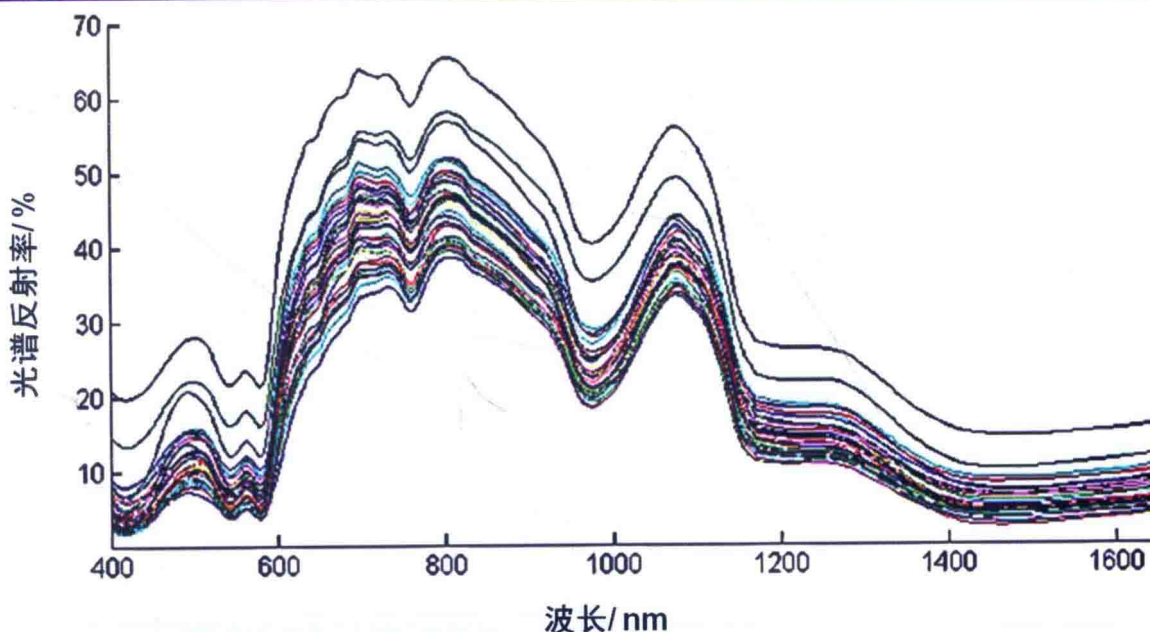


Nondestructive Optical Technology for
Agro-food Quality and Safety Assessment

农畜产品品质安全 光学无损快速检测技术

彭彦昆 著



科学出版社

Nondestructive Optical Technology for
Agro-food Quality and Safety Assessment

农畜产品品质安全 光学无损快速检测技术

彭彦昆 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书基于光学原理和方法,以大宗农畜产品为对象,以其品质和安全属性为检测指标,凝练了近年来国内外农畜产品光学无损检测的最新研究成果和前沿技术,系统地著述了无损、快速、实时预测和评价主要农畜产品品质安全属性的新方法、新技术、新装置和设备等,反映了作者及其研究团队近年来的主要科研成果。

本书凝集和阐述的主要技术内容包括光学信号处理、计算机光谱及图像解析与建模、光学扫描传感器设计、机器视觉、可见/近红外光谱、高光谱、拉曼光谱、光电系统控制等。本书针对水果、蔬菜、牛肉、猪肉、禽肉及禽蛋、水产品、家畜和家禽活体等大宗农畜产品,分门别类地描述了国内外的最新无损快速检测方法、实用技术和发展趋势等。本书通过新颖的原理方法、实用的技术实例,使读者系统掌握并快速提升农畜产品光学无损检测实用技术及装置的创新研发技能。

本书可供农畜产品品质安全检测研发人员和管理人员使用参考。

图书在版编目(CIP)数据

农畜产品品质安全光学无损快速检测技术/彭彦昆著. —北京:科学出版社, 2016. 2

ISBN 978-7-03-047197-0

I. ①农… II. ①彭… III. ①农产品-质量检验-无损检验②畜产品-质量检验-无损检验 IV. ①S37②S87

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第012173号

责任编辑:霍志国/责任校对:何艳萍

责任印制:徐晓晨/封面设计:铭轩堂

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

*

2016年2月第 一 版 开本:720×1000 B5

2016年2月第一次印刷 印张:23 1/4

字数:470 000

定价:128.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

“民以食为天，食以安为先”。由种植业、畜牧业、渔业等行业生产的农畜产品是人类赖以生存的食物和不可或缺的食品加工原料。农畜产品的品质安全直接关系到人类的健康和社会的发展与稳定。改革开放以来，我国的国民经济和科学技术快速发展。一方面，随着生活水平的不断提高，人们对农畜产品的品质安全提出了更高要求，其饮食消费观从“吃得饱”向“吃得安全、吃得营养”方向转变。另一方面，随着我国经济贸易的全球化和“一带一路”建设，农畜产品的进出口数量不断增长。因此，对农畜产品品质安全的管理，需要更新的监管手段和技术水平与其相适应。

