

近红外光谱技术在水果成熟期预测中的应用(综述)

毛莎莎¹, 曾明¹, 何绍兰², 郑永强², 易时来², 邓烈²

(1.西南大学 园艺园林学院, 重庆 400716; 2.中国农业科学院 柑桔研究所, 重庆 400712)

摘要: 近红外光谱技术以快速、准确和多组分同步分析等优势, 近年来在水果果实发育、成熟期预测和品质检测等方面应用广泛, 并在果实品质无损检测分析技术研究方面取得重要进展。本文综述近红外光谱技术的基本原理和特点, 分析近红外光谱技术在果实成熟期预测中的研究现状和存在问题, 并提出今后研究方向。

关键词: 近红外光谱技术; 水果; 成熟期; 应用

Doi: 10.3969/j.issn.1009-7791.2010.01.020

中图分类号: S123

文献标识码: A

文章编号: 1009-7791(2010)01-0082-06

Application of Near Infrared Spectra (NIRS) Technology in Prediction of Maturity Stage of Fruit

MAO Sha-sha¹, ZENG Ming¹, HE Shao-lan², ZHENG Yong-qiang², YI Shi-lai², DENG Lie²

(1.College of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2.Citrus Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 400712, China)

Abstract: Near infrared spectroscopy has become very popular in food industry because of many important practical advantages such as fast, accurate and simultaneous multicomponent analysis. In recent years, more and more attention is paid to applying NIRS technology to fruit development, prediction of maturity stage and internal quality measurement. In this article, not only the fundamental principles and characteristics of near infrared spectroscopy were summarized, but also the status quo and existing problems in prediction of mature stage were presented. The research direction about applying NIRS technology in food industry is provided for us.

Key words: Near Infrared Spectra Technology; fruit; maturity stage; application

在果实采收环节, 确定果实成熟期和最佳采收期的传统方法是根据经验和目测判断, 也有通过历年的气象数据或年积温以及盛花后的天数等方法来预测果实的最佳采收期^[1]。但繁琐冗多的数据和预测的不准确性, 难以在现代生产和营销中应用。随着果树产业规模化和集约化进程的加快, 特别是国际化贸易对果实成熟度和科学采收的更高要求, 常规的水果成熟期预测技术已不能适应现代果树产业发展的需求。为此, 农业及相关领域的学者都致力于研究开发更为快速、方便、准确的果实成熟期预测方法, 以适应现代生产和物流的需要。

1 果实成熟期

果实成熟期是指全树有 50%果实的果皮全部转为该品种固有的色泽(如柑桔果实表面转为橙黄色或橙红色)时的果实发育时期^[2]。果实成熟过程中, 外部形态和内在品质都发生一系列变化, 而这些变化是果实成熟的主要标志, 并与品种特性、气候条件、栽培技术和施肥管理等密切相关^[3]。

果实在发育成熟期, 其内部代谢强度降低, 呼吸减弱, 果皮和果肉着色, 糖分增加, 酸度降低, 组织软化, 果汁增多, 香气产生。内源乙烯在果实成熟前开始增加, 并在果实成熟过程中发挥着重要

收稿日期: 2009-10-06

基金项目: 国家科技支撑项目(2007BAD47B00; 2008BAD92B08)、重庆市重大攻关项目(CSTC,2008AB1053)

