

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.041

仿生食品质构仪设计与试验*

孙钟雷^{1,2} 孙永海¹ 李 宇² 刘晶晶¹ 李君兴³

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025; 2. 长江师范学院生命科学与技术学院, 重庆 408100;
3. 吉林省农业机械研究院, 长春 130025)

【摘要】 利用仿生技术设计了仿生咀嚼装置、仿生牙周膜,搭建了二级信号放大电路,使用 Visual C++ 语言开发了测试软件,组建成仿生食品质构仪。使用该质构仪对苹果、胡萝卜进行了质地测量试验,并与感官评价、通用质构仪测量进行对比。Pearson 相关性分析表明,仿生食品质构仪测量结果与感官评分达到了极显著的相关性,与苹果硬度、脆性的相关系数为 0.970、0.904,与胡萝卜硬度、脆性的相关系数为 0.961、0.971,均大于通用食品质构仪测量与感官评分的相关系数。

关键词: 质构仪 仿生 感官评价

中图分类号: TB17 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)01-0230-05

Design and Experiment of Bionic Food Texture Analyzer

Sun Zhonglei^{1,2} Sun Yonghai¹ Li Yu² Liu Jingjing¹ Li Junxing³

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China
2. Department of Life Science and Technology, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China
3. Jilin Provincial Academy of Agricultural Machinery, Changchun 130025, China)

Abstract

The bionic chewing equipment and parodontium were designed by bionic technology and two stages, a signal amplifying circuit was made, the testing software was developed by Visual C++, and then the bionic food texture analyzer was set up. Apples and carrots were measured by using this texture analyzer and the corresponding experiments were done and results were contrasted with those from panelists and the universal food texture analyzer. Pearson correlation coefficients showed that test values of the bionic food texture analyzer and sensory evaluation had a good relationship, the correlation coefficients with apple's hardness, crunchiness were 0.970, 0.904, and with carrot's hardness, crunchiness were 0.961, 0.971. The data are better than the coefficients from the universal food texture analyzer and sensory evaluation.

Key words Texture analyzer, Bionic, Sensory evaluation

引言

质构仪是食品质地测量的主要仪器,目前已广泛应用于食品质地的评价分析。Susana R S 等^[1]使用 TaxT2i 型食品质构仪对葡萄皮的硬度和厚度进行了测试。Lee H L 等^[2]使用 CT3 型食品质构仪对甘薯淀粉的物理特性和流变特性进行了测试。除了

这些通用食品质构仪外,人们已研制出一些新型食品质构仪。Mitsuru T 等^[3]研制了由探针、压电传感器、计算机等组成的食品质构仪,通过探针刺压食物、压电传感器感知食物振动信号,测试了苹果、柿子、梨的质地特性。Behic M 等^[4]研制了由圆球压头、压电水晶、加载单元等组成的质地测试仪,利用此装置测试了玉米粉的粘弹性。陈纯等^[5]研制了

收稿日期: 2011-05-09 修回日期: 2011-05-31

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2008AA100802)

作者简介: 孙钟雷,博士生,长江师范学院讲师,主要从事农产品智能检测与评价研究,E-mail: jlu.szl@163.com

通讯作者: 孙永海,教授,博士生导师,主要从事农产品智能检测与评价研究,E-mail: sunyh@jlu.edu.cn

由操作台、探头、压力传感器、直流电动机等组成的新型食品品质构仪,对胡萝卜进行了穿透测试。这些食品质地测量仪器,只近似模仿牙齿咀嚼运动进行质地测量,没有模仿齿面形态、牙周膜结构及信号传递机理、口腔温湿环境等,与人类的感官相差较大。质地测量仪器应符合消费者的感官评价习惯,越接近人的感官,测量仪器就越好^[6]。

本文根据牙齿感知食物质地的机理,利用仿生技术对牙齿、牙周膜、咀嚼运动、口腔温度以及唾液分泌进行全面模仿,设计仿生食品品质构仪,并对食品质地进行测试,为食品质地的客观、准确、快速评价提供一种新仪器。