传统的农畜产品品质安全检测多采用人工抽检方式，且依赖于价格昂贵的进口设备，需要专业技术人员操作，具有样品前处理过程复杂、测试时间长、人为误差大、破坏样品、抽检率低等缺点，难以用于农畜产品的生产、加工、销售等现场实时检测，无法用于农畜产品产业链中的高通量在线检测，无法实现对农畜产品的逐一品质标定、分级和分选。在农畜产品产业链中，急需新技术弥补传统人工抽检方法所不及的功能。

伴随着光学材料和计算机技术的飞速发展，农畜产品品质安全的光学无损快速检测已经成为可能。通过实时采集光谱图像数据，确立农畜产品的光学特征，建立与品质安全参数之间的关系，实现农畜产品的原位无损、高通量快速、实时在线检测和分级，越来越多的应用于农畜产品产业链中品质安全的实时在线检测。另外，2015年10月1日我国新修订的《食品安全法》开始实施，要求食品生产经营企业建立食品安全全程追溯制度，食品安全追溯已经成为法定条款。利用农畜产品品质安全无损快速检测技术，与互联网技术相结合在全程追溯过程中，能实时提供品质安全状况，成为农畜产品品质安全有效监控的最重要工具之一。

本书凝集和论述了国内外农畜产品无损检测研究的最新光学理论和前沿技术手段，包括光学信号处理、计算机光谱及图像解析与建模、光学扫描传感器设计、机器视觉、可见/近红外光谱、高光谱成像、拉曼光谱、X射线荧光光谱、光电系统控制等。农畜产品的种类和待测品质安全指标不同，采用的光学检测技术也不同。本书的特色在于针对大宗农畜产品，如水果、蔬菜、牛肉、猪肉、禽肉及禽蛋、水产品、家畜和家禽活体等不同的检测对象，结合大量的实例，按章分门别类详细描述了国内外光学无损检测的最新方法、实用技术和装置和发展趋

势等。

本书共分为 10 章,第 1 章绪论,对农畜产品无损检测技术进行了综合的概述,介绍了光学无损检测技术的概念、应用及发展趋势等。第 2 章介绍了农畜产品光学无损检测系统构成,主要描述了光学系统硬件构成、农畜产品的光学属性、农畜产品品质安全参数的光谱和图像特征以及数据解析方法等。第 3~8 章,分别介绍了主要农畜产品,包括水果、蔬菜、牛肉、猪肉、禽肉及禽蛋、水产品的品质安全光学无损检测原理、方法、技术及应用。第 9 章主要介绍了关于活体家畜家禽的行为特征判断、品质指标预测等光学技术及应用。第 10 章针对农畜产品光学实时检测系统和装置的应用研究状况和实例进行了详细的介绍。

本书著者一直致力于农畜产品品质安全光学检测技术的研究,曾获得公益性行业(农业)科研专项、国家科技支撑计划、国家“863”计划、国家自然科学基金、北京市自然科学基金等科研项目的支持。本书凝练了近年来国内外农畜产品光学无损检测领域的最重要研究成果和最新研究进展,系统地论述了无损、快速、实时预测和评价各种农畜产品品质和安全属性的新方法、新技术、新装置和设备等,反映了作者及其研究团队近年来的重要科研成果与经验。

本书著者都是直接参与相关科研项目的重要骨干,其中,第 1 章由彭彦昆、张雷蕾编写;第 2 章由陶斐斐、彭彦昆、宋育霖、李青编写;第 3 章由赵娟编写;第 4 章由翟晨、陈菁菁编写;第 5 章由郑晓春、林琬、周彤编写;第 6 章由王文秀、李翠玲、张海云编写;第 7 章由张雷蕾、孙宏伟编写;第 8 章由乔璐、刘媛媛编写;第 9 章由田芳编写;第 10 章由魏文松、张海云、王文秀编写。本书由彭彦昆负责策划、组稿、统稿、修订和审定。

在本书出版之际,衷心感谢多年来在农畜产品无损检测研究与实践过程中给予我们指导以及与我们合作的各位专家和学者。深深感谢研究团队的汤修映教授、李永玉副教授、江发潮教授、徐杨教授、王伟副教授的密切协作。由衷感谢科学出版社以及责任编辑对本书的出版付出的辛勤劳动。

