

河南省重大科技专项项目资助（项目编号：161100110600）

河南科技攻关计划项目资助（项目编号：182102310060）

河南省青年人才托举工程项目资助（项目编号：豫科协发[2017]132-08）

河南省高等学校重点科研项目资助（项目编号：17A550001）

中国博士后科学基金面上资助（项目编号：2018M632767）

长波近红外高光谱成像 结合PLS算法快速监测 冷鲜鸡肉中腐败微生物研究

何鸿举 马汉军 著



中国农业出版社

河南省重大科技专项项目资助 (项目编号: 161100110600)
河南科技攻关计划项目资助 (项目编号: 182102310060)
河南省青年人才托举工程项目资助 (项目编号: 豫科协发[2017]132-08)
河南省高等学校重点科研项目资助 (项目编号: 17A550001)
中国博士后科学基金面上资助 (项目编号: 2018M632767)

长波近红外高光谱成像 结合PLS算法快速监测 冷鲜鸡肉中腐败微生物研究

何鸿举 马汉军 著

中国农业出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

长波近红外高光谱成像结合 PLS 算法快速监测冷鲜鸡肉中腐败微生物研究/何鸿举, 马汉军著. —北京: 中国农业出版社, 2019. 2

ISBN 978-7-109-25039-0

I. ①长… II. ①何… ②马… III. ①低频—红外成像系统—监测—冷冻保鲜—鸡肉—鲜度—研究 IV. ①TS251.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 271433 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区麦子店街 18 号楼)

(邮政编码 100125)

责任编辑 刁乾超 王芳芳

化学工业出版社印刷厂 新华书店北京发行所发行
2019 年 2 月第 1 版 2019 年 2 月北京第 1 次印刷

开本: 700mm×1000mm 1/16 印张: 7.25

字数: 170 千字

定价: 48.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

作者简介

何鸿举，男，爱尔兰都柏林大学博士，河南科技学院特聘教授、硕士生导师，河南科技学院食品无损检测与分析团队带头人，主要从事食品质量分析与快速检测研究。近五年主持参与科研项目 13 项，发表论文 30 余篇，第一作者发表高水平 SCI 论文 10 篇，主编教材 4 部，出版专著 2 部，授权专利 4 项，担任食品科学与技术领域 40 余部 SCI 期刊审稿专家。

马汉军，男，南京农业大学博士，河南科技学院食品学院院长、教授、硕士生导师，河南省高校中青年骨干教师、学术技术带头人、省创新型科技团队带头人、校教学名师、河南省农产品加工与贮藏工程学会副理事长、中国畜产品加工研究会常务理事。主要从事肉类加工及贮藏方面的研究，发表 SCI、EI 论文 15 篇。曾获河南省科技进步二等奖。

内 容 简 介

我国是世界上第二大鸡肉生产国和消费国，鸡肉已成为仅次于猪肉的第二大肉类消费品。鸡肉因低脂肪、低胆固醇、高蛋白质、易被消化等优点而备受广大消费者青睐。目前我国鸡肉的消费形式主要有热鲜肉、冷冻肉和冷鲜肉。冷鲜鸡肉由于肌肉质地更柔软、弹性好、口感鲜美、营养价值高而大受消费者欢迎。然而，冷鲜鸡肉在冷藏过程中，一些嗜冷菌如热死环丝菌等在 $0\sim 4^{\circ}\text{C}$ 的温度环境中，依然可以生长、繁殖、代谢，从而引发肉品腐败变质。这些微生物的污染也是导致冷鲜鸡肉腐败变质、新鲜度降低的最主要原因。及时准确检测这些腐败微生物，有针对性地对其加以控制，可提高肉品新鲜度，对延长货架期具有直接意义。微生物检测常用的方法有平板计数法、分子生物学法、免疫学法等，尽管这些方法结果可靠，但都存在操作烦琐、需要破坏原材料、检测时间长、效率低下、难实现批量检测等缺点。随着冷鲜肉消费量的不断增加以及消费者对新鲜肉品的强烈需求，迫切需要研发新技术以实现冷鲜鸡肉腐败微生物的快速无损检测。

