

多维度表征渗透脱水组合干燥桃脆片的质构特性

张嗣伟^{1,2}, 吕健¹, 白岚莎¹, 钟耀广², 毕金峰^{1*}

(¹中国农业科学院农产品加工研究所 农业农村部农产品加工重点实验室 北京 100193

²上海海洋大学食品学院 上海 201306)

摘要 为解析糖液渗透脱水组合干燥桃脆片质构品质的差异性,以桃为试材,采用两种渗透糖液(蔗糖和低聚异麦芽糖)对桃片进行渗透脱水预处理,之后分别组合热风干燥、真空冷冻干燥和压差闪蒸干燥制备桃脆片。多角度追踪分析不同渗透脱水组合干燥桃脆片宏观质地和微观结构方面的差异性。试验结果表明:渗透脱水预处理中糖分子渗入原料组织均能诱导原料细胞出现一定程度的坍塌和破损,同时糖分子的渗入增强了组织固化,使产品硬度增加了 9.03%~158.98%。基于各干燥技术的特点分析,渗透脱水预处理使真空冷冻干燥脆片体积减小,而显著促进热风干燥和压差闪蒸干燥桃脆片皱缩度降低至 0.724~0.798 和 0.436~0.570,同时增加脆片表面积,降低吸光性,改善产品色泽。相关性分子表明,硬度与固形物增加量(SG)呈现正相关,表明渗透脱水能够显著影响干制桃脆片的质构特性。此外,本研究所选用的质构评价指标之间均呈现一定的相关性。采用多角度进行渗透脱水组合干燥桃脆片的质构品质分析,为揭示桃脆片质构形成机制提供理论依据。

关键词 桃脆片; 渗透脱水组合干燥; 蔗糖; 低聚异麦芽糖; 质构

文章编号 1009-7848(2023)09-0266-10 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2023.09.028

渗透脱水组合干燥作为一种重要的果蔬加工技术,可以有效提高果蔬原料的附加值。其中,渗透脱水多作为果蔬干燥的预处理方式,是将果蔬原料放入高渗透压溶液中,通过原料与渗透液之间的传质作用,去除部分水分的过程^[1]。果蔬(尤其是水果)渗透脱水中渗透溶质多以蔗糖为主,其次为葡萄糖、果糖、糖浆等物质。近年来,低聚糖以及多元糖醇类(木糖醇、赤藓糖醇等)物质,因低热量,难以被胃肠消化吸收,基本对人体血糖/血脂无显著影响,逐渐被应用于干制果蔬加工中^[2-4]。研究发现,低聚糖和多元醇具有与蔗糖相似,甚至更好的渗透脱水效果,并能够显著改善干制果蔬产品质构等品质特性^[5]。

质构特性是干制果蔬的重要品质评价指标,也是决定产品可接受性的关键质量属性之一。渗透脱水组合干燥能有效改善单一干燥方式引起的产品皱缩等质构问题。糖液渗透脱水有助于增强干制苹果表面的机械稳定性,同时有效抑制苹果片的皱缩度^[6]。蔗糖分子渗入草莓果肉内部,能有效抑制草莓在烘箱干燥中的组织塌陷,更好地保

留草莓的力学和结构特性,然而干燥加工使草莓组织结构完整性遭到破坏,使其复水性降低^[7]。渗透脱水预处理中水苏糖渗入苹果原料组织,一方面填充入压差闪蒸干燥过程中形成的孔隙中,改变孔隙的均匀度与致密性;另一方面渗入的水苏糖可能与细胞壁组分作用,诱导原料组织的黏弹性和可塑性增加,使苹果脆片宏观表现出良好的硬度和脆度^[8]。

目前,果蔬干制品质构特性的评价主要从宏观和微观两个维度,利用感官评价和仪器分析两种手段进行,其中,仪器分析(如质构仪等)因操作方便、结果重复性高等优点而被广泛应用于干制品质构的分析中。大多数研究应用质构仪测得的硬度、脆度等指标进行干制果蔬质构特性评价,并不能全面反映干制品质构特性,因此多角度、多维度综合评价干制品质构特性,对改善干制果蔬品质具有重要意义。孙希云等^[9]在对真空冷冻干燥组合膨化干燥银杏脆粒质构品质的研究中发现银杏脆粒质构品质与组合干燥过程中孔隙、微观结构的变化密切相关。基于以上分析,孔隙率、孔隙结构等微观组织结构是干制果蔬质构形成的基础,复水性、吸水性、皱缩度等宏观特性也适用于表征干制果蔬的质构特性。综上,形成一套适用的质构特性综合评价指标体系具有重要的研究意义。本

收稿日期: 2022-09-25

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(32001718)

第一作者: 张嗣伟,男,硕士生

通信作者: 毕金峰 E-mail: bjfcaas@126.com

研究以桃为原料,分别选用蔗糖和低聚异麦芽糖为渗透溶质,联合热风干燥、真空冷冻干燥、压差闪蒸干燥制备桃脆片,多角度综合分析不同渗透脱水组合干燥桃脆片的质构特性,以期为提升桃脆片产品品质,增加桃产品商业化价值提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

桃原料由北京市农林科学院林业果树研究所提供,要求果实颜色、大小相近,成熟度基本一致,无明显病虫害和机械损伤。原料运回实验室后贮藏于 4℃冷库。原料水分含量为 89.6%,可溶性固形物含量为 7.5°Brix。

