

# 基于质构特性分析对寒富苹果贮藏品质的预测

张佰清, 关悦乐

(沈阳农业大学食品学院, 辽宁 沈阳 110866)

**摘 要:** 应用BP神经网络, 通过苹果质构特性指标(硬度、可恢复形变、黏着性、内聚性、咀嚼性)来预测苹果贮藏品质(出汁率、可溶性固形物、总酸、固酸比)的方法, 建立苹果品质的预测模型。本实验将寒富苹果分别置于温度为0℃和20℃的贮藏条件下, 分别测定苹果在贮藏期间品质的变化。以苹果质构特性指标为输入, 品质指标为输出确定网络拓扑结构, 训练所建立的苹果品质神经网络模型。仿真结果表明: 该神经网络模型用质构特性指标能预测苹果品质, 同时通过2组非样本数据来验证该模型, 其预测值与实测值的相对误差在5%以下, 故能够实现用质构值评价苹果品质的目的。

**关键词:** 寒富苹果; 质构特性; 贮藏品质; BP神经网络; 预测模型

## Prediction of Storage Quality of ‘Hanfu’ Apple Based on Texture Properties

ZHANG Bai-qing, GUAN Yue-yue

(College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** A BP neural network model for predicting storage quality traits of ‘Hanfu’ apple including juice yield, soluble solids, total acid and solid/acid ratio based on texture properties such as hardness, resilience, adhesiveness, cohesiveness and chewiness was established. Quality changes of ‘Hanfu’ apple were measured during storage at 0 °C and 20 °C. A topological network structure was constructed to train the established predictive model. The results of simulation demonstrated that the BP neural network model allowed the prediction of apple quality based on texture properties. The model was validated using two sets of non-sample data and relative errors lower than 5% between the predicted and the observed values were obtained.

**Key words:** ‘Hanfu’ apple; texture properties; quality properties; BP neural network; predictive model

中图分类号: TS255.3; TP183

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2012)24-0335-04

寒富苹果是抗寒优质的大果型苹果品种, 近些年更是在北方地区广泛种植。总产量大, 市场占有率更是逐年增大。在贮藏保鲜及流通过程中, 适时测定和掌握寒富苹果品质变化规律及质量分级, 可提高寒富苹果的商品品质与经济价值<sup>[1-2]</sup>。物性学测定分析就是方法之一。

近年来, 国内外对苹果物性学开展了一系列的研究。运用各种物理学方法如声、光<sup>[3-4]</sup>、电、图像视觉技术、力学等手段对物料进行监测分析, 基于被检物料的物理性质如密度、硬度、形态、颜色等, 进而判定成熟度以及内部的含糖量、糖酸比、水分、内部病变等<sup>[5]</sup>, 刘燕德等<sup>[6]</sup>利用Matlab 6.1分析了苹果有效酸度与漫反射原始光谱吸光度的相关关系、李小昱等<sup>[1,7]</sup>利用人工神经网络建模, 实现用苹果机械特性指标检测苹果总酸、可溶性固形物等贮藏品质等。上述研究表明用物性指标测定和预测苹果贮藏品质是可行的。

随着质构仪逐步应用于果蔬质地测定<sup>[7]</sup>, 减少了个体

间主观判断差异造成的误差, 也为研究果蔬品质变化提供了新的手段<sup>[8-10]</sup>。本实验选用寒富苹果为原料, 基于神经网络算法, 尝试用质构特性指标预测苹果在冷藏与货架期间的贮藏品质。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料处理

以2010年9月27号采摘的寒富苹果为实验材料。将苹果分别设为冷藏组和货架组。其中冷藏组的苹果置于(0±0.5)℃的条件下; 货架组苹果置于(20±1)℃条件下; 相对湿度均为92%~98%。每周分别取样一次, 测定贮藏期间苹果的品质和质构值变化, 重复3次取平均值。