1 仿生食品品质构仪设计

1.1 整体结构

仿生食品品质构仪主要由仿生咀嚼装置、仿生牙周膜、信号调理电路、测试软件等构成,见图 1。

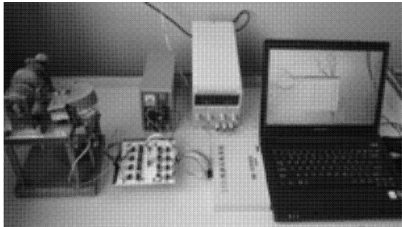


图 1 仿生食品品质构仪
Fig.1 Bionic food texture analyzer

1.2 仿生咀嚼装置

前期对仿生咀嚼装置的零部件、咀嚼运动方案进行了详细设计,见文献[7]。本装置主要包括仿生牙齿、仿生颞下颌关节、仿生上下颌、仿咀嚼肌弹簧、动力系统、装卸料机构、支撑架等,可完成三维咀嚼运动,实现压碎、磨细食物的功能。主要参数如下:最大开口度为 40 mm,最大前后伸缩距离为 4 mm,最大侧向偏移距离为 4 mm;咬合力可随仿咀嚼肌弹簧弹性系数改变而改变,弹性系数设为 10 ~ 60 N/mm,可满足不同食物咬合力的要求;咀嚼速度可通过调整电动机转速而改变,调速范围为 0 ~ 120 r/min;咀嚼方式可实现单、双侧咀嚼;仿生口腔温度为 (37 ± 1) °C,人造唾液流速为 3 mL/min;电动机、自控温电热带、微型水泵的供电为 220 V 交流电。

1.3 仿生牙周膜及信号调理电路

牙周膜是牙根周围的纤维组织薄膜,其中的机械感受器极为敏感,可以感知齿面上微小的触压力。选取 PVDF 压电薄膜作为敏感元件,模仿牙周膜机械感受器,其压电效应好、质地柔软、易粘合、防水防潮,适合牙齿咀嚼力的测量^[8]。以 PVDF 压电薄膜为主体,配以导线、薄铜片、PET 薄膜、环氧导电胶,

制成压电薄膜传感器。根据仿生牙齿根部的形态以及牙周膜感受器分布部位,将压电薄膜传感器制成圆锥筒形和圆片形,分别粘贴于仿生牙齿齿根外围和底部,从而形成仿生牙周膜,如图 2 所示。在仿生上下颌的左右两侧仿生第一磨牙、第二磨牙,共 8 颗牙齿的外围和底部粘贴仿生牙周膜。PVDF 薄膜材料使用锦州科信电子材料有限公司生产的 50 μm 厚、镀铝压电薄膜,制成的仿生牙周膜厚度为 0.2 mm,与人牙周膜厚度相仿。

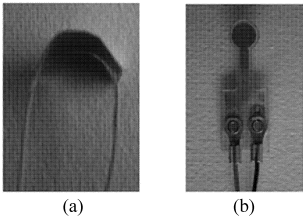


图 2 仿生牙周膜
Fig.2 Bionic parodontium
(a) 圆锥筒形 (b) 圆片形

根据 PVDF 薄膜性质和信号采集卡要求,采用二级放大电路进行信号放大。选用 CA3140 高输入阻抗运算放大器作为首级电荷放大,它具有高达 1.5 TΩ 的输入阻抗,同时具有低达 10 pA 的输入电流,可以满足 PVDF 压电薄膜的要求。选用 UA741 运算放大器进行电压反相比例二级放大,放大倍数可通过滑动变阻器调节,整个电路使用 ±12 V 电源供电。放大电路如图 3 所示。

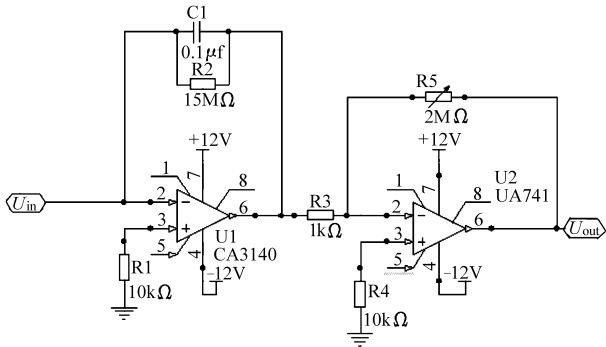


图 3 信号放大电路
Fig.3 Figure of the signal amplifying circuit

PVDF 压电薄膜有多个极化方向,其正压电效应的压电方程为^[9]

$$D = dT + \epsilon^T E \tag{1}$$

其中 $D = [D_1 \ D_2 \ D_3]^T$
 $T = [T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4 \ T_5 \ T_6]^T$
式中 ϵ ——介电常数矩阵 E ——电场强度
 D ——面电荷密度矩阵
 T ——应力 d ——压电常数矩阵