蔗糖,低聚异麦芽糖(食品级),北京萃锋科技有限公司。

1.2 设备与仪器

CL50 蔬菜水果切片机,法国 Robot Coupe 公司;HH-4B 恒温水浴锅,常州荣华仪器制造有限公司;DHA-9123A 电热鼓风干燥箱,上海景宏实验仪器有限公司;LGJ-10E 型真空冷冻干燥机,北京四环科学仪器厂有限公司;50t/y 果蔬压差膨化机,天津勤德新材料技术有限公司;LC-DRT-94B 数显折射仪,上海力辰邦西仪器科技有限公司;Nikon D700 数码相机,尼康 Nikon 公司;1.5.5.0 电子眼色彩分析系统,美国 Lens Eye-NET 公司;S-570 型扫描电子显微镜,日本日立公司;TA.HD plus 物性测试仪,英国 Stable Micro System 公司;Volume Measuring Instrument 300 食品体积测定仪,英国 Stable Micro System 公司;OSMOMAT 3000 渗透压仪,德国 Gonotec GmbH 公司。

1.3 方法

1.3.1 渗透脱水预处理 (Osmotic dehydration, OD) 桃经清洗、去皮、去核后切分成 10 mm 厚、形状大小一致的扇形。将桃片分别置于 30°Brix (数显折射仪校正)的蔗糖(Sucrose, SUC)和低聚异麦芽糖(Isomaltose, IMO)溶液中进行渗透脱水处理。其中蔗糖溶液的渗透压为 1 836 mOsm/kg,低聚异麦芽糖溶液的渗透压为 1 258 mOsm/kg。设定渗透温度为 40℃,料液比为 1:5(质量比),渗透时间为 180 min。渗透脱水结束后,将桃片取出,用蒸馏水清洗桃片表面 2~3 次,并用吸水纸除去表

面多余水分。

1.3.2 热风干燥(Hot air drying, HAD) 将渗透脱水处理后的样品(100±2.0)g 置于热风干燥箱中,设定温度为 80℃,风速为 1.5 m/s。干燥至样品水分含量低于 7%(湿基)时结束干燥。

1.3.3 真空冷冻干燥(Vacuum freeze drying, FD) 将渗透脱水处理后的样品(100±2.0)g 在-80℃条件下预冻 12 h 后,置于真空冷冻干燥机中,设置冷阱温度为-70℃,真空度约为 1 Pa。干燥至样品水分含量低于 7%(湿基)时结束干燥。

1.3.4 压差闪蒸干燥 (Instant controlled pressure drop drying, DIC) 将渗透脱水处理后的样品(100±2.0)g 置于热风干燥箱中进行预干燥,设定温度为 80℃,风速为 1.5 m/s,预干燥至样品水分含量为 30%±2%(湿基)取出,置于 4℃冰箱均湿 12 h。经均湿后的样品置于压差闪蒸干燥设备中,设定闪蒸温度 95℃,停滞时间 15 min,抽空温度 75℃,干燥至样品水分含量低于 7%(湿基)时结束干燥。

1.3.5 测试指标

1.3.5.1 水分含量 采用 GB 5009.3-2016 中直接干燥法测定^[10]。

1.3.5.2 渗透特性 采用水分损失量(Water loss, WL)和固形物增加量(Solid gain, SG)评价桃片渗透脱水特性,计算公式如下^[11]:

$$WL(g/g) = \frac{(M_0 - m_0) - (M - m)}{M_0} \quad (1)$$

$$SG(g/g) = \frac{m - m_0}{M_0} \quad (2)$$

式中: M_0 ——桃片的初始质量,g; M ——桃片渗透后的质量,g; m_0 ——桃片的初始干质量,g; m ——桃片渗透后的干质量,g。

1.3.5.3 色泽 采用电子眼色彩分析系统测定鲜样及干燥后的桃片的亮度值 L^* 、红绿值 a^* 和黄蓝值 b^* ,并计算总色差值 ΔE 。计算公式如下^[12]:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L)^2 + (a^* - a)^2 + (b^* - b)^2} \quad (3)$$

式中: L 、 a 、 b ——分别代表鲜样的亮度、红度和蓝度; L^* 、 a^* 、 b^* ——分别表示桃脆片的亮度、红度和蓝度。

1.3.5.4 皱缩度 采用食品体积测定仪测定样品在干燥过程中的体积变化,并以皱缩度(Shrinkage

ratio, SR)进行表示。计算公式如下^[13]:

$$SR = \frac{V_0 - V}{V_0} \quad (4)$$

式中: V_0 ——鲜样的体积; V ——桃脆片的体积。

1.3.5.5 硬脆度 采用质构仪测定样品的硬度和脆度。采用 P/0.25s 测试探头, 选择探头模式为穿刺模式, 设定前期、中期和后期测试速度分别为 1 mm/s、1 mm/s 和 2 mm/s, 触发力为 10 g, 穿刺距离为 10 mm。其中, 测试结果中产生的峰的最高值定义为硬度, 单位为 g; 峰的个数定义为脆度, 单位为个^[14]。

1.3.5.6 孔隙分布 采用压汞法测定干燥样品的孔隙率及孔隙分布^[15], 设定压汞仪的测定压力范围为 1 kPa~420 MPa。样品孔径分布计算如下所示:

$$P = \frac{4\gamma\cos\theta}{d} \quad (5)$$

式中: P ——在真空物料室中施加的外部压力, kPa; γ ——汞的表面张力 (0.48 N/m); θ ——孔表面与汞之间不完全润湿的接触角 (130°); d ——孔的直径, nm。通过侵入体积百分比与孔径的关系来表征孔隙分布。