本书可供农畜产品品质安全检测研发人员和管理人员使用参考。作者期待本书可以使读者对农畜产品光学技术有所了解,起到抛砖引玉的作用,使读者系统掌握农畜产品光学无损检测技术,全面了解农畜产品光学无损检测现状,提升农畜产品光学无损检测实用技术及装置的创新研发技能。

在编著过程中我们力求全面、完美、准确地呈献农畜产品光学检测技术,但是由于水平所限,疏漏和不足在所难免,恳请各位读者批评指正,敬请各位专家不吝赐教。

著者

2015 年 11 月

于中国农业大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 农畜产品品质安全问题	1
1.1.1 农畜产品定义和种类	1
1.1.2 农畜产品品质安全问题	1
1.1.3 农畜产品品质安全检测指标	2
1.2 农畜产品品质无损检测技术的概述	5
1.2.1 无损检测技术定义	5
1.2.2 无损检测技术简介	5
1.3 农畜产品品质安全光学检测的前沿技术及发展趋势	8
1.3.1 光学检测的前沿技术	8
1.3.2 农畜产品光学无损检测技术的主要应用	13
1.3.3 农畜产品光学无损检测技术的难点问题	13
1.3.4 光学无损检测技术的发展趋势和应用前景	16
参考文献	16
第 2 章 农畜产品光学无损检测系统构成	21
2.1 农畜产品光学无损检测系统的基本构成	21
2.1.1 近红外光谱仪	21
2.1.2 高光谱成像系统	23
2.1.3 拉曼光谱仪	25
2.1.4 机器视觉检测系统	26
2.1.5 结果输出系统	28
2.1.6 分级/筛选机构	28
2.2 农畜产品的光学属性	29
2.2.1 反射光	29
2.2.2 吸收光	30
2.2.3 散射光	31
2.2.4 透射光	32
2.3 农畜产品品质安全属性的特征波长	34
2.3.1 畜肉品质安全属性的特征波长	34

2.3.2	果蔬品质安全属性的特征波长	36
2.4	农畜产品品质安全属性的特征图像	37
2.4.1	牛肉大理石花纹图像	37
2.4.2	牛肉嫩度的高光谱图像纹理特征	39
2.4.3	苹果表面伤痕与果梗和花萼的机器视觉辨识	40
2.4.4	叶菜高光谱荧光图像	41
2.5	农畜产品品质安全无损检测的数据解析方法	43
2.5.1	光谱预处理算法	43
2.5.2	光学特征参数的提取方法	47
2.5.3	主要化学计量学方法	53
2.5.4	模型预测性能的评价标准	59
	参考文献	61
第3章	水果品质安全的光学检测技术	68
3.1	水果的品质安全参数及其检测方法	68
3.1.1	水果品质安全参数	68
3.1.2	利用光学特性水果品质安全参数基本检测方法	69
3.2	水果外部品质的光学检测技术	70
3.2.1	大小、形状、颜色的无损检测	70
3.2.2	表面损伤缺陷的无损检测	72
3.2.3	表面污染、腐烂、疤痕的无损检测	77
3.3	水果内部品质的光学无损检测	79
3.3.1	水果内部品质参数的无损检测	79
3.3.2	内部品质检测中的建模修正方法	97
3.4	水果内外部品质同时检测的光学技术	99
3.4.1	多信息融合技术	99
3.4.2	高光谱成像技术	99
3.5	水果安全品质的光学检测技术	102
3.5.1	水果单种农药残留的检测	102
3.5.2	农药残留种类识别及浓度预测	105
3.6	水果品质安全光学检测技术的应用	109
	参考文献	113
第4章	蔬菜品质安全的光学检测技术	116
4.1	蔬菜的品质安全参数及其光学无损快速检测方法	116
4.2	蔬菜外部品质检测	117
4.2.1	蔬菜形态检测	118

