

基于CT技术的苹果贮藏期内主要成分无损检测*

张京平 刘孔绚

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310029)

【摘要】 为了探讨富士苹果内部主要成分与其剖面CT值之间线性关系在贮藏期内的变化,使用X射线CT技术,对处于不同贮藏期的苹果进行扫描,获得CT图像及CT值,并测量苹果内部的主要成分含量,建立不同贮藏期CT值与苹果内部主要成分含量的线性模型。经过比较发现,苹果内部pH值及糖度随着贮藏期的增长而增大,而含水率及可滴定酸含量随着贮藏期的增长而降低,同时各成分与CT值的线性相关模型随着贮藏时间的变化也发生了相应变化。将贮藏时间参数引入苹果内主要成分含量的预测模型,并验证其准确性及可行性,结果表明预测模型的平均误差率小于10%,利用以上预测模型进行苹果内部主要成分无损检测是一种可行的方法。

关键词: 苹果 成分 CT技术 无损检测 贮藏期

中图分类号: TS255.1; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)07-0119-04

Nondestructive Test of Major Internal Components for Fushi Apple during Storage Based on CT Technology

Zhang Jingping Liu Kongxuan

(College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract

Change of the linear relationship between CT value and major internal components of Fushi apple during storage period was discussed. CT images and CT value were acquired by scanning the section of Fushi apples, and the model of linear relationships between CT value and major internal components was established. The linear relationships in different storage time were compared. It's clear that the pH value and sugar content increased with the growth of storage time, while moisture content and titrable acidity decreased. The linear relationships have been changed during the storage period. So the storage time was introduced into the predicting model, which was used to predict the internal components of Fushi apple. The predicting model was proved to be accurate and feasible.

Key words Apple, Components, CT technology, Nondestructive test, Storage period

引言

近年来无损检测技术在水果品质检测领域获得快速发展。近红外、核磁共振、机器视觉及超声波等无损检测技术在水果检测领域的应用已经有所报道^[1-4]。基于X射线的CT(X-ray CT)技术在农产品检测领域也有较快发展^[5-7]。同时,利用CT技术预测水果内部主要成分的研究也已进行,并且证实在CT值与水果内部主要成分^[8-10]之间存在显著的线性关系,同时应用神经网络模型进行预测的结

果也较为理想^[11-12],验证了利用CT技术预测苹果内部品质的可行性。但是,上述研究忽略了苹果品质对贮藏期的依赖性,使其研究尚有不足。本文针对上述现状,利用CT技术研究苹果的主要成分在贮藏期内的变化情况。

1 试验原理与过程

1.1 X-ray CT

CT实时成像技术又称计算机断层扫描成像技术,目前最成熟的、应用最广的是利用X射线源的

断层摄影技术^[13]。CT的基本思想是取一高度准直、极细笔状的X射线束,环绕人体(或某一物体)某一部分作断面扫描,未被吸收光子穿透人体后被检测器接收,判断X射线被吸收程度,将其作为模拟信号输入,经过数学处理和运算后重建图像。CT值即为X射线被吸收的判断标准,由于物体的吸收,X射线会发生衰减,其衰减后的强度计算式为

$$I = I_0 e^{-\mu W}$$

式中 I_0 ——X射线入射时的强度, eV
 W ——穿过均匀物体的路径长度, mm
 μ ——衰减系数, eV/mm

CT值实际上是X射线通过物体时的一个相对衰减值,它定义为

$$N_{CT} = 1000 \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w}$$

式中 N_{CT} ——物体的CT值, Hu
 μ_t ——物体组织的绝对衰减系数
 μ_w ——水的绝对衰减系数

1.2 试验材料及设备

本试验选用产自山东、采摘后一周内的红富士苹果作为试验对象,以保证红富士苹果的新鲜度,确保整个贮藏期的数据。

试验设备: GZX-9140M.E型数显鼓风干燥箱; JS-1.5A型赛多利斯电子天平,精度为0.0001g; Digital FRACTOMETER PR-101型数显糖度计,测量范围0~45%,最小刻度0.1%,精确度 $\pm 0.2\%$; GE HISPEED Fx/I型医用CT机,精确度0.01Hu; PHS-3CW型微机酸度计,测量范围pH值0~14.00,精确度 ± 0.001 ,上海理达仪器厂生产。

1.3 试验步骤和方法

试验方法参照ISO和GB/T 8858—1988执行。

首先,将同批次苹果分成8组,每组6个,编号1~8,放置室温环境下贮藏,保证贮藏温度处于 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$,空气相对湿度 $(70 \pm 10)\%$ 。

