

X-射线和红外光谱研究马铃薯蛋糕老化特性

张仲柏, 牛黎莉, 汪月, 张珍, 魏晓岩, 张盛贵*

(甘肃农业大学 食品科学与工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 以 X-射线衍射(XRD)和傅里叶变换红外光谱(FT-IR)研究马铃薯蛋糕在贮藏期间(1、24、72、120、168 h)的老化特性,并利用质构仪和色差研究了老化对蛋糕品质(质构、色差)的影响。结果表明,蛋糕贮藏 1 h 后,在 X-射线 2θ 12.5°和 20°附近出现衍射峰,分别对应于禾谷类淀粉的无定形峰和由直链淀粉与脂肪酸形成的螺旋形复合物——V-型结晶,当贮藏时间达到 120 h 时,在 2θ 17°附近出现由支链淀粉回生产生的 B-型结晶。FT-IR 在波数 925、995、1 025、1 047、1 079、1 155 和 1 243 cm^{-1} 附近出现吸收峰,1 025 和 1 047 cm^{-1} 附近的吸收峰分别对应淀粉的非结晶区特征和结晶区特征,(1 047/1 025) cm^{-1} 峰强度比值能够反映淀粉分子的有序程度,其比值越大,有序度越高。马铃薯蛋糕在贮藏期间的 X-射线衍射峰和红外吸收峰强度以及(1 047/1 025) cm^{-1} 比值均小于普通蛋糕,表明其老化速度慢于普通蛋糕。老化会导致蛋糕硬度、咀嚼性、胶着性、 a^* 和 b^* 值增加,黏聚性和 L^* 值降低,从而使蛋糕失去光泽、口感变粗糙、风味发生劣变。

关键词: X-射线衍射;傅里叶变换红外光谱;马铃薯蛋糕;老化

中图分类号:TS 207 文章编号:1673-1689(2019)08-0119-07 DOI:10.3969/j.issn. 1673-1689.2019.08.017

X-Ray and FT-IR Research on Staling Characteristics of Potato Cake

ZHANG Zhongbai, NIU Lili, WANG Yue, ZHANG Zhen, WEI Xiaoyan, ZHANG Shenggui*

(School of Food Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The staling characteristics of potato cake during storage (1, 24, 72, 120, 168 h) were studied by X-ray diffraction and Fourier transform infrared spectroscopy, additionally, with Texture Analyzer and Color Difference Meter, effects of staling on cake quality (texture and color) were studied. The results manifested that through the X-ray of the potato cake, after 1 h of storage, peaks at around 2θ of 12.5° and 20° arised, namely the amorphous peak of cereal starch and V-type structure which was the helical complex formed by amylose and fatty acids, after 120 h of storage, peaks at around 2θ of 17° showed up which was caused by B-type structure formed by amylopectin starch. The fourier transform infrared spectroscopy of cake samples showed major peaks at around 925, 995, 1 025, 1 047, 1 079, 1 155 and 1 243 cm^{-1} , the IR absorbance bands at 1 025 and 1 047 cm^{-1} was the amorphous starch and crystalline starch respectively, the band intensity ratio at 1047 and

收稿日期: 2017-03-07

基金项目: 甘肃省高等学校基本科研业务费专项项目;甘肃省生物技术专项项目 GNSW-2014-10/GNSW-2015-14。

* 通信作者: 张盛贵(1970—),男,博士,教授,硕士研究生导师,主要从事淀粉深加工研究。E-mail: zhangshenggui@gsau.edu.cn

引用本文: 张仲柏,牛黎莉,汪月,等. X-射线和红外光谱研究马铃薯蛋糕老化特性[J]. 食品与生物技术学报,2019,38(08):119-125.

1 025 cm^{-1} illustrated the order degree of starch, the higher the ratio was, the higher the order degree was. Potato cake had lower X-ray diffraction and IR absorbance bands intensity as well as (1 047/1 025) cm^{-1} ratio than ordinary cake during storage, suggesting that its staling rate was lower than that of ordinary cake. Aging will lead to cake hardness, chewiness, gumminess, a^* and b^* values increased, cohesiveness and L^* values decreased, making the cake lack of lustre, taste rough with the deterioration of flavor.