4.2.2 蔬菜缺陷识别	121
4.3 蔬菜内部品质检测	125
4.3.1 蔬菜营养成分检测	126
4.3.2 蔬菜内部缺陷检测	132
4.4 蔬菜内外部品质同时检测	133
4.5 蔬菜安全检测	136
4.6 蔬菜品质安全光学检测的应用	142
参考文献	145
第5章 牛肉品质安全的光学检测技术	150
5.1 牛肉的品质安全参数及常规检测方法	150
5.1.1 牛肉大理石花纹及其检测方法	150
5.1.2 牛肉嫩度及其检测方法	151
5.1.3 牛肉水分含量及其检测方法	153
5.1.4 牛肉系水力及其检测方法	153
5.1.5 牛肉新鲜度及其检测方法	154
5.1.6 牛肉细菌总数及其检测方法	155
5.1.7 牛肉剩余货架期及其预测方法	155
5.1.8 注胶肉、注水肉及其检测方法	156
5.2 牛肉品质光学检测技术	157
5.2.1 牛肉大理石花纹的光学检测	157
5.2.2 牛肉嫩度的光学检测	166
5.2.3 牛肉水分含量光学检测	174
5.2.4 牛肉系水力的光学检测	176
5.3 牛肉安全的光学检测技术	179
5.3.1 牛肉新鲜度光学检测	179
5.3.2 牛肉细菌总数光学检测	182
5.3.3 牛肉剩余货架期的光学预测	186
5.3.4 注入异物牛肉的光学鉴别	187
5.4 牛肉品质安全光学检测的应用	188
5.4.1 基于可见/近红外的牛肉多品质同时检测	189
5.4.2 基于高光谱成像的牛肉品质安全检测	191
5.4.3 基于计算机视觉的牛肉嫩度及大理石花纹等级判定	192
参考文献	193
第6章 猪肉品质安全的光学检测技术	198
6.1 猪肉的品质安全参数及其检测方法	198

6.1.1	猪肉品质安全评价指标	198
6.1.2	检测方法	200
6.2	猪肉品质检测	201
6.2.1	感官参数	201
6.2.2	化学成分参数	204
6.2.3	物理工艺参数	211
6.3	猪肉安全指标检测	223
6.3.1	新鲜度检测	223
6.3.2	微生物检测	230
6.4	猪肉品质安全光学检测的应用	234
6.4.1	猪肉多品质无损在线检测	234
6.4.2	便携式猪肉新鲜度等级实时检测	235
	参考文献	235
第7章	禽肉及禽蛋品质安全的光学检测技术	240
7.1	品质安全参数及其检测方法	240
7.1.1	禽肉及禽蛋品质安全参数	240
7.1.2	基于光学特性检测禽肉的原理及方法	243
7.1.3	基于光学特性检测禽蛋的原理及方法	244
7.2	禽肉及禽蛋品质检测	245
7.2.1	禽肉品质无损检测	245
7.2.2	禽蛋品质无损检测	248
7.3	禽肉及禽蛋安全检测	255
7.3.1	禽肉安全无损检测	255
7.3.2	禽蛋安全无损检测	261
7.4	品质安全光学检测的应用	265
7.4.1	禽肉及禽蛋光学检测的应用	265
7.4.2	今后待解决的技术问题	266
	参考文献	267
第8章	水产品品质安全的光学检测技术	271
8.1	水产品品质安全参数及常规检测方法	271
8.1.1	水产品品质参数及常规检测方法	271
8.1.2	水产品安全参数及常规检测方法	274
8.2	水产品品质光学无损检测技术	276
8.2.1	水产品感官质量指标得分检测	277
8.2.2	水产品质构参数检测	279

8.2.3 水产品化学营养成分含量检测	280
8.2.4 水产品分级及分类鉴别	285
8.3 水产品安全光学无损检测技术	287
8.3.1 水产品新鲜度指标的检测	287
8.3.2 水产品微生物污染指标的检测	292
8.3.3 水产品寄生虫检测	293
8.4 水产品品质安全光学无损检测技术的应用	294
参考文献	297
第9章 家畜和家禽活体光学检测技术	301
9.1 牛的活体检测	301
9.1.1 牛的背膘厚检测	301
9.1.2 牛的体重检测	305
9.1.3 牛的行为姿态的检测	308
9.2 猪的活体检测	310
9.2.1 猪的体重及肉产量检测	310
9.2.2 猪的背膘厚检测	315
9.2.3 猪的行为姿态的检测	316
9.3 鸡的活体检测	319
9.3.1 幼鸡性别的检测	319
9.3.2 鸡的行为的检测	320
9.3.3 健康鸡与病死鸡的判别	322
9.4 活体光学检测技术的应用	323
参考文献	325
第10章 农畜产品光学实时检测系统与装置	328
10.1 农畜产品光学实时检测的意义和发展现状	328
10.1.1 光学实时检测技术的优点	328
10.1.2 农畜产品光学实时检测技术的应用现状以及分类	329
10.2 农畜产品光学实时检测的核心技术	331
10.2.1 多传感器信息融合技术	331
10.2.2 检测与控制技术	333
10.2.3 农畜产品筛选与分选技术	334
10.2.4 信息无线传送与物联网	336
10.2.5 云计算技术	337
10.3 农畜产品光学实时检测系统的构成	339
10.3.1 硬件组成	340

