看冻干白萝卜片的组织结构较为紧密,表面较为光滑,孔隙结构排列不均匀,孔径大小不均匀,冻干后细胞皱缩现象严重,细胞间出现明显的断裂变形现象。

在 FD 过程中,果蔬片内部水分形成固态冰晶,经过高压使得水分直接从固态升华为气态,使得原本含有固态冰晶的空间结构被保留下来,细胞大量失水,形成高度疏松多孔结构^[18-19],不同果蔬 FD 后的组织结构之间存在明显差异,可以从图 1 中观察到 FD 后细胞孔径由大到小依次为苹果>马铃薯>白萝卜>杏鲍菇。

2.3 冻干果蔬在贮藏过程中吸湿性的变化

FD 过程中,由于物料具有较低的界面温度和表面温度,物料中的水分升华为气态而脱离物料,冰晶升华留下了大量孔隙,使物料保持固有的均匀组织结构,易于外界水分进入,产生吸湿现象^[20]。不同冻干果蔬片在贮藏过程中吸湿性的变化如图 2 所示。贮藏过程中 4 种冻干果蔬逐渐从环境中吸收水分,吸湿性不断增加,随着贮藏时间的延长,吸湿性变化趋缓,这是因为样品经 FD 加工后,

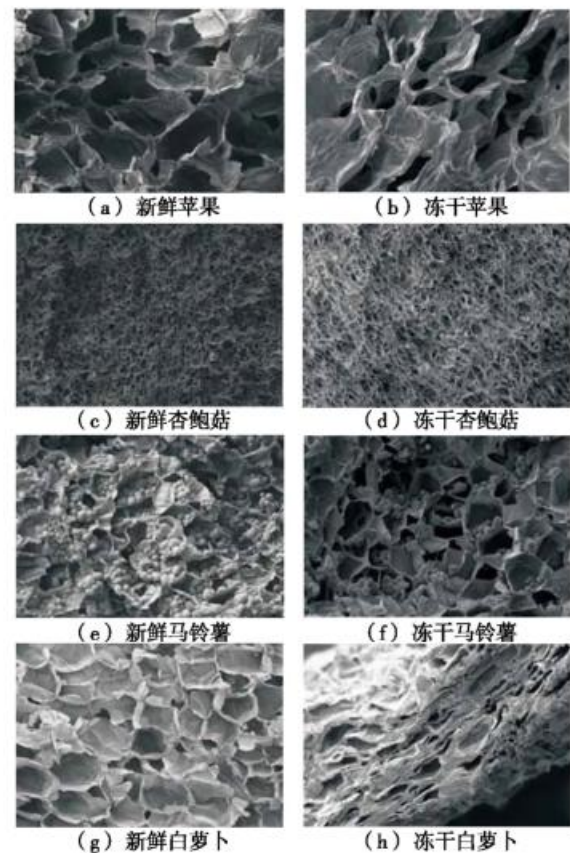


图 1 果蔬冻干前后的微观结构

Figure 1 Microstructure of different fruits and vegetables before and after FD (100×)

表 1 不同新鲜果蔬营养成分含量[†]

Table 1 Nutrient content of different fresh fruits and vegetables %

样品	水分	碳水化合物	蛋白质	脂肪
苹果	86.90±4.02 ^b	13.53±0.12 ^a	0.71±0.02 ^b	0.45±0.04 ^a
杏鲍菇	88.36±0.34 ^b	8.36±0.56 ^b	3.66±0.11 ^a	0.52±0.07 ^a
马铃薯	79.80±1.52 ^c	16.61±1.84 ^a	2.72±0.34 ^a	0.27±0.03 ^{ab}
白萝卜	93.46±0.67 ^a	4.32±0.53 ^c	0.91±0.06 ^b	0.12±0.01 ^b

[†] 每列字母不同表示存在显著差异($P < 0.05$)。

呈现稳定的网状固体骨架,在相同贮藏条件下,4 种冻干果蔬表面结合水分子并向内部转移较快,维持了表面较低的水蒸气分压,随着时间的延长,内外压强差逐渐减小,吸湿性变化较慢,直至达到吸湿平衡^[11]。