Keywords: X-ray diffraction, Fourier transform infrared spectroscopy, potato cake, staling

蛋糕(Cake)是以面粉、鸡蛋、食糖等为主要原料,经搅打充气,辅以膨松剂,调制成发松的面糊,浇入模盘,通过烘烤或汽蒸而使组织松发的一种疏松绵软、适口性好、营养丰富且方便的食物,深受国内外消费者的青睐。老化是烘焙产品在贮藏过程中发生的包括物理、化学和感官品质等综合变化的复杂过程^[1],涉及到淀粉回生、水分迁移、淀粉-蛋白质之间的相互作用以及在非晶区内淀粉聚合物的重组等^[2],会导致蛋糕和面包等烘焙产品变硬、失去光泽、口感变粗糙、风味发生劣变等由于淀粉老化而引起的不良变化,从而降低消费者对产品的接受度和造成巨大的经济损失。蛋糕中含有较高比例的蔗糖和油脂,其老化速率慢于面包^[3],随着人们生活水平和消费水平的不断提高,追求低糖低脂、绿色保健的蛋糕已成为一种时尚和趋势。

目前,国内学者对烘焙产品的老化研究较少,而国外学者主要研究了用小麦面粉或大米粉制备的面包/蛋糕的老化,如 Ribotta 等^[4]利用 X-射线衍射研究了面包的老化特性;Hesso 等^[5]利用 X-射线和差示扫描量热仪研究了蛋糕在贮藏期间淀粉和脂质的重结晶;Demirkesen 等^[6]通过 X-射线和 FT-IR 研究了用大米粉和板栗粉制备的无筋面包老化特性;Botosoa 等^[6]利用热重和 DSC 研究了蛋糕在 20 $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 65%贮藏条件下的老化过程;Ji 等^[7]利用快速黏度仪、FT-IR 和 X-射线研究了大米蛋糕的老化特性;Curti 等^[8]通过核磁共振研究了面包在老化过程中水分的变化过程。但是,同时利用 X-射线衍射和傅里叶变换红外光谱研究马铃薯蛋糕在贮藏期间的老化以及老化过程对蛋糕品质的影响未见有文献报道。

本文拟以 X-射线衍射和红外光谱研究马铃薯蛋糕在贮藏期间(1、24、72、120、168 h)的老化特性,并利用 TPA 质构仪和色差计研究老化对蛋糕质构

和色度的影响,以期为烘焙食品的贮藏保鲜加工提供一定的理论研究基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

马铃薯(大西洋品种)、高筋面粉(蛋白质含量 22%)、鸡蛋、白糖、色拉油、蛋糕油、食盐均购于本地市场。

1.2 仪器与设备

DW-86L728 型烤箱(青岛海尔特种电器有限公司);HA-3157A 型号电动打蛋器(克莱美斯机电科技有限公司);FA2004B 电子天平(上海佑科仪器有限公司);SCIENTZ-10ND 真空冷冻干燥机(宁波新芝生物科技股份有限公司);DW-86L486 超低温冰箱(上海沪粤明科学仪器有限公司);D/max 2500 型 X-射线衍射仪(日本理学公司);FTIR-650 傅里叶变换红外光谱(天津港东科技发展股份有限公司);TA-XTP1us 物性测试仪(Texture Analyser Stable Micro Systems 公司);CR-10 型色差仪(日本柯尼卡美能达公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 马铃薯蛋糕配方及制作工艺 蛋糕配方:以高筋面粉 100 g、鸡蛋 3 个、白糖 60 g、色拉油 10 g、蛋糕油 2 g、食盐 1 g、自来水 37.5 g 制作普通蛋糕;以高筋面粉 50 g、马铃薯泥(含水量约 75%)50 g、自来水 0 g,其他物料的添加量不变,制作马铃薯蛋糕。具体操作要点如下:

1)挑选无病害马铃薯,清洗后去皮去芽眼,切块蒸制 30 min,冷却后捣碎成泥,于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冷藏 24 h 待用;2)将蛋清和蛋黄分离,白糖、食盐和蛋糕油加入蛋清中,先用打蛋器低速搅打 3 min,等蛋清发白时,高速搅打 3 min 至干性发泡倒出备用;3)将蛋黄置于打蛋机中打散,然后将马铃薯泥、色拉油加入

继续搅打至均匀,缓慢加入面粉,搅打均匀,取 1/3 打发的蛋白加入面糊中低速搅拌均匀,最后加入剩余蛋白混合均匀;4) 将已预热的蛋糕烤盘刷油,将调配好的蛋糕糊加注到模具总容量的 2/3,放入烤箱烘烤,开始阶段底火、面火控制在 180 ℃,烘烤 15 min,后期底火不变,将面火升至 200 ℃,继续烘烤 10 min。烘烤后的蛋糕在室温下冷却 1 h 后用聚丙烯保鲜袋(PP)密封,在室温条件下贮藏待用。