1.3.5.7 复水比 参考张鹏飞等^[16]的方法, 在室温条件下将干燥桃脆片置于 100 mL 烧杯中, 按料液比 1:50 (m/V) 加入蒸馏水, 25 °C 恒温处理 120 min 后取出, 用吸水纸除去表面水分后称重。复水比 (Rehydration ratio, RR) 计算如下:

$$RR = \frac{m_1}{m_0} \quad (6)$$

式中: m_1 ——复水后的样品质量, g; m_0 ——复水前的样品质量, g。

1.3.5.8 吸湿性 采用扩散皿静态称重测试法测定样品吸湿性, 以吸湿率进行表示^[16]。将放有桃脆片的样品瓶 (需进行预先恒重) 置于扩散皿室中 (相对湿度 75%), 密封后放入 25 °C 的恒温箱中进行吸湿性测定试验。分别于 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150 和 180 min 后测定样品质量变化。吸湿率计算如下:

$$H = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100 \quad (7)$$

式中: H ——样品的吸湿率, %; m_t ——吸湿后

的样品质量, g; m_0 ——吸湿前的样品质量, g。

1.3.5.9 微观结构 将取自不同干燥处理桃脆片断裂面的切片用导电胶固定于样品柱上, 进行喷金处理。利用扫描电镜于 150 倍下进行观察并拍照。

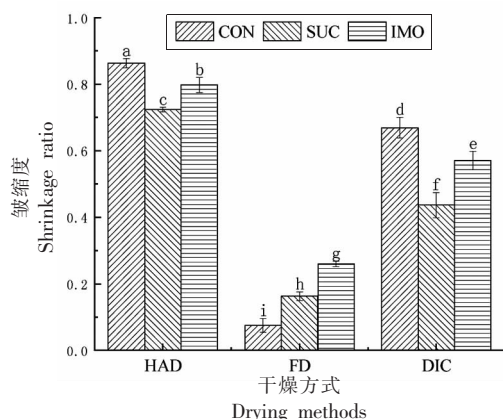
1.3.6 数据处理与分析 除硬脆度检测试验重复测定 10 次, 其余试验均重复测定 3 次, 结果以平均值±标准差表示。采用 SPSS 25.0 进行数据统计和方差分析, 采用 Origin 2021 进行数据绘图。用 Duncan 多重法进行显著性差异比较, 显著性差异水平 $P < 0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 不同渗透脱水组合干燥桃脆片皱缩度

不同渗透脱水组合干燥桃脆片皱缩度变化如图 1 所示。相比较 IMO 组, 经 SUC 渗透脱水预处理的桃脆片表现出更小的皱缩度。一方面可能是由于蔗糖的低分子质量产生的较高的渗透压 (1 836 mOsm/kg), 更利于蔗糖分子更多的渗透至细胞组织内, 对细胞骨架产生更大的支撑力。另一方面 IMO 处理组在渗透脱水预处理后表现出较高的水分散失量 (0.150±0.09) g/g 和较低的固形物获得量 (0.072±0.004) g/g, 进而诱导样品表现出更大的皱缩度; 此外 IMO 分子中更多的羟基基团可能会与原料中的组分形成氢键, 进而限制组织结构在后期干燥过程中的伸展。

OD 预处理能够有效改善 HAD 和 DIC 桃脆片的皱缩度。经渗透脱水预处理, 原料中水分逸出而发生皱缩^[17]; 同时糖分子填充至桃组织细胞内的空隙中, 改善了细胞骨架在干燥过程中的机械特性, 进而有效减轻了 HAD 处理过程中因加工温度高于玻璃态转化温度而导致的结构坍塌^[18-19]。糖分子的渗入有利于 DIC 桃片体积膨胀, 这与 Lyu 等^[20]研究结果相一致。相比较 HAD, DIC 处理过程中的瞬时降压过程使桃片内部的水分瞬间升温气化、减压膨胀, 形成多孔状结构, 从而表现出较低的皱缩度^[21]。通常认为 OD-FD 果蔬脆片的皱缩主要发生在渗透脱水阶段。FD 处理过程中, 样品始终处于玻璃态, 结构稳定, 形变能力很小, 皱缩度较低。



注:CON 表示未渗透脱水预处理;SUC 表示蔗糖渗透脱水预处理;IMO 表示低聚异麦芽糖渗透脱水预处理;小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

图 1 不同渗透脱水组合干燥中桃脆片皱缩度的变化
Fig.1 Changes of shrinkage ratio of peach chips prepared by osmotic dehydration combined with drying

表 1 不同渗透脱水组合干燥中桃脆片硬脆度和孔隙率的变化

Table 1 Changes of hardness, crispness and porosity of peach chips prepared by osmotic dehydration combined with drying

干燥方式	组别	硬度/g	脆度/个	孔隙率/%
HAD	CON	2 249.1 ± 228.2 ^{gh}	7 ± 1 ^e	36.90
	SUC	3 788.4 ± 182.6 ^e	5 ± 1 ^e	32.71
	IMO	2 528.0 ± 292.6 ^g	4 ± 1 ^e	21.45
FD	CON	1 973.1 ± 108.0 ^h	108 ± 11 ^{ab}	81.71
	SUC	5 110.0 ± 107.0 ^b	107 ± 14 ^{ab}	77.26
	IMO	3 107.0 ± 227.9 ^f	113 ± 10 ^a	87.48
DIC	CON	4 184.9 ± 172.7 ^d	98 ± 8 ^{bc}	78.51
	SUC	6 179.2 ± 134.7 ^a	77 ± 14 ^d	70.87
	IMO	4 562.6 ± 214.3 ^c	92 ± 9 ^c	73.75

注:同一列不同字母表示不同处理之间存在显著差异($P<0.05$),下同。

2.3 不同渗透脱水组合干燥桃脆片孔隙率和孔隙分布

不同渗透脱水组合干燥桃脆片孔隙率如表 2 所示。HAD 过程中受高温高风速影响,热量通过物料表面传入物料内部,水分受热迁移至表面蒸发,促使毛细管张力增加大于细胞壁横纹抗拉强度,造成内部结构坍塌,诱发物料体积发生严重皱缩^[22];随着干燥时间的延长,物料内部组织弹性丧失,致密性增加,呈现出最低的孔隙率。DIC 的热风预干燥环节一方面使物料部分水分散失为闪蒸提供了适度的气化动力,另一方面预干燥过程中