然后,取第1组的苹果试验样本,拍摄苹果中心剖面的CT图像,在所得的CT图像中,以苹果果核中心为圆心,在果核外围的不同半径处,选取4块约 2.5 cm^2 的圆形区域。测量各区域CT平均值,CT值测量3次,以3次的平均值作为CT的测量值,同时准确记录下各区域的位置。

沿苹果CT扫描的中心剖面切开苹果,于采集CT值区域位置处取出约10g的苹果果块,参照国家标准测量该果块的糖度、pH值、可滴定酸含量及含水率。由此完成一组试验样本的数据采集。

最后,每隔一周取下一组试验样本,重复上述步骤进行试验数据采集,直至所有组试验样本测量完

毕,完成试验的所有数据采集。

2 试验数据分析

2.1 相同贮藏期

分析试验数据能够得出,在同一贮藏期,苹果内部的主要成分与苹果的CT值之间存在着显著的线性关系,这与本试验室前期工作所得到的结论相吻合^[14]。建立相关线性关系如图1~4所示。

由图中可以看出,富士苹果的主要成分和CT值之间存在显著的线性相关关系。随着CT值的增高,苹果内部pH值升高,含水率升高,可滴定酸含量降低,糖度降低。

2.2 不同贮藏期

随着贮藏时间的增长,苹果内部主成分与CT值之间的线性关系也随之变化。为了进行比较,建立了苹果内部主要成分与CT值及贮藏时间的三维立体模型。如图1~4所示。

• 1d	$Y = 4.00733 + 0.00241X$	$R = 0.95819$
• 7d	$Y = 4.35033 + 0.00347X$	$R = 0.90226$
• 14d	$Y = 4.49974 + 0.00223X$	$R = 0.9449$
• 22d	$Y = 4.90081 + 0.00453X$	$R = 0.97519$
• 28d	$Y = 4.68542 + 0.0016X$	$R = 0.96674$
• 35d	$Y = 4.94845 + 0.00293X$	$R = 0.94472$
• 42d	$Y = 4.84161 + 0.00231X$	$R = 0.97755$
• 48d	$Y = 4.83293 + 0.00157X$	$R = 0.94202$

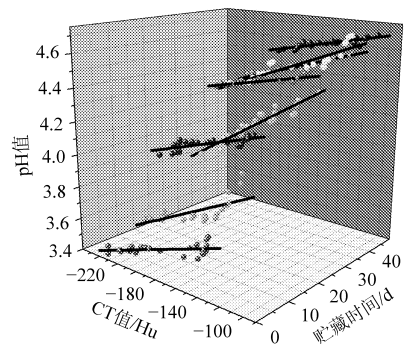


图1 苹果贮藏期内CT值与pH值的线性模型变化
 Fig.1 Change of linear relationships between CT value and pH value of apples during the storage

经过比较发现,苹果pH值随着贮藏时间增长呈现增大的趋势,其范围由贮藏初期的3.41~3.75增长至贮藏末期的4.50~4.67;含水率随着贮藏时间的增长呈现减小的趋势,其范围由贮藏初期的89.79%~93.55%减小至贮藏末期的87.97%~91.10%;可滴定酸含量随着贮藏时间的增长也呈现降低的趋势,其范围由贮藏初期的0.30%~0.44%减小至贮藏末期的0.17%~0.32%;糖度随着时间的增长呈现增大的趋势,其范围由贮藏初期的12.8%~15.2%增长至贮藏末期的14.4%~19.3%。这与实际生活中,苹果随着贮藏期的增长其口感的甜味逐渐增强,酸味逐渐降低,同时水分的含量逐渐减少的现象相吻合。

苹果内部主要成分与CT值的线性模型,随着

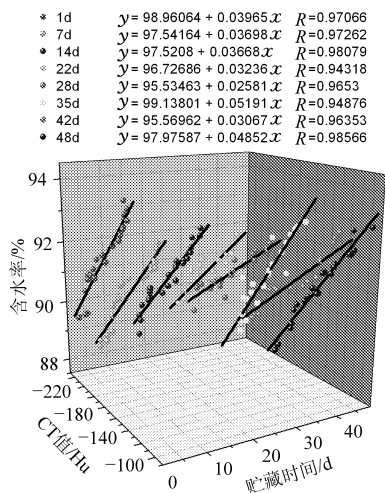


图 2 苹果贮藏期内 CT 值与含水率的线性模型变化
Fig.2 Change of linear relationships between CT value and moisture content of apples during the storage