1.3.2 样品的制备 将贮藏到不同时间段(1、24、72、120、168 h)的蛋糕样品置于-80 ℃超低温冰箱中冷冻,然后在冷冻干燥机中冷冻干燥 48 h,冷冻干燥完的样品在研钵中研磨并过 212 μm 网筛^[1],用于测定 X-射线和红外光谱。

1.3.3 X-射线衍射 采用日本理学公司 D/max 2500 型 X-射线衍射分析仪,衍射条件为铜靶,电压 40 kV,电流 40 mA,CuKα(λ=1.540 56 Å)辐射,衍射角扫描区域 2θ=10~40°,扫描速度 4 (°)/min^[1,4,7]。

1.3.4 傅里叶红外光谱 采用 KBr 压片法,按照 1%的比例与 KBr 充分混合、研磨、压片后置于红外光谱仪上测试,扫描波数范围 4 000~400 cm⁻¹,分辨率为 4 cm⁻¹,采用 DTGS 检测器,以空气为空白^[9,10]。

1.3.5 蛋糕质构测定 参照孙彩玲等^[11]的方法,并略作修改,测定其在贮藏期间(1、24、72、120、168 h)硬度、咀嚼性、黏聚性和胶着性等质构特性的变化。试验参数设定如下:选用 TPA 压缩模式,探头型号 P50,测试前速率 2.0 mm/s,测试速率 1.0 mm/s,测试后速率 1.0 mm/s,两次压缩间隔时间 2 s,压缩程度 60%,感应力 5g,数据提取速率 200 pps,每个样品在相同条件下测量 12 组数据,选取 8 组相近数据求平均值。

1.3.6 色差测定 蛋糕色差测定参考 Matos 等^[12]的方法,并略作调整。测定蛋糕在贮藏期间(1、24、72、120、168 h)蛋糕芯 L*、a*、b* 值的变化,其中,L* 代表样品颜色亮度;a*、b* 代表颜色色方向,+a* 为红色方向,+b* 为黄色方向。

1.3.7 数据分析 采用 Excel 2007 软件进行数据统计,用 SPSS 19.0 软件对数据进行差异显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 X-射线衍射分析

由图 1 可知,蛋糕在烘焙结束 1 h 后,在 2θ

12.5°和 20°出现峰衍射峰,当贮藏时间达到 120 h 时,在 2θ 17°出现衍射峰,随着贮藏时间的增加,衍射峰峰形不变但强度增加,与普通蛋糕相比,马铃薯蛋糕降低了 2θ 12.5°、17°和 20°衍射峰的强度。蛋糕中的直链淀粉通常在焙烤结束 1 h 后发生回生,在 2θ 20°形成 V-型结晶^[1],而支链淀粉在冷却贮藏过程中会发生较慢的回生,在 2θ 15°、17°、22.2°、24°会出现衍射峰,形成由支链淀粉回生产生的 B-型结晶^[1,4-5],禾谷类淀粉的无定形峰出现在 2θ 12.5°^[13]。因此,12.5°的衍射峰可能是由直链淀粉回生引起,而 17°和 20°的衍射峰分别是由支链淀粉回生和直链淀粉-脂质复合物所引起。马铃薯淀粉的直链淀粉含量(22%)低于小麦淀粉(24%),且其所含直链淀粉的链较长,聚合度约为 1 000~6 000,故马铃薯淀粉回生慢^[14],此外,马铃薯泥富含纤维素、半纤维素和木质素等膳食纤维^[15],添加到蛋糕中后使蛋糕具有较高的水合速率^[16],能够增加蛋糕的持水性、改善蛋糕质构^[17],而淀粉的糊化和回生程度取决于贮藏温度和体系中的水分含量^[18],因此膳食纤维的持水特性会减少蛋糕中水分的向外扩散,Lebesi 等^[19]将燕麦麸皮用木聚糖酶处理后加入到蛋糕中,发现其能够延缓蛋糕的老化速率,Curti 等^[20]的研究结果表明,在面包中添加马铃薯纤维有助于减缓面包的老化,究其原因可能与马铃薯纤维的保水性和其能够减少体系中淀粉之间的相互作用有关,从而会减少淀粉的回生。