2.2 不同渗透脱水组合干燥桃脆片硬度、脆度

如表 1 所示,不同渗透脱水组合干燥方式桃片硬度、脆度呈现出显著差异性($P<0.05$)。OD 预处理能够显著增加桃脆片的硬度,可能是由于渗入桃片组织内的糖分子羟基与水分子或其它组分发生交互作用形成氢键,导致原料组织内部结构致密、弹性损失;此外,部分糖分子附着于样品表面,在干燥加热条件可能发生结晶现象,诱导原料表面硬壳现象的发生^[11],使其硬度增加。相比较 I-IMO,SUC 更多的渗入使原料组织更为致密,进而 SUC 渗透脱水处理组表现出更为显著的硬度增加现象。OD-FD 组桃脆片表现出最高的脆度值,其次为 OD-DIC 组,OD-HAD 组脆度值最低,这与其孔隙率变化趋势相一致。FD 使物料中冻结的自由水迅速升华散失,保持了物料的结构和形态,且形成多孔结构,有利于产品良好脆度的形成。

物料表面形成了一定厚度的干燥层,为产品体积膨胀提供了固定和支撑作用;此外闪蒸过程依靠气体的膨胀力以及热力作用诱导组织细胞壁中高分子物质结构变性,使样品内部形成较为均匀的蜂窝状结构,后期的真空干燥过程,物料处于较低温度负压状态,利于孔隙结构的保持,进而呈现出良好的孔隙结构,表现为较高的孔隙率^[23]。FD 中样品处于冷冻状态,水分由冰直接升华,不产生毛细管张力,能较大程度的保持细胞壁形态,避免细胞壁内部孔隙结构发生坍塌,进而保持了最高的孔隙率。相比较 SUC 分子,IMO 分子的渗入更有

利于桃脆片孔隙率的保持,可能是由于大量的蔗糖分子渗入桃片组织,一方面蔗糖并不均匀的填充在物料的细胞组织中,另一方面蔗糖分子与物料中的水分子等组分发生交互作用,使内部结构更为致密,不利于孔隙的形成。

由图2可知,不同渗透脱水组合干燥的桃脆片具有相似的孔径分布范围5 nm至370 000 nm,但不同干燥方式桃脆片在主要孔径分布范围及所

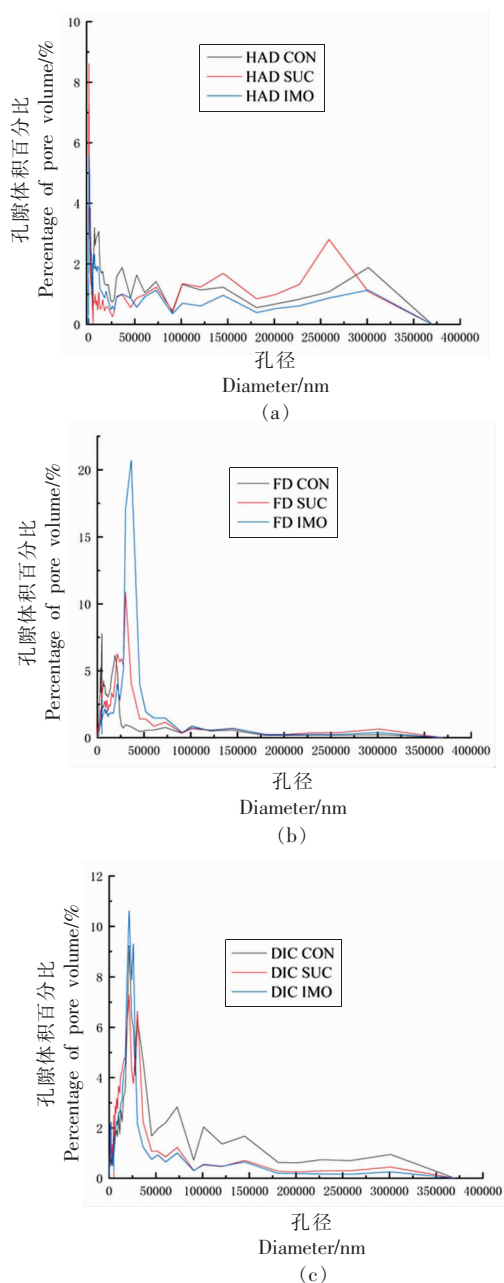
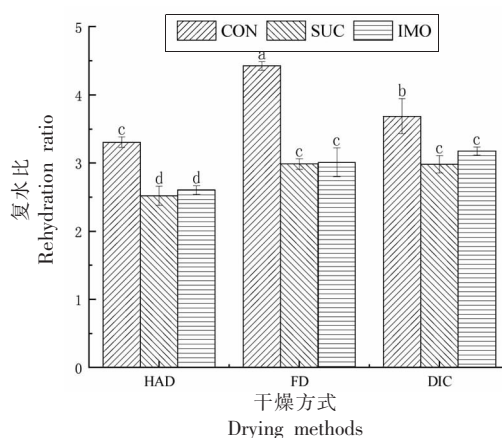


图2 不同渗透脱水组合干燥桃脆片的孔隙分布
Fig.2 Pore distribution of peach chips prepared by osmotic dehydration combined with drying

占孔隙体积百分比上存在显著差异。HAD组中,桃脆片孔径分布集中在5 nm至5 000 nm范围内,其孔隙体积所占百分比较小,同时可以发现HAD桃脆片的孔隙数量较少,以小孔隙为主,同时存在少量较大孔径的孔隙;FD组中,桃脆片的孔径分布较为集中,主要分布在500 nm至90 000 nm之间,且孔隙所占的体积百分比较大,表明FD桃脆片的孔隙结构分布较均一。DIC组中,桃脆片的主要孔径分布与FD组分布范围较为一致(500 nm~90 000 nm)范围内,但所占比例小于FD桃脆片;此外桃脆片在90 000~180 000 nm孔径范围内也存在一定比例的孔隙,表明压差闪蒸干燥促进了桃脆片大孔隙的形成。与对照组相比,OD预处理降低了FD桃脆片孔径分布的集中性,促进了桃脆片更大孔隙的形成;使DIC桃脆片的孔径分布更为集中,孔隙大小更为均一;但对HAD桃脆片的孔径分布的影响较小。