由图 2 可知,4 种果蔬吸湿性的大小顺序为苹果>马铃薯>白萝卜>杏鲍菇。冻干苹果片的吸湿性较大,可能是因为物料本身含有较高的碳水化合物,而部分糖类对水分具有高亲和力,又因为物料在冻干过程中,水分升华,形成了较为完整的孔隙结构,因此冻干苹果片呈现出较高的吸湿性^[21-22];马铃薯片同时含有较高的糖含量,在 FD 后内部结构较为完整,细胞结构中存在大量淀粉颗粒[图 1(f)],淀粉中含有大量羟基,羟基为亲水基,因此冻干马铃薯片具有较高的吸湿性^[23-24];冻干白萝卜、杏鲍菇的吸湿性较低,是因为物料在 FD 后内部结构受损较为严重,细胞壁发生断裂坍塌,孔径较小,在一定程度上阻止了水分子的进入,物料吸湿性与样品所含糖类及细胞结构有关,这与夏晓霞等^[25]研究结果一致。

2.4 冻干果蔬在贮藏过程中色泽的变化

果蔬干燥后颜色的变化是影响其质量及市场价值的一个非常重要的指标,以色泽变化最小,最接近新鲜果蔬原色的产品最为理想^[26]。不同冻干果蔬片在吸湿过程中的 L^* 、 a^* 、 b^* 及 ΔE 色泽参数变化如图 3 所示。 L^* 值

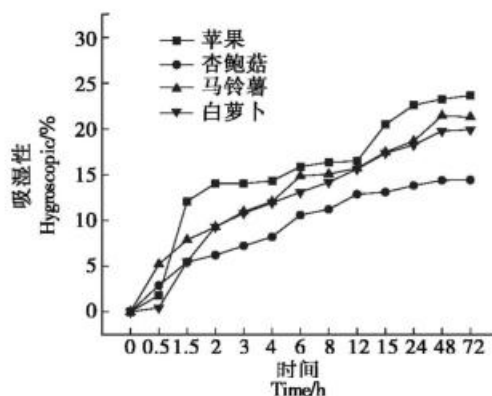
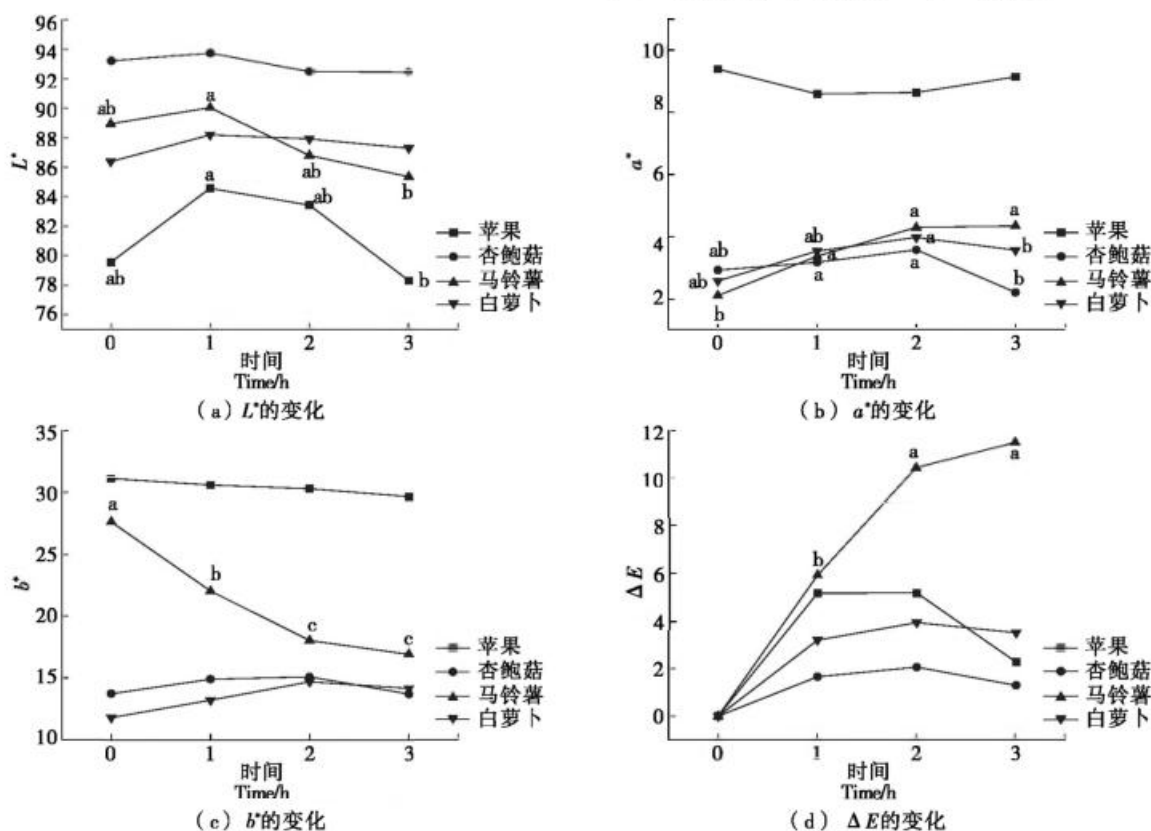