2.2 红外光谱分析

由图 2 可知,蛋糕贮藏 1 h 后,FT-IR 波谱在 1 350~750 cm⁻¹ 区域出现 7 个吸收峰,分别在 925、995、1 025、1 047、1 079、1 155 和 1 243 cm⁻¹ 附近,吸收峰的强度随贮藏时间(1、24、72、120、168 h)的增加而加强。1 155 和 1 079 cm⁻¹ 附近的吸收峰为 C-O-H 基团的 C-O 伸缩振动^[21-22];1 025 和 1 047 cm⁻¹ 附近的吸收峰为脱水葡萄糖环中 C-O-C 基团的 C-O 伸缩振动^[22],分别对应淀粉的非结晶区特征和结晶区特征^[9,23], (1 047/1 025) cm⁻¹ 峰强度比值能够反映淀粉分子的有序程度,其比值越大,有序度越高^[7,24],由图 3 可知,普通蛋糕的(1 047/1 025) cm⁻¹ 比值从贮藏 1 h 的 1.000 增至贮藏 168 h 的 1.059,变化明显,而马铃薯蛋糕从贮藏 1 h 的 0.984 增至 168 h 的 0.997,增加幅度小于普通蛋糕;925 cm⁻¹ 附近的吸收峰为 C-H 弯曲振动^[25];995 cm⁻¹ 附近的吸

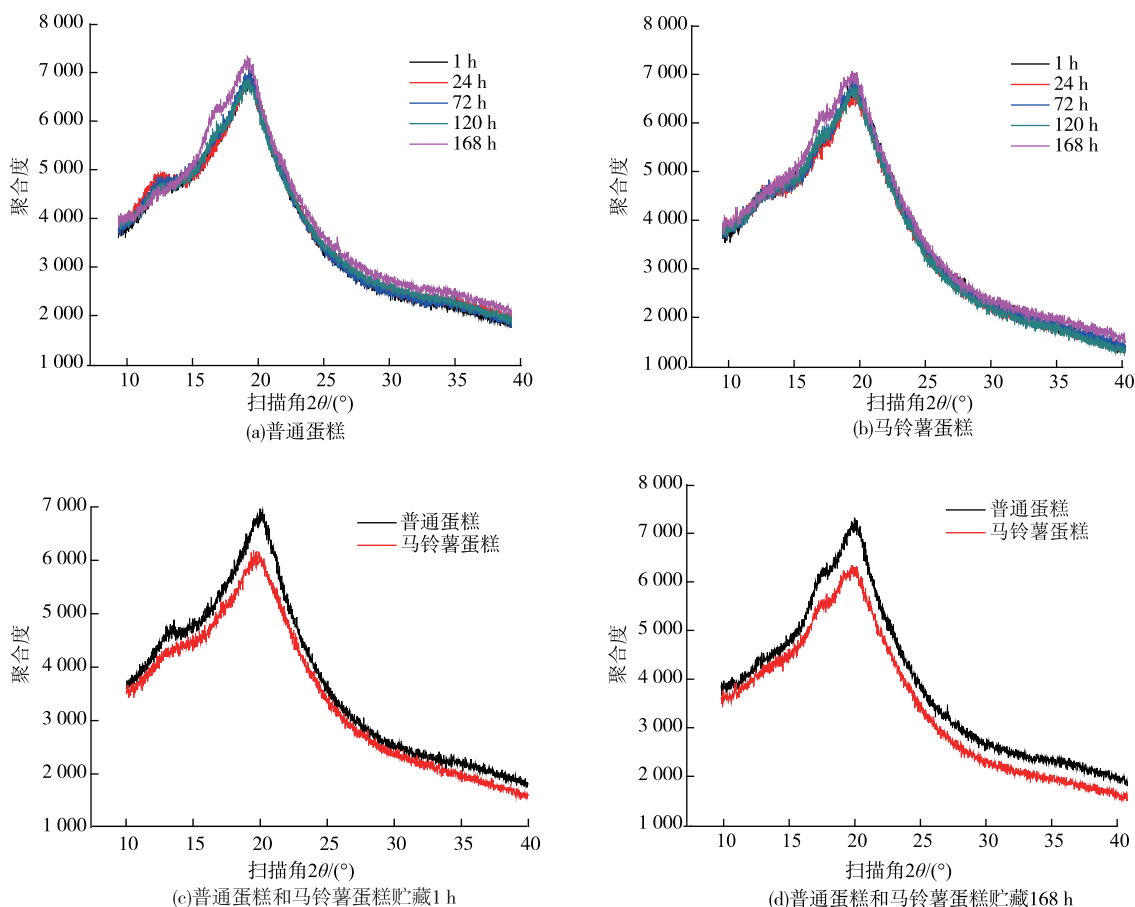


图 1 马铃薯蛋糕在不同贮藏时间的 X-射线衍射图谱

Fig. 1 X-ray diffraction diagrams of potato cake stored at different storage time