### 1.2 仪器与设备

CT3型质构仪(Texture Analyser) 美国Brookfield公司; TD-45型数显糖度计 浙江托普仪器有限公司; 恒

收稿日期: 2011-10-19

基金项目: 沈阳市科技局项目

作者简介: 张佰清(1966—), 男, 副教授, 博士, 主要从事食品工程技术研究。E-mail: sybaiqingxl@sina.com

温恒湿培养箱 上海精密仪器仪表有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 常规测定方法

依据GB 8559—87《苹果冷藏技术》，理化特性指标选取可溶性固形物、总酸、固酸比及出汁率。可溶性固形物(total soluble solids, TSS)测定：采用数显糖度计进行测定；总酸测定：采用直接滴定法；出汁率测定：出汁率/%=压榨后果汁质量/鲜果质量×100，每项测试重复3次，取平均值。

#### 1.3.2 质构特性测定

将寒富苹果去皮和切片，沿横向切成直径5cm 厚度2cm的柱状果片，将试样置于CT3质构仪TA41探头下做TPA试验。参数设置为：预测速度2mm/s；测试速率0.5mm/s；返回速度0.5mm/s；触发点负载7g；测定深度6mm；停留时间0s；可恢复时间5s；数据频率10点/s。得出测定参数。每项测试重复3次，取平均值<sup>[11-13]</sup>。

#### 1.4 TPA图谱及参数计算方法

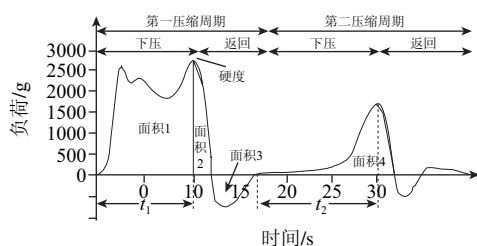


图1 苹果TPA试验质地特征曲线

Fig.1 Typical texture profile analysis curve of an apple

图1中各值计算公式如下：可恢复形变=面积2/面积1；弹性= $t_2/t_1$ ；内聚性=面积4/面积1+面积2；咀嚼性=硬度×内聚性×弹性；黏性=面积×3。

#### 1.5 运用BP神经网络建模

BP(back propagation)神经网络模型拓扑结构包括输入层(input)、隐层(hidden layer)和输出层(output layer)。输入层各神经元负责接收来自外界的输入信息，并传递给中间层各神经元；中间层是内部信息处理层，负责信息变换，根据信息变化能力的需求，中间层可以设计为单隐层或者多隐层结构；最后一个隐层传递到输出层各神经元的信息，经进一步处理后，完成一次学习的正向传播处理过程，由输出层向外界输出信息处理结果。当实际输出与期望输出不符时，进入误差的反向传播阶段，各层权值通过不断调整，最终训练得出满足误差要求的网络<sup>[14]</sup>。

本实验以寒富苹果的质构特性值为输入，苹果贮藏品质值为输出，冷藏组与货架组各取10组测试数据为样本数据来训练神经网络模型。冷藏组与货架组各取1组非样本数据来验证该神经网络，此过程一直进行到网络输

出的误差达到5%以下的程度。

## 2 结果与分析

### 2.1 TPA苹果各质构参数间的相关性分析

#### 2.1.1 果肉硬度

硬度是果实越过生物屈服点后，外界继续施加一定程度的压力，果实所受力的大小。硬度可以反映果肉细胞膨压大小，细胞膨压大，则果实硬度大。所以采用硬度指标进行建模<sup>[15]</sup>。

表1 TPA试验所得苹果各项质地参数间的相关性(R)矩阵表

Table1 Correlation (R) matrix between TPA texture parameters

	硬度/g	可恢复形变/mm	黏着性/mJ	内聚性	弹性/mm	咀嚼性/mJ
硬度/g	1.000					
可恢复形变/mm	0.628	1.000				
黏着性/mJ	-0.652	-0.484	1.000			
内聚性	0.628	0.820*	-0.560	1.000		
弹性/mm	0.703	0.888*	-0.597	0.777	1.000	
咀嚼性/mJ	0.639	0.834*	-0.655	0.761	0.874*	1.000

