

基于水果电物理特性的 无损检测技术

马海军 著

非外借



科学出版社

基于水果电物理特性的 无损检测技术

马海军 著

国家自然科学基金项目 (31360468、30471001)

资助出版



科学出版社

北京

内 容 简 介

无损检测技术是一门新兴的综合性应用技术。实现果品无损检测,创建果实内在品质快速无损检测方法及途径,关键在于确立标志果实内在品质的特征指标(体系)。本书以“富士”苹果和枸杞为试材,应用LCR电子测试仪(日产)、生理生化技术、灰色系统理论与方法,对上述两种果实的生理生化特性与电学特性关联机理进行研究,建立标志苹果和枸杞品质特性(电特性和生理特性)动态变化的数学模型。研究结果证明了用电学参数标志苹果采后病害和机械损伤响应以及进行枸杞产区识别和品种识别的可行性,为创建果实质量的无损检测新技术和进一步研制开发果实品质的无损检测仪器提供了一定理论依据,也为目前困扰枸杞产业的产区识别、品种识别提供了有力的电物理理论支撑。

本书可供食品科学与工程、农产品检测等专业的高校师生阅读,也可从事果品无损检测工作的技术人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于水果电物理特性的无损检测技术 / 马海军著. —北京: 科学出版社, 2018.9

ISBN 978-7-03-058676-6

I. ①基… II. ①马… III. ①苹果-无损检验 IV. ①TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 200858 号

责任编辑: 亢列梅 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 9 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2018 年 9 月第一次印刷 印张: 10 3/4

字数: 163 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者简介

马海军，男，1974 年生，博士，副教授，硕士生导师，高级酿酒师，国家级二级品酒师。主要从事果树栽培生理和园艺产品的无损检测方面的研究工作。参与中日国际合作项目、国家科技支撑计划项目等。主持国家自然科学基金项目“宁夏枸杞发育及贮藏中电物理特性与生理活性关联机理研究”、宁夏自然科学基金重点项目“宁夏不同产区枸杞电物理特性差异研究”等国家级、区级科研项目 6 项。在《农业机械学报》《西北植物学报》《西北农林科技大学学报》《西北林学院学报》等核心期刊上发表学术论文 30 余篇。获批专利 2 项。



前 言

无损检测技术（简称无损检测技术）是一门新兴的综合性应用技术。它是在不损坏被检测对象的前提下，运用各种物理学的方法如热、声、光、电、磁等来探测物料性质和数量的变化。该方法既可以保证样品的完整性，检测速度相较传统的化学方法更加迅速，而且能有效地判断出从外观无法得出的样品内部品质信息。根据检测原理不同，无损检测大致可分为光学特性分析法、声学特性分析法、机器视觉技术检测方法、电学特性分析法、电磁与射线检测技术等五大类。

目前，我国对果实质量（如成熟度、内部品质等）的检测主要采用外观颜色的目测法和依据果实机械特性及化学成分等的化学检验法。目测法科学性差、效率低；化学检验法不仅会对果品造成损伤，而且会产生污染。因此，果品质量的快速无损检测一直是国内果实采后生理研究领域的一大难题。我国与发达国家在水果质量检测及处理手段方面存在着巨大差距。据统计，我国每年因检测及处理手段落后而引发的腐烂变质和品质下降造成的直接经济损失，仅苹果一项就高达数千万元。

运用无损在线检测技术不仅可以解决这一难题，而且会丰富果实采后生理学研究内容，更会对传统的果实分类、分级方法带来新的突破。对水果最佳采收时期的确定、在贮藏或加工前对内部缺陷水果的发现与剔除以及在流通和销售环节上科学的质量检测等，不但可以有效保证每一个产品的质量，而且可以获得人工和普通分选方法所不能达到的目标，具有广阔的应用前景，将对我国的水果生产、贸易及深加工等产生积极的推动作用。创建果实内在品质快速无损检测方法及途径，关键在于确立标志果实内在品质的特征指标（体系）。果实的成熟与衰老过程不仅包含诸多复杂的生理生化过程，而且伴随着许多物理特性的变化。近几十年来，国外学者开始将成熟与衰老过程中果实组织的物理特性变化与其生理生化变化联系起来进行研究，以物理参数作为标志果实内在