收峰是由 C-OH 的弯曲振动引起，对水分子很敏感，对应于淀粉大分子的羟基间所形成的氢键结构^[9]。本试验表明，马铃薯蛋糕在试验期内的红外吸收

峰强度以及能够反映淀粉回生程度的 (1 047/1 025) cm^{-1} 比值均小于普通蛋糕，表明其老化速度慢于普通蛋糕，这与 XRD 测试结果一致。

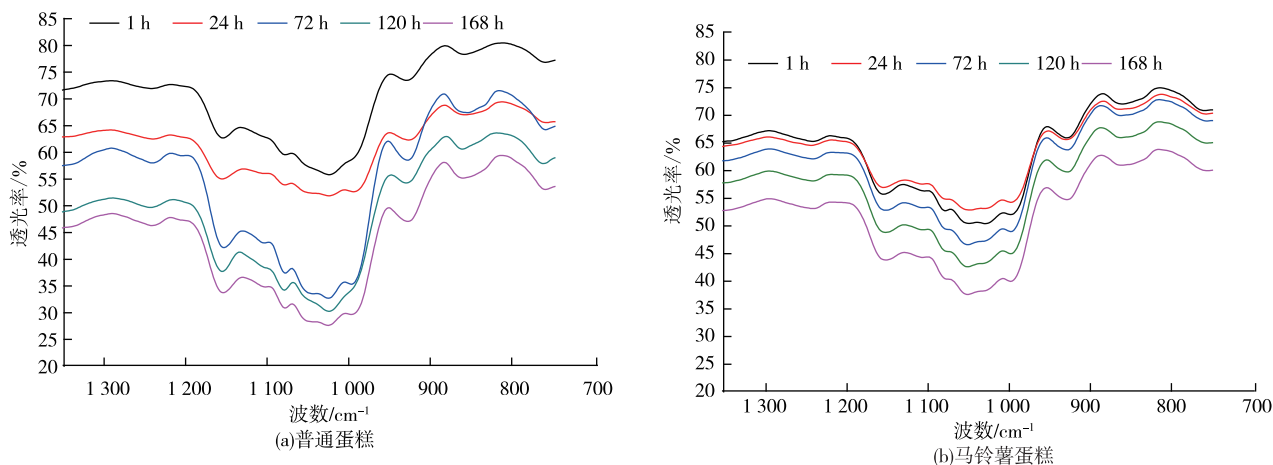


图 2 马铃薯蛋糕在不同贮藏时间的傅里叶变换红外光谱图

Fig. 2 FT-IR spectra of potato cake stored at different storage time

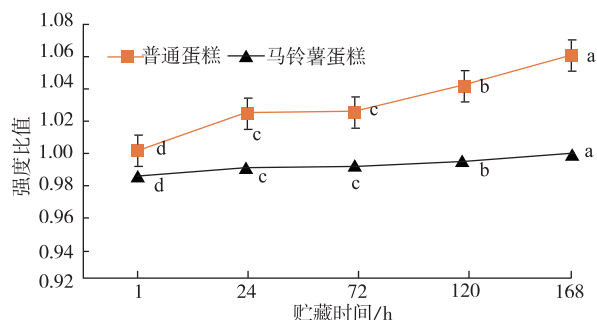
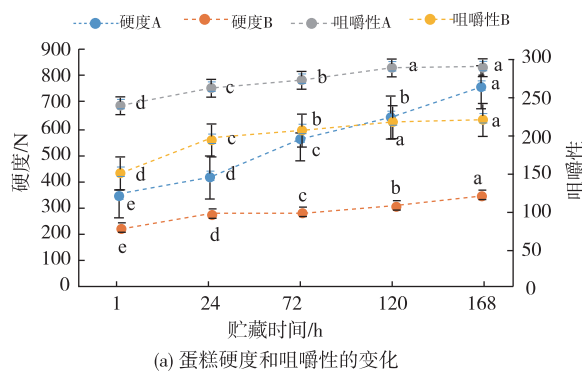


