

近红外技术在果品品质无损检测中的研究进展

李光辉,任亚梅*

(西北农林科技大学 食品科学与工程学院 陕西 杨凌 712100)

摘要:综述了近四年国内外近红外无损检测技术在苹果、梨、柑橘等果品的研究情况,提出了近红外技术检测果品时存在的问题,并展望了近红外技术无损检测果品的前景。

关键词:近红外技术;无损检测;果品;品质

Advances on the Quality of Fruits Nondestructive Detection by Near Infrared Reflectance Spectroscopy

LI Guang-hui, REN Ya-mei*

(College of Food Science and Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Summarized research progress of nondestructive detection on fruits quality by NIR. The problems in measuring internal qualities of fruit with the technique were put forward and the future research was prospected.

Key words: near infrared reflectance spectroscopy; nondestructive detecting; fruit; quality

我国水果产量居世界第一,由于受到检测技术、商品化处理能力、评判标准等方面的限制,我国鲜食果品的出口量极少,且难以进入国际高端市场,这极大地影响了我国果品在国际贸易中的竞争力和创汇能力。

近红外光谱技术无损检测水果,可实现果品在线自动分级,提升我国果品的商品化处理能力,提高果品在国际贸易中的竞争力。该技术以即时、无损、方便、准确率高等特点成为20世纪90年代以来发展最迅速的检测技术之一,已广泛应用于食品、医学、农业等领域,我国在这方面的起步较晚,但成果突出,目前我们利用近红外技术在果品品质检测及其分级方面做了大量的研究,且研究的热点是建立果品的可溶性固形物、酸度、硬度、病害果等检测模型。本文对近红外技术在果品检测中的研究情况进行了总结。

基金项目:国家苹果产业技术体系(NYCYTX-08-05-02)

作者简介:李光辉(1985—),男(汉),硕士,主要从事果蔬贮藏与加工的研究。

*通信作者:任亚梅(1970—),女,副教授,主要从事果蔬贮藏与加工的教学与研究。

1 近红外技术在果品无损检测中的应用

1.1 国内近红外无损检测技术的研究现状

1.1.1 在苹果上的应用研究现状

邹小波^[1]等认为用多尺度小波去噪并结合间隔偏最小二乘法建立的苹果糖度模型,不但精度得到了提高,而且模型更加简洁,其模型校正时的相关系数 R^2 和校正均方根误差RMSEC分别为0.963 5和0.302 6,预测时的相关系数 R^2 和预测均方根误差RMSEP分别为0.921 4和0.411 3^[1]。李艳肖等用遗传区间偏最小二乘法建立了苹果糖度近红外光谱预测模型,结果表明:用遗传区间偏最小二乘法优选的区间所建立的模型不但简洁,而且预测精度也有所提高,其校正相关系数 R^2 和RMSEC分别为0.962和0.334 6^[2]。李桂峰等用近红外光谱技术快速无损检测苹果的质地品质,指出在波长范围1 300 nm~2 500 nm,经多元散射校正(MSC)预处理后用偏最小二乘法(PLS)所建立的模型预测效果最好,硬度、脆度模型的预测标准偏差(RMSEP)和决定系数(R^2)分别为0.226、0.243 kg/cm²和96.52%、97.15%;并且在PLS模型的基础上用权重法选择的硬度特征波长为1 657、1 725、1 790、2 455、

1 929、2 304 nm,脆度特征波长为 1 613、1 725、1 895、2 304、2 058、2 087、2 396 nm,经多元线性回归(MLR)模型检验,硬度、脆度的 RMSEP 和 R^2 分别为 0.271、0.304 kg/cm² 和 90.30 %、91.64 %;说明特征指纹光谱和 PLS 模型都能准确预测苹果质地品质。

屠振华等用 FT-NIRS 检测了苹果的硬度,结果表明:用遗传算法对特征波长进行选择,然后用间隔偏最小二乘法建立预测模型,此法既降低了模型的复杂度,又提高了模型的预测精度,且波长可反映出果胶的吸收信息,进而可阐明近红外光谱技术检测苹果硬度的机理^[4]。章海亮等比较了近红外光谱静态和在线检测苹果 SSC 的差异性,在 SSC 特征波段用间隔偏最小二乘法建立预测模型,其静态检测模型性能优于在线模型,在线检测模型预测时的相关系数和预测均方根误差分别为 0.78 和 1.04 °Brix,近红外技术在线检测苹果 SSC 的精度不理想^[5]。史波林等用声光可调谐滤光器近红外光谱仪无损检测苹果内部品质,用 Cook 距离、杠杆值、马氏距离和学生化残差判断疑似异常样本点和用二审剔除判别法确定异常样本,经剔除异常样品后用偏最小二乘回归建立苹果品质模型,其各个品质模型稳定,且准确度高^[5]。