10.3.2	实时检测分析软件	342
10.3.3	分析预测模型	342
10.4	农畜产品光学便携式检测装置系统	345
10.4.1	便携式生鲜肉品质无损检测装置	345
10.4.2	便携式生鲜肉新鲜度无损检测装置	347
10.4.3	便携式牛肉大理石花纹无损检测装置	349
10.4.4	手持式猪胴体背膘厚度检测装置	351
10.5	农畜产品光学在线检测装置与系统	353
10.5.1	生鲜肉多品质无损实时在线检测系统	353
10.5.2	水果外部品质实时在线检测系统	356
	参考文献	358

第 1 章 绪 论

1.1 农畜产品品质安全问题

1.1.1 农畜产品定义和种类

农畜产品是指来源于农业生产的初级产品，即通过农业生产活动获得的植物、动物、微生物及其产品，包括果蔬、粮油等种植业产品，畜禽、禽蛋等畜牧业产品，鱼类、贝类等渔业产品，以及鲜奶、茶叶等特种农产品。

农畜产品作为人们赖以生存的食物，其品质安全是食品安全的基础，是食品安全的重中之重。优质安全的农畜产品，越来越受到消费者广泛重视和追求，逐渐赢得市场青睐。我国居民消费的主要农畜产品有水果、蔬菜、生鲜肉、禽蛋等，其品质参数包括物理属性、化学属性和生物属性。物理属性主要有大小、形状、重量、色泽、硬度等；化学属性主要有营养成分、新鲜度、成熟度等；生物属性主要有致病性细菌、腐败变质等。

1.1.2 农畜产品品质安全问题

近年来，食品安全问题频频发生，很大程度上是由于初级农畜产品源头污染严重以及流通过程中监管控制力度不到位所造成的，所以迫切需要全面提升农产品品质安全保障措施。农畜产品品质安全是当前人们最为关注的重大民生问题，它直接关系到消费者的身体健康，关系到相关企业的生存和发展，关系到整个社会的稳定发展。一方面，随着中国经济与世界贸易的一体化，对农畜产品的进出口质量及其检验检测技术提出更高要求，迫切需要农畜产品品质安全检测新技术。另一方面，由于食品的功能性和安全性受到关注，初级农畜产品的品质安全也就逐渐得到了广泛的重视。

在农畜产品国际贸易中，我国农产品出口仍面临巨大挑战。由于主要农产品进口国通过设立高标准、技术壁垒及绿色壁垒等手段，导致我国农产品出口屡屡受挫。出口受阻的农畜产品从蔬菜、水果、茶叶到蜂蜜、水产品等。2014 年，我国农产品进出口总额为 1928.2 亿美元，比上年同期增长 4.2%，其中，出口 713.4 亿美元，增长 6.3%，进口 1214.8 亿美元，增长 3%。贸易逆差为 501.4 亿美元。为了使出口的农畜产品品质安全达到出口国的技术指标，对农畜产品品质安全检测就显得尤为必要。

农畜产品质量安全，指农畜产品的品质可靠性、食用安全性和内在营养性，

包括在生产、贮存、流通和使用过程中形成、残存的营养、危害及外在特征因子,既有等级、规格、品质等特性要求,也有对人、环境的危害等级水平的要求。食品从田野到餐桌,构成一个复杂的全产业链。生产环节是保证农产品品质安全的源头。在种植养殖的生产过程中,农畜产品会涉及以下几方面的污染:有毒有害杂质掺入等物理性污染;农药残留、兽药残留、重金属超标等化学性污染;致病性细菌、病毒以及毒素等生物性污染。在储藏、运输、加工及销售等流通环节中,由于设施缺乏或落后、操作不规范等原因,也可能造成二次污染,影响农产品的新鲜度或品质安全。

农畜产品品质控制和安全检测是保障农畜产品品质安全的关键环节。为了进一步优化农牧业种植养殖的品种质量,提高品质安全水平,保证农畜产品供给的安全性、可靠性、食用性,实现对农畜产品品质安全进行无损快速检测具有重要现实意义。

传统检测农畜产品品质安全方法,如质谱分析法、高效液相色谱法、理化检验和微生物检验等,存在检测效率低、所需时间长、产品破坏大等问题。所以,现代的农畜产品品质安全检测技术正朝着快速、准确、无损的方向发展。因此,如何实现农畜产品品质的快速检测和安全评价是当前的研究热点之一。