图 2 不同冻干果蔬在贮藏过程中吸湿性的变化
Figure 2 Changes in hygroscopicity of different freeze-dried fruits and vegetables during storage

表示物料的亮度,冻干苹果片、马铃薯片在贮藏期间 L^* 值显著降低($P<0.05$),而冻干杏鲍菇片、白萝卜片 L^* 值变化不显著($P>0.05$),这是因为在 FD 过程中,细胞结构受到破坏,释放出较多的多酚氧化酶(PPO),物料在贮藏过程中吸湿并与氧气接触,产生酶促褐变,因此冻干苹果片与马铃薯片的亮度降低^[27],而杏鲍菇片和白萝卜片的多酚氧化酶含量较低,因此色泽变化不明显。 a^* 和 b^* 值分别表示红(+ a^*)/绿(- a^*)和黄(+ b^*)/蓝(- b^*),冻干马铃薯片在贮藏期间 a^* 值显著增加($P<0.05$), b^*



字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图 3 不同冻干果蔬在贮藏过程中色泽的变化

Figure 3 Color changes of different freeze-dried fruits and vegetables during storage

值显著降低($P<0.05$),而冻干苹果片、杏鲍菇片、白萝卜片色泽变化不显著($P>0.05$),这是因为马铃薯中含有单宁类物质,在酶的作用下极易被氧化,因此马铃薯的 a^* 和 b^* 值变化也较为明显^[28-29]。从图3(d)中可以看出,4种果蔬中冻干马铃薯片的 ΔE 值变化较为显著($P<0.05$),其他冻干果蔬片在贮藏过程中变化不显著($P>0.05$),这是由于冻干马铃薯片在贮藏过程中与氧气接触发生氧化反应,而物料本身所含有的碳水化合物高于其他果蔬,而碳水化合物具有一定的吸湿性,因此吸湿性较强,色泽变化更为明显。

2.5 冻干果蔬在贮藏过程中质构特性的变化

由表2可知,在相同贮藏条件下,不同冻干果蔬片吸

湿后的质构特性有所差异。

吸湿后的冻干果蔬片硬度均显著降低($P<0.05$),其中贮藏第2天的硬度最低,冻干果蔬片的硬度分别降低了98.37%(冻干苹果片)、79.17%(冻干杏鲍菇片)、86.47%(冻干马铃薯片)、78.04%(冻干白萝卜片)。FD后,冻干苹果、马铃薯片的细胞壁较厚,硬度较高,在贮藏过程中的吸湿性逐渐升高,硬度显著降低($P<0.05$),这是由于样品中含有较高的碳水化合物,使得产品具有较高吸湿性的同时,样品呈现软黏状态,失去了脆片应有的质构特性^[30-31];冻干杏鲍菇片吸湿后弹性显著增加,原因可能是经过干燥后的果蔬组织凝结,促使其张力增加^[32];冻干白萝卜片的硬度较低,吸湿后的硬度、弹性、胶

表2 冻干果蔬在贮藏过程中质构特性的变化[†]

Table 2 Changes in texture properties of different freeze-dried fruits and vegetables during storage