品质的指标,目前已成为国际上的研究热点之一,并研发出多种检测仪器并投入实际应用。

电磁特性检测技术是利用样品在电磁场中电、磁特性参数的变换来反映样品的性质。该方法所需设备相对简单,数据的获取和处理比较容易,因此,其应用前景较广阔。目前国内对水果电学特性的研究刚刚起步,关于苹果特别是伤害和病害导致的果实电物理特性的响应研究几乎是空白,对机械伤害防御机制以及茉莉酸提高植物抗逆性的机理了解尚不足,还鲜见苹果电学特性对碰伤和病害的响应以及茉莉酸在苹果损伤机理方面影响的报道。而国内外对于不同产区、不同品种枸杞鲜果电物理研究甚少。基于此,作者依托国家自然科学基金项目“果实成熟衰老过程中电特性与生理生化变化关系的研究”(30471001)和“宁夏枸杞发育及贮藏中电物理特性与生理活性关联机理研究”(31360468),通过系统研究苹果和枸杞鲜果不同状态下电物理特性的变化以及电物理特性指标与生理活性指标间的相关性,从而筛选标志苹果和枸杞鲜果内在品质的敏感电物理参数。本书成果对于揭示苹果和枸杞鲜果成熟与衰老的电物理变化机理,丰富苹果和宁夏枸杞的研究内容等具有重要的理论意义;对于创建苹果和宁夏枸杞质量检测的新途径,开发苹果和枸杞质量检测的新技术也具有广阔的应用前景。鉴于电参数分析法具有其他方法所不具备的快速、准确、无污染以及可实现计算机控制等特点,其应用前景将非常广阔。

全书共7章,第1章为绪论;第2~5章重点介绍作者在苹果无损检测方面开展的研究;第6章对作者近4年来在宁夏枸杞电学特性检测方面开展的研究进行了总结;第7章为结论、创新点及展望。本书撰写过程中得到了西北农林科技大学生命科学院张继澍教授的大力支持,同时得到了陈连兵、黄帅、王海兰、罗丹、陈苏、葛宏达、马淑琴等学生的帮助,在此表示衷心的感谢!本书撰写过程中参考了大量文献,在此向相关作者表示诚挚的谢意!

由于本书内容所涉及的学科较广,加之作者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正!

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 基于水果物理特性的无损检测技术研究进展	1
1.1.1 基于水果光学特性的无损检测技术研究进展	1
1.1.2 基于水果声学特性的无损检测技术研究进展	9
1.1.3 基于水果电磁特性的无损检测技术研究进展	11
1.1.4 利用计算机视觉技术进行水果无损检测的研究进展	16
1.1.5 利用电子鼻技术进行水果无损检测的研究进展	19
1.1.6 利用其他方法进行水果无损检测的研究进展	22
1.2 伤信号转导途径中茉莉酸与其他植物激素间的关系	23
1.2.1 茉莉酸研究进展	23
1.2.2 茉莉酸与水杨酸在伤信号转导途径中的关系	33
1.2.3 茉莉酸与脱落酸在伤信号转导途径中的关系	36
1.2.4 茉莉酸与乙烯在伤信号转导途径中的关系	37
1.2.5 茉莉酸与一氧化氮在伤信号转导途径中的关系	39
1.3 苹果机械损伤研究进展	40
1.3.1 苹果的无损检测研究进展	40
1.3.2 损伤苹果的电特性研究进展	42
1.3.3 损伤苹果生理生化特性研究进展	42
1.3.4 损伤苹果其他方面的研究进展	43
第 2 章 苹果电学特性对病害响应的机理	46
2.1 LCR 电学测试系统及参数筛选	46
2.1.1 材料与处理	46
2.1.2 测试系统组成	46
2.1.3 测试电路原理	47
2.1.4 测试系统调零及测量参数设置	48
2.1.5 结果与分析	49