作者简介: 毛莎莎(1984-), 女, 重庆云阳人, 硕士研究生, 从事果树生理生态及果树信息化研究。

注: 邓烈为通讯作者。

的调节作用^[4]。果实成熟期间果实内的化学变化主要包括:(1)果皮、果肉着色及果汁糖酸含量变化。果汁可溶性固形物主要是糖类,还有矿物质盐类和有机酸,可溶性蛋白和果胶。在果实成熟过程中,果实积累的不可溶态糖、淀粉、果胶等物质分解,使可溶性固形物浓度提高;果汁中柠檬酸等酸类物质分解,则使果汁固酸比不断提高,而固酸比直接影响果实的风味口感。因此,固酸比成为果实成熟的重要生理指标。(2)果汁增加。果实生长前期主要是果实组织增加,果汁含量很少,随着果实逐渐成熟,可溶性固形物增加,柑桔果肉组织的渗透压增加,吸水力加强,导致果汁不断增多,至成熟时果实汁胞充满果汁。果汁含量影响果实的口感,因此,果汁含量或出汁率也是判断果实成熟度的重要理化指标。(3)组织软化。果实成熟过程中,果胶酶分解果皮细胞间的果胶,使细胞离散、组织软化,导致果实组织逐渐软化。果实变软利于食用,该指标也成为一些果实成熟的重要标志之一。(4)香气。果实香气来自果皮或果肉组织含有的高级醇、酯、醛、酮及挥发性有机酸等芳香物质,这些物质会随着果实成熟而不断积累与释放,使果实产生特有的香气。

果实的最佳采收期一般是根据果实的成熟度来决定。过早采收,果实内的营养成分未充分转化,糖分低,酸度高,果实风味较差。同时,未成熟果实因果皮蜡质少,采摘后果实失水快,不耐贮藏。过迟采收,因果实的酸度过低,也影响果实风味,还会影响果实的贮运能力,另外还会大量消耗树体养分,影响第二年产量。

由于果实的用途不同,对采收成熟度的要求也不尽相同。例如鲜食用果,要在果实达到该品种固有的色泽、风味和香气,果实内含物达到一定的指标时方可采收;用于贮藏或长途运输的果实,则需在接近成熟或达到八成成熟度时采收;加工用的果实,如制果汁、果酱、糖水桔瓣等用的原料果实,宜在充分成熟时采收,而制蜜饯用的果实,则可适当早采;采种繁育种苗用的果实,应待果实在树上完全转色,种子充分成熟饱满时再采收^[3]。

2 果实成熟期预测技术

对果实成熟期的科学监测和预测,有利于了解果实成熟进程和果实发育状况、预测最佳采收期,是现代果实生产、经销和加工企业的迫切需求。目前国内外对果实成熟期预测和最佳采收期确定的方法有以下几种:

2.1 着色度

这是一种比较简单的根据果皮的转色来确定果实采收期的方法^[3]。果实成熟时都会呈现固有的果皮色泽,所以在生产实践中,种植者常使用该方法预测果实成熟期。但如果果实成熟期气温下降早,昼夜温差比较大,可使果实提早着色。所以此方法也有一定的局限性。

2.2 糖酸比(或固酸比)

通过测定果实糖酸比(或固酸比)确定其内部品质,进而预测果实的成熟期^[5]。该方法比较简单,且需要的仪器设备相对简单,但比较耗时,不能快速预测果实成熟期,预测精度也不高。

2.3 果实发育时间

根据盛花期后的天数预测果实采收期^[6]。该方法虽然比较简单,但工作量较大,且受当年的气候变化影响,因此预测准确度不高。

2.4 气象参数

影响果实成熟及品质发育的因素很多,其中积温的影响较为重要,不同类型的水果和品种对积温有不同的要求,故可以根据果实发育期内的积温来确定果实采收期^[7]。但繁冗的数据和计算使其难以在生产中推广应用。

2.5 光谱分析技术

随着现代光谱技术的发展,通过光谱分析确定果实品质的非损伤监测技术日渐成熟,针对食品、谷物和水果品质的在线检测技术和装备应运而生,利用光谱技术甚至遥感技术监测或预测果实成熟期成为研究热点,且凭借其快速、方便、准确和无损伤等特点,展现出良好的发展前景。