融合光谱和图像技术的高光谱成像技术，被用于食品品质的快速检测研究，相比传统的检测技术，高光谱成像技术可同时提供被测样品的光谱信息和图像信息，并可实现快速信息采集与数据分析、无需预处理、检测过程无损、无污染、同时测定多个指标，是一种潜力巨大的绿色检测分析技

术。本书所述研究以冷鲜鸡肉为研究对象,利用 PLS 算法挖掘腐败菌污染冷鲜鸡肉不同时期的高光谱图像数据,揭示腐败菌污染与高光谱数据之间的相关联系,以此构建数学模型,定量表征腐败菌污染冷鲜鸡肉变化,实时动态检测冷鲜鸡肉新鲜度。研究结果对开发快速检测肉品腐败微生物设备具有理论参考价值。

作为快速检测腐败菌领域的学术论著,本书适合于从事食品快速检测技术的科研人员、企业研发人员及政府监管人员阅读,也可作为食品科学专业的高校教师、本专科学生及研究生的参考书。

前言

鸡肉是我国第二大肉类消费品，其因低脂肪、低胆固醇、高蛋白质、易被消化等优点而备受广大消费者青睐。冷鲜鸡肉由于肌肉质地更柔软、弹性好、口感鲜美、营养价值高而大受消费者欢迎，逐渐成为消费趋势。然而，冷鲜鸡肉在冷藏过程中，容易受到一些嗜冷菌如热死环丝菌、假单胞菌、肠杆菌、乳酸菌、莫拉氏菌和不动杆菌等的污染而引发肉品腐败变质。这些微生物的污染也是导致冷鲜鸡肉腐败变质、新鲜度降低的最主要原因。传统的微生物检测方法有平板计数法、分子生物学法、免疫学法等，尽管这些方法结果可靠，但都存在操作烦琐、需要破坏原材料、检测时间长、效率低下、难实现批量检测等缺点。高光谱成像技术融合了光谱和图像技术，可同时提供被测样品的光谱信息（反映物理结构、化学成分等）和图像信息（反映形态学特征），具有快速信息采集与数据分析、无需预处理、检测过程无损、无污染、多指标同时测定等优势。因此，研究如何利用高光谱成像技术准确快速检测冷鲜鸡肉腐败微生物，对鸡肉品质控制及延长货架期具有直接现实意义。

高光谱成像技术用于检测是基于对高光谱图像所包含大量数据的有效挖掘。本书所述研究以冷鲜鸡肉为研究对象，通过 PLS 算法挖掘冷鲜鸡肉不同时期（连续贮藏七天）的高光谱图像数据，揭示细菌总数（TVC）和四种腐败菌（假单胞菌、肠杆菌、乳酸菌和热杀索丝菌）与光谱数据之间的相

关联系，并构建高精度数学模型，实现了定量表征冷鲜鸡肉贮藏期间的腐败菌动态变化。

本研究结果揭示了冷鲜鸡肉贮藏期间不同腐败菌与光谱数据之间的相关性，为快速检测冷鲜鸡肉中腐败菌提供了有效的理论指导，亦可为开发快速检测肉品腐败微生物设备提供理论参考。

本书的所有试验均在河南科技学院食品无损快速检测与分析团队努力下完成。在试验过程中得到了河南科技学院食品学院的硕士研究生王慧、朱亚东、王魏、蒋圣启等的大力帮助，在此表示衷心感谢。同时，衷心感谢河南科技学院食品学院马汉军、潘润淑、刘玺、宋照军、康壮丽、朱明明、赵圣明、王正荣、焦凌霞、冉军舰、梁新红、南海娟等老师在试验过程中给予的指导与建议。