时间/ d	苹果					杏鲍菇				
	硬度/N	内聚性	弹性/mm	胶黏性/N	咀嚼性/ (N·mm)	硬度/N	内聚性	弹性/mm	胶黏性/N	咀嚼性/ (N·mm)
0	45.91±8.80 ^a	0.30±0.02 ^c	0.47±0.07 ^a	14.00±3.76 ^a	6.72±2.85 ^a	44.51±20.00 ^{ab}	0.32±0.03 ^b	0.46±0.08 ^b	14.60±6.78 ^b	6.98±3.80 ^b
1	0.85±0.09 ^b	0.62±0.04 ^b	0.35±0.15 ^a	0.53±0.05 ^b	0.19±0.10 ^b	16.69±5.36 ^{bc}	0.57±0.02 ^a	0.54±0.11 ^{ab}	9.51±3.34 ^b	5.15±2.36 ^b
2	0.75±0.00 ^b	0.69±0.03 ^a	0.28±0.08 ^a	0.52±0.02 ^b	0.15±0.05 ^b	9.27±7.90 ^c	0.55±0.04 ^a	0.57±0.05 ^{ab}	4.86±3.79 ^b	2.62±1.82 ^b
3	1.26±0.23 ^b	0.59±0.03 ^b	0.35±0.05 ^a	0.74±0.12 ^b	0.26±0.07 ^b	55.08±23.67 ^a	0.51±0.02 ^a	0.65±0.07 ^a	27.75±10.87 ^a	18.39±7.99 ^a

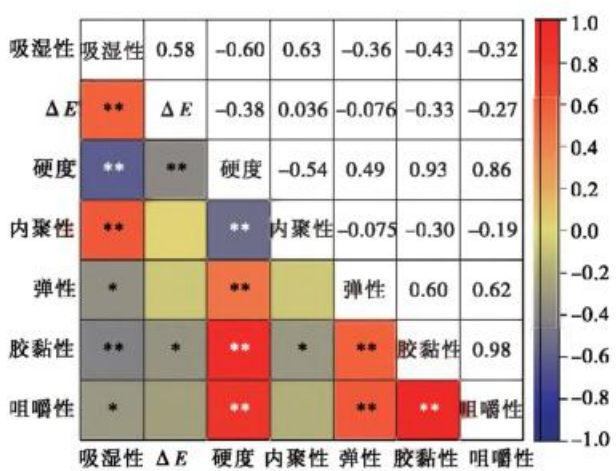
时间/ d	马铃薯					白萝卜				
	硬度/N	内聚性	弹性/mm	胶黏性/N	咀嚼性/ (N·mm)	硬度/N	内聚性	弹性/mm	胶黏性/N	咀嚼性/ (N·mm)
0	45.96±9.87 ^a	0.24±0.05 ^b	0.40±0.04 ^{bc}	10.96±1.67 ^a	4.46±1.11 ^{ab}	5.01±1.88 ^a	0.56±0.05 ^{ab}	0.60±0.11 ^a	2.74±0.82 ^a	1.57±0.22 ^a
1	12.33±3.78 ^b	0.40±0.04 ^a	0.36±0.04 ^c	4.86±0.99 ^b	1.79±0.58 ^{ab}	1.16±0.09 ^b	0.49±0.03 ^b	0.23±0.04 ^b	0.57±0.08 ^b	0.13±0.03 ^b
2	6.22±2.69 ^b	0.37±0.04 ^a	0.47±0.07 ^b	0.37±0.04 ^{ab}	0.47±0.07 ^b	1.10±0.09 ^b	0.60±0.07 ^a	0.34±0.03 ^b	0.66±0.03 ^b	0.23±0.02 ^b
3	19.80±12.73 ^b	0.41±0.10 ^a	0.57±0.01 ^a	8.96±7.81 ^a	5.09±4.38 ^a	1.31±0.09 ^b	0.51±0.02 ^{ab}	0.36±0.06 ^b	0.67±0.06 ^b	0.24±0.06 ^b

† 每列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

黏性、咀嚼性均显著降低($P<0.05$),这是由于白萝卜片FD后细胞产生明显的皱缩现象,细胞形态不完整,使得冻干白萝卜片的硬度较其他冻干果蔬片的硬度低,而白萝卜具有的碳水化合物含量较其他果蔬含量低,吸湿性较低,吸湿后硬度降低得最少(78.04%),与李瑞杰等^[33]研究结果一致。

2.6 相关性分析

采用Origin 2021分析4种不同果蔬中9项品质指标之间的相关性,结果见图4。由图4可知,吸湿性与 a^* 值呈极显著正相关($P<0.01$);物料冻干后具有疏松多孔的组织结构,由于物料本身所含有的成分以及特殊的组织状态,随着贮藏时间的延长,吸湿性不断增加,致使物料发生氧化现象,进而影响产品的色泽。吸湿性与质构特性呈显著相关($P<0.05$)。吸湿性与弹性、咀嚼性呈显著负相关($P<0.05$),与内聚性呈极显著正相关($P<0.01$),与硬度、胶黏性呈极显著负相关($P<0.01$),在贮藏过程