1.1.3 农畜产品品质安全检测指标

果蔬品质安全检测主要包括外部品质判定、内部品质检测以及食用安全评定。果蔬外部品质判断是对果蔬进行外部形态特征识别、表面缺陷及污染物检测、冻伤检验。果蔬的大小、色泽、重量等感官特征是决定消费者购买的重要因素。果蔬表面缺陷和污染严重影响果蔬品质和附加值,是生产者和消费者极为重视的指标,尤其是轻微损伤、病虫害、粪便污染等难以识别的情况,如何对其进行快速、无损检测已经成为国内外学者的研究热点。另外,运输、贮藏过程受天气、温度、湿度等因素影响,水果蔬菜易造成冻伤,冻伤后的果蔬由于植物组织被破坏,不仅丧失营养价值,改变原有的口感风味,还会产生有毒物质。果蔬内部品质检测是果蔬流通中的重要环节,对于果蔬在采后加工、运输、贮藏和销售过程起着重要作用,能够有效保障果蔬内在价值。果蔬内部品质控制需要进行组成成分分析、食用指标测定、品质分级评定等。果蔬的营养品质主要取决于果蔬的化学组成(水分、糖、淀粉、色素等),与果蔬贮藏特性和采后保鲜密切相关。果蔬的风味、质地和口感,决定消费者的喜好程度,与糖度、酸度、可溶性固形物等食用性指标密切相关。成熟度是果蔬分级与保鲜的重要评价指标之一。此外,在果蔬生产、贮藏过程中,必须加强果蔬食用安全的监测和控制。果蔬表面杀菌剂、杀虫剂、植物生长调节剂等药物残留会危害人体健康,因而对果蔬表面农药残留进行定量和定性检测十分有意义。果蔬贮运中的微生物病害是引起果蔬

商品腐烂和品质下降的主要原因之一,因而需要实时对果蔬中由致病性细菌等微生物感染及产生的毒素而导致腐败等缺陷进行检测。

生鲜肉品质安全检测主要包括营养品质、食用品质、加工品质及安全品质的评定。研究发现影响肉类品质的因素有多种,如遗传、环境、屠宰方式等,其中营养在品质的调控上起重要作用。肉的营养成分主要包括水分、蛋白质、脂肪、维生素、矿物质和碳水化合物。生鲜肉中的各种营养成分对肉的品质有重大的影响,例如,肌内水分含量、分布及其持水性关系到肉的品质和风味,脂肪的多少及脂肪酸的组成直接影响肉的嫩度和多汁性。食用品质是肉品最重要的品质指标之一,直接影响生鲜肉的商品价值,一般从嫩度、大理石花纹、色泽和新鲜度等几个方面进行评价。当生鲜肉具有很高的食用价值时,其肉色鲜红、质地鲜嫩、大理石纹状俱佳、脂肪白色而有光泽、味道鲜美。嫩度是指肉在食用时口感的老、嫩,反映了肉的质地,是消费者评判肉质优劣最常用的指标。嫩度的不同决定着肉的等级档次,直接影响着肉的食用价值和商品价值。大理石花纹是生鲜肌肉范围内可见的肌肉脂肪的分布状况,是确定肉类质量等级的主要指标。肉的颜色主要决定于其中的肌红蛋白含量和化学状态。生鲜肉在销售、贮藏过程中颜色的变化与肌肉新鲜度存在一定的关系。色泽给人以第一印象,决定消费者的购买欲望。新鲜度是衡量生鲜肉是否符合食用要求的客观标准,可以综合地反映产品营养性、安全性和嗜好性的可靠程度。肉的保水性(即系水力、系水性、持水性)是指肌肉组织保持水分的能力,是一项重要的生鲜肉加工品质指标。它不仅影响肉的颜色、香气、嫩度、多汁性、营养成分等食用品质,而且具有重要的经济意义。如果生鲜肉保水性能差,从家畜屠宰后到肉品加工前这一过程中,肉因失水而重量减少,从而造成一定的经济损失。肉类本身富含营养物质和水分,极易腐败变质,且在屠宰加工及销售的过程中,可能缺乏良好的卫生条件和冷藏设施,在出售时随着放置时间的延长导致生鲜肉的卫生安全情况变得错综复杂。肉中含有有机营养物质,为腐败微生物的生长繁殖提供了良好的营养物质,在适宜的环境条件下,微生物大量繁殖,使肉类发生一系列复杂变化,最终导致生鲜肉腐败变质。因而生鲜肉的安全评定包括表面微生物污染、腐败酸败变质、毒素药物残留等指标评价。

水产动物的肌肉及其他可食部分富含蛋白质,并含有脂肪、多种维生素、无机质和少量的碳水化合物。不同品种的水产品在自然环境条件下都有其特定的体色。在人工养殖条件下,往往由于养殖环境剧烈变化(温度、噪声、光照、pH、盐度、重金属污染等)或使用缺乏天然有效色素源的饲料等因素,导致养殖水产品体色和肌肉颜色异常,使其失去所特有的天然颜色和光泽。因此,水产品体色和肌肉颜色能够反映水产品的品质 and 安全性。一般认为,水产品的风味主要是由它们的嗅感香气和鲜味共同组成。嗅感香气是由挥发性含香化合物构成,而鲜味