2.4 不同渗透脱水组合干燥桃脆片复水比

不同渗透脱水组合干燥桃脆片复水比呈现出显著差异(图3),其中无渗透脱水预处理桃脆片的复水能力表现为FD>DIC>HAD($P<0.05$)。OD预处理会显著降低桃脆片的复水比,其中OD-HAD组表现出最低的复水性,但不同糖液预处理并未显著改变各组内桃脆片的复水性。OD-FD组和OD-DIC组桃脆片均表现出较高的复水性,且二



注:CON表示未渗透脱水预处理;SUC表示蔗糖渗透脱水预处理;IMO表示低聚异麦芽糖渗透脱水预处理;小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

图3 不同渗透脱水组合干燥中桃脆片复水比的变化
Fig.3 Changes of rehydration ratio of peach chips prepared by osmotic dehydration combined with drying

者之间未出现显著性差异。干燥过程中,因温度、风速等作用条件不同,样品内水分等传热传质速率不同,诱导样品出现不同程度的不可逆损伤和错位,导致组织结构完整性受到不同程度的破坏,微观结构表现为差异性的坍塌致密结构、毛细管萎缩、亲水性降低等,宏观表现为样品复水能力降低^[24]。HAD 以热空气为干燥介质,使物料与介质之间产生温度和湿度差,通过对流循环的方式将物料中的水分蒸发汽化,加之较长的干燥周期,物料内部致密结构以及表面的硬化层都会阻碍水分吸收,导致较低的复水性^[25];FD 因其低温和低于水三相点的压力使产品细胞结构保留较为完好,因此产品具有较高的孔隙率及较为均匀的孔隙分布,有利于水分扩散进入组织内部。DIC 减轻了物料因预干燥形成的表面硬化层,同时赋予产品较为均匀的扩大的孔隙结构,有利于水分在产品内的扩散与吸收,表现出良好的复水性。

OD 处理过程中,糖分子黏附于物料表面形成结晶层阻碍了复水过程中水分的扩散。此外,OD 预处理造成桃片组织结构破坏,如细胞坍塌、细胞壁破裂等也可能是导致产品复水能力下降的原因^[26]。

2.5 不同渗透脱水组合干燥桃脆片吸湿性

不同渗透脱水组合干燥桃脆片吸湿率如图 4 所示。干燥桃片的吸湿性与其内部孔隙结构有着密切的联系,多孔结构会增加桃片组织中亲水基团与空气中水分子的接触面积,增加桃片的吸湿性^[27]。随着试验时间的增加,桃片吸湿率逐渐增

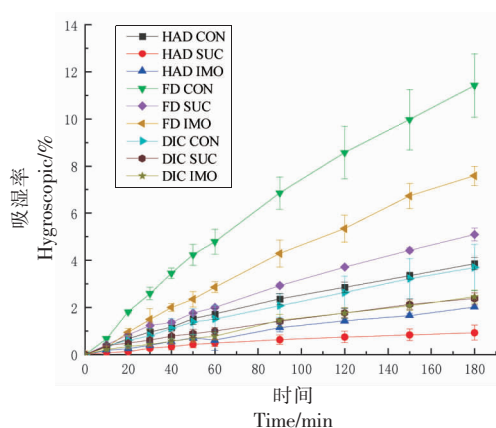


图 4 不同渗透脱水组合干燥中桃片吸湿性的变化

Fig.4 Changes of hygroscopic of peach chips prepared by osmotic dehydration combined with drying

大,其中 FD 组(含渗透预处理组)表现出最大的吸湿性,其次为 HAD 对照组和 DIC 对照组。OD 预处理显著降低了桃脆片的吸湿率,其中 HAD 组和 FD 组中蔗糖分子的渗入更利于产品吸湿性的降低。在 DIC 处理中,SUC 渗透处理桃脆片的吸湿率与 IMO 渗透处理相近,这可能与孔隙率相差无几有关。糖的渗入使桃片组织中亲水基团与糖组分中羟基作用形成氢键,降低了亲水基团与空气中水分子的接触,进而抑制了桃脆片在空气中的吸湿作用。

2.6 不同渗透脱水组合干燥桃脆片色泽

由表 2 可知,不同组合干燥方式桃脆片亮度(L^*)、红度(a^*)、黄度(b^*)和色差值(ΔE)呈现出显著差异($P<0.05$)。相比较新鲜桃片,除 FD 组桃脆

表 2 不同渗透脱水组合干燥中桃脆片色泽的变化

Table 2 Color changes of peach chips in different osmotic dehydration combination with drying

干燥方式	组别	L^*	a^*	b^*	ΔE
鲜样		39.12 ± 2.33^a	21.49 ± 1.91^a	25.52 ± 2.04^a	
HAD	CON	20.59 ± 1.55^d	11.47 ± 2.35^d	8.20 ± 2.17^e	29.36 ± 2.06^a
	SUC	24.00 ± 3.58^c	14.53 ± 1.22^b	12.37 ± 2.38^{cd}	16.35 ± 1.04^{cd}
	IMO	20.19 ± 0.58^d	12.10 ± 1.09^{cd}	8.48 ± 0.96^e	18.39 ± 1.43^c
FD	CON	36.63 ± 1.15^a	14.06 ± 0.82^{bc}	15.16 ± 1.15^{bc}	12.17 ± 1.91^f
	SUC	38.82 ± 1.39^a	11.57 ± 0.28^d	12.02 ± 0.61^d	13.82 ± 1.21^{ef}
	IMO	38.97 ± 0.57^a	12.04 ± 0.49^{cd}	13.81 ± 1.13^{bcd}	15.11 ± 0.60^{de}
DIC	CON	25.41 ± 0.86^c	16.24 ± 0.31^b	13.35 ± 0.72^{bcd}	26.45 ± 1.80^b
	SUC	30.86 ± 1.85^b	15.47 ± 0.64^b	16.11 ± 1.77^b	12.09 ± 1.39^f
	IMO	25.67 ± 0.96^c	14.78 ± 0.33^b	12.38 ± 0.95^{cd}	17.65 ± 0.82^{cd}