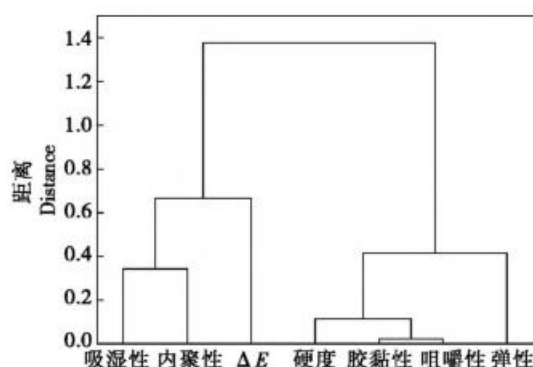
* 代表显著相关($P<0.05$); ** 代表极显著相关($P<0.01$)

图4 不同冻干果蔬品质指标的相关性分析
Figure 4 Correlation analysis of quality indexes of different freeze-dried fruits and vegetables

中,随着吸湿性的不断增加,内聚性逐渐增加,弹性、咀嚼性、硬度与胶黏性逐渐下降;物料冻干后组织结构越完整,孔隙结构破坏越小,孔径越大,吸湿性越强,硬度下降越明显。

2.7 聚类分析

对 4 种冻干果蔬贮藏过程中的品质指标进行 R 型聚类分析,由图 5(a)可知,当距离为 0.5 时,可将不同果蔬品质指标分为 3 类:第一类为吸湿性、内聚性;第二类为



(a) R型聚类分析谱系图

ΔE ;第三类为硬度、胶黏性、咀嚼性、弹性。对 4 种不同冻干果蔬进行 Q 型聚类分析,由图 5(b)可知,第一类为未吸湿的冻干马铃薯片、杏鲍菇片及苹果片,第二类为贮藏过程中吸湿 3 d 的冻干杏鲍菇片,第三类为吸湿后的冻干果蔬片(除贮藏 3 d 的冻干杏鲍菇片),第四类为未吸湿的冻干白萝卜片。对于不同果蔬来说,未吸湿与吸湿后的样品之间品质差异较为明显,未吸湿的冻干苹果片具有较高的 a^* 、 b^* 值以及较高硬度和咀嚼性,品质较好。



(b) Q型聚类分析谱系图

图 5 不同冻干果蔬聚类分析图

Figure 5 Cluster analysis diagram of different freeze-dried fruits and vegetables

3 结论

通过研究 4 种冷冻干燥后果蔬片的微观结构及在相同贮藏条件下的吸湿性、色泽与质构特性的变化,并对质构特性进行相关性分析与聚类分析,发现不同冻干果蔬的吸湿性对产品品质有较大的影响。新鲜果蔬的细胞结构较为完整,呈现规则空隙结构,冻干后,果蔬的组织结构出现不同程度的坍塌,其中不同 FD 样品细胞孔径大小依次为苹果>马铃薯>白萝卜>杏鲍菇;在贮藏过程中不同物料的吸湿性均不断增加,随着吸湿性的增加,物料色泽及质构特性也发生改变。综上,未吸湿与吸湿后的物料质构差距较大,吸湿现象影响着产品的品质特性。果蔬的吸湿性可能与本身含有的糖类物质有关,在贮藏过程中冻干果蔬糖类物质与组织内部的其他物质之间的协同作用对其吸湿性的影响机理还有待进一步的探讨。

参考文献

- [1] 余淑娴,郝晓霞,罗明.真空冷冻干燥技术及其应用[J].食品科技,2007(10):22-25.
YU Shu-xian, HAO Xiao-xia, LUO Ming. The vacuum freeze-drying technology and its applications[J]. Food Science and Technology, 2007(10): 22-25.
- [2] MERIVAARA A, ZINI J, KOIVUNOTKO E, et al. Preservation of biomaterials and cells by freeze drying: Change of paradigm[J]. Journal of Controlled Release: Official Journal of the Controlled

Release Society, 2021, 336: 480-498.