根据仿生牙周膜的应用情况,所用 PVDF 压电薄膜的极化方向为方向 3,即厚度方向,因此在仿生

牙周膜受力被压缩时,可得

$$D_3 = d_{33} T_3 \quad (2)$$

则由式(2)可知仿生牙周膜受压力时,产生的表面电荷与所受压力呈线性关系。根据设计的电荷转换放大电路,再结合电荷与电压关系,放大电路的输出电压可表示为

$$U_{out} = A \frac{d_{33} T_3}{C_1} \quad (3)$$

式中 U_{out} ——电路输出电压

A ——电路放大倍数

C_1 ——电荷放大器的反馈电容

由式(3)可知,放大电路输出的电压与仿生牙周膜所受压力也呈线性关系。本文直接用电路输出电压信号表征咀嚼压力信号,用于测量食品质地。

信号采集电路采用多路同步采集方法,主要由多路模拟开关、A/D 转换、计算机接口组成,使用 16 位 A/D、32 路开关量 USB7889 高速采集卡实现。

1.4 测试软件

利用 Visual C++ 语言开发仿生食品质构仪测试软件,整个软件基于单文档设计,界面友好、操作方便,可实现食品质地信号的自动采集和分析处理,还可绘出信号曲线图。主要包括样品信息、参数设置、信号采集、数据处理 4 个模块,测试软件主界面见图 4。样品信息模块用于从数据库中调出待测样品的最佳测试条件,参数设置模块用于设置测试参数、采集参数等。信号采集模块是本软件的主要部分,通过程序驱动 USB7889 采集卡,完成多路信号的同步采集,包括 AD 校正、时间设定、采样操作、图形绘制、数据存储,见图 5。数据处理模块包括数据预处理和数据的特征提取,能提供信号曲线的最大峰值、样品脆裂时峰值、平均值、峰面积、最大峰值时间、样品脆裂时间等,还可方便地修改程序,获取其它特征数据。



图 4 仿生食品质构仪测试软件界面

Fig. 4 Software interface of bionic food texture analyzer

2 食品质地测量试验

2.1 试验材料

国光苹果,购于超市,新鲜、无破损、无虫蛀,呈

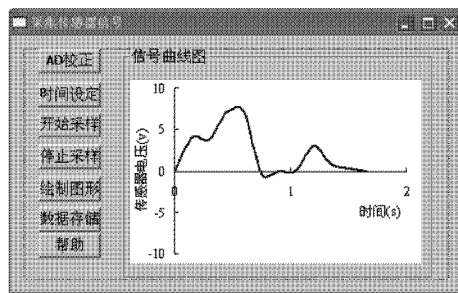


图 5 信号采集界面

Fig. 5 Signal collection module

圆球形,直径 7 ~ 8 cm。沿果梗将苹果纵向均匀切开,任取一瓣,使用打孔器在切断面左右两边果肉的上、中、下 3 个部位各取 3 个样品,共 6 个样品。每个样品制成圆柱体 ($\Phi 10 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$)。胡萝卜,购于超市,新鲜、无破损、肉色橙红,长 18 ~ 20 cm、直径 4 ~ 5 cm。去皮后沿轴线方向平分分为顶、中、底 3 个部位,使用打孔器在这 3 个部位分别沿横向、纵向取样,共 6 个样品。样品制成圆柱体 ($\Phi 10 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$)。

2.2 测量方法

2.2.1 感官评价

邀请咀嚼功能正常、无任何口腔疾病的食品专业师生,首先进行食品质地评价能力筛选,最终确定 20 名合格的评价员组成感官评价小组,男女生各 10 人,平均年龄 25.5 岁。对苹果、胡萝卜的硬度、脆性两项质地指标进行评价。将样品置于上下第一磨牙间,按平均咀嚼速度 (68 次/min),每咀嚼 1 次将咀嚼感知的硬脆特性记录下来。每种样品评价 3 次,取平均值,每次评价后用纯净水漱口。评价标准参照文献[6],其中硬度采用 1 ~ 9 分制;脆性采用 1 ~ 7 分制。