2.2	电激励信号频率对红点病苹果采后电学特性的影响	53
2.2.1	材料 with 处理	53
2.2.2	结果 with 分析	54
2.2.3	讨论	57
2.3	100Hz~3.98MHz 下 “富士” 苹果虎皮病果实电特性研究	60
2.3.1	材料 with 处理	61
2.3.2	结果 with 分析	61
2.3.3	讨论	65
第 3 章	苹果电学特性和生理生化变化对机械损伤响应的机理	68
3.1	“富士” 苹果碰伤 48h 内电学特性变化研究	68
3.1.1	材料 with 处理	69
3.1.2	结果 with 分析	70
3.1.3	讨论	86
3.2	“富士” 苹果碰伤 48h 内品质指标及主要抗氧化酶活性的响应	89
3.2.1	材料 with 处理	90
3.2.2	结果 with 分析	92
3.2.3	讨论	98
第 4 章	“富士” 苹果碰伤 48h 内茉莉酸及其他伤信号分子的变化	103
4.1	材料 with 处理	104
4.2	结果 with 分析	106
4.2.1	碰伤对 “富士” 苹果内源茉莉酸含量的影响	106
4.2.2	碰伤对 “富士” 苹果内源脱落酸含量的影响	107
4.2.3	碰伤对 “富士” 苹果内源水杨酸含量的影响	108
4.2.4	碰伤对 “富士” 苹果内源一氧化氮含量的影响	110
4.2.5	碰伤对 “富士” 苹果内源乙烯释放速率的影响	111
4.2.6	碰伤对 “富士” 苹果脂氧合酶活性的影响	111
4.3	讨论	112
4.3.1	碰伤对 “富士” 苹果内源茉莉酸含量的影响	112
4.3.2	碰伤对 “富士” 苹果内源 ABA 含量的影响	113
4.3.3	碰伤对 “富士” 苹果内源水杨酸含量的影响	114
4.3.4	碰伤对 “富士” 苹果 NO 含量的影响	115
4.3.5	碰伤对 “富士” 苹果乙烯释放速率的影响	116
4.3.6	碰伤对 “富士” 苹果 LOX 活性的影响	117

第 5 章 基于灰色系统理论用电学参数预测苹果品质指标	119
5.1 材料与处理	120
5.1.1 试验材料	120
5.1.2 电学参数测定方法及选取	120
5.1.3 数据处理	121
5.2 结果与分析	121
5.2.1 电学参数和生理参数的关联分析	121
5.2.2 多因子动态变化模型	123
第 6 章 枸杞鲜果电学特性检测研究	134
第 7 章 结论、主要创新点及展望	137
7.1 结论	137
7.2 主要创新点	138
7.3 展望	139
参考文献	140
附录 主要电学参数及其含义	159

第1章 绪 论

1.1 基于水果物理特性的无损检测技术研究进展

近年来,随着人们对水果需求量的提高,国内外水果品种增多,产量逐年上升,人们对水果品质也有了更高的要求。我国加入世界贸易组织(World Trade Organization, WTO)后,水果走向世界的关税壁垒逐渐被技术壁垒所取代,水果的功能性和安全性越来越受到重视。同时,果农、政府监管机构和消费者对水果品质分析手段的要求,则向着实时、快速、无损的方向转变。在这一背景下,新型、快捷、高效的检测技术及仪器设备成为这一领域的重大科技需求。以近红外光谱和机器视觉等为代表的无损检测技术和根据这些原理开发的新型检测方法成为当前的研究热点。与之相关的化学计量和智能识别等新技术也不断向水果质量安全领域延伸,为深入开展水果质量无损检测技术研究提供了必要手段和理论依据(潘立刚等, 2008)。