韩东海等用近红外连续透射光谱检测苹果内部褐变,分析了其光谱特性,选择 810、750、715 nm 3 个波长对褐变果进行判别分析,其样品的正确判别率达到 95.65 %^[7]。王加华等用可见-近红外光谱鉴别苹果褐腐病、水心病,比较了峰面积判别法(PADA)、主成分分析判别法(PCADA)、偏最小二乘判别法(PLSDA)对苹果类别判定的准确性,得出这三种方法对褐腐病苹果判别正确率都为 100 %,对水心苹果正确判别率分别是 79.2 %、95.0 %和 96.7 %,对正常苹果正确判别率分别是 88.6 %、98.2 %和 98.8 %;说明可见-近红外光谱结合化学计量学可以快速、无损鉴别苹果褐腐病和水心病^[8]。李桂峰用 FT-NIRS 对苹果果肉褐变度定量无损检测,用该方法建立的预测模型预测准确度较高,还探明了与苹果褐变相关的特征指纹图谱 8 822、7 085、7 000、6 694、5 800、5 322、4 650 cm⁻¹,用该特征指纹图谱建立的检测苹果果肉褐变 MLR 模型,其模型的 RMSEC 和 RMSEP 分别为 0.077、0.079,交叉验证决定系数和外部验证决定系数分别为 0.908、0.878^[9]。

1.1.2 在梨上的应用研究现状

刘燕德等比较了 MLR、PCR 和 PLS 3 种数学建模方法以及不同的光谱预处理对梨 SSC 模型稳定性的影响,结果表明:在梨赤道部位采集光谱,经一阶微分预处理后用 PLS 所建 SSC 模型预测准确度较高^[10]。孙通

利用近红外透射光谱在线检测梨的 SSC,用偏最小二乘回归(PLS)和主成分回归(PCR)分别在 550 nm~700 nm、700 nm~850 nm、550 nm~850 nm 波段范围建立预测模型,结果表明:在 550 nm~850 nm 波段内,用 PLS 和 PCR 两种方法所建模型效果都较好,且 5 点 S-G 光谱平滑能提高模型预测精度,其最优模型 RMSEC=0.236, RMSEP=0.548^[11]。李东华等确定了南果梨的糖、酸度近红外光谱模型的适用性和适用时间,即采后 6 d 所建立的糖、酸模型对常温采后 12 d 内、采后冷藏 120 d 内的样品预测精度较高,其预测相关系数均在 0.80 以上,说明此模型能满足一定贮藏期内样品的预测。马本学等利用近红外漫反射光谱技术判别库尔勒香梨中的脱萼果和宿萼果,比较了不同的建模波段,不同的预处理及主成分因子数对判别模型的影响^[12],结果表明:在 9 091 cm⁻¹~4 000 cm⁻¹ 波段内,用原始光谱所建立的判别分析模型效果最好,其校正集和预测集正确分类率分别为 100 %和 95 %^[13]。

1.1.3 在蜜桔和脐橙上的应用研究现状

刘燕德等用近红外透射光谱技术并结合神经网络无损检测南丰蜜桔 SSC,结果表明:径向基函数神经网络比反向传播神经网络效果好,其校正模型的预测均方根误差为 0.65 °Brix,说明径向基函数神经网络可用于建立南丰蜜桔 SSC 非线性模型^[14]。孙旭东等研究了在波段 350 nm~1 800 nm 范围内,不同的光谱预处理对蜜桔 SSC 模型预测能力的影响,结果表明:用间隔偏最小二乘法所建立的 SSC 预测模型效果较好,预测模型的相关系数和预测均方根误差分别为 0.95 和 0.55 °Brix^[15]。周文超等研究表明在波段 550 nm~900 nm 范围,用 PLS 建立的赣南脐橙的糖度模型预测精度最高,其相关系数和预测样本均方根误差分别为 0.903 2 和 0.242 1^[16]。夏俊芳和李小昱比较了各种小波消噪方法对脐橙 V_C 含量 PLS 模型的影响,结果表明:db5 小波是脐橙 V_C 含量近红外光谱消噪预处理的最优小波基,其模型预测值与实测值的相关系数 $R=0.942 7$, RMSECV=2.02 mg/(100 g)^[17]。