3 现代近红外光谱技术

3.1 近红外光谱分析技术的基本原理

NIR 是电磁波,它具有光的属性,具有“波”及“粒”的二重性。NIR 作为一种分析手段,利用有机物以及部分无机物分子中各种基团(如 O-H、C=O、N-H、C-H)伸缩、振动、弯曲等运动固定的振动频率进行物质检测分析。当分子受到红外线照射时会被激发而产生共振,同时使得光的能量被部分吸收,测量其吸收光可以得到极为复杂的图谱,这种图谱即表示被测物质的特征。不同物质在近红外区域有丰富的吸收光谱,每种成分都有特定的吸收特征,这就为近红外光谱定量分析提供了基础。由于近红外光谱含有丰富的物质分子结构信息,所以可用来分析绝大多数种类的化合物及其混合物的成分浓度或品质参数。但由于每一物质有许多近红外吸收带,某一成分的吸收会与其他成分的吸收发生重组,因此当测定某一复杂物质时,必须选择合适的近红外光谱区,以免受到其他成分吸收的干扰^[8]。

3.2 近红外光谱分析技术的特点

近红外光谱分析技术是综合光谱学、化学计量学和计算机应用等多学科知识的现代分析技术^[9],对分析测定有机化合物具有许多独特的优越性^[10]:(1)多数物质在近红外区域的吸收系数小,使分析过程变得简单;(2)近红外区内光的散色效应大,且穿透深度大,因此,近红外光谱技术可以用漫反射技术对样品进行直接测定;(3)近红外区的波长短,因而不被玻璃或石英介质所吸收,所用样品池容器可用常用的玻璃或石英制成,价格较低,使用也方便;(4)分析速度快,近红外光谱的信息必须由计算机进行数据处理及统计分析,一般一个样品取得光谱数据后可立刻得到定性或定量分析结果,整个过程可以在 2 min 内完成;(5)既可用于样品的定性,也可得到精度很高的定量结果,比如采用多元校正方法及一组已知的同类样品所建的定量模型,可以快速得到相对误差小于 0.5%的测定结果。

3.3 现代近红外光谱技术的发展

近红外光谱是指波长介于可见区与红外区之间的电磁波,波长为 780~2 526 nm^[11]。在 19 世纪早期,Colblentz 记录下许多物质的吸收光谱,证明特定的原子群会吸收特定的波长,通过对这些特定波长的观测,能够识别物质中的某种化学成分。

20 世纪 50 年代,Norris 和他的同事们将快速发展的电子光学应用于土豆、西红柿和苹果等农产品分析中,他们用选定波长的近红外光,测定其被样品吸收和反射值的,分析样品中某种成分的含量。随着计算机硬件和软件的发展,瑞典化学家 Wold 定名的化学计量学方法得到推广普及,数据分析软件不断成熟进步,并开始自成一体。1985 年,内置微处理器的近红外分析仪研制成功;进入 20 世纪 90 年代以来,近红外检测仪在食品分析、谷物分析及在线检测等许多领域均发挥了重要作用^[8]。

4 近红外光谱技术在果实成熟期监测中的应用

4.1 果实成熟过程中的近红外光谱变化规律研究

早在 1996 年,日本学者 Tanaka 等^[12]通过在梨树上安装近红外装置,研究其果实成熟过程中各种单糖含量变化及其与光谱特征的相关性,探讨了通过光谱检测果实单糖含量而确定梨成熟期和采摘期的可能性。

McGlone 等^[13]利用 VIS/NIR 技术进一步深入探测了‘Royal Gala’苹果在采摘前和贮藏后各品质指标的变化规律。该试验在商品采收期前 7 周开始动态分析,对品质指标,如可溶性固形物、总酸及硬度等进行检测,并得到各预测模型。初步实验表明,VIS/NIR 技术主要是依据果实成熟过程中叶绿素减少的趋势来探测。在苹果早采收、适中采收、晚采收的典型吸光度光谱对比中,发现在 680 nm 波长处,叶绿素吸光度有明显的变化,早采收果实的吸光度明显高于适中采收和晚采收果实,因此认为该波长可用于区别苹果的成熟度。