无损检测技术(nondestructive determination technologies, NDT)简称无损检测技术,是一门新兴的综合性应用技术。该技术运用各种物理学的方法如热、声、光、电、磁等来探测物料性质和数量的变化。该方法不但保证了样品的完整性,检测速度快,而且能有效地判断出从外观无法得出的样品内部品质信息(莫润阳, 2004)。根据检测原理,可将无损检测大致分为光学特性分析法、声学特性分析法、机器视觉技术检测方法、电学特性分析法、电磁与射线检测技术等五大类(潘立刚等, 2008)。

1.1.1 基于水果光学特性的无损检测技术研究进展

由于水果或蔬菜的内部成分及外部特性不同,其在不同波长的射线照射下会有不同的吸收或反射特性,且吸收量与果蔬的组成成分、波长

及照射路径有关。根据这一特性结合光学检测装置能实现水果和蔬菜品质的无损检测（张立彬等，2005）。

1. 可见/近红外光谱无损检测技术研究进展

NIR（near infrared）是近红外光的英文缩写，近红外光的波长为800~2500nm，略高于可见光（波长400~750nm）。当近红外光用于果实检测时，NIR有反射模式和透射模式两种。当近红外线照射在果实上时，果实中构成糖和酸的官能团（如—CH、—OH、—NH）能吸收NIR中与分子固有振荡频率一致的、特定的光线，而其他官能团则不能吸收。近红外法就是利用上述性质，从被吸收的光中无损坏检测糖、酸、水分和叶绿素等成分的一种技术（郭文川等，2001）。

水果品质的近红外检测就是指在不破坏水果外形的前提下，进行水果着色度、糖度、酸度、水分、坚实度、可溶性固形物等参数的测量。从20世纪60年代开始，近红外光谱法（near infrared spectrometry, NIRS）逐渐应用到水果品质检测中。经过50多年的研究，NIRS可以检测苹果、梨、桃、柑橘、草莓等多种水果的品质（付兴虎，2007）。

近几年来，利用NIR技术进行水果内部品质的检测逐渐引起人们的兴趣，正在形成一个新的热点研究领域。Sohn和Rae（2000）对“富士”苹果研究后得出的模型在波长1100~2500nm相关系数（ R^2 ）为0.71。Renfu（2001）用近红外反射光谱无损测量“Hedelfinger”和“Sam”两个品种甜樱桃的硬度和糖度，采集在800~1700nm的NIR光谱数据，用偏最小二乘法建立甜樱桃硬度和糖度的预测统计模型。结果显示，模型对“Hedelfinger”和“Sam”两个品种甜樱桃的硬度预测对应的 r 值为分别为0.80和0.65，预测标准差（standard error of prediction, SEP）分别为0.55N和0.44N；模型对甜樱桃糖度预测的SEP值分别为0.71°Brix和0.65°Brix。McGlon等（2002，2003）在500~1100nm波长范围内，分别比较了“Royal Gala”苹果采后和冷藏6周后所建模型的优劣。结果表明：贮藏6周后建立的可溶性固形物含量（soluble solid content, SSC）模型明显优于采后建立的SSC模型，其主要原因是采摘后样品受到生理热等影响，性质不稳定。Schmilovitch等（2000）报道了在1200~