由于时间仓促，资料有限，以及试验在操作过程中可能存在误差，书中难免存在不妥之处，敬请读者谅解，并提出宝贵意见。

作 者

河南科技学院

2019 年

目 录

前言

第 1 章 高光谱成像技术在肉品方面的应用研究及进展	1
1.1 高光谱成像技术简介	1
1.1.1 高光谱成像系统	2
1.1.2 高光谱图像数据分析	4
1.2 高光谱成像技术在肉品方面的研究进展	7
1.3 本研究的目的及内容	8
1.3.1 研究目的及意义	8
1.3.2 研究的主要内容	9
1.3.3 研究的技术路线	10
第 2 章 基于长波近红外高光谱成像技术 快速检测鸡肉中 TVC 含量	11
2.1 材料与方法	11
2.1.1 鸡肉样品	11
2.1.2 主要试剂	11
2.1.3 仪器与设备	12
2.1.4 试验方法与步骤	12
2.2 结果与分析	16
2.2.1 TVC 测定结果	16
2.2.2 冷鲜鸡肉样品的光谱特征	17
2.2.3 基于全波段长波近红外光谱预测 TVC	20
2.2.4 最优变量选择结果	21

2.2.5 F-PLS 回归模型优化	23
2.2.6 TVC 分布的可视化	25
2.3 结论	26
第 3 章 基于长波近红外高光谱成像技术快速 检测鸡肉中假单胞菌	27
3.1 材料与方法	27
3.1.1 鸡肉样品	27
3.1.2 主要试剂	28
3.1.3 仪器与设备	28
3.1.4 试验方法与步骤	29
3.2 结果与分析	31
3.2.1 假单胞菌测定结果	31
3.2.2 冷鲜鸡肉的光谱特征	33
3.2.3 基于全波段长波近红外光谱预测假单胞菌	35
3.2.4 最优变量选择结果	36
3.2.5 PLS 回归模型优化	38
3.3 结论	40
第 4 章 基于长波近红外高光谱成像技术快速 检测鸡肉中总肠杆菌	42
4.1 材料与方法	42
4.1.1 鸡肉样品	42
4.1.2 主要试剂	43
4.1.3 仪器与设备	43
4.1.4 试验方法与步骤	44
4.2 结果与分析	46
4.2.1 总肠杆菌测定结果	46
4.2.2 冷鲜鸡肉的光谱特征	48
4.2.3 基于全波段长波近红外光谱预测总肠杆菌	50
4.2.4 回归系数法筛选最优变量结果	51

4.2.5 PLS 回归模型优化	53
4.3 结论	55
第5章 基于长波近红外高光谱成像技术 快速检测鸡肉中乳酸菌	56
5.1 材料与方法	56
5.1.1 鸡肉样品	56
5.1.2 主要试剂	57
5.1.3 仪器与设备	57
5.1.4 试验方法与步骤	58
5.2 结果与分析	60
5.2.1 乳酸菌测定结果	60
5.2.2 冷鲜鸡肉的光谱特征	62
5.2.3 基于全波段长波近红外光谱预测乳酸菌	63
5.2.4 回归系数法筛选最优变量结果	64
5.2.5 PLS 回归模型优化	66
5.3 结论	67
第6章 基于长波近红外高光谱成像技术快速 检测鸡肉中热杀索丝菌	69
6.1 材料与方法	69
6.1.1 鸡肉样品	69
6.1.2 主要试剂	69
6.1.3 仪器与设备	70
6.1.4 试验方法与步骤	70
6.2 结果与分析	73
6.2.1 热杀索丝菌测定结果	73
6.2.2 冷鲜鸡肉的光谱特征	75
6.2.3 基于全波段长波近红外光谱预测热杀索丝菌	77
6.2.4 回归系数法筛选最优变量结果	77
6.2.5 PLS 回归模型优化	80

6.3 结论	82
第 7 章 基于长波近红外高光谱成像技术	
快速检测鸡肉中主要优势腐败菌	83
7.1 材料与方法	83
7.1.1 鸡肉样品	83
7.1.2 主要试剂	83
7.1.3 仪器与设备	84
7.1.4 试验方法与步骤	84
7.2 结果与分析	87
7.2.1 PEC 测定结果	87
7.2.2 冷鲜鸡肉的光谱特征	88
7.2.3 基于全波段长波近红外光谱预测 PEC	90
7.2.4 回归系数法筛选最优变量结果	91
7.2.5 PLS 回归模型优化	93
7.3 结论	95
参考文献	96
缩略词表	103