图3 马铃薯蛋糕不同贮藏时期(1 047/1 025) cm⁻¹的峰强度比值

Fig. 3 Ratios of the band intensities at 1 047 and 1 025 cm⁻¹ of potato cake at different storage time

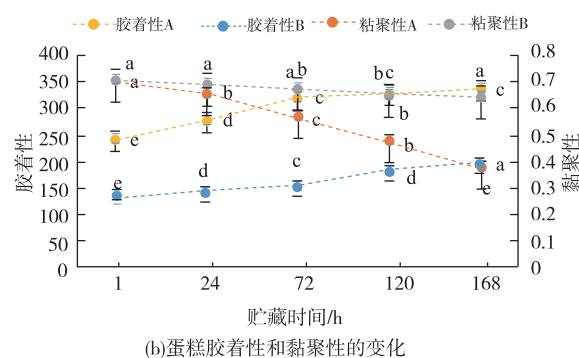
2.3 质构

由图4可知,随着贮藏时间从1 h增至168 h,蛋糕的硬度、咀嚼性和胶着性呈增加趋势,而黏聚



(a) 蛋糕硬度和咀嚼性的变化

性呈下降趋势,与普通蛋糕相比,在烘烤结束1 h后,马铃薯蛋糕的硬度、咀嚼性和胶着性显著低于普通蛋糕,且在贮藏期间其值增加或下降的幅度均弱于普通蛋糕。蛋糕老化速度与其在贮藏期间的硬度变化密切相关,在货架期,蒸汽压的不同会驱使水分从“内部—表皮—空气”转移^[26],水分迁移会导致蛋糕水分减少,从而使蛋糕硬度、咀嚼性和胶着性增加,黏聚性降低。黏聚性与蛋糕的芯部结构、口感呈显著正相关,与外观呈显著负相关,黏聚性越大,蛋糕吃起来越绵软、细腻,口感越好。胶着性与蛋糕的百克质量、口感呈显著负相关^[27-28]。本试验表明,老化过程会导致蛋糕的硬度、咀嚼性和胶着性增加,黏聚性降低,从而会使蛋糕的口感变粗糙、风味发生劣变。



(b) 蛋糕胶着性和黏聚性的变化

A.普通蛋糕;B.马铃薯蛋糕

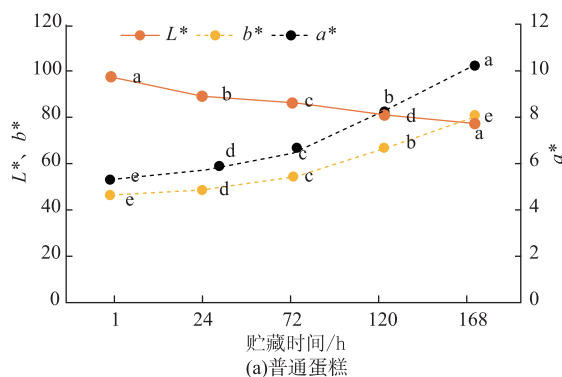
图4 马铃薯蛋糕贮藏期间质构的变化

Fig. 4 Changes in texture of potato cake during storage

2.4 色差

由图5可知,马铃薯蛋糕的L*和a*值低于普通蛋糕,而b*值高于普通蛋糕,表明用马铃薯泥代替部分面粉制作蛋糕,其本身较暗的色泽会使蛋糕芯的颜色向暗、黄色转变,随着贮藏时间的增加,普通蛋糕和马铃薯蛋糕的L*值都呈下降趋势,而a*和b*值呈增加趋势。Nguyen等^[29]的研究结果表明,赖氨酸是食品中发生美拉德反应的前体物质;马铃薯中含有丰富的在面粉中为第一限制氨基酸的赖氨酸,能够促进体系中美拉德反应的发生,增加蛋糕的b*值,此外,Park等^[15]的研究表明植物性的膳食纤维能够改善烘烤面包的颜色;马铃薯富含纤维素、半纤维素和木质素等膳食纤维^[30],对蛋糕的色泽也会有一定的影响,从而使马铃薯蛋糕本身的L*