- [3] 周鸣谦,刘春泉,李大婧.不同干燥方式对莲子品质的影响[J].食品科学,2016,37(9):98-104.
ZHOU Ming-qian, LIU Chun-quan, LI Da-jing. Effects of different drying methods on the quality of lotus seeds[J]. Food Science, 2016, 37(9): 98-104.
- [4] 薛艾莲,夏晓霞,寇福兵,等.不同干燥方式联合熟化处理对板栗粉品质特性及微观结构的影响[J].食品科学,2022,43(9):62-70.
XUE Ai-lian, XIA Xiao-xia, KOU Fu-bing, et al. Effects of curing treatment combined with different drying methods on the quality characteristics and microstructure of chestnut flours [J]. Food Science, 2022, 43(9): 62-70.
- [5] 王莹莹,武晔秋,刘玥.不同干燥工艺对黄花菜的干燥效果影响分析[J/OL].保鲜与加工.(2021-12-21)[2022-04-09].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1330.S.20211020.1753.002.html>.
WANG Ying-ying, WU Ye-qiu, LIU Yue. Analysis of influence of different drying processes on the drying effect of day lily[J/OL]. Storage and Process. (2021-12-21)[2022-04-29].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1330.S.20211020.1753.002.html>.
- [6] YAN Ma, WU Xing-zhuang, ZHANG Qi, et al. Key composition optimization of meat processed protein source by vacuum freeze-drying technology[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2018, 25(4): 724-732.
- [7] 乔晓玲,闫祝伟,张原飞,等.食品真空冷冻干燥技术研究进

- 展[J]. 食品科学, 2008(5): 469-474.
- QIAO Xiao-ling, YAN Zhu-wei, ZHANG Yuan-fei, et al. Research progress on food freeze-drying[J]. Food Science, 2008(5): 469-474.
- [8] LI Lin-lin, ZHANG Min, BIMAI C, et al. Effect of combined drying method on phytochemical components, antioxidant capacity and hygroscopicity of Huyou (*Citrus changshanensis*) fruit[J]. LWT, 2020, 123: 109102.
- [9] 李明娟, 张雅媛, 游向荣, 等. 不同干燥技术对核桃粕蛋白粉品质特性及微观结构的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(5): 92-98.
- LI Ming-juan, ZHANG Ya-yuan, YOU Xiang-rong, et al. Effects of different drying technologies on the quality characteristics and microstructure of walnut meal protein powder[J]. Food Science, 2021, 42(5): 92-98.
- [10] SOTS S, BUNYAK O. Study of moisture absorption of sweet corn grain of different fractions [J]. Zernovi Produkti Kombikorma, 2019, 19(1): 19-23.
- [11] 罗登林, 姚金格, 徐宝成, 等. 不同聚合度菊粉的吸附特性[J]. 食品科学, 2017, 38(1): 67-73.
- LUO Deng-lin, YAO Jin-ge, XU Bao-cheng, et al. Adsorption characteristic of inulins with different polymerization degrees[J]. Food Science, 2017, 38(1): 67-73.
- [12] 钟碧奎, 黄媛, 林锦铭, 等. 不同品种鱼胶的吸湿性及保湿性对比研究[J]. 现代食品, 2020(19): 164-168.
- ZHONG Bi-luan, HUANG Yuan, LIN Jin-ming, et al. Determination of components and analysis of hygroscopicity and moisture retention of fish gelatin products[J]. Modern Food, 2020(19): 164-168.
- [13] 何一成. 健康饮食事典[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2011: 90-91.
- HE Yi-cheng. Healthy eating code[M]. Beijing: China Textile & Apparel Press, 2011: 90-91.
- [14] 刘建平. 糖尿病吃什么速查[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2015: 70.
- LIU Jian-ping. What to eat for diabetes[M]. Beijing: China Textile & Apparel Press, 2015: 70.
- [15] GADANYA A M, ABUBAKAR M Y, MAIGARI F U, et al. Comparative analysis of nutrients content and characterization of oil from two varieties of tiger nut (*Cyperus esculentus*) [J]. Asian Journal of Research in Biochemistry, 2021, 8(1): 11-21.