1.1.4 在其它水果上的研究现状

李建平等用近红外漫反射光谱无损检测两个产地 3 个品种枇杷的 SSC,结果表明:在波长 1 400 nm~1 500 nm 和 1 900 nm~2 000 nm 两波段范围内建立的 SSC 预测模型没有全波段的 PLSR 模型效果好,并且在全波段用原始光谱建立的 PLSR 模型效果最好,其模型的校正集和预测集的 R^2 分别为 0.96 和 0.95^[18]。马广等用近红外漫反射光谱技术无损检测金华大白桃的糖度,并用偏最小二乘回归法在波段 800 nm~

2 500 nm 之间建立预测模型,结果为用顶部、中部、底部 3 个部位共 9 个检测点的果肉平均光谱所建立的模型效果较好,且原始光谱建立的模型比微分光谱建立的模型效果好^[19]。周竹等比较了不同光谱预处理对用合格板栗和霉变板栗的近红外光谱所建判别模型的影响,结果表明:矢量归一化预处理后所建模型预测精度最高^[20]。

1.2 国外近红外无损检测技术的研究现状

1.2.1 在苹果上的研究现状

Guoqiang Fan 等用近红外透射光谱对苹果的坚实度和 SSC 进行了检测,比较了不同光源和不同检测部位对预测模型的影响,并在 650 nm~920 nm 范围,用 PLS 法建立预测模型,结果表明:二阶导后所建坚实度和 SSC 预测模型效果较好,且多光源与苹果茎轴垂直的放置位置有助于提高模型的预测精度^[21]。Els Bobelyn 等研究了生物差异性对用近红外光谱技术建立的苹果 SSC 和坚实度预测模型的影响,经方差分析表明:品种、来源和货架期对苹果 SSC 和坚实度模型的影响是显著的,且水在 970、1 170 和 1 450 nm 的吸收峰是它们最显著的区别^[22]。Clara Shenderay 等用可见-近红外小型光谱仪无损在线检测苹果霉心病,并用典型判别分析和偏最小二乘回归建立判别模型,结果表明:此模型对苹果霉心病的预测精度较高^[23]。

1.2.2 在梨上的研究现状

Xiaping Fu 等用近红外漫反射光谱和近红外透射光谱对梨褐心病进行了鉴别,并用判别分析对褐心病梨和完好梨进行区分,结果表明:梨在 T₂ 的放置位置,且用近红外透射光谱技术采集梨的光谱,所建立的模型判别效果较好,正确判别率为 91.2 %^[24]。Panmanas Sirisomboon 等选用 2 nm 光谱间隔,无损检测完整日本梨和梨汁的果胶,采集的光谱范围在 1 100 nm~2 500 nm 之间,用多元线性回归对原始光谱和二阶微分光谱建立果胶预测模型,并对 1997、1998 年采集的日本梨的胶质组成进行预测,结果表明:1998 年的梨子预测模型对 1997 年的梨子预测精度不高,所建立的模型有一定的局限性^[25]。

Yande Liu 等用可见-近红外技术无损检测梨的 SSC 和坚实度,比较了不同的建模方法(MLR、PCR 和 PLSR)和不同的光谱预处理对梨 SSC 和坚实度预测模型的影响^[26],结果是:在梨赤道部位采集光谱并用偏最小二乘回归(PLSR)建立的 SSC 和坚实度模型效果较好,其校正时的相关系数 R^2 分别为 0.912 和 0.854, RMSEP 分别为 0.662 °Brix 和 1.232 N。Yibin Ying 和 Yande Liu 用近红外光谱技术无损检测梨的 SSC、pH

和总酸(TA),用遗传算法优选波段,并用偏最小二乘法建立预测模型^[27],结果为:用遗传算法优选过的波段所建立的 SSC、TA 和 pH 预测模型比全局模型效果好,其 RMSEP 分别为 0.395、0.019 5 和 0.008 7。