和a*值低于普通蛋糕,b*值高于普通蛋糕,而蛋糕在贮藏过程中发生的老化现象则会使蛋糕的L*值逐渐降低,a*和b*值逐渐增加,使蛋糕失去光泽,降低消费者对产品的接受度。



(a) 普通蛋糕

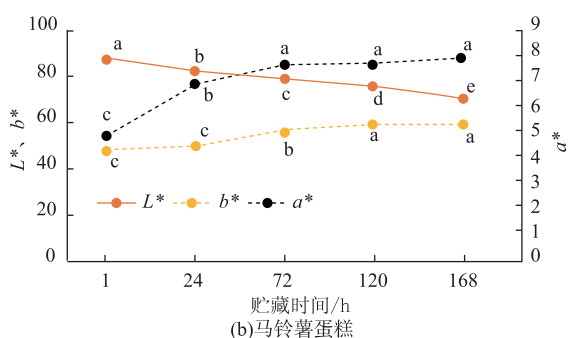


图5 马铃薯蛋糕贮藏期间蛋糕芯色差的变化

Fig. 5 Changes in cake crumb color of potato cake during storage

3 结语

X-射线衍射和红外光谱测试结果表明,蛋糕在贮藏1 h后,在X-射线 2θ 12.5°和20°附近出现衍

射峰,分别是由禾谷类淀粉中的直链淀粉回生产生的无定形峰和由直链淀粉与脂肪酸形成的螺旋形复合物——V-型结晶,随着贮藏时间增至120 h,在 2θ 17°附近出现由支链淀粉回生产生的B-型结晶。蛋糕贮藏1 h后,FT-IR在波数925、995、1 025、1 047、1 079、1 155和1 243 cm^{-1} 附近出现吸收峰,随着贮藏时间的增加,峰的峰形不变,但强度增加。马铃薯蛋糕在贮藏试验期的X-射线衍射峰强度、FT-IR吸收峰强度和(1 047/1 025) cm^{-1} 峰强度比值以及变化幅度显著弱于普通蛋糕。这表明,马铃薯蛋糕在贮藏期间的淀粉回生度低于普通蛋糕,因此,其老化速度慢于普通蛋糕。蛋糕在贮藏期间的质构和色差测试结果表明,老化会导致马铃薯蛋糕的硬度、咀嚼性、胶着性、 a^* 和 b^* 值增加,黏聚性和 L^* 值降低,从而使蛋糕失去光泽、口感变粗糙、风味发生劣变。

参考文献:

- [1] DEMIRKESEN I, CAMPANELLA O H, SUMNU G, et al. A study on staling characteristics of gluten-free breads prepared with chestnut and rice flours[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7(3): 806-820.
- [2] OZKOC S O, SUMNU G, SAHIN S, et al. Investigation of physicochemical properties of breads baked in microwave and infrared- microwave combination ovens during storage[J]. *European Food Research and Technology*, 2009, 228(6): 883-893.
- [3] GÉLINAS P, ROY G, GUILLET M. Relative effects of ingredients on cake staling based on an accelerated shelf-life test[J]. *Journal of Food Science*, 1999, 64(5): 937-940.
- [4] RIBOTTA P D, CUFFINI S, LEON A E, et al. The staling of bread: an X-ray diffraction study[J]. *European Food Research and Technology*, 2004, 218(3): 219-223.
- [5] HESSO N, LE-BAIL A, LOISEL C, et al. Monitoring the crystallization of starch and lipid components of the cake crumb during staling[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 133(22): 533-538.
- [6] BOTOSOA E P, CHENE C, BLECKER C, et al. Nuclear magnetic resonance, thermogravimetric and differential scanning calorimetry for monitoring changes of sponge cakes during storage at 20 °C and 65 % relative humidity[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(5): 1020-1031.
- [7] JI Y, ZHU K, ZHOU H, et al. Study of the retrogradation behaviour of rice cake using rapid visco analyser, Fourier transform infrared spectroscopy and X-ray analysis[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2010, 45(5): 871-876.
- [8] CURTI E, BUBICI S, CARINI E, et al. Water molecular dynamics during bread staling by Nuclear Magnetic Resonance[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2011, 44(4): 854-859.
- [9] MAN Jianmin, CAI Canhui, YAN Qiuxiang, et al. Applications of infrared spectroscopy in the analysis of ordered structure of starch grain[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(3): 505-513. (in Chinese)
- [10] CHEN Ling, HUANG Yanran, LI Xiaoxi, et al. Infrared spectroscopy study on the crystal structure of modified starch[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(12): 2821-2826. (in Chinese)
- [11] SUN Cailing, TIAN Jichun, ZHANG Yongxiang. Application of TPA test mode in the study of food [J]. *Experimental Science and Technology*, 2007, 5(2): 1-4. (in Chinese)
- [12] MATOS M E, ROSELL C M. Relationship between instrumental parameters and sensory characteristics in gluten-free breads[J]. *European Food Research and Technology*, 2012, 235(1): 107-117.
- [13] XU Bin, MAN Jianmin, WEI Cunxu. Methods for determining relative crystallinity of plant starch X-ray powder diffraction