2400nm 用 NIR 对杧果硬度的预测, 预测模型相关系数 (R^2) 为 0.82, 预测均方根误差 (root mean standard error of prediction, RMSEP) 为 17.1N, 该结果后来被 Mahayothee 等验证。Mahayothee 等 (2004) 运用 NIR 技术在 650~2500nm 区间对两个杧果品种得到了一个相似的硬度预测模型, 模型 $0.67 < R^2 < 0.85$, $25.8\text{N} < \text{RMSEP} < 54.5\text{N}$ 。Valero 等 (2004) 发现苹果的硬度和苹果组织的散射特性在 670nm、750nm、800nm、900nm 和 950nm 有很明显的相关性。Lu (2004) 在选择 NIR 波长时结合多波长散射光方法及神经网络模型预测了苹果的硬度, 模型的 $R^2=0.76$, $\text{SEP}=5.8\text{N}$ 。Zude 等 (2006) 在可见光范围内 (400~700nm) 结合光学和声学脉冲方法测量得到两个苹果品种硬度的调整模型和刚性因子值, 模型的 R^2 为 0.75~0.93, 交互验证标准差为 7.7~11.3N/cm²。2004 年, McGlone 和 Martinsen 对高速运动 (0.5m/s) 的完整苹果的干物质含量进行透射检测, 并建立了苹果的干物质预测模型, 其结果为 LAS ($R^2 = 0.87$, $\text{RMSEP} = 0.43\%$), TDIS ($R^2 = 0.81$, $\text{RMSEP} = 0.48\%$)。2005 年, McGlone 等应用两种近红外在线检测系统对“Braeburn”苹果的内部褐心面积的百分比进行了无损检测。LAS 系统最好的结果为 $R^2 = 0.88$, $\text{RMSEP} = 4.7\%$; TDIS 系统最好的结果为 $R^2 = 0.75$, $\text{RMSEP} = 7.6\%$ 。Nicolai 等 (2006) 应用 NIR 和偏最小二乘 (partial least square, PLS) 法对苹果苦痘病检测数据所建模型进行分析后指出, 模型能很好地预测苦痘病, 还能鉴别采收后肉眼无法观察到的苦痘病。Gómez 等 (2006) 用可视近红外检测法 (Vis-NIRS) 检测了温州蜜柑“Zaojin Jiaogan”的硬度、SSC 和 pH, PLS 法和主成分回归 (principal component regression, PCR) 法建立的模型显示, SSC 预测的 r 和 RMSEP 分别为 0.94°Brix 和 0.33°Brix, pH 和硬度的 r 和 RMSEP 则分别为 0.80 和 0.18 及 0.83 和 8.53。该结果表明, 通过该技术在 400~2350nm 对蜜柑质量检测是完全可行的。Li 等 (2007) 认为该技术在杨梅 (Chinese bayberry) 品种的分类上有很大的应用潜力。McGlone 等 (2007) 采用 Vis-NIRS 对黄肉猕猴桃干物质含量、可溶性固形物含量及果肉颜色进行的检测显示, 该方法的检测精度分别为 $\pm 0.40\%$ 、 $\pm 0.71\%$ 和 $\pm 1.05^\circ$ 。Sinelli 等 (2008) 用

NIR 来评估两个越橘品种“Brigitta”和“Duke”的成熟指数和营养参数,通过偏最小二乘法建立的模型显示,总酚含量、总类黄酮和总花青素含量的校正均方根误差 (root mean standard error of calibration, RMSEC) 和预测均方根误差 (RMSEP) 分别为 -0.14mg 儿茶酚/g 和 -0.18mg 儿茶酚/g、 -0.20mg 儿茶酚/g 和 -0.25mg 儿茶酚/g、 -0.25mg 儿茶酚/g 和 -0.22mg 儿茶酚/g,最后指出,该技术不仅实用而且节省检测时间和成本。Pérez-Marín 等 (2009) 用 NIRS 检测了树上的油桃和冷库中的油桃,结果显示有很好的精确度,SSC ($R^2 = 0.89$; $\text{SEP} = 0.75\% \sim 0.81\%$)、硬度 ($R^2 = 0.84 \sim 0.86$; $\text{SEP} = 11.6 \sim 12.7\text{N}$),并认为油桃的质量变化参数可以通过无损仪器检测。Bureau 等 (2009) 用 NIR 在 $800 \sim 2500\text{nm}$ 对杏果的质量进行了检测,结果显示,波长与 SSC 和 TA (total acid) 含量有很高的相关性,相关系数分别为 0.92 和 0.89,预测模型的均方根误差则分别为 0.98% Brix 和 $3.62\text{meq}/100\text{g FW}$,对其他的质量特性如硬度、乙烯含量、单糖含量和有机酸含量,该模型的精度较差。Camps 和 Christen (2009) 运用 NIR 对杏果的 SSC、TA 和硬度 (Fi) 进行了测定,对建立的模型进行分析后得出,SSC、TA 和 Fi 的均方根误差的交叉验证值分别为 $0.67 \sim 1.10^\circ\text{Brix}$ 、 $0.79 \sim 2.61\text{g}/100\text{mL}$ 和 $6.2\% \sim 13.0\%$,对应的 R^2 分别为 $0.88 \sim 0.90$ 、 $0.73 \sim 0.97$ 和 $0.85 \sim 0.92$,也就是说 NIR 可以用于杏果质量的检测。Valente 等 (2009) 在可吸收波长内将 NIR 与声学检测法结合预测芒果的硬度,得到的偏最小二乘回归模型相对于有损检测而言,对刚性因子在不同阶段成熟的芒果有更好的预测。Liu 等 (2010) 研究指出,Vis-NIR 可以很好地预测脐橙的 SSC。