第1章

高光谱成像技术在肉品方面的应用研究及进展

1.1 高光谱成像技术简介

高光谱成像技术是基于非常多窄波段的影像数据技术，它将成像技术与光谱技术相结合，探测目标的二维几何空间及一维光谱信息，获取高光谱分辨率的连续、窄波段的图像数据^[1-2]。目前高光谱成像技术发展迅速，可以应用在食品安全^[3]、医学诊断^[4]、航天领域^[5]等领域。

近几年来，融合了光谱和图像技术的高光谱成像技术，被用于食品品质及安全的快速检测研究^[6-8]。相比传统的检测技术，高光谱成像技术可同时提供被测样品的光谱信息（反映物理结构、化学成分等）和图像信息（反映形态学特征），并具有快速信息采集与数据分析、无需预处理、检测过程无损、无污染、同时测定多个指标等优点，是一种潜力巨大的绿色检测分析技术^[9-10]。高光谱成像技术用于检测应用是基于对高光谱图像所包含大量数据的有效挖掘。高光谱图

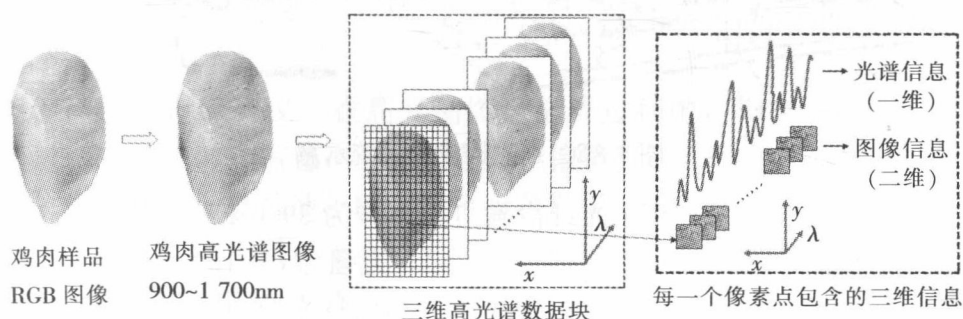


图 1-1 三维高光谱图像示意图

像由一系列三维数据块所构成,其中二维代表图像信息(以 x 和 y 表示),第三维代表波长信息(以 λ 表示),一个分辨率为 $x \times y$ 像素的图像阵列在 λ 波长处获得的样品图像块是 $x \times y \times \lambda$ 的三维阵列(图 1-1)。基于该三维阵列,高光谱成像技术可实现对样品的快速无损分析。

1.1.1 高光谱成像系统

目前,在食品检测研究方面最常用的高光谱成像系统分为短波近红外(400~1 000nm)高光谱成像系统和长波近红外(900~1 700nm)高光谱成像系统^[11-13]。高光谱成像系统示意图 1-2。本试验过程中所用到的是推扫式长波近红外高光谱成像系统(HSI-eNIR-XC130 型,台湾,中国),如图 1-3 所示。该系统主要由 6 大部分组成:光源、光谱仪、镜头、CCD 探测仪、移动平台、装有图像采集及数据处理软件的计算机。当光源打在物体表面时,通过反射或透射出来的光直接进入到达成像镜头内一直到达光谱仪,而光谱仪再根据接收到的不同波长光信息进行色散最后形成光谱,光谱进入到面阵 CCD 探测器内,CCD 把收到的光信号转化成电信号,图像采集卡把 CCD 得到的电信号再转化成数字信号,最后通过计算机显示出来。