2.2.2 仿生食品质构仪测量

将仿生食品质构仪调试到待测状态,打开自控温电热带控制器,预热 3 min,使用装卸料机构将样品送入仿生咀嚼装置,打开电动机、微型水泵,使用仿生第一磨牙组单侧咀嚼一个循环。仿生口腔温度 37℃,人造唾液流速 3 mL/min,电动机转速 68 r/min (相当于人的平均咀嚼速度 68 次/min),每种试样测试 5 次。参考不同食物所需的咬合力^[10],测试苹果和胡萝卜时分别选取弹性系数为 30 N/mm 和 40 N/mm 的仿咀嚼肌弹簧。使用测试软件获取仿生下颌第一磨牙周围和底部的仿生牙周膜电压信号,将两者信号曲线的最大峰值取平均值,表征样品硬度,将两者信号曲线的脆裂时峰值取平均值,表征样品脆性。

2.2.3 通用食品质构仪测量

使用 CT3 型食品质构仪对苹果、胡萝卜进行 TPA 质地测定,采用直径 12.7 mm Black Delrin 圆柱

探头 TA5。苹果测试条件^[11]:预压速度 1.00 mm/s,下压速度 0.5 mm/s,压后上行速度 1.00 mm/s,两次压缩中间停顿 5 s,试样受压变形 60%,触发力值 0.1 N。胡萝卜测试条件^[12]:预压速度 1.00 mm/s,下压速度 1 mm/s,压后上行速度 1.00 mm/s,两次压缩中间停顿 2 s,试样受压变形 40%,触发力值 0.1 N。根据 Texture Loader 软件控制模式,取信号曲线的最大值作为样品硬度,取压缩破裂时峰值作为样品脆性。每种试样测试 5 次。

2.2.4 数据处理方法

使用 SPSS 13.0 软件对试样质地测量值差异进行方差分析,对仿生食品质构仪测试结果、通用食品质构仪测试结果和感官评分之间的相关性采用皮尔

逊(Pearson)相关系数分析。

2.3 相关性分析

按照 2.2.1 节方法对苹果、胡萝卜进行硬度、脆性感官评价,评分见表 1。其中苹果为 6 种样品,用 A1、A2、A3 分别代表左边果肉的上、中、下 3 种试样,A4、A5、A6 分别代表右边 3 种试样;用 C1~C6 分别代表胡萝卜顶部横向、纵向试样,中部横向、纵向试样,底部横向、纵向试样。按照 2.2.2 节方法对苹果、胡萝卜进行仿生食品质构仪测试,结果见表 2。按照 2.2.3 节方法对苹果、胡萝卜进行通用食品质构仪测试,结果见表 3。苹果、胡萝卜的硬度、脆性感官评分与仿生食品质构仪、通用食品质构仪测量结果之间的相关系数见表 4、5。

表 1 两种食品的感官评价结果
Tab.1 Results of sensory evaluation on apples and carrots

参数	A1	A2	A3	A4	A5	A6	C1	C2	C3	C4	C5	C6
硬度评分	2.92 ± 0.12 ^a	3.03 ± 0.11 ^{ab}	3.28 ± 0.10 ^b	2.93 ± 0.09 ^a	3.04 ± 0.09 ^{ab}	3.30 ± 0.10 ^b	6.47 ± 0.10 ^a	6.74 ± 0.11 ^b	6.63 ± 0.06 ^{ab}	7.12 ± 0.08 ^c	6.58 ± 0.11 ^{ab}	6.75 ± 0.06 ^b
脆性评分	1.84 ± 0.12 ^a	1.95 ± 0.10 ^a	2.02 ± 0.08 ^a	1.88 ± 0.06 ^a	1.93 ± 0.07 ^a	2.05 ± 0.08 ^a	4.50 ± 0.23 ^a	5.91 ± 0.21 ^b	4.90 ± 0.20 ^a	5.97 ± 0.32 ^b	4.60 ± 0.30 ^a	5.71 ± 0.11 ^b