2005 年,Herold 等^[14]人借鉴前人的研究利用光谱技术对‘Elstar’苹果果实发育进行了动态研究。从获得的光谱数据来看,不同的光谱指标都反映出果实色泽变化和果实成熟过程。果实不同时期的透射光谱在 570 nm 和 680 nm 处均出现显著变化。由于叶绿素吸光率降低导致果皮颜色中绿色减少,红

色增加,故可在这两波长处进行分析,从而更好地了解果实成熟时的物质变化,并预测果实成熟期。

同年 Peirs 等^[15]人在苹果自然变异对最佳采收期预测模型准确度的影响上做了研究。在最佳采收期预测的实践中,单个果园样品批量的平均预测值要高于单个果实的平均预测值。研究表明,当果实自然变异较小时,校准模型的准确度就要高些,反之亦然。利用 Streif index 校准模型的准确度不是很高,即使对其进行了对数转化。

4.2 基于光谱技术的果实品质指标及成熟度预测模型研究

1998 年, David 等^[16]采用 700~1 100 nm 波长的近红外漫反射技术,分析了成熟和未成熟猕猴桃的光谱特性,发现 520~680 nm 波长范围内,未成熟猕猴桃的光谱吸收度高于成熟猕猴桃,因此认为该波长范围的光谱可用于监测猕猴桃成熟度。

两年后 Peirs 等^[17]在商业采收期之前对苹果进行可见/近红外光谱测量和果实成熟指标分析,得到较好的果实成熟度预测模型($R = 0.90$, SEP 为 7.4 d)。同时建立了影响成熟度各因素的预测模型、Streif 指数预测模型($R = 0.84$, SEP 为 0.18% Brix, 淀粉指数)、可溶性固形物含量预测模型($R = 0.84$, SEP 为 0.73% Brix)、酸度预测模型($R = 0.80$, SEP 为 2.07 ml NaOH)和硬度预测模型($R = 0.78$, SEP 为 1.13 kg)。

Saranwong 等^[18]利用 NIRS 无损检测技术预测芒果的食用品质,获得的校正集模型可以很好地预测晚熟期芒果的干物质含量和淀粉含量,干物质标准偏差 SEP 为 0.41%,淀粉标准偏差 SEP 为 1.71%。

国内学者袁雷等^[19]选择不同谱区范围的近红外光谱,利用偏最小二乘法对柑桔总酸、总糖和维生素三种组分建立数学预测模型并优化,三种组分的化学值与近红外预测值的相关决定系数分别为:总酸 $r^2 = 0.959$ 、总糖 $r^2 = 0.970$ 和维生素 C $r^2 = 0.973$,实验表明,近红外光谱定量分析技术在柑橘品质检测中具有很高的应用价值。

在芒果成熟期预测中, Subedi 等^[20]利用短波近红外光谱技术对芒果采收期的食用品质进行研究。研究中,利用对 Hunter b 值和果皮干物质含量作为预测果实成熟的指标。成熟果实的 TSS 校准模型对独立群体的预测很有用($R^2_v = 0.92$, SEP = 0.67 及 bias 为 1.25% TSS)。结果表明,短波近红外光谱(SWNIR)技术可用于果实成熟的评估以及果实成熟后的可溶性固形物(TSS)品质特性预测。

傅霞萍等^[21]应用傅里叶漫反射近红外光谱技术探讨了水果坚实度无损检测的方法。利用偏最小二乘法建立了坚实度与漫反射光谱的无损检测数学模型,同时对不同光谱预处理方法和不同建模波段范围对模型的预测性能进行对比分析。结果表明:原始光谱在 800~2 500 nm 范围的模型获得较好预测结果。校正集样本的相关系数 r 为 0.869,校正均方根误差 RMSEC 为 3.88 N;预测集样本的相关系数 r 为 0.840,预测均方根误差 RMSEP 为 4.26 N。说明应用近红外漫反射光谱检测水果坚实度是可行的,为今后快速无损评价水果成熟度提供了理论依据。