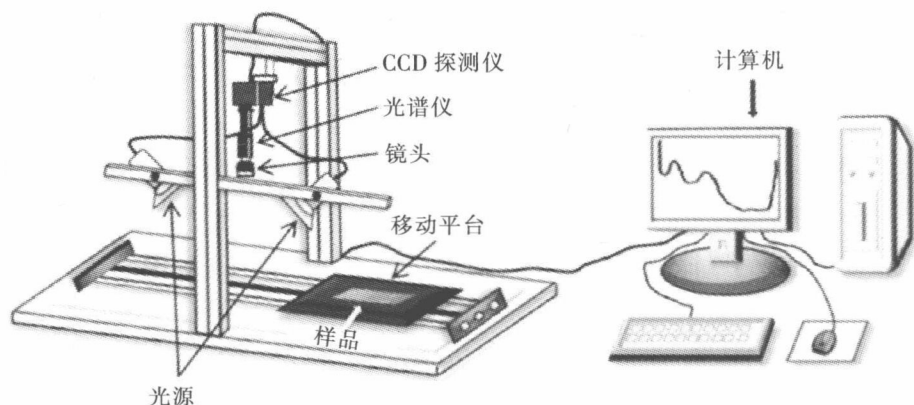


图 1-2 高光谱成像系统示意

(1) 光源 为 150W 光纤卤素灯,型号为 3900-ER (Illumination Technologies Inc., New York, USA),光强为 0~100%,可调。由两个分支光纤卤素灯组成对称线光源,然后将光源引出,可提供长波近红外波段的连续光谱。

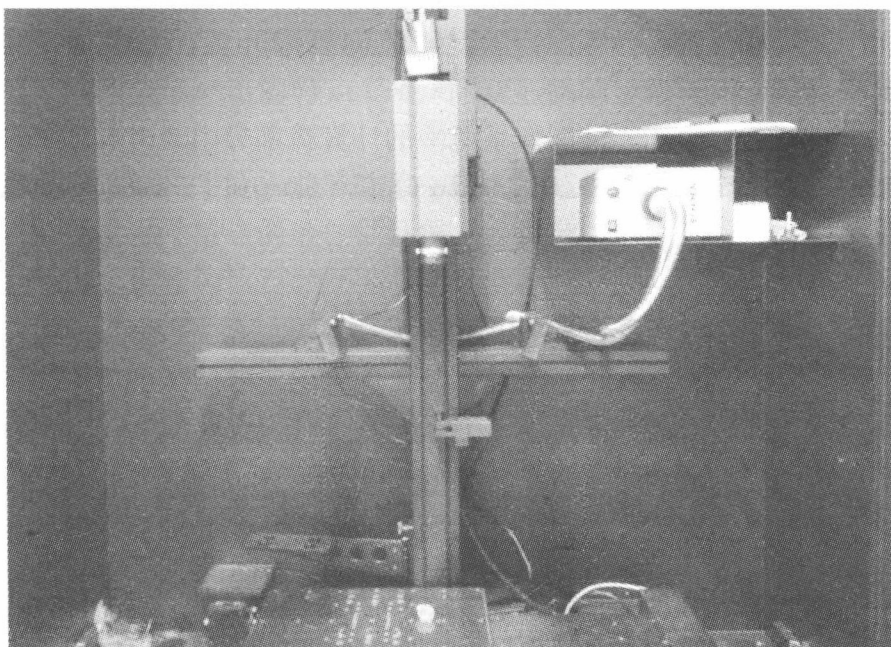


图 1-3 本试验使用的 900~1 700nm 高光谱成像系统

(2) **光谱仪** 光谱仪是高光谱成像系统的核心组成部分。光谱仪的工作原理是通过棱镜-光栅-棱镜将射到光栅上的光束按波长的不同进行色散,再经成像镜头聚焦而形成光谱。本试验中使用的光谱仪型号为 ImSpector V10E (Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland), 光谱波长范围是 879~1 722nm, 其中 879~900nm 和 1 700~1 722nm 两个波段属于噪声,本试验取 900~1 700nm 作为研究波段,共 486 个波长,两波长间隔约 1.65nm。

(3) **镜头** 镜头型号为 OLE30 (Schneider, German), 焦距为 30.7mm。

(4) **CCD 探测器** 在高光谱图像形成过程中,物体表面因光源照射后产生反射光信息,这些信息经成像镜头进入光谱仪,然后由光谱仪将反射光信息按波长的不同进行色散而形成光谱。这些反映被测样本相关信息的光谱可由面阵 CCD 探测器检出从而产生高光谱图像。本试验 CCD 探测器 (DL-604 M, Andor, Ireland) 产生图像分辨率为 $1\,600 \times 1\,200$ 。