注：数据为冷藏与货架组苹果综合评价结果；\*表示显著相关( $R > 0.8$ )。

#### 2.1.2 果肉可恢复形变与弹性相关性分析

可恢复形变表示样品在第一次压缩过程中快速恢复变形的能力，是第一次压缩循环过程中返回时样品所释放的弹性能与压缩时探头的耗能之比。弹性表示样品经过第一次压缩以后在一段时间内，变形恢复的能力。由表1可知，果肉可恢复形变与弹性的相关性很显著( $R=0.888$ )，考虑到弹性受第一次压缩后对试样变形程度的影响较大，生物体弹性会表现出受到了抑制，故采用可恢复形变进行建模。

#### 2.1.3 果肉咀嚼性与内聚性相关性分析

咀嚼性反映了果实对咀嚼的持续抵抗性。内聚性反映的是咀嚼果肉时，果粒抵抗受损并紧密连接，使果实保持完整的性质。由表1可知，果肉咀嚼性与内聚性相关性显著( $R=0.874$ )，说明二者能够反映果实同一质地特性对应人体口腔中触觉感受。咀嚼性与内聚性均能较好的反映果肉质度，故采用两个参数进行建模。

#### 2.1.4 果肉黏着性

黏着性是下压一次后探头从试样中拔出所需要能量的大小。它能够反映果肉细胞间结合力大小，细胞间结合力减小，则黏着性增大。由表1可知，果肉黏着性与硬度、内聚性、弹性、咀嚼性皆成负相关，说明硬度、内聚性、弹性、咀嚼性较高的果肉，无黏着性或者黏着性很小。黏着性的大小能较好的反映果肉质地的新鲜程度，故采用黏着性进行建模。

综上所述，本实验采用硬度、可恢复形变、黏着性、内聚性、咀嚼性5个质构特性参数为输入量来建立模

表2 不同贮藏期苹果特性品质指标的测量值

Table 2 Measured quality parameters of apples during different storage periods

时间/周	组别	质构特性					贮藏品质			
		硬度/g	可恢复形变/mm	黏着性/mJ	内聚性	咀嚼性/mJ	可溶性固形物/%	总酸/%	固酸比/%	出汁率/%
1	1	2945.67	1.31	1.93	0.15	17.53	11.5	0.45	25.56	77.18
	2	2774.67	1.46	1.87	0.18	15.9	11.7	0.42	27.86	77.87
2	1	2571.67	1.11	2.3	0.13	15.3	11.6	0.43	26.98	76.93
	2	2567	1.41	2.27	0.15	14.77	12	0.4	30.00	76.39
3	1	2435.33	1.05	2.37	0.13	14.83	11.7	0.4	29.25	76.01
	2	2571.33	1.29	2.3	0.15	15	12.53	0.39	32.13	74.09
4	1	2477	1.03	2.54	0.138	14.73	11.6	0.374	31.02	75.08
	2	2346.67	1.13	2.7	0.136	10.93	12.63	0.35	36.09	73.24
5	1	2454	0.93	2.7	0.14	12.13	12.07	0.379	31.85	74.37
	2	2339	1.1	2.3	0.13	9.63	12.73	0.32	39.78	72.84
6	1	2297	0.95	2.77	0.13	11.6	12	0.36	33.33	73.92
	2	2310	1	2.48	0.12	9.23	13.2	0.3	44.00	71.39
7	1	2284	0.97	2.77	0.13	9.07	12.1	0.335	36.12	73.71
	2	2206.33	0.87	2.57	0.11	7.47	12.9	0.29	44.48	70.85
8	1	2229.33	0.97	3.03	0.12	8.15	12.47	0.329	37.90	72.81
	2	2093	0.84	2.87	0.11	8	13.53	0.28	48.32	70.46
9	1	2268.33	0.9	3.13	0.12	8.03	12.4	0.31	40.00	72.19
	2	2042.33	0.87	4.23	0.1	6.13	13.8	0.27	51.11	69.77
10	1	2229	0.94	3.1	0.11	8.93	12.77	0.318	40.16	71.98
	2	1985	0.77	4.73	0.09	6.3	14.15	0.25	56.60	68.24
11	1	2190.33	0.97	3.5	0.12	8.13	13.3	0.3	44.33	71.45
	2	1977	0.7	5	0.08	4.8	14.4	0.22	65.45	66.59