- [16] 张懋. 生鲜食品保质干燥新技术理论与实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 127-130.
- ZHANG Min. Theory and practice of new technology for fresh food quality preservation and drying[M]. Beijing: Chemical Industrial Press, 2009: 127-130.
- [17] 冯明. 食品真空冷冻干燥技术在我国发展与对策探析[J]. 农业技术与设备, 2019, 10(2): 26, 28.
- FENG Ming. Analysis on the development and countermeasures of food vacuum freeze-drying technology in China[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2019, 10(2): 26, 28.
- [18] 杨佳琪. 果蔬干燥过程微观组织结构变化的实验研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2020: 21.
- YANG Jia-qi. Experimental study on changes in microstructure of fruits and vegetables during drying[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2020: 21.
- [19] 廉苗苗, 段续, 黄路路, 等. 猕猴桃片冻干—真空微波联合干燥过程中品质变化及收缩模型[J]. 食品与机械, 2020, 36(5): 140-145, 210.
- LIAN Miao-miao, DUAN Xu, HUANG Lue-lue, et al. Quality change and shrinkage model of kiwi during freeze drying and vacuum microwave combined drying[J]. Food & Machinery, 2020, 36(5): 140-145, 210.
- [20] 陈腊梅, 金鑫, 毕金峰, 等. 超声辅助糖液渗透处理对真空冷冻干燥桃脆片干制品品质及吸湿性的影响[J/OL]. 食品科学. (2021-08-16) [2022-04-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20210816.1140.012.html>.
- CHEN La-mei, JIN Xin, BI Jin-feng, et al. Effect of ultrasonic assisted sugar osmosis pretreatment on the quality and hygroscopicity of vacuum freeze dried peach chips [J]. Food Science. (2021-08-16) [2022-04-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20210816.1140.012.html>.
- [21] 姜佳惠. 草莓微波冻干过程及品质调控研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 10.
- JIANG Jia-hui. Study on microwave freeze-drying process and quality control of strawberry [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021: 10.
- [22] CLAUDIA K, HENNING G. Merits and limitations of dynamic vapor sorption studies on the morphology and physicochemical state of freeze-dried products[J]. Journal of Pharmaceutical Sciences, 2018, 107(8): 2 179-2 191.
- [23] 曹丽琴, 徐世美, 封顺, 等. 两性淀粉的取代度与吸湿保湿性能关系的研究[J]. 日用化学工业, 2004(2): 97-99.
- CAO Li-qin, XU Shi-mei, FENG Shun, et al. Study of relation between the degree of substitution of amphoteric starch and the ability of moisture absorption, moisture retention[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 2004(2): 97-99.
- [24] 杨宏志. 微细化马铃薯淀粉疏水亲脂化改性研究[J]. 粮油学报, 2015, 30(10): 11-14.
- YANG Hong-zhi. Modification of micronized potato starch by hydrophobic-lipophilic treatment[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(10): 11-14.
- [25] 夏晓霞, 薛艾莲, 寇福兵, 等. 冬枣粉吸湿的色泽、热力学特性及糖物质基础分析[J]. 食品科学. [2022-03-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20210928.0037.012.html>.
- XIA Xiao-xia, XUE Ai-lian, KOU Fu-bing, et al. Analysis of moisture absorption color, thermodynamic properties and sugar material basis of winter jujube powder[J]. Food Science. [2022-03-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20210928.0037.012.html>.