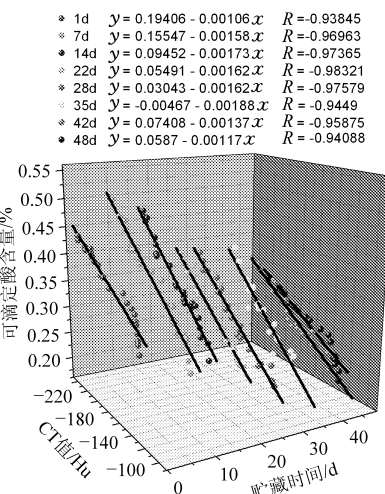


图 3 苹果贮藏期内 CT 值与可滴定酸含量的线性模型变化
Fig.3 Change of linear relationships between CT value and titratable acidity of apples during the storage

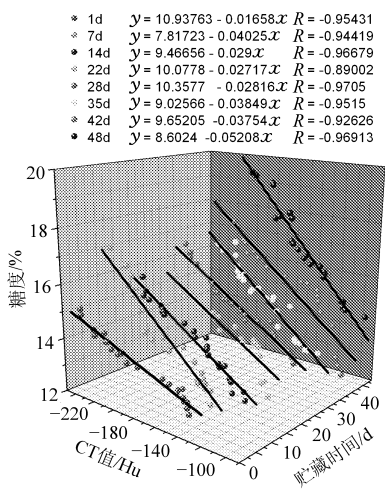


图 4 苹果贮藏期内 CT 值与糖度的线性模型变化
Fig.4 Change of linear relationships between CT value and sugar content of apples during the storage

性相关模型,只能表示该贮藏期内苹果内部主要成分与 CT 值的关系,或者预测该贮藏期苹果内部主要成分的含量。由于不同的贮藏期,其主要成分与 CT 值的关系是不同的,因此贮藏时间成为了预测苹果内部主要成分的一个重要参数。

2.3 苹果内部主要成分预测模型

由上述分析可知,苹果内各主要成分与 CT 值之间存在着显著的线性关系,因此在以 CT 值、贮藏时间为参数的苹果内部主要成分预测模型中,参数的一次项是影响预测结果的主要因素。同时,为了提高预测模型的准确度,参数的二次项作为预测结果的补充,将高次项忽略,即采用二次拟合的方法建立预测模型。在试验数据中随机抽取小部分数据,用于对建立的模型进行误差分析,剩余数据用作建立预测模型。分别建立以 CT 值和贮藏时间作为参数,预测苹果内部 pH 值、含水率、可滴定酸含量及糖度等主要成分的模型,结果如表 1 所示,表中 x_1 表示 CT 值(Hu), x_2 表示贮藏时间(d), y 表示对应的主要成分含量。

为了验证上述过程所建立预测模型的正确性以及利用该模型预测苹果内部主成分含量的可行性,将事先留作误差分析的数据中的 CT 值及贮藏时间代入上述模型中,进行主要成分含量预测,并将所得结果记为估计值,同时将数据中的主要成分含量记为实测值。将估计值与实测值之差记为估计差,将估计差的绝对值与实测值的比值记为误差率。经过分析整理后,各主要成分的最大误差率,最小误差率和平均误差率的情况如表 2 所示。

由上述结果可以看出,应用二次拟合所建立的苹果内部主要成分的预测模型,其预测结果最大误差率小于 20%,平均误差率小于 10%。4 种主要成分中,由于测量可滴定酸含量的过程相对复杂,容易引入测量误差,造成其预测结果的最大误差率及平均误差率都相对较高,分别为 19.63% 和 7.01%。尽管如此,由于贮藏时间参数的引入,模型仍然表现出了良好的预测效果。综上所述,利用以上预测模型,进行苹果内部主要成分的无损检测是一种可行的方法。

3 结束语

在富士苹果的贮藏期内,通过对不同贮藏时间苹果内部主要品质与 CT 值的关系研究,证实了在同一贮藏期内两者之间存在着显著的线性关系,苹果内部 pH 值及糖度随着贮藏时间的增长而增大,含水率及可滴定酸含量随着贮藏时间的增长而出现降低的趋势。同时发现苹果内部主要成分与 CT 值

贮藏时间的增长也发生了变化。处于某贮藏期的线

表1 以CT值及贮藏时间为参数的苹果内主要成分含量预测模型

Tab.1 Predicting model of internal components of apples with the CT value and storage time as the parameters