注：“组别”中，1表示冷藏组，贮藏于0℃条件；2表示货架组，贮藏于20℃条件。下同。

型。苹果质构特性指标和不同贮藏期加工品质特性指标的结果如表2所示。

## 2.2 运用神经网络建模与模型验证结果

采用MATLAB7.6.0工具箱中的Newff函数来初始化网络，首先定义网络的输入、输出样本，隐含层包含10个神经元，即网络结构为6-10-4的3层结构的BP神经网络。相邻层神经元之间为单项完全连接，输入层与隐含层、隐含层与输出层之间的链接权值分别为 $w_{1kj}$ 和 $w_{2kj}$ 。链接权的大小体现在前接神经元的输入对后续神经元的激励强度。图2为基于BP算法的3层神经网络模型的拓扑结构。输入层、隐含层采用Tansig作为传递函数，即 $f(x)=\tanh(x)$ ，输出层采用Purelin传递函数，即 $f(x)=kx$ 。训练苹果品质预测模型<sup>[4]</sup>，最后运用Traingd算法优化训练所建立的网络，直到网络性能目标误差达到 $1 \times 10^{-4}$ 以下，同时通过2组非训练样本数据来验证所建立网络的合理性。

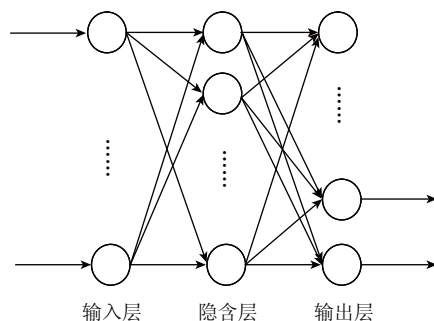


图2 神经网络拓扑结构

Fig.2 Topologic pattern of neural network

### 2.2.1 仿真结果及分析

网络训练时的误差变化曲线如图1所示，定义均方误

差MSE作为目标误差：

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e_i)^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - a_i)^2$$

式中： $t_i$ 、 $a_i$ 分别表示第*i*个训练样本的目标输出和网络输出。

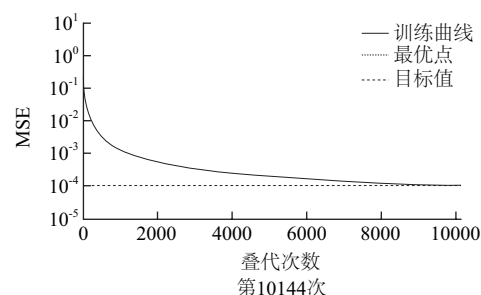


图3 误差变化曲线

Fig.3 Error curve obtained from model training

从图3可以得出，所设计的苹果品质神经网络模型用20组样本数据进行训练，网络性能目标误差为 $1 \times 10^{-4}$ ，学习率为0.05，步长达到10144次时，输出层的均方误差达到了 $9.986 \times 10^{-5}$ ，满足训练参数中要求的目标误差要求。

### 2.2.2 预测结果的验证

将2组非样本实验数据输入到所建立的神经网络来预测0℃和20℃的苹果品质，通过与实验数据的对比，来进一步分析所建立模型的合理性，表3为后2组实测值与模型预测值的对比结果。

从表3可知，该BP神经网络预测性能较好，与实测值相对误差较小，最大相对误差为3.005%，最小误差达到0.003%，预测效果好，能够满足苹果品质预测的精度要求。

表 3 模型预测与实测值的对比  
Table3 Comparison of predicted values and measured values of quality parameters

组别	可溶性固形物/%			总酸/%			固酸比/%			出汁率/%		
	预测值	实测值	相对误差/%	预测值	实测值	相对误差/%	预测值	实测值	相对误差/%	预测值	实测值	相对误差/%
1	13.3	13.05	3.005	0.3	0.29	0.786	44.33	43.25	0.413	71.45	70.06	0.300
2	14.4	14.26	1.558	0.22	0.23	0.852	65.45	65.52	0.003	66.59	64.78	0.095