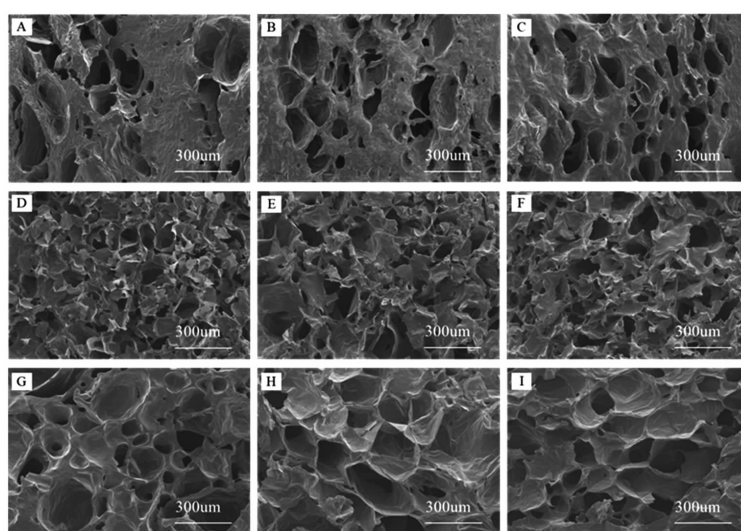
注:同一列不同字母表示不同处理之间存在显著差异($P<0.05$)。

片 L^* 值无显著变化外,其它干燥处理均使桃脆片色泽值显著降低。与其它两种干燥方式相比,FD桃脆片 ΔE 值最小,其次是 DIC,最后是 HAD。HAD 处理过程中,桃片长时间暴露在高温空气中会发生酶促反应、色素类物质的降解和褐变产物的积累,导致脆片亮度显著降低;此外,HAD 诱导桃片皱缩严重,表面积减小,褐变产物等更易累积在凸起部位,表现为更严重的褐变现象。FD 的低温和真空条件较好的减缓了酶促与褐变反应,同时 FD 制备得到的桃脆片体积未出现显著皱缩,呈色物质可以较为均匀的分布在物料表面,进而表现出良好的色泽品质。DIC 后端相对较短的干燥时间及真空处理环节,减缓了褐变反应的发生;此外,瞬间压差使桃片体积膨胀,表面吸光性减弱,亮度增加。

经 OD 预处理后,HAD 组和 DIC 组桃脆片 ΔE 值显著低于对照组 ($P < 0.05$),表明 OD 预处理能减小桃片在干燥过程中的色泽变化,改善产品的色泽。OD 处理使桃片表面在干燥过程中形成糖结晶层,抑制了褐变物质在桃片表面累积,并使原料表面变得更加光滑,吸光性降低,宏观表现为良好的色泽品质^[28]。此外,OD 过程中,糖分子的渗入可促进桃片细胞结构中氧气等气体的排出,减缓了氧化褐变反应,导致更小的色泽变化^[29],这可能是造成 SUC 渗透处理的桃脆片 ΔE 值更小的原因。

2.7 不同渗透脱水组合干燥桃脆片微观结构

图 5 显示了渗透脱水组合干燥桃脆片的内部微观结构。干燥既能诱导水分流失,同时也会使物料内部结构发生变化。HAD 样品组织内部变化最为剧烈,细胞破裂、组织坍塌、结构致密、孔隙结构不均匀(图 5A),但是 OD 预处理并未显著改善 HAD 产品的孔隙结构。FD 桃脆片内部呈现出松散排列、较均一的多孔状结构(图 5D),同时伴有细胞破裂的现象,这主要与预冻过程中冰晶刺破细胞有关。OD 预处理显著改变了 FD 桃脆片均匀的孔隙结构,其中蔗糖分子在物料组织内的大量扩散,诱导组织细胞发生破裂,局部出现较为致密的组织结构(图 5E),进而使桃脆片表现出较大的硬度;IMO 的渗入使桃片内部结构呈现出更多的不均匀的孔隙结构,这可能是导致产品出现较高脆度和孔隙率的原因。在压差闪蒸干燥闪蒸环节,罐内压力从常压瞬时变为负压,桃片内部水分瞬间汽化蒸发,诱导物料组织产生较大的孔隙结构(图 5G),同时也可以观察到细胞结构存在一定数量的塌陷和皱缩;OD 预处理显著改善了 DIC 桃脆片的内部结构,组织内少量细胞出现破裂现象,且均呈现出较为均匀大孔隙的蜂窝状结构。适量糖液的渗入,对桃片内部骨架结构起到一定的支撑作用,有利于减小桃片在预干燥过程中的皱缩度,为后续压差闪蒸干燥过程中孔状结构的形成



注:HAD:A-C,FD:D-F,DIC:G-I,从左到右分别为 CON、SUC 和 IMO。

图 5 不同渗透脱水组合干燥中桃脆片微观结构的变化

Fig.5 Changes of microstructure of peach chips prepared by osmotic dehydration combined with drying

提供一定的动力和支撑。

2.8 桃脆片品质相关性

图 6 显示了本研究中用于表征桃脆片质地特性指标间的相关性。硬度与固形物增量(SG)呈显著正相关, ΔE 、吸湿率及复水比与 SG 呈显著负相关。脆度与孔隙率呈显著正相关, 与 ΔE 、皱缩度呈显著负相关。此外, 皱缩度与孔隙率、吸湿率、复水比均呈现显著负相关; 孔隙率与吸湿率、复水比呈现显著正相关; 吸湿性与皱缩度呈现显著负相关, 与孔隙率呈现正相关。相关性分析结果表明, 渗透脱水预处理过程中糖分子的渗入会显著影响干制桃脆片的质构品质, 同时不同质构特性指标之间存在显著相关性。