Patricia Paz 等用扫描单色式、二极管扫描单色式和二极管式三种近红外光谱仪对梨的 SSC、坚实度和储藏时间进行了检测^[28],结果是:这三种仪器所建立的 SSC 模型,其验证时的相关系数 R^2 在 0.39~0.76 之间,验证时的标准偏差 SECV 在 0.59 °Brix~1.49 °Brix 之间;所建立的坚实度预测模型,其验证时的相关系数 R^2 在 0.45~0.79 之间,验证时的标准偏差 SECV 在 5.33~7.36 N 之间;用偏最小二乘判别法(PLS-DA)建立的梨的贮藏时间(0、6 和 8 d)的判别模型其判别正确率在 81.1 %~94.4 %之间。

1.2.3 在杏和李上的研究现状

Dolores Pérez-Marín 等用两种微型手携近红外光谱仪(二极管阵列式和微电子系统式)无损检测李子的 SSC 和坚实度,用不同的方法预处理光谱并用偏最小二乘法建立李子的 SSC 和坚实度预测模型,结果为:这两种光谱仪都能获得准确的结果,但是用二极管阵列式仪器建立的 SSC 的预测模型效果稍优于微电子式近红外仪器,其校正时的相关系数 R^2 和校正均方根误差 RMSEC 分别为 0.73 %和 1.11 %,预测时的相关系数 R^2 和预测均方根误差 RMSEP 分别为 0.68 %和 1.22 %;用这两种仪器建立的坚实度预测模型精度都较低,但二极管式近红外仪器效果稍优于微电子系统式近红外仪,其校正时的相关系数 R^2 和校正均方根误差 RMSEC 分别为 0.64 和 1.77 N,预测时的相关系数 R^2 和预测均方根误差 RMSEP 分别为 0.61 N 和 2.30 N;用这两种仪器对杏的品种及杏的贮藏期(0、6 和 9 d)进行判别,用 PLS-DA 建立判别模型,其结果是杏品种的正确判别率为 96.5 %,杏贮藏期的正确判别率为 94.5 %^[29]。

Sylvie Bureau 等用傅里叶近红外光谱技术对杏的品质进行无损检测^[30],结果表明:用偏最小二乘法建立的 SSC 和总酸的预测模型效果较好,其相关系数 R^2 分别为 0.92 和 0.89,预测时的均方根误差为 0.98 °Brix 和 3.62 meq 100 g⁻¹ FW,而所建立的坚实度、乙烯、单糖和有机酸的预测模型效果不好。C. Camps 和 D. Christen 用便携式近红外光谱仪无损检测杏的品质,建立了杏各个品种的品质模型及所用品种通用模型^[31],结果是:所建立的 SSC 模型的 RMSECV 在 0.67 °Brix~1.1 °Brix 之间, R^2 在 0.88~0.96 之间;不同品种的坚实度模型的 RMSECV 和 R 相差很大,TA 预测模型的

RMSECV 在 0.79 g/100 mL~2.61 g/100 mL 之间 R^2 在 0.73~0.97 之间,并且近红外光谱技术可以有效地识别杏的品种。

1.2.4 在其它水果上的研究现状

Ali Moghimi 等用近红外光谱技术结合化学计量学建立了猕猴桃 SSC 和 pH 的校正模型,比较了多元散射校正、变量标准化、中值滤波和一阶导数光谱预处理对所建猕猴桃 SSC 和 pH 校正模型的影响,表明:变量标准化结合中值滤波和一阶倒数预处理光谱后,用 PCR-PLS 法建立的 SSC 和 pH 的校正模型精度较高,其相关系数 R^2 分别为 0.93 和 0.943 RMSEP 分别为 0.259 °Brix 和 0.076^[32]。Fang Cao 等研究了可见-近红外仪器无损检测葡萄的 SSC、pH 和品种,用遗传算法优选信息丰富的波段,并用最小二乘支持向量机对葡萄品种和品质建立预测模型^[33] 结果是:所建品种判别模型对葡萄品种正确识别率为 96.58%,所建 SSC 和 pH 预测模型其校正相关系数分别为 0.9065 和 0.9781。