(下转第 173 页)

- [25] FARID M M. Mathematical modeling of food processing[J]. *Contemporary Food Engineering*, 2010, 34(4): 22-42.
- [26] 张国琛, 李莎, 张倩, 等. 脱毒海星微波真空干燥工艺优化[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16): 289-295.
ZHANG Guo-chen, LI Sha, ZHANG Qian, et al. Optimization of microwave-vacuum drying for detoxified starfish[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(16): 289-295.
- [27] 张继驰. 金银花微波真空干燥特性及工艺优化的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015: 11-61.
ZHANG Ji-chi. Study on the microwave vacuum drying characteristics of *Lonicera japonica* and optimization of the drying technology [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015: 11-61.
- [28] 郑炯, 张甫生, 阙建全, 等. 竹笋热风薄层干燥特性及动力学分析[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(2): 112-116.
ZHENG Jiong, ZHANG Fu-sheng, KAN Jian-quan, et al. Analysis of hot-air thin layer drying characteristics and kinetics model of bamboo shoots[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2014, 30(2): 122-116.
- [29] 邹三全, 刘显茜, 赵振超, 等. 猕猴桃切片流化床干燥特性与干燥动力学模型研究[J]. *食品与机械*, 2021, 37(4): 150-156.
ZOU San-quan, LIU Xian-xi, ZHAO Zhen-chao, et al. Study on drying characteristics and drying kinetic model of kiwi fruit slices in fluidized bed[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(4): 150-156.
- [30] BEIGI Mohsen. Influence of drying air parameters on mass transfer characteristics of apple slices[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2016, 52(10): 2 213-2 221.
- [31] 曾雅, 刘云宏, 张嘉怡, 等. 远红外辐射温度对猕猴桃干燥水分迁移的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(8): 143-147, 188.
ZENG Ya, LIU Yun-hong, ZHANG Jia-yi, et al. Effects of far-infrared radiation temperature on the moisture transfer of kiwifruit slices[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(4): 150-156.
- [32] 屈展平, 任广跃, 李叶贝, 等. 燕麦添加量对马铃薯复合面条品质特性的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(1): 186-192.
QU Zhan-ping, REN Guang-yue, LI Ye-bei, et al. Effect of adding oat flour on quality characteristics of potato compound noodles[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(1): 186-192.
- [33] EBRAHIM Sadeghi, KAMYAR Movagharnejad, ALI Haghighi Asl. Mathematical modeling of infrared radiation thin-layer drying of pumpkin samples under natural and forced convection[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(12): 3-13.
- [34] 员冬玲, 耿文广, 杜锐, 等. 南美白对虾过热蒸汽干燥特性及干燥数学模型[J]. *食品科学*, 2020, 41(3): 62-67.
YUN Dong-ling, GENG Wen-guang, DU Rui, et al. Drying characteristics and modelling of *penaeus vannamei* during superheated steam drying[J]. *Food Science*, 2020, 41(3): 62-67.
- [35] 解国珍, 贾力, 王瑞祥, 等. 物料温度和几何尺寸对动态干燥偏差活化能的影响[J]. *干燥技术与设备*, 2006, 4(1): 28-31.
JIE Guo-zhen, JIA Li, WANG Rui-xiang, et al. Effect of material temperature and geometry size on activation energy of dynamic drying deviation[J]. *Drying Technology and Equipment*, 2006, 4(1): 28-31.
- [36] COSTA C F, CORRÊA P C, VANEGAS J, et al. Mathematical modeling and determination of thermodynamic properties of jabuticaba peel during the drying process[J]. *Rev Bras Eng Agric Ambient*, 2016, 20(6): 576-581.
- [37] NADI F, TZEMPELIKOS D. Vacuum drying of apples (cv. golden delicious): Drying characteristics, thermodynamic properties, and mass transfer parameters[J]. *Heat & Mass Transfer*, 2018(4): 1-14.
- (上接第 165 页)
- [26] GOZTEPE B, KAYACAN S, BOZKURT F, et al. Drying kinetics, total bioactive compounds, antioxidant activity, phenolic profile, lycopene and β -carotene content and color quality of Rosehip dehydrated by different methods[J]. *LWT*, 2022, 153: 112476.
- [27] FEDERICA T, ANNA L. Recent advances in controlling polyphenol oxidase activity of fruit and vegetable products[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2018, 50: 73-83.
- [28] 邓媛元, 汤琴, 张瑞芬, 等. 不同干燥方式对苦瓜营养与品质特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(2): 362-371.
DENG Yuan-yuan, TANG Qin, ZHANG Rui-fen, et al. Effects of different drying methods on nutritional and physical properties of *momordica charantia*[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2017, 50(2): 362-371.
- [29] 方长发, 乔方, 黄略略, 等. 不同贮藏条件对冻干荔枝色泽的影响[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(16): 335-337, 382.
FANG Chang-fa, QIAO Fang, HUANG Lue-lue, et al. Effects of different storage conditions on freeze-dried litchi pulp color[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(16): 335-337, 382.
- [30] DARICI M, SÜFER Ö, SIMSEK M. Determination of microwave drying and rehydration kinetics of green peppers with the bioactive and textural properties[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2021, 44(8): e13755.
- [31] HU Li-na, BI Jin-feng, JIN Xin, et al. Study on the rehydration quality improvement of shiitake mushroom by combined drying methods[J]. *Foods*, 2021, 10(4): 769-769.
- [32] PENG Jing, LU Lu, ZHU Ke-xue, et al. Effect of rehydration on textural properties, oral behavior, kinetics and water state of textured wheat gluten[J]. *Food Chemistry*, 2021, 376: 131934.
- [33] 李瑞杰, 张慧. 不同干燥方式对胡萝卜片吸湿性及品质的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2010, 29(3): 342-349.
LI Rui-jie, ZHANG Min. Drying methods affect the quality and hygroscopic capacity of carrot chips[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2010, 29(3): 342-349.