刘燕德等^[22]应用近红外光谱(350~1 800 nm)及多元线性回归、主成分回归和偏最小二乘法回归三种数学校正方法对梨的可溶性固形物进行定量分析。在采用一阶微分预处理方法的同时应用偏最小二乘法回归方法,以果实赤道部位的预测结果较为理想。研究表明,近红外漫反射光谱可以作为一种准确、可靠和无损的检测方法用于评价梨果实内部指标可溶性固形物。

刘燕德等^[23]采用可见/近红外漫反射光谱对梨表面色泽进行无损检测研究。在 350~1 800 nm 光谱区间,结合梨的原始吸收光谱和标准化光谱,采用多元线性回归(MLR)、主成分回归(PCR)和偏最小二乘法回归(PLSR)三种数学校正算法进行了定量对比分析。原始吸收光谱应用 PLSR 建立的定标模型对 24 个未知样品的预测结果是: L^* 、 a^* 、 b^* 预测均方差分别为 1.4251, 0.4569 和 0.9497,相对预测偏差分别为 3.7404%、3.3571%和 2.5877%,表明可见/近红外光谱技术对梨表面色泽的无损检测具有可行性。

周丽萍等^[24]采用可见近红外光谱技术对苹果可溶性固形物含量的检测进行了研究。本文结合主成分分析(PCA)和 BP(反向传播)神经网络技术,建立苹果 SSC 预测模型。获取苹果样本在 345~1 039 nm 波段的漫反射光谱,采用 DPS 数据处理系统对其进行主成分分析,并提取出累计可信度大于 95%的 5

个新主成分。建立一个 3 层 BP 神经网络模型,并将这 5 个新的主成分作为 BP 神经网络模型的输入量,其结果是 98% 以上预测样本的预测相对误差在 5% 以下。

同年,史波林等^[25]通过 PLS 分别建立去皮前后苹果硬度的近红外回归模型。采用光谱附加散射校正(MSC)、微分处理(Derivative)、直接正交信号校正(DOSC)等预处理方法和机遇遗传算法(GA)的有效波段选择方法来消除果皮对模型精度的影响。结果表明,苹果果皮对近红外光谱分析模型的预测能力有很大影响,但仅通过常规的光谱预处理方法(MSC、Derivative)很难有效消除。他们提出的遗传算法结合直接正交信号校正(GA-DOSC)方法能有效消除果皮的影响,不但使所建模型的波长点和最佳主因子数分别由 1 480 和 5 降到 36 和 1,相关系数 r 由 0.753 提高到 0.805,更重要的是模型的预测相对误差 RSD_p 从 16.71% 显著下降到 12.89%,并接近采用苹果果肉建模的预测性能(12.36%),达到对苹果硬度的近红外无损检测要求。

4.3 果实成熟期光谱监测技术发展与应用现状

2002 年,运用分光检测技术,Manuela 等^[26]人在 300~1 100 nm 波长范围检测不同品种(‘Elstar’、‘Jonagold’和‘Indared’、‘Golden delicious’等品种)苹果果实的生长情况,用吸光度多变量分析方法得到上述品种叶绿素含量的相关系数 r^2 分别为 0.88、0.98、0.90 和 0.87,建立了基于光谱测定果面叶绿素含量的果实成熟期预测技术。

采用近红外漫反射技术,Peirs^[27]等人建立了不同成熟度‘Jonagold’苹果的可溶性固形物、坚实度、酸度、淀粉含量的相关数学模型,结果显示,用早期采收的未成熟苹果建立模型来预测成熟苹果的可溶性固形物含量是不合适的,只有当样品具有足够宽的成熟度范围,建立的模型才是稳健的。