Jagdish C. Tewari 等用近红外光谱技术对柑橘的来源、品种及品质进行了无损检测,并用遗传算法、偏最小二乘法和对应分析建立预测模型^[34] 结果是:蔗糖、葡萄糖和果糖的近红外模型 R^2 在 0.996~0.998 之间;用 GA-ANN 和聚类分析能很好的将不同品种柑橘和不同产地柑橘区别开。Yande Liu 等用近红外漫反射光谱技术无损检测赣南脐橙的糖度^[35] 在 450 nm~1750 nm 波段范围内,比较不同的建模方法(MLR, PCR, PLS, Poly-PLS and Spline-PLS)和不同的光谱预处理(一阶导数、二阶导数、多元散射校正和平滑)对所建糖度预测模型的影响,表明:用 Spline-PLS 法所建立的糖度近红外模型精度较高,其相关系数 $R^2=0.87$, RMSEP = 0.47 °Brix, 说明样条函数 SPL-PLS 可以建立非线性校正模型。

Yande Liu 等用近红外光谱技术在波段 350 nm~1800 nm 无损检测柑橘的 SSC,用多元散射校正和变量标准化预处理光谱,并比较 PCA-BPNN 和 PLSR 两种建模方法对所建赣南脐橙 SSC 预测模型的影响^[36] 结果是:光谱经多元散射校正后用 PCA-BPNN 法建立的糖度非线性模型较好,其相关系数 R^2 、RMSEP 和偏差分别为 0.90、0.68 °Brix 和 0.16 °Brix。Yande Liu 等用电荷耦合器件近红外仪(CCD-NIRS)无损检测南丰蜜橘 SSC 和 TA,在 600 nm~980 nm 波段范围内用间隔偏最小二乘优选南丰蜜橘 SSC 和 TA 的代表波段,并用偏最小二乘法建立 SSC 和 TA 预测模型^[37] 结果为:在 681.36 nm~740.51 nm,798.60 nm~836.19 nm 和

945.52 nm~962.75 nm 范围内所建立的 SSC 预测模型精度较高,其 $R^2=0.92$ 、RMSEP = 0.65 °Brix;在波段 817.57 nm~836.19 nm,909.85 nm~927.60 nm 和 945.52 nm~962.75 nm,所建 TA 预测模型效果较好,其相关系数 $R^2=0.64$ 、RMSEP = 0.09 %。

Dolores Pérez-Marín 等研究了两种商业用(微电子系统式近红外仪和二级管式可见近红外仪)近红外光谱仪对油桃成熟期和储藏期品质无损检测^[38] 用改进的偏最小二乘法建立数学模型,结果是:两种仪器所建立的 SSC 模型,其相关系数 $R^2=0.89$, SEP 在 0.75%~0.81% 之间,所建坚实度预测模型,其 R^2 在 0.84~0.86 之间,SEP 在 11.6 N~12.7 N 之间;用二级管式近红外仪器所建立的杏的单果重和直径预测模型精度高于微电子系统式的近红外仪器,其单果重预测模型的 $R^2=0.98$, SEP = 5.40 g;直径预测模型的 $R^2=0.75$, SEP = 0.46 cm。

2 近红外光谱在检测果品品质时存在问题

2.1 模型的通用性问题

目前,我们所建立的果品近红外模型只适合于单个品种,由于同一类水果有不同的品种,品种间品质有差异,故单个品种所建立的模型很难适合于其他品种,因此建立近红外果品通用模型是现在急需解决的问题。

2.2 近红外光谱仪的问题

虽然近红外光谱技术发展了近 50 年,在某些方面还取得了优异的成绩,但是目前还停留在实验室阶段,近红外仪器移动性差,很难用于实际生产;其次,近红外光谱处理软件价格较高,给科研和生产带来不便,因此开发便捷式近红外仪及其低价的光谱处理软件显得尤为必要。

2.3 模型的转移问题

目前所建立的模型都是在一台近红外仪器建立的,同时只适合于这台仪器,如何将一台仪器上建立的数学模型准确的转移到其他仪器上是我们必需解决的问题,从而尽可能节省人力、物力。

2.4 近红外仪器类型合理选择的问题

目前,市场上存在的近红外光谱仪可分为傅立叶变换型、光栅色散型、滤光片型和声光可调滤光器型等 4 类,检测果品时也都是用单一类型的近红外仪器进行检测的,缺乏比较不同类型的近红外仪对所建预测模型的影响,如何确定某一类型的近红外仪器更适合于某一类水果将是以后研究所解决的问题。