是由非挥发性的滋味活性物质构成。水产品也常因鲜度、加工方法的不同而呈现出不同的嗅感。水产品非常容易腐败,在腐败过程中,新鲜水产品的香味可能会被微生物或自溶作用破坏,或可能存在新生成的化合物,掩蔽了水产品原有的香气,使得呈现出异常的气味。此外,加工及水环境因素对水产品气味同样有很大的影响。在水产品中出现的很多气味是由环境因素造成的,如发霉味、泥土味、土腥味和霉烂味等,在野生的鱼种群中普遍存在的。水产品的鲜度检验主要是对水产原料进行检验,水产原料的好坏是保证产品品质的一个重要条件。

禽蛋是人们日常饮食中的重要食品。在贮藏、运输过程中,禽蛋会发生物理、化学及生物变化,因此对禽蛋的品质参数进行快速检测和评价尤为重要。禽蛋品质参数是对鲜蛋进行品质鉴定和评定等级的主要依据。禽蛋的品质安全指标检测,主要是针对鲜蛋的外部品质、内部品质进行鉴定和评定分级以及对新鲜度等安全指标进行检测评价。外部品质参数直接决定消费者是否购买,给人以直观的评判,包括蛋壳裂纹、大小、蛋重、颜色、蛋形指数等指标。蛋壳状况是影响禽蛋商品价值的一个重要参考指标,从蛋壳的清洁程度、完整状况和色泽三方面来鉴定。质量正常的鲜蛋,蛋壳表面应清洁,无禽粪、未粘有杂草及其他污物;蛋壳完好无损、无裂纹、无流清等;蛋壳的色泽应当是各种禽蛋所固有的色泽,表面无油光发亮等现象。蛋形指数在包装分级中起着重要的决定作用。标准禽蛋的形状应为椭圆形,蛋形指数在 $1.3 \sim 1.35$,且在贮运过程中不易破伤。内部品质参数不仅影响到禽蛋的质量,而且直接决定是否可食用,与其新鲜度密切相关。蛋白和蛋黄状况是评定蛋的品质优劣的重要指标。通过测定蛋黄指数(蛋黄高度与蛋黄直径之比)也可以判定蛋的新鲜程度。存放时间过久的禽蛋,其蛋黄是扁平的,当蛋黄指数小于 0.25 时,蛋黄膜极易破裂,出现散黄。蛋内容物的气味和滋味同样可以评判禽蛋品质的好坏。此外,系带状况、胚胎状况、气室状况也是评定禽蛋内部品质的重要因素。随着贮藏时间的延长,蛋内水分不断向外蒸发,蛋重不断变轻,蛋重是禽蛋新鲜程度的一个重要评定指标。新鲜的蛋只有轻微的腥味,而严重腐败的蛋散发出氨、硫化氢的臭气味。

畜禽活体检测是建立现代化养殖设备和设施系统以及发展现代化养殖技术中十分重要的一部分。家畜和家禽的活体检测主要是利用机器视觉技术、超声波技术、X射线技术、红外热成像技术等对畜禽在生长阶段的特定时期进行体质检测。主要检测指标有动物体尺特征参数、眼肌面积、背膘厚、性别等。在现代化养殖中,生长监测是保障种猪、种牛等出栏品质的重要手段之一。众多研究表明,活体猪牛羊等出栏体重与其体型特征参数,如体长、胸围、臀围、体高等参数有一定的相关性,传统的生猪体征参数测量均采用人工体尺测量的方法,该方法耗时费力,不适宜在现代化规模生猪养殖中继续采用。另外,人工测量容易给猪造成应激反应,从而对猪的出栏品质造成严重的不良影响。例如,在屠宰前猪

若受到惊吓产生应激反应,会使其体内分泌很多激素,从而造成猪肉品质下降,如肉色较苍白、容易出水,一些营养成分也会随之流失。随着计算机机器视觉技术的发展,通过摄像头拍摄获取猪活体图像,应用图像处理和分析技术对猪的体型特征参数进行估算,能有效减少对牲畜的刺激和物理伤害。针对实际生产中畜禽活体的脂肪厚、腰肌厚、腰肌面积及肌间脂肪等指标的检测要求,可以根据检测结果来调整畜禽的饲喂条件,以提高其出栏品质和产量。