主要成分	预测模型	R^2
pH值	$y = 4.397232 + 0.007242x_1 + 0.037020x_2 + 0.000012811x_1^2 - 0.000020577x_2x_1 - 0.000419x_2^2$	0.8658
含水率/%	$y = 95.107555 + 0.001043x_1 - 0.015605x_2 - 0.000099734x_1^2 + 0.000130x_2x_1 - 0.000078454x_2^2$	0.8871
可滴定酸含量/%	$y = 0.142329 - 0.001798x_1 - 0.002927x_2 - 0.000001514x_1^2 - 0.000003312x_2x_1 - 0.000009756x_2^2$	0.8523
糖度/%	$y = 8.898196 - 0.039213x_1 - 0.063763x_2 - 0.000049252x_1^2 - 0.000407x_2x_1 + 0.001137x_2^2$	0.8734

表2 预测模型验证误差分析

Tab.2 Analysis of error for the predicting model

主要成分	最大误差率	最小误差率	平均误差率/%
pH值	5.18	0.07	1.32
含水率	1.36	0.01	0.38
可滴定酸含量	19.63	0.02	7.01
糖度	10.73	0.01	2.41

之间的线性关系,受贮藏时间的影响较大。处于不同贮藏期的苹果,其主要成分与CT值之间的线性相关模型也不相同。采用二次拟合法建立以CT值和贮藏时间为参数的苹果内部主要成分预测模型,检验结果表明预测模型的平均误差小于10%,该模型能够比较准确预测苹果内部的主要成分含量。

参 考 文 献

- Nicola Bart M, Beullens Katrien, Bobelyn Els, et al. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: a review[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2007, 48(1):99~118.
- Lammertyn J, Dresselaer T, Van Hecke P. MRI and X-ray CT study of spatial distribution of core breakdown in 'Conference' pears[J]. *Magnetic Resonance Imaging*, 2003, 21(7):805~815.
- Mirik M, Michels G J Jr, Mirik S Kassymzhanova, et al. Using digital image analysis and spectral reflectance data to quantify damage by greenbug (Hemitera: Aphididae) in winter wheat[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2006, 51(1~2):86~98.
- Baltazara Arturo, Arandab Jorge Isidro. Bayesian classification of ripening stages of tomato fruit using acoustic impact and colorimeter sensor data [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 60(2):113~121.
- Vestergaard Christian, Risum Jgen. Quantification of salt concentrations in cured pork by computed tomography [J]. *Meat Science*, 2004, 68(1):107~113.
- Longuetaud Fleur, Leban Jean-Michel. Automatic detection of the heartwood/sapwood boundary within Norway spruce logs by means of CT images [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2007, 58(2):100~111.
- 徐澍敏,于勇,王俊. 机械损伤苹果CT值的试验研究[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(6):83~85,97.
Xu Shumin, Yu Yong, Wang Jun. Study on CT value of damaged apple [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(6):83~85,97. (in Chinese)
- 张京平,彭争,汪剑. 苹果水分与CT值相关性的研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(2):180~182.
Zhang Jingping, Peng Zheng, Wang Jian. Correlation between moisture of apples and values of CT[J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(2):180~182. (in Chinese)
- 王会. 基于CT技术的富士苹果内部品质无损检测研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007.
Wang Hui. Study of nondestructive test of Fushi apple content by computer tomography [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- 张京平,刘孔绚,王会. 富士苹果剖面CT值与pH值的关系研究[J]. *浙江大学学报:农业与生命科学版*, 2009, 35(1):89~92.
Zhang Jingping, Liu Kongxuan, Wang Hui. Research of relationship between CT and pH value for Fushi apple[J]. *Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci.*, 2009, 35(1):89~92. (in Chinese)
- 张京平,王会. 神经网络和线性回归在苹果含水率预测中的应用[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(2):198~200.
- 张京平,张华,王会. 富士苹果主要成分的CT无损检测[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(7):99~102.
Zhang Jingping, Zhang Hua, Wang Hui. Non-destructive test of Fuji apple's major components by CT[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(7):99~102. (in Chinese)
- 庄天戈. CT原理与算法[M]. 上海:上海交通大学出版社, 1992.
- Barcelon Eufemio G, Tojo Seishu, Watanabe Kengo. X-ray computed tomography for internal quality evaluation of peaches [J]. *J. Agric. Engng. Res.*, 1999, 73(4):323~330.