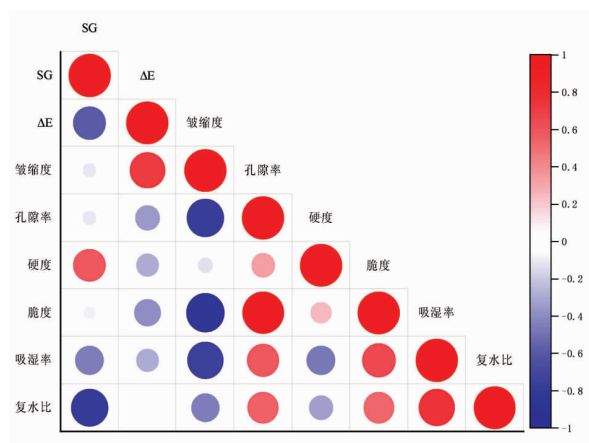


图 6 桃脆片品质间相关性分析

Fig.6 Correlation analysis of peach chips quality

3 结论

本文探究了糖液(蔗糖、低聚异麦芽糖)渗透脱水组合不同干燥方式(热风、真空冷冻和压差闪蒸干燥)桃脆片质构特性, 并从质构变化的角度分析了桃脆片色泽的差异性。试验结果表明: 糖液渗透脱水处理过程中糖分子渗入至桃片组织内部, 会一定程度破坏原料均一的细胞结构, 表现为干制桃脆片孔隙结构发生改变, 但并未显著影响产品的孔隙率。扫描电镜结果发现, 渗透脱水预处理能够促进压差闪蒸干燥桃脆片形成典型的蜂窝状孔隙结构, 宏观表现为桃脆片脆度改善。蔗糖渗透脱水组合干燥制备得到的桃脆片硬度增加显著, 可能是由于蔗糖分子较小的分子质量使其能够更大量的进入桃片组织内部, 对组织结构起到了更

强的固化作用。复水性和吸湿性测定结果表明, 渗透脱水预处理会显著降低不同干燥桃脆片的复水能力, 显著增强桃脆片的抑制吸湿作用。此外, 糖分子在桃片组织中的迁移和扩散, 一方面可能会诱导桃片表面形成糖结晶层, 另一方面降低了桃片的皱缩度, 增加了表面的平滑度和表面积, 进而呈现出改善色泽的作用。相关性分析发现, 本研究中所选用的质构评价指标均呈现一定的相关性。多角度分析桃脆片宏观质构的差异性, 能够更好的解析渗透脱水预处理对干制果蔬质地的影响机制, 优选效果更为理想的低聚糖或蔗糖的替代糖, 也可更好地调控或改善桃脆片的质地品质提供理论参考。

参 考 文 献

- [1] YADAV A K, SINGH S V. Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review[J]. Journal of Food Science and Technology -Mysore, 2014, 51(9): 1654-1673.
- [2] LAZOU A E, DERMESONLOUGLOU E K, GI-ANNAKOUROU M C. Modeling and evaluation of the osmotic pretreatment of tomatoes (*S. lycopersicum*) with alternative sweeteners for the production of candied products[J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(6): 948-961.
- [3] KATSOUFI S, LAZOU A E, GIANNAKOUROU M C, et al. Air drying kinetics and quality characteristics of osmodehydrated-candied pumpkins using alternative sweeteners[J]. Drying Technology, 2021, 39(16): 2194-2205.
- [4] ASSIS F R, MORAIS R M S C, MORAIS A M M B. Osmotic dehydration with sorbitol combined with hot air convective drying of apple cubes[J]. Journal of Food Science and Technology -Mysore, 2017, 54(10): 3152-3160.
- [5] KOWALSKA H, WOZNIAK L, MASIARZ E, et al. The impact of using polyols as osmotic agents on mass exchange during osmotic dehydration and their content in osmodehydrated and dried apples[J]. Drying Technol, 2020, 38(12): 1620-1631.
- [6] ONAL B, ADILETTA G, CRESCITELLI A, et al. Optimization of hot air drying temperature combined with pre-treatment to improve physico-chemical and