- spectra[J]. **Chinese Bulletin of Botany**, 2012, 47(3): 278-285. (in Chinese)
- [14] YU Tianfeng, XIA Ping. Characteristic and use of the potato starch[J]. **Chinese Agricultural Science Bulletin**, 2005, 21(1): 55-58. (in Chinese)
- [15] PARK H, SEIB P A, Chung O K. Fortifying bread with a mixture of wheat fiber and psyllium husk fiber plus three antioxidants[J]. **Cereal Chemistry**, 1997, 74(3): 207-211.
- [16] KLINGSPORN U, BADER J, KRUSE B, et al. Utilization of potato pulp from potato starch processing[J]. **Process Biochemistry**, 1993, 28(2): 91-98.
- [17] GAN Z, GALLIARD T, ELLIS P R, et al. Effect of the outer bran layers on the loaf volume of wheat bread[J]. **Journal of Cereal Science**, 1992, 15(2): 151-163.
- [18] GUDMUNDSSON M. Retrogradation of starch and the role of its components[J]. **Thermochimica Acta**, 1994, 246(2): 329-341.
- [19] LEBESI D M, TZIA C. Staling of cereal bran enriched cakes and the effect of an endoxylanase enzyme on the physicochemical and sensorial characteristics[J]. **Journal of Food Science**, 2011, 76(6): S380-S387.
- [20] CURTI E, CARINI E, DIANTOM A, et al. The use of potato fibre to improve bread physico-chemical properties during storage [J]. **Food Chemistry**, 2015, 195: 64-70.
- [21] GOODFELLOW B J, WILSON R H. A fourier transform IR study of the gelation of amylose and amylopectin [J]. **Biopolymers**, 1990, 30(13/14): 1183-1189.
- [22] SOEST J J G V, TOURNOIS H, WIT D D, et al. Short-range structure in (partially) crystalline potato starch determined with attenuated total reflectance Fourier-transform IR spectroscopy[J]. **Carbohydrate Research**, 1995, 279(95): 201-214.
- [23] KARIM A A, NORZIAH M H, SEOW C C. Methods for the study of starch retrogradation [J]. **Food Chemistry**, 2000, 71(1): 9-36.
- [24] SEVENOU O, HILL S E, FARHAT I A, et al. Organisation of the external region of the starch granule as determined by infrared spectroscopy[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2002, 31(1/2/3): 79-85.
- [25] IRUDAYARAJ J, YANG H. Depth profiling of a heterogeneous food-packaging model using step-scan Fourier transform infrared photoacoustic spectroscopy[J]. **Journal of Food Engineering**, 2002, 55(1): 25-33.
- [26] SABANIS D, LEBESI D, TZIA C. Effect of dietary fibre enrichment on selected properties of gluten-free bread [J]. **LWT-Food Science and Technology**, 2009, 42(8): 1380-1389.
- [27] ZHAO Yanwei, GENG Xin, CHEN Haihua, et al. Correlation between texture and sensory evaluation of bread and cake [J]. **Chinese Agricultural Science Bulletin**, 2012, 28(21): 253-259. (in Chinese)
- [28] CHU Yanpei. Study on the application of physical property testing instrument in food quality evaluation [J]. **Cereal and Feed Industry**, 2003(7): 40-42. (in Chinese)
- [29] NGUYEN H T, VAN DER FELS-KLERX H J, VAN BOEKEL M. N ϵ - (carboxymethyl) lysine: a review on analytical methods, formation, and occurrence in processed food, and health impact[J]. **Food Reviews International**, 2014, 30(1): 36-52.
- [30] ORR P H, TOMA R B, MUNSON S T, et al. Sensory evaluation of breads containing various levels of potato peel [J]. **American Potato Journal**, 1982, 59(12): 605-611.