1.2 农畜产品品质无损检测技术的概述

1.2.1 无损检测技术定义

农畜产品品质无损检测技术是近十几年快速发展的一项新型检测技术。它是利用农畜产品的声、光、电、磁等特性,在不改变被检样品结构和成分的情况下,应用有效的检测技术和分析方法对其内在品质和外在品质进行非破坏测定,并按一定的标准对其作出评价的过程^[1]。利用无损检测技术,能使样品检测后仍然可以销售和食用,不损害生产者的经济效益,具有极大的商业化实用潜力。与此同时,无损检测技术可替代人工用于过冷或过热、有毒的环境,成为农业、食品领域最新的研究热点。无损检测的主要特点为:避免破坏样品、检测速度快、实时高通量、预测精度高、无需化学试剂、测试重现性好、易于实现自动化及适用于大规模在线检测。

1.2.2 无损检测技术简介

随着新材料、计算机等高新技术的急速发展以及在农畜产品检测领域的广泛应用,无损检测技术已向数字化、智能化、便携化的方向快速发展。根据无损检测原理的不同,常用的农畜产品无损检测技术主要包括基于图像分析的机器视觉检测技术,基于光学特性的光谱检测技术,基于声学特性的超声波检测技术,基于电磁学特性的核磁共振波谱法检测技术,基于气味原理的电子舌和电子鼻,基于生物活性的生物传感器检测技术等。

1. 基于光学特性的无损检测技术

光学特性检测的原理是利用农畜产品对光的吸收、散射、反射、透射等特性来确定产品品质的一种方法^[2],包括近红外光谱检测技术、高光谱成像检测技术、激光拉曼光谱技术和X射线荧光光谱技术等。近红外光谱吸收主要是有机物的含氢基团(如—OH、—CH、—NH、—SH等)的倍频和合频吸收,由于农畜产品中的大多数有机化合物,如蛋白质、脂肪、有机酸、碳水化合物以及农药残留和兽药残留等都含有不同的含氢基团,所以对其进行近红外光谱分析就可

测定这些成分的含量,并通过进一步分析得到更多与品质相关的信息。高光谱成像技术是一种图像及光谱的融合技术,可以同时获取研究对象的空间及光谱信息。与近红外光谱类似,拉曼光谱技术基于拉曼散射原理,利用物质的拉曼光谱特异性,以散射光的强度随拉曼位移的变化表示,通过峰的位置和强度,反映官能团或化学键的特征振动频率,提供散射分子的结构信息。X射线荧光光谱法的基本原理是当物质中的原子受到适当的高能辐射激发后,放射出该原子所具有的特征X射线,激发被测样品。

2. 基于图像分析的无损检测技术

图像处理技术把外部特征等具体信息高速地输送给计算机进行图像信息的实时处理、识别,从而实现外观品质的综合评价^[3,4]。以机器视觉为代表的图像分析技术是基于图像的数字识别技术发展起来的。它是利用一个代替人眼的图像传感器获取物体图像,然后将图像转换成数字图像,通过计算机模拟人的判别准则去理解和识别图像,用图像分析做出相应结论的实用技术^[5,6]。它可代替人工视觉进行长时间作业,实现自动化操作,避免人工作业造成的人为误差,在农产品表面缺陷损伤检测、外观尺寸识别、品质分级分选应用较多。早在1985年,Rehkugler等^[7]根据苹果图像的灰度值对苹果的缺陷进行检测,虽然当时的检测精度未能满足现实工作的需求,但是是一个良好的开端。随后,Sarkar等^[8]利用数字图像分析和模式识别技术,研发了一套具有定向机构和照明装置的机器视觉分级装置,对西红柿品质进行准确判断。在肉类品质评价方面,目前图像分析方法主要用于根据牛肉的大理石花纹和颜色特征进行胴体的自动分级、猪眼肌肌肉脂肪含量的测定,均具有较好的应用效果。但是机器视觉对目标检测物获取的快速性和准确性还有待提高,并且对于农畜产品内部品质和安全参数无法进行准确检测。

3. 基于声学特性的无损检测技术

声学特性检测的原理是利用农畜产品在声波作用下的反射、散射、透射、吸收特性、衰减系数、传播速度以及声阻抗和固有频率等参数变化,来反应样品与声波之间相互作用的基本规律,用以获取被测物内部的物理化学性状^[9]。浙江大学的饶秀勤等^[10]开发了西瓜声学特性测试系统,选取752Hz、869Hz、1001Hz、4556Hz、322Hz、3950Hz 6个特征频率,通过其对应的声透过率值建立多元线性回归模型,实现了西瓜糖度的无损检测。超声波检测技术一般采用0.5~20MHz的高频率低能量超声波。超声波检测技术在食品理化特性检测中,尤其是对于高浓度液体和不透明材料的检测中具有一定的优势。在乳制品品质检测方面,超声波技术发挥了极大的作用。Bakkali等^[11]采用超声波冲回波技术对牛