3 展望

经过近半个世纪的发展,近红外光谱技术已广泛的应用于食品、农业、医学等领域,在今后的研究中,我们要特别注重所建立模型的通用性及其转移性,同时开发便捷式的近红外仪器这将对实际应用产生巨大的推动作用。随着近红外技术在研究中存在问题的解决,近红外技术必将有更广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 邹小波,赵杰文,夏蓉,等. 苹果糖度近红外光谱小波去噪和 i-PLS 建模[J]. 农业机械学报, 2006, 37(6): 79-82
- [2] 李艳肖, 邹小波, 董英. 用遗传区间偏最小二乘法建立苹果糖度近红外光谱模型[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(10): 2001-2004
- [3] 李桂峰, 赵国建, 刘兴华, 等. 苹果质地品质近红外无损检测和指纹分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 189-173
- [4] 屠振华, 籍保平, 孟超英, 等. 基于遗传算法和间隔偏最小二乘的苹果硬度特征波长分析研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(10): 2760-2763
- [5] 章海亮, 孙旭东, 刘燕德, 等. 近红外光谱检测苹果可溶性固形物[J]. 农业工程学报, 2009(S2): 340-343
- [6] 史波林, 赵镭, 刘文, 等. 苹果内部品质近红外光谱检测的异常样本分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 132-137
- [7] 韩东海, 刘新鑫, 鲁超, 等. 苹果内部褐变的无损检测研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(6): 86-88
- [8] 王加华, 孙旭东, 潘璐, 等. 基于可见/近红外能量光谱的苹果褐腐病和水心鉴别[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(9): 2098-2102
- [9] 李桂峰. 苹果果肉褐变机理和近红外无损检测技术研究[D]. 陕西: 西北农林科技大学食品科学与工程学院, 2008
- [10] 刘燕德, 孙旭东, 陈兴苗. 近红外漫反射光谱检测梨内部指标可溶性固性物的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(4): 797-800
- [11] 孙通. 梨可溶性固形物含量的在线近红外光谱检测. 光谱学与光谱分析[J]. 2008, 28(11): 2356-2359
- [12] 李东华, 纪淑娟, 重藤和明. 南果梨糖、酸度近红外光谱模型适用的贮藏期研究[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 270-275
- [13] 马本学, 饶秀勤, 应义斌, 等. 基于近红外漫反射光谱的香梨类别定性分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(12): 3288-3240
- [14] 刘燕德, 陈兴苗, 孙旭东. 可见近红外漫反射光谱无损检测南丰蜜橘 V_c 的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(10): 2318-2320
- [15] 孙旭东, 章海亮, 欧阳爱国, 等. 南丰蜜桔可溶性固形物近红外特征波段选择[J]. 农业机械学报, 2009, 40(7): 129-131
- [16] 周文超, 孙旭东, 陈兴苗, 等. 近红外透射光谱无损检测赣南脐橙糖度的研究[J]. 农机化研究, 2009, 31(5): 161-163
- [17] 夏俊芳, 李小昱. 脐橙 V_c 含量近红外光谱消噪小波优化[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 143-146
- [18] 李建平, 傅霞萍, 周莹, 等. 近红外光谱定量分析技术在枇杷可溶性固形物无损检测中的应用 [J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(9): 1605-1609
- [19] 马广, 傅霞萍, 周莹, 等. 大白桃糖度的近红外漫反射光谱无损检测试验研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(5): 907-910
- [20] 周竹, 刘洁, 李小昱, 等. 霉变板栗的近红外光谱和神经网络方法判别[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 109-112
- [21] Fan Guoqiang, Zha Jianwen, Du Ran, et al. Determination of soluble solids and firmness of apples by Vis/NIR transmittance[J]. Journal of food engineering, 2009, 93: 416-420
- [22] Bobelyn E, Serban A S, Nic M, et al. Postharvest quality of apple predicted by NIR-spectroscopy: Study of the effect of biological variability on spectra and model performance[J]. Postharvest biology and technology, 2010, 55: 133-143