注:数值表示形式为平均值±标准差,上标字母不同者差异显著(P<0.05),下同。

表 2 两种食品的仿生食品质构仪测量结果
Tab.2 Results of apples and carrots measured by the bionic food texture analyzer

参数	A1	A2	A3	A4	A5	A6	C1	C2	C3	C4	C5	C6
最大峰值	2.95 ± 0.07 ^a	3.00 ± 0.09 ^a	3.26 ± 0.07 ^b	2.96 ± 0.10 ^a	3.02 ± 0.06 ^a	3.29 ± 0.07 ^b	5.17 ± 0.10 ^a	5.44 ± 0.01 ^b	5.34 ± 0.09 ^{ab}	5.72 ± 0.03 ^c	5.28 ± 0.11 ^{ab}	5.40 ± 0.12 ^{ab}
脆裂峰值	1.81 ± 0.07 ^a	1.91 ± 0.12 ^{ab}	2.01 ± 0.06 ^{ab}	1.85 ± 0.05 ^{ab}	1.92 ± 0.03 ^{ab}	2.03 ± 0.08 ^b	2.90 ± 0.09 ^a	3.56 ± 0.06 ^b	3.02 ± 0.18 ^a	3.72 ± 0.07 ^b	2.90 ± 0.11 ^a	3.49 ± 0.11 ^b

表 3 两种食品的通用食品质构仪测量结果
Tab.3 Results of apples and carrots measured by the universal food texture analyzer

参数	A1	A2	A3	A4	A5	A6	C1	C2	C3	C4	C5	C6
TPA 硬度	50.33 ± 3.06 ^a	54.67 ± 4.04 ^{ab}	60.00 ± 3.61 ^{bc}	51.00 ± 4.58 ^{ab}	55.00 ± 1.00 ^{ab}	60.67 ± 3.06 ^c	96.00 ± 3.00 ^a	110.33 ± 9.50 ^{ab}	100.67 ± 6.03 ^a	117.00 ± 2.65 ^b	99.00 ± 3.61 ^a	100.67 ± 5.86 ^{ab}
TPA 脆性	35.33 ± 2.52 ^a	40.00 ± 3.61 ^{ab}	44.67 ± 3.51 ^{bc}	35.67 ± 1.53 ^a	39.00 ± 2.00 ^{ab}	46.00 ± 1.00 ^c	62.67 ± 2.52 ^a	64.67 ± 4.00 ^a	67.00 ± 2.65 ^{ab}	76.00 ± 6.24 ^c	64.67 ± 4.16 ^{ab}	74.00 ± 2.00 ^{bc}

表 4 两种食品的硬度感官评分与测量结果之间的相关系数
Tab.4 Correlation coefficients between values measured by the bionic and universal food texture analyzer and hardness sensory evaluation to apples and carrots

硬度评分	仿生食品质构仪测量的最大峰值	通用食品质构仪测量的 TPA 硬度
苹果	0.970 **	0.876 **
胡萝卜	0.961 **	0.860 **

** 相关性极显著

表 5 两种食品的脆性感官评分与测量结果之间的相关系数
Tab.5 Correlation coefficients between values measured by the bionic and universal food texture analyzer and crunchiness sensory evaluation to apples and carrots

脆性评分	仿生食品质构仪测量的样品脆裂时峰值	通用食品质构仪测量的 TPA 脆性
苹果	0.904 **	0.783 *
胡萝卜	0.971 **	0.869 **

* 相关性显著; ** 相关性极显著。

从表4可见,苹果、胡萝卜的硬度感官评分与仿生食品品质构仪测量的最大峰值都达到了极显著的相关性($r=0.970$ 和 $r=0.961$),与通用食品品质构仪测量的TPA硬度也达到了极显著的相关性($r=0.876$ 和 $r=0.860$)。因此,可以使用仿生食品品质构仪测量的最大峰值,来表征这两种食品的感官硬度。仿生食品品质构仪测量结果与硬度感官评分的相关系数均大于通用食品品质构仪测量结果,说明仿生食品品质构仪测量结果更接近人类感官,对于苹果、胡萝卜的硬度测定要优于通用食品品质构仪。