国内有关研究人员在利用 NIR 技术进行水果品质测定方面也进行了大量的研究。韩东海等 (2004) 通过密度法和自行研制的水心病检测仪器对苹果样品进行检测。结果表明:把近红外 810nm 的计算透光强度 25000 作为界限值可以将好果 (1 级) 与 3、4 级果完全分离,2 级果有 29% 分离。在 2006 年,该研究小组应用 NIR 技术对苹果内部褐变进行研究后指出,选择 715nm 、 750nm 、 810nm 3 个特征波长进行褐变果判别分析样品的正确判别率达到 95.65% (韩东海等, 2006)。张海东等

(2005) 采用正交信号校正 (orthogonal signal correction, OSC) 法对苹果的近红外光谱 (1300~2100nm) 进行预处理, 并结合偏最小二乘 (PLS) 法建立了苹果光谱对糖度的预测模型。此后, 他们将用于纯组分定量分析的混合线性分析法的一种变形算法 (HLA/XS 法) 移植到苹果糖度这一非纯组分含量指标的近红外光谱检测中, 并与偏最小二乘 (PLS) 法进行比较。结果表明: 在诸如苹果糖度这一类农产品品质综合指标 (非纯组分含量指标) 的光谱检测中, 应用混合线性分析法 (HLA/XS 法) 进行定量分析是可行的, 并且其结果与偏最小二乘 (PLS) 法的结果相同 (张海东等, 2006)。李晓丽等 (2006) 先应用可见-近红外光谱仪测定三个品种水蜜桃的光谱曲线, 再用主成分分析法对不同品种样本进行聚类分析, 经过主成分分析得到的前 8 个主成分的累积可信度已达 94.38%, 从 75 个样本中随机抽取 60 个样本用于建立 8 个主成分变量的多类判别分析品种鉴别模型准确率为 100%, 说明 NIR 方法具有明显的分类和鉴别作用。何勇和李晓丽 (2006) 用主成分分析法对四个典型的杨梅品种进行聚类分析, 获取杨梅的近红外指纹图谱, 再结合人工神经网络技术进行品种鉴别。结果表明, 杨梅品种识别准确率达到 95%, 说明综合主成分分析和人工神经网络方法具有很好的分类和鉴别作用。马广等 (2007) 应用近红外漫反射光谱定量分析技术开展了金华大白桃的糖度检测试验研究, 用偏最小二乘回归 (partial least square regression, PLSR) 方法在 800~2500nm 光谱范围建模, 最终建立桃子果肉平均光谱经多元散射校正和矢量归一化散射校正后与糖度的相关模型, 该研究表明近红外光谱检测技术可用于金华大白桃糖度的定量分析。夏俊芳等 (2007a) 利用不同分解水平的 Daubechies3 小波变换, 对 100 个柑橘整果样品的近红外光谱信号进行了消噪处理, 并利用消噪后的重构光谱对柑橘维生素 C 含量进行了偏最小二乘法交叉验证。结果表明: 小波消噪后建立的近红外光谱模型能准确地对柑橘维生素 C 含量进行无损快速的定量分析。同时, 他们还指出, 小波消噪是脐橙维生素 C 含量近红外光谱无损检测的有效光谱预处理方法 (夏俊芳等, 2007b)。刘燕德等 (2008) 基于可见/近红外漫反射光谱定量分析技术对南丰蜜橘的可