- [23] Shenderoy C, Shmulevich I, Alchanatis V, et al. NIRS Detection of Moldy Core in Apples[J]. Food Bioprocess Technol, 2010, 3: 79-86
- [24] Fu Xiaping, Ying Yibin, Lu Huishan, et al. Comparison of diffuse reflectance and transmission mode of visible-near infrared spectroscopy for detecting brown heart of pear[J]. Journal of food engineering, 2007, 83: 317-323
- [25] Sirisomboon P, Tanaka M, Fujita S, et al. Evaluation of pectin constituents of Japanese pear by near infrared spectroscopy [J]. Journal of food engineering, 2007, 78: 701-707
- [26] Liu Yande, Chen Xingmiao, Ouyang Aiguo. Nondestructive determination of pear internal quality indices by visible and near-infrared spectrometry[J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41: 1720-1725
- [27] Ying Yibin, Liu Yande. Nondestructive measurement of internal quality in pear using genetic algorithms and FT-NIR spectroscopy [J]. Journal of food engineering, 2008, 84: 206-213
- [28] Paz P, Sánchez MT, Pérez-Marín D. Instantaneous quantitative and qualitative assessment of pear quality using near infrared spectroscopy[J]. Computers and electronics in agriculture, 2009, 69: 24-32
- [29] Pérez-Marín D, Paz P, Guerrero J E, et al. miniature handheld NIR sensor for the on-site non-destructive assessment of post-harvest quality and refrigerated storage behavior in plums[J]. Journal of food engineering, 2010, 99: 294-302
- [30] Bureau S, Ruiz D, Reich M, et al. Rapid and non-destructive analysis of apricot fruit quality using FT-near-infrared spectroscopy[J]. Food chemistry, 2009, 113: 1323-1328
- [31] Camps C, Christen D. Non-destructive assessment of apricot fruit quality by portable visible-near infrared spectroscopy[J]. LWT-Food science and technology, 2009, 42: 1125-1131
- [32] Moghimi A, Aghkhani MH, Sazgarnia A. Vis/NIR spectroscopy and chemometrics for the prediction of soluble solids content and acidity (pH) of kiwifruit[J]. Biosystems engineering, 2010, 106: 295-302
- [33] Cao Fang, Wu Di, He Yong. Soluble solids content and pH prediction and varieties discrimination of grapes based on visible-near infrared spectroscopy[J]. Computers and electronics in agriculture, 2010, 71S: S15-S18
- [34] Tewari J C, Dixit V, Cho B K, et al. Determination of origin and sugars of citrus fruits using genetic algorithm, correspondence analysis and partial least square combined with fiber optic NIR spectroscopy [J]. Spectrochimica Acta Part A, 2008, 71: 1119-1127