从表5可见,苹果、胡萝卜的脆性感官评分与仿生食品品质构仪测量的脆裂时峰值都达到了极显著的相关性($r=0.904$ 和 $r=0.971$),与通用食品品质构仪测量的TPA脆性的相关系数为0.783、0.869。因此,可以使用仿生食品品质构仪测量的脆裂峰值,来表征这两种食品的感官脆性。而对通用食品品质构仪测量的苹果脆性相关系数只有0.783,勉强可以表征苹果的感官脆性。仿生食品品质构仪测量结果与脆性感官评分的相关系数均大于通用食品品质构仪测量结

果,说明仿生食品品质构仪对于苹果、胡萝卜的脆性测量结果更接近人类感官,要优于通用食品品质构仪。

3 结论

(1) 研制的仿生食品品质构仪可以对食品质地进行测量,使用仿生技术研制食品品质构仪进行脆性食品质地检测具有可行性。

(2) 相关性分析表明,仿生食品品质构仪测量结果与感官评分达到了极显著的相关性,可以使用仿生食品品质构仪测量的最大峰值,来表征苹果、胡萝卜的硬度;可以使用脆裂时峰值,来表征苹果、胡萝卜的脆性。

(3) 仿生食品品质构仪测量结果与苹果感官硬度、脆性的相关系数为0.970、0.904,与胡萝卜硬度、脆性的相关系数为0.961、0.971,均大于通用食品品质构仪测量与感官评分的相关系数,表明仿生食品品质构仪更接近人类感官,更适合脆性食品质地的测试。

参 考 文 献

- Susana R S, Luca R, Vincenzo G, et al. Phenolic ripeness assessment of grape skin by texture analysis [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2008, 21(8):644~649.
- Lee H L, Yoo B. Effect of hydroxypropylation on physical and rheological properties of sweet potato starch [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2011, 44(3):765~770.
- Mitsuru T, Takanori H, Naoki S. Device for acoustic measurement of food texture using a piezoelectric sensor [J]. *Food Research International*, 2006, 39(10):1099~1105.
- Behic M, David G, Osvaldo H, et al. A new method to determine viscoelastic properties of corn grits during cooking and drying [J]. *Journal of Cereal Science*, 2007, 46(1):32~38.
- 陈纯,汪琳,周骥. 新型食品品质构仪的研制[J]. *农业机械学报*, 2001, 32(1):69~71.
Chen Chun, Wang Lin, Zhou Ji. Development of a new type of food texture analyzer [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2001, 32(1):69~71. (in Chinese)
- 张佳程,刘爱萍,晋艳曦. 食品质地学[M]. 北京:中国轻工业出版社,2010.
- 孙钟雷,孙永海,万鹏,等. 仿生咀嚼装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(8):214~218.
Sun Zhonglei, Sun Yonghai, Wan Peng, et al. Design and experiment on bionic chewing equipment [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(8):214~218. (in Chinese)
- 王海涛,罗秋风,周必方,等. 压电薄膜力传感器及其牙咬力的测量应用研究[J]. *仪器仪表学报*, 2001, 22(增刊2):51~52.
Wang Haitao, Luo Qiufeng, Zhou Bifang, et al. Piezoelectrical PVDF-foil force sensor and its biting force measurement research [J]. *Journal of Scientific Instrument*, 2001, 22(Supp.2):51~52. (in Chinese)
- 王国力,赵子婴,白金星. PVDF压电薄膜脉搏传感器的研制[J]. *传感技术学报*, 2004, 12(4):688~692.
Wang Guoli, Zhao Ziying, Bai Jinxing. Design and implementation of the three point PVDF piezo-film sphygmo-transducer [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2004, 12(4):688~692. (in Chinese)
- 韩科,王毓英,谭京,等. 对咀嚼压力的模拟以及对食物粉碎力的测定[J]. *口腔医学*, 1993, 13(4):169~170.
- Nikolaos E M, Petr D, Ingegerd S. Studies on some raw material characteristic in different Swedish apple varieties [J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 62:121~129.
- 姜松,冯峰,赵杰文. 胡萝卜流变特性测试的差异性研究[J]. *食品工业科技*, 2006, 27(7):55~58.
Jiang Song, Feng Feng, Zhao Jiewen. Study on the differences of carrot rheological properties [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2006, 27(7):55~58. (in Chinese)