溶性固形物含量进行实验研究,采用偏最小二乘法对南丰蜜橘完整果和果肉的可见/近红外光谱进行了分析,并且比较和讨论了不同光谱预处理的建模结果。实验结果表明:在波长范围 350~1800nm,一阶微分光谱所建模型效果最佳,其中完整果所建校正模型的预测相关系数为 0.825,预测均方根误差为 0.899;果肉所建校正模型的预测相关系数为 0.893,预测均方根误差为 0.749。虞佳佳等(2008)提出了一种用近红外光谱技术结合遗传算法和人工神经网络模型的芒果糖度、酸度快速无损检测的新方法。李东华等(2009)为确定南果梨糖、酸度,利用可见-近红外光谱模型,对不同贮藏期南果梨的适用性和适用时间进行了糖、酸度和光谱变化的方差分析,利用偏最小二乘(PLS)法建立采后 6d 的南果梨糖、酸度模型。实验结果表明:模型能满足一定贮藏时期内样品的预测要求,为南果梨近红外分级技术的应用提供了依据。蔡健荣等(2009)为了探寻一种快速无损检测猕猴桃糖度的方法,利用小波滤噪法对猕猴桃 1000~2500nm 近红外光谱进行了预处理,并用偏最小二乘(PLS)法、区间偏最小二乘(iPLS)法和联合区间偏最小二乘(siPLS)法分别建立预测模型。结果表明:采用联合区间偏最小二乘法将光谱划分为 16 个子区间,利用其中的第 9、11、13 号 3 个子区间联合建立的糖度模型效果最佳,其校正集相关系数和均方根误差分别为 0.9414 和 0.3788,预测集相关系数和均方根误差分别为 0.9295 和 0.3904。张淑娟等(2009)采用近红外光谱分析技术无损鉴别 3 个品种的鲜枣并测定其可溶性固形物含量;采用平滑法和多元散射校正方法对样本数据进行预处理,建立 3 层人工神经网络鉴别模型,并用该模型对 15 个预测样本进行预测。结果表明:在阈值设定为 ± 0.17 的情况下,该模型对预测集样本品种鉴别准确率达到 100%,可溶性固形物含量预测值与实测值相对偏差小于 10%。

2. X 射线检测技术研究进展

X 射线是一种很短的电磁波,波长范围为 $10^{-12} \sim 10^{-8}$,较紫外线短,但比 γ 射线长。与其他电磁波一样,X 射线能产生反射、折射、散射、

衍射、干涉、偏振和吸收等。X 射线具有穿透能力，在穿透不透明物质的过程中会被物质吸收和散射，从而引起射线能量的衰减（韩平等，2009）。通过 X 射线捕获射线的穿透特性，可以得到样品的透射图像和断层图像，进而探明物质的内部结构，穿透的程度主要取决于其品质密度与吸收系数；通过捕获射线与样品作用产生的荧光和衍射效应，可以检测到样品所含元素的情况，尤其是重金属含量（潘立刚等，2008）。X 射线检测技术原本是为检测一些不易拆卸分解的大型构件或机械零件的内部缺陷而开发的，在工业无损检测中的应用已日趋成熟，近年来已被成功地应用到农产品加工领域。由于 X 射线对物体有较强的穿透能力，所形成的 X 射线图像可以反映农产品的内部质构变化，对其内部的空洞、虫害、水分及食品中的异物检测有得天独厚的优势，受到国内外学者的广泛关注。