运用透射光谱方法,Carlomagno 等^[28]人在 730~900 nm 波长范围内对不同地域的桃子进行分类分析。根据桃的含糖量和坚实度判断桃子的成熟度,经小波包变换滤噪,结合聚类分析和异常样品剔除来完成不同成熟期桃子的分类,准确率可达 82.5%。由于没有进行 700 nm 以下和 900 nm 以上波长的分析,存在光谱范围窄、测试精度不够高等问题。

Manuela 等^[29]根据光照强度、样品形状易于改变等要求研制了一套近红外高光谱成像系统,并设计算法检测水果表面新的撞伤、旧的撞伤、叶绿素含量、坚实度等。实验采集了‘Red Delicious’和‘Golden Delicious’两种苹果和‘Red Haven’和‘Coral star’两种桃子,建立相关的数学模型。由于水果的个体存在差异,而结论却建立在水果大小一致的前提下,从而导致光谱吸收值之间出现高度共线性问题。

5 存在问题

虽然近红外光谱技术在检测食品、水果品质上的研究已持续将近 10 年,但大多数还只是在实验室范围内进行的检测,很少形成真正的商业化应用。目前,水果品质或成熟期检测研究还存在以下几方面的问题。

(1)同一品种的果实由于生长发育的外部因素不同(包括海拔、降雨量和土壤条件等),其内部品质也有较大差异。这些内部品质的差异可能导致近红外分析时水果对模型的适应性不同,进而影响对水果品质预测的准确性。

(2)果实不同部位的内在品质存在一定差异,因此,在近红外光谱检测中对果实测试位点选择不当会明显影响检测结果。以苹果为例,同一指标在果实顶部、赤道部位和脐部存在显著差异。为了避免因测试位点选择不当对测量结果引起不利影响,一般宜选择赤道部位的相对 4 点进行检测^[30]。

(3)近红外光谱数据分析的核心是建立光谱值与样品组分含量之间的相关性,最终需要采用适当的数学建模方法建立预测模型。常用的数学建模方法较多,预测建模的方法选择不当会导致所建模型的过适应或欠适应。

(4)在建模过程中,回归分析会出现过度拟合现象,某些重要的波段可能被忽略,光谱仪自身的信噪比影响检测数据的正确性,这些因素均会造成预测模型的精确度下降。

(5)果实果皮厚薄可能会对果皮光谱特征与果实内质的相关程度产生一定影响,进而影响光谱探测的准确性,带来测定误差。

6 展 望

尽管 NIRS 法在技术还存在一些不足,但其所具有的快速、简便、准确及同时可测定多种组分的优点,使它在现场测试、港口检验、产品质量及原料在线分析中获得较好的应用。基于近红外光谱技术研究中存在的问题,利用近红外光谱预测果实成熟期时,除了保证预测模型的精确度外,还需考虑模型的通用性。为了更好的利用近红外光谱技术预测果实成熟期,还需进一步研究水果果实的不同光学特性与其内部品质和果实成熟期的相关性,评价这些光学特性在水果品质预测中的应用潜力,提高预测的效率和准确性。

近红外光谱技术在果实成熟期预测中,光谱波段的选择尤为重要。对波段优化选择与全谱建模分析的效果比较表明^[31],建立预测模型时有必要对光谱波段进行优选和组合,如果模型中包含了与组分无关的信息时,将干扰预测模型分析的准确性。因此,在今后的研究中,进行波段信息选择建立相应组分分析模型是开展数据处理的重要环节。

在水果品质的光谱检测中,光谱仪自身的信噪比等性能会极大地影响预测模型的精确度。一些学者提出利用多尺度小波去噪法对近红外光谱进行预处理^[32]和建立预测模型的方法,结果表明,该法既可滤除原始光谱中的部分噪音,又保留了原光谱中的主要信息,因而可以较好地提高预测模型的精度。可见,在光谱预处理方面,选择合适的消噪方法将成为今后近红外光谱技术在水果内部品质及成熟期预测中的另一研究重点。