(下转第 240 页)

- [9] Menne E, Guggenbuhl N and Roberfroid M. Fn-type chicory inulin hydrolysate has a prebiotic effect in humans[J]. Journal of nutrition, 2000,130:1197-1199
- [10] Coudray C, Bellanger J, Castiglia-Delavaud C, et al. Effects of soluble or partly soluble dietary fibres supplementation on absorption and balance of calcium, magnesium, iron and zinc in healthy young men [J]. European journal of clinical nutrition, 1997, 51: 375-380
- [11] Kaur N, Gupta A K, Saijpal S. Hypotriglyceridaemic effect of Cichorium intybus roots in ethanol injected and saturated fat-fed rats[J]. Medical science research, 1988(16):91-92
- [12] Hond E D, Geypens B and Ghooys Y. Effect of high performance chicory inulin on constipation[J]. Nutrition research, 2000(20):731-736
- [13] Cummings J H, Macfarlane G T, Englyst H N. Prebiotic digestion and fermentation[J]. American journal of clinical nutrition (Suppl.), 2001 (73):415-420
- [14] 孙艳波, 颜敏茹, 徐亚麦. 菊粉的生理功能及其在乳制品中的应用[J]. 中国乳品工业, 2005, 33(8):43-45
- [15] Lopez H W, Coudray C, Levrat M A, et al. Fructo oligosaccharides enhance mineral apparent absorption and counteract the deleterious effects of phytic acid on mineral homeostasis in rats[J]. Journal of nutritional biochemistry, 2000, 11:500-508
- [16] Singh J, Rivenson A, Tomita M, et al. Bifidobacterium longum, a lactic acid-producing intestinal microflora inhibit colon cancer and modulate the intermediate biomarkers of colon carcinogenesis[J]. Carcinogenesis, 1997, 18:1371-1377
- [17] Buddington K K, Donahoo J B, Buddington R K. Dietary oligofructose and inulin protect mice from enteric and systemic pathogens and tumor inducers[J]. Journal of nutrition, 2002, 132:472-477
- [18] 郑建仙. 功能性食品甜味剂[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1997: 11
- [19] 周永国, 胡永利. 以蔗糖为原料制取高果糖浆的研究[J]. 河北农业技术师范学院学报, 1990, 4(3): 21-23
- [20] 林影, 卢荣德, 郭勇. 洋姜水解生产果糖的研究[J]. 食品工业, 1997 (5):38-39
- [21] 王建华, 刘艳艳, 姚斌, 等. 一步法制备高果糖浆工程及产酶菌体营养价值研究[J]. 食品与发酵工业, 2000(2):1-4
- [22] Onodera S, Shiomi N. Purification and substrate specificity of endo-type inulinase from *Penicillium purpurogenum*[J]. Agricultural biology and chemistry. 1988, 52(10):2569-2576
- [23] Nakamura T, Shitara A, Matsuda S, et al. Production, purification and properties of an endo-inulinase of *Penicillium* sp. TN-88 that liberates inulinase[J]. Journal of fermentation and bioengineering, 1997, 84(4):313-318
- [24] Yokota A, Yamauchi O. Production of inulotriose from inulin by inulin-degrading enzyme from *Streptomyces rochei* E87[J]. Letters in Applied Microbiology, 1995, 21:330-333
- [25] Cho Y J, Sinha J, Park J P, et al. Production of inulooligosaccharides from chiori extract by endoinulinase from *Xanthomonas oryzae* No.5 [J]. Enzyme and microbial technology, 2001, 28(4/5):439-455
- [26] Ohta K, Akimoto H. Production of high concentrations of ethanol from inulin by simultaneous saccharification and fermentation using *Aspergillus niger* and *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Application of environmental microbiology, 1993, 59:729-733
- [27] Schorr-galindo S, Fontana A, Guiraud J P. Fructose syrups and ethanol production by selective fermentation of inulin[J]. Current microbiology, 1995, 30:325-330
- [28] Margaritis A, Bajpai P. Ethanol production from Jerusalem artichoke tubers (*Helianthus tuberosus*) using *Kluyveromyces marxianus* and *Saccharomyces rosei*[J]. Biotechnology and bioengineering, 1982, 24: 941-953
- [29] 何强, 江波. 菊糖作为脂肪替代品在低脂冰淇淋中对流变性及品质的影响[J]. 食品工业科技, 2004(6): 52-54
- [30] 孙彩玉, 王娟, 张坤生. 菊粉作为脂肪替代品的工艺研究[J]. 食品与发酵科技, 2010, 46(2):56-60
- [31] 上官明军, 王芳, 张红岗. 菊粉对蛋雏鸡生长性能、免疫器官指数和血清免疫球蛋白的影响[J]. 动物营养学报, 2009, 21(1):118-122
- [32] 顾宪红, 张名涛, 杨琳, 等. 菊粉对断奶仔猪大肠微生物区系及生产性能的影响[J]. 畜牧兽医学报, 2005, 36(4):333-336

收稿日期:2012-02-05

(上接第 211 页)

- [35] Liu Yande, Sun Xudong, Zhou Jian min, et al. Linear and nonlinear multivariate regressions for determination sugar content of intact Gannan navel orange by Vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2009, 51(2010):1438-1443
- [36] Liu Yande, Sun Xudong, Ouyang Aiguo. Nondestructive measurement of soluble solid content of navel orange fruit by visible-NIR spectrometric technique with PLSR and PCA-BPNN [J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43:602-607
- [37] Liu Yande, Sun Xudong, Zhang Hailiang, et al. Nondestructive measurement of internal quality of Nanfeng mandarin fruit by charge coupled device near infrared spectroscopy[J]. Computers and electronics in agriculture, 2010, 71S:10-14
- [38] Pérez-Marín D, Sánchez MT, Paz P, et al. Non-destructive determination of quality parameters in nectarines during on-tree ripening and postharvest storage[J]. Postharvest biology and technology, 2009, 52:180-188

收稿日期:2012-02-05