Thomas 等（1995）将 X 射线成像技术用于芒果象鼻虫的检测上，并指出该技术的可靠性。1997 年，Shahin 和 Tollner 用 X 射线扫描图像提取与苹果水心有关的图像特征，建立了模糊分类器来预测苹果水心。1999 年，Shahin 等选择苹果图像面积和图像表征的密度两个空间变量、余弦变换特征、小波变换特征为基本因子，然后用逐步回归法确定了苹果图像面积、密度和 10 阶余弦变换系数 3 个因子作为线性贝叶斯分类器的输入量，建立了预测苹果水心的贝叶斯分类器，预测准确率达到 79%。2002 年，Shahin 等又研究了根据压伤状态进行苹果分类的 X 射线图像技术，用逐步回归法确定了基于罗伯特算子的空间边缘特征和余弦变换特征两个因子，把它们作为预测旧压伤（1 个月）和新压伤（1 天）的因子，并建立了相应的神经网络分类器。结果表明：旧压伤的预测准确率达到 60%，两个品种苹果的新压伤预测准确率分别为 90% 和 83%。Barcelon 等（1999）用 X 射线计算机层析（computed tomography, CT）扫描仪监控成熟期桃子内在品质的变化，建立了 CT 量与桃子的物理化学含量之间的关系。实验结果表明：X 射线图像技术在桃子内在品质评价中是很有效的工具。Kim 和 Schatzki（2000）研究了苹果水心的检测问题。他们通过抽取苹果 X 射线图像的 8 个特征，依据这些特征

将苹果分成 3 类：无水心、轻微水心和严重水心，再用这些数据建立神经网络分类器。结果表明，建立的识别系统预测无水心和严重水心的误差为 5%~8%。Lammertyn 等（2003）将磁共振成像（magnetic resonance imaging, MRI）和计算机 X 射线断层技术结合用来检测 ‘Conference’ 梨褐心病发生的时间过程。Jiang 等（2008）提出了一个合适的图像分割法运算法则，该法解决了 X 射线运用的频率问题，使得 X 射线对农产品的检测不受果实厚度和密度的影响。

韩东海（1998）提出了一种利用柑橘正常果和皱皮果波形的差异检测柑橘皱皮果的方法，研究了影响皱皮果检测的主要因素。结果表明：X 射线的强度高、传送速度慢，有利于检测，检测速度达到 5 个/s。章程辉和王群（2005）利用 X 射线图像处理及模式识别方法检测红毛丹内部品质——可食率、可溶性固形物含量。实验结果表明，误判率小于 10%；红毛丹可溶性固形物含量的 X 射线图像检测可采用纹理特征描述的方法，利用直方图矩特征和支持向量机回归方法预测红毛丹可溶性固形物含量的相关系数最高可达 87.2%。2006 年，章程辉等分别用可见光图像和 X 射线图像检测红毛丹的外形尺寸，结果表明采用 X 射线图像检测技术能较准确地预测红毛丹的外形尺寸（章程辉等，2006a）。同一年，他们通过测定红毛丹果实各部分的厚度，并利用 X 射线图像测定射线强度，研究其 X 射线衰减系数，同时研究衰减系数与其密度的相关性，建立射线强度和厚度的回归方程以及果实衰减系数与果实的果皮、果肉、果仁衰减系数的关系，为外形尺寸大小的分级奠定了基础（章程辉等，2006b）。徐澍敏等（2006）以陕西产“富士”苹果为试验材料，利用 X 射线电子计算机扫描技术，测定了从不同高度跌落的苹果 CT 值的变化规律。试验结果表明：受机械损伤的苹果，在相同的扫描层上，苹果的 CT 值随贮藏时间增加而降低，且苹果受机械损伤程度越高，苹果的 CT 值越低；随着扫描层位置与撞击点距离的增加，未受损伤苹果的 CT 值略有下降，而受机械损伤苹果的 CT 值明显上升；随着贮藏时间的变化，苹果 CT 值随受损伤程度的变化规律有所不同。孙旭东等（2007）利用 X 射线二维图像每个灰度值的负指数与厚度成正比