气象因子是影响果实发育的重要因素,因此,如何利用近红外光谱技术检测果实品质发育的动态过程,并结合气候因子建立模型,更精准地预测果实成熟期,这将是有待探索的新领域。

参考文献:

- [1] 徐广通,等. 现代近红外光谱技术及应用进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2000,20(2): 134-142.
- [2] 杨家驹. 江苏柑桔的栽培[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1991: 30.
- [3] 黄德灵. 柑桔生产手册[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1987: 34.
- [4] 刘孝仲. 甜橙栽培生物生理学基础[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1985: 134-139.
- [5] 许伟东,等. 晚熟龙眼果实成分和变化趋势初探[J]. 福建果树, 1998(3): 52-54.
- [6] 郁香荷,等. 仁用杏果实生长发育规律及适宜采收期[J]. 北方果树, 2004(4): 10.
- [7] 刘干生. 根据柑桔果实发育积温确定采收期[J]. 中国柑桔, 1993,22(3): 39.
- [8] 包应时,等. 近红外光谱分析技术在农业与食品无损检测上的应用[J]. 农机化研究, 2006,10(10): 167-172.
- [9] 吴瑾光. 近代傅里叶变换红外光谱技术及应用(上卷)[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994: 251-281.
- [10] 陆婉珍,等. 现代近红外光谱分析技术[M]. 北京: 中国石油化工出版社, 2002: 10-12.
- [11] 严衍禄. 近红外光谱分析基础与应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005.
- [12] Tanaka M, *et al.* Near infrared monitoring to the growth period of Japanese pear fruit based on constituent sugar concentrations[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1996,44(8): 2 272-2 277.
- [13] McGlone V A, *et al.* VIS/NIR estimation at harvest of pre- and post-storage quality indices for 'Royal Gala' apple[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2002,25: 135-144.
- [14] Herold B, *et al.* Spectral measurements on 'Elstar' apples during fruit development on the tree[J]. *Biosystems Engineering*, 2005,91(2): 173-182.
- [15] Peirs A, *et al.* Effect of natural variability among apples on the accuracy of VIS/NIR calibration models for optimal harvest date predictions[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2005,35: 1-13.
- [16] David C S, *et al.* Nondestructive internal quality assessment of kiwifruit using near-infrared spectroscopy[J]. *Seminars in Food Analysis*, 1998(3): 131-140.
- [17] Peirs A, *et al.* Prediction of the optimal picking date of different apple cultivars by means of VIS/NIR-spectroscopy[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2000,21: 189-199.

(下转第 96 页)