- nutritional quality of 'Annurca' apple[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2019, 115: 87-99.
- [7] PROSAPIO V, NORTON I. Influence of osmotic dehydration pre-treatment on oven drying and freeze drying performance[J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2017, 80: 401-408.
- [8] 肖敏, 易建勇, 毕金峰, 等. 水苏糖渗透对压差闪蒸联合干燥苹果片品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(8): 138-146.
- XIAO M, YI J Y, BI J F, et al. Influence of osmotic treatment using stachyose on qualities of apple chips dried by hot air coupled with instant controlled pressure drop[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(8): 138-146.
- [9] 孙希云, 刘春菊, 任晗慈, 等. 冷冻干燥联合膨化干燥工艺优化提高银杏脆粒酥脆质地[J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(6): 1565-1574.
- SUN X Y, LIU C J, REN H C, et al. Optimization of freeze drying combined with puffing drying process to improve crispy texture of ginkgo crisp granule[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 37(6): 1565-1574.
- [10] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB/T 5009.3-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Determination of moisture in foods: GB/T 5009.3-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [11] 张鹏飞, 吕健, 毕金峰, 等. 渗透脱水对变温压差膨化干燥桃片品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2017, 17(1): 69-76.
- ZHANG P F, LYU J, BI J F, et al. Effect of osmotic dehydration on quality of peach chips prepared by explosion puffing drying[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2017, 17(1): 69-76.
- [12] 马有川, 毕金峰, 易建勇, 等. 预冻对苹果片真空冷冻干燥特性及品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(18): 241-250.
- MA Y C, BI J F, YI J Y, et al. Effects of pre-freezing on the drying characteristics and quality parameters of freeze drying apple slices[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(18): 241-250.
- [13] LYU J, YI J, BI J, et al. Impacts of explosion puffing drying combined with hot-air and freeze drying on the quality of papaya chips[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2017, 13(2): 20160250.
- [14] YI J Y, LYU J, BI J F, et al. Hot air drying and freeze drying pre-treatments coupled to explosion puffing drying in terms of quality attributes of mango, pitaya, and papaya fruit chips[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017, 41(6): e13300.
- [15] 邱阳. 联合干燥对香菇复水后持水性的影响与工艺优化[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- QIU Y. The effect of combined drying on water holding capacity of rehydrated shiitake mushroom and process optimization[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- [16] 李瑞杰, 张慙. 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 R J, ZHANG M. Drying methods affect the quality and hygroscopic capacity of carrot chips[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2010, 29(3): 342-349.
- [17] BARAT J M, FITO P, CHIRALT A. Modeling of simultaneous mass transfer and structural changes in fruit tissues[J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 49(2/3): 77-85.
- [18] SAGAR V R, KUMAR S P. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review[J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2010, 47(1): 15-26.
- [19] 李慧, 胡小松, 汪致富. 樱桃番茄渗透预处理热风干燥特性研究[J]. *食品科技*, 2012, 37(4): 74-79.
- LI H, HU X S, WANG Z F. Properties of cherry tomatoes in osmotic dehydration followed by hot-air drying[J]. *Food Science and Technology*, 2012, 37(4): 74-79.
- [20] LYU J, YI J, BI J, et al. Effect of sucrose concentration of osmotic dehydration pretreatment on drying characteristics and texture of peach chips dried by infrared drying coupled with explosion puffing drying[J]. *Drying Technology*, 2017, 35(15): 1887-1896.
- [21] 毕金峰, 王雪媛, 周林燕, 等. 脉动压差闪蒸处理

- 对苹果片水分散失特性及品质影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 376–382.
- BI J F, WANG X Y, ZHOU L Y, et al. Effect of instant controlled pressure drop drying on water loss and quality in apple slices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(S2): 376–382.
- [22] 曹梦丹, 张雪霞, 任文庭, 等. 干燥方式对毛竹细胞壁孔隙结构的影响[J]. 林业工程学报, 2021, 6(6): 58–65.
- CAO M D, ZHANG X X, REN W T, et al. Effect of drying methods on the cell wall pore structure of *Phyllostachys edulis*[J]. Journal of Forestry Engineering, 2021, 6(6): 58–65.
- [23] LYU J, BI J, WANG F, et al. Recent developments and trends of instant controlled pressure drop drying—a review [J]. Drying Technology, 2021, 39(11): 1704–1119.
- [24] OMOLOLA A O, JIDEANI A I O, KAPILA P F. Quality properties of fruits as affected by drying operation[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(1): 95–108.
- [25] 张群, 舒楠, 黄余年, 等. 不同干燥方式对黄桃果干结构特性及营养品质的影响[J]. 湖南农业科学, 2021(4): 86–89.
- ZHANG Q, SHU N, HUANG Y N, et al. Effects of drying methods on quality properties and microstructure of yellow peach (*Amygdalus persica*) [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2021(4): 86–89.
- [26] CIURZYNSKA A, LENART A. Rehydration and sorption properties of osmotically pretreated freeze-dried strawberries[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 97(2): 267–274.
- [27] 刘春菊, 王海鸥, 牛丽影, 等. 蔗糖调控对气流膨化黄桃片微观结构及品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 113–120.
- LIU C J, WANG H O, NIU L Y, et al. Effect of sucrose control on microstructure and quality of explosion-puffed yellow peach chips[J]. Food Science, 2020, 41(11): 113–120.
- [28] FALADE K O, IGBEKA J C, AYANWUYI F A. Kinetics of mass transfer, and colour changes during osmotic dehydration of watermelon[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(3): 979–985.
- [29] AN K, LI H, ZHAO D, et al. Effect of osmotic dehydration with pulsed vacuum on hot-air drying kinetics and quality attributes of cherry tomatoes[J]. Drying Technology, 2013, 31(6): 698–706.

Multi-dimensional Characterization of Texture Characteristics of Peach Chips Prepared by Osmotic Dehydration Combined with Drying

Zhang Siwei^{1,2}, Lü Jian¹, Bai Lansha¹, Zhong Yaoguang², Bi Jinfeng^{1*}

¹Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences/

Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193

²College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306

Abstract In order to explore and analyze the differences in the texture quality of peach chips prepared by sugar-osmotic dehydration (OD) combined with drying. Sucrose and isomaltose were selected as the osmotic agents for the osmotic dehydration pretreatments. And then hot air drying (HAD), vacuum freeze drying (FD) and instant controlled pressure drop drying (DIC) were carried out to prepared the peach chips, respectively. Differences in macro- and micro-structure of peach chips were analyzed. OD pretreatments with the infiltration of sugar molecular could induce both the collapse or damage of raw cells and solidification of tissue, which reflected on the increased in hardness. The hardness values were increased 9.03%–158.98%. Additionally, OD pretreatments significantly reduced the volume of FD chips, but improved the shrinkage rate of HAD and DIC chips, which were 0.724–0.798 and 0.436–0.570, respectively. It could be deduced that OD pretreatment could significantly change the texture characteristics of peach chips. The light absorption was decreased and then the color of peach chips were improved. A positive correlation between hardness and solid gain (SG) was observed. The correlations among the indicators used to evaluate the texture properties were also analyzed. It was clear that the texture features of peach chips could be explored from multiple angles, which might provide theoretical support for revealing the texture formation mechanism of peach chips.

Keywords peach chips; osmotic dehydration combined with drying; sucrose; isomaltose; texture