3 结论与讨论

寒富苹果的果肉黏着性与硬度、内聚性、弹性、咀嚼性皆成负相关。果肉的硬度、可恢复形变、黏着性、内聚性、咀嚼性5项质构指标，在反映果实质构特性中的可靠度优于其他质构特性值，可采用这5项指标为输入量来建立模型。采用Matlab7.6.0建立苹果在0℃和20℃温度下的品质与质构值之间关系的预测数学模型，其预测结果误差小于5%，通过2组非样本数据进行验证，实测值与预测值的相对误差较小，预测效果好，因此可以通过测定质构值的方法，来预测寒富苹果品质。

质构值可通过质构仪TPA试验挤压鲜果试样得到，用于品质预测耗时少，检测方便。但是，影响苹果贮藏品质的因素很多，苹果品种间也存在差异，预测体系也需要继续完善，对此还有待于进一步研究。

参考文献：

[1] 李小昱, 汪小方, 王为. 基于机械特性BP神经网络的苹果贮藏品质预测[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 150-153.  
[2] 邵兴锋, 屠康, 王海, 等. 采后热空气处理对嘎拉苹果品质及后熟特性的影响[J]. 食品科学, 2007, 28(6): 351-355.  
[3] 张海东, 赵杰文, 刘木华. 基于混合线性分析的苹果糖度近红外光谱检测[J]. 农业机械学报, 2006, 37(4): 149-163.  
[4] 赵杰文, 张海东, 刘木华. 简化苹果糖度预测模型的近红外光谱预处理方法[J]. 光学学报, 2006, 26(1): 136-140.

[5] 于华宁, 郑先哲. 苹果品质无损检测和分级的研究现状与发展趋势[C]//中国农业工程学会2007年学术年会论文集, 2007: 1-6.  
[6] 刘燕德, 应义斌. 近红外漫反射式水果糖份含量的测量系统[J]. 光电工程, 2004, 31(2): 51-53.  
[7] 李小昱, 王为. 基于灰色系统理论用机械特性指标预测苹果贮藏品质特性[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 1-6.  
[8] 刘亚平, 李红波. 物性分析仪及TPA在果蔬质构测试中的应用综述[J]. 山西农业大学学报, 2010, 30(2):188-192.  
[9] 潘秀娟, 屠康. 质构仪质地多面分析(TPA)方法对苹果采后质地变化的检测[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 166-170.  
[10] 朱帆, 徐广文, 丁文平. 小麦理化性质与馒头品质的相关性研究[J]. 粮油加工, 2007(8): 102-105.  
[11] 姜松, 王海鸥. TPA质构分析及测试条件对苹果TPA质构分析的影响[J]. 食品科学, 2004, 25(12): 68-71.  
[12] User manual of TA-XT2i[M]. England: Stable Micro Systems.  
[13] HARKER F R, MAINDONALD J, MURRAY S H, et al. Sensory interpretation of instrumental measurements 1: texture of apple fruit[J]. Post-harvest Biol Tec, 2002, 24(3): 225-239.  
[14] 闵惜琳, 刘国华. 人工神经网络结合遗传算法在建模和优化中的应用[J]. 计算机应用研究, 2002, 19(1): 79-80.  
[15] ALVAREZ M D, EDWARD D, SAUNDERS J, et al. Fracture properties of stored fresh and osmotically manipulated apple tissue[J]. Eur Food Res Technol, 2000, 211(4): 284-290.  
[16] BRUSEWITZ G H, BARTSCH J A. Impacts parameters related to post harvesting bruising of apples[J].Transactions of the ASAE, 1989, 32(3): 953-957.  
[17] HARKER F R, MAINDONALD J, MURRAY S H, et al. Sensory interpretation of instrumental measurements 1: texture of apple fruit[J]. Post-harvest Biol Tec, 2002, 24(3): 225-239.