- 138(1-2): 161-167.
- [10] Dalmay T, *et al.* Replication of Cymbidium ringspot virus satellite RNA mutants[J]. *Virology*, 1995,206(2): 1 092-1 098.
- [11] Rubino L, *et al.* Expression of tombusvirus open reading frames 1 and 2 is sufficient for the replication of defective interfering, but not satellite RNA[J]. *Gen Virol.*, 2004,85(10): 3 115-3 122.
- [12] Burgyan L, *et al.* Expression of homologous and heterologous viral coat protein encoding genes using recombinant DI RNA from Cymbidium ringspot tombusvirus [J]. *Gene.*, 1994,138(1-2): 159-161.
- [13] Kollar A, *et al.* Defective interfering RNA-mediated resistance against Cymbidium ringspot tombusvirus in transgenic plants[J]. *J Virol.*, 1993,192(2): 551-555.
- [14] Dalmay T, *et al.* Generation of defective interfering RNA dimers of Cymbidium ringspot tombusvirus[J]. *Virology*, 1995, 206(2): 1 092-1 098.
- [15] Havelda Z, *et al.* Localization of cisacting sequences essential for cymbidium ringspot tombusvirus defective interfering RNA replication[J]. *J Gen Virol.*, 1995,76(9): 2 311-2 316.
- [16] Havelda Z, *et al.* 3'terminal putative stem-loop structure required for the accumulation of Cymbidium ringspot viral RNA[J]. *Virology*, 1995,214(1): 269-272.
- [17] Napoli C, *et al.* Introduction of a chimeric chalcone synthase gene into petunia results in reversible co-suppression of homologous genes in trans[J]. *Plant Cell*, 1990,2(4): 279-289.
- [18] Matzke M, *et al.* RNA: guiding gene silencing [J]. *Science*, 2001,293: 1 080-1 083.
- [19] 牛宝龙,等. RNA干涉与基因功能研究进展[J]. *浙江农业学报*, 2005,15(4): 263-268.
- [20] Lakatos L, *et al.* Molecular mechanism of RNA silencing suppression mediated by p19 protein of tombusviruses[J]. *EMBO J.*, 2004,23(4): 876-884.
- [21] Molnar A, *et al.* Plant virus-derived small interfering RNAs originate predominantly from highly structured single stranded viral RNAs [J]. *J Virol.*, 2005,79(12): 7 812-7 818.
- [22] Szittyá G, *et al.* Cymbidium ringspot tombusvirus coat protein coding sequence acts as an avirulent RNA[J]. *Virol.*, 2001, 75(5): 2 411-2 420.
- [23] 张仲凯,等. TSWV与TMV复合侵染大花蕙兰的细胞病理[J]. *西南农业学报*, 2004,14(17): 155-159.
- =====
- (上接第 87 页)
- [18] Saranwong S, *et al.* Prediction of ripe-stage eating quality of mango fruit from its harvest quality measured nondestructively by near infrared spectroscopy[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2004,31: 137-145.
- [19] 袁雷,等. 柑橘品质的近红外光谱无损检测[J]. *光谱实验室*, 2006,23(4): 820-822.
- [20] Subedi P P, *et al.* Prediction of mango eating quality at harvest using short-wave near infrared spectrometry[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2007,43: 326-334.
- [21] 傅霞萍,等. 水果坚实度的近红外光谱检测分析试验研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006,26(6): 1 038-1 041.
- [22] 刘燕德,等. 近红外漫反射光谱检测梨内部指标可溶性固形物的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008,28(4): 797-800.
- [23] 刘燕德,等. 梨表面色泽的可见/近红外漫反射光谱无损检测研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2008,27(4): 266-268.
- [24] 周丽萍,等. 苹果可溶性固形物含量的检测方法[J]. *农业化研究*, 2009,4(4): 104-106.
- [25] 史波林,等. 应用 GA-DOSC 算法消除果皮影响近红外漫反射光谱分析苹果硬度的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009,29(3): 665-675.
- [26] Manuela Z S, *et al.* An approach to non-destructive apple fruit chlorophyll determination[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2002,25: 123-133.
- [27] Peirs A, *et al.* Nicolai Effect of natural variability among apples on the accuracy of VIS-NIR calibration models for optimal harvest date predictions[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2005,35: 1-13.
- [28] Carlomagno G, *et al.* Non-destructive grading of peaches by near-infrared spectrometry[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2004,46: 23-29.
- [29] Manuela Z, *et al.* Non-destructive tests on the prediction of apple fruit flesh firmness and soluble solids content on tree and in shelf life[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006,77: 254-260.
- [30] 刘燕德,等. 光纤传感技术及其在水果内部品质检测中的应用研究[J]. *传感技术学报*, 2003,16(2): 15-17.
- [31] 郑丽敏,等. 近红外光谱波段优化选择在驴奶成分分析中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007,27(11): 2 224-2 227.
- [32] 夏俊芳,等. 基于小波消噪柑橘内部品质近红外光谱的无损检测[J]. *华中农业大学学报*, 2007,26(1): 120-123.