(5) **移动平台** 移动平台用于荷载被测样品, 台面尺寸为 $25\text{cm} \times 25\text{cm}$, 行程为 30cm , 内建正负向极限开关, 由电脑控制运行, 根据试验需要调整移动速度。

(6) **计算机** 高光谱图像系统中的计算机部分内装有数据采集软件 (Spectral Image software, Isuzu Optics Corp, Taiwan, China)。

1.1.2 高光谱图像数据分析

利用高光谱成像系统获取高光谱图像数据后, 需要进行相关处理, 主要流程分为三部分: 光谱数据处理、图像数据处理、模型构建及评价。详细如图 1-4 所示。

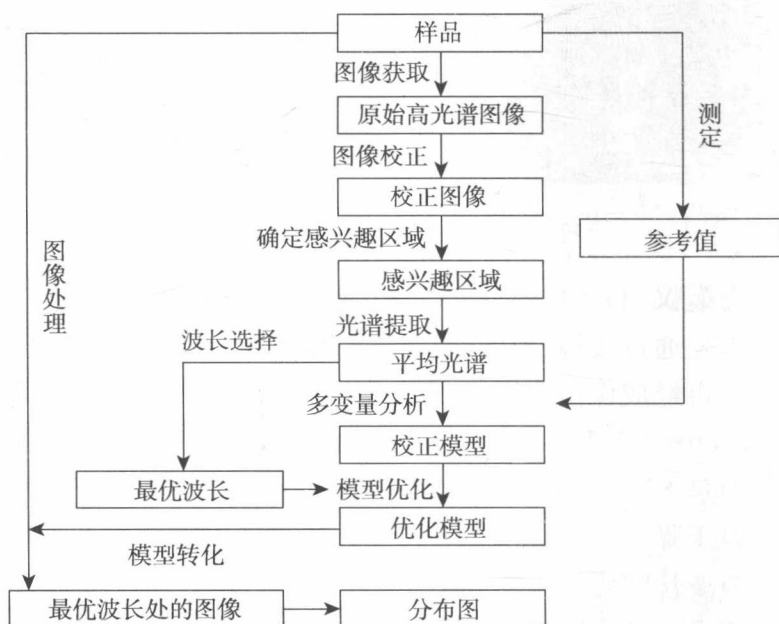


图 1-4 高光谱图像数据处理流程图

(1) **光谱数据预处理** 高光谱成像系统获取的光谱数据信息中既含有样本本身的信息, 同时还包含一些无关样本的噪声信息等。这些无关信息的存在会对模型构建产生很大的影响。因此, 需要对原始光谱数据进行预处理, 以减少系统噪声等影响, 获得高信噪比、低背景干扰的光谱数据, 最终提高模型的预测精度和稳健性。本试验中使用的光谱预处理方法主要包括:

Savitzky-Golay 卷积平滑 (S-G)^[14]: S-G 是一种在时域内运用局部多项式, 结合最小二乘法得到最优拟合的滤波算法, 与平均平滑法类似, 该算法最突出的特点是在对数据去噪时能保证原始数据的宽度、形状等特征不发生变化。平滑算法是消除噪声的常用方法之一, 其基本原理是在平滑点前后选取一定大小范围的数据点进行平均或拟合, 从而求得平滑点的最佳估计值, 并以此消除随机噪声, 提高信噪比。目前应用较为广泛的平滑方法有移动窗口平均法和 S-G 卷积平滑法。S-G 卷积平滑算法是移动平滑算法的改进, 在对原始光谱进行卷积平滑时采用最小二乘拟合系数建立滤波函数, 然后对平滑点周边一定范围的光谱数据进行多项式最小二乘拟合, 从而减少噪声。

多元散射校正 (Multiplicative Scatter Correction, MSC)^[15]: MSC 算法是现阶段多波长定标建模常用的一种数据处理方法, 旨在消除由于样本表面不均匀性 (粒度分布) 所引起的光散射影响, 增强光谱与成分含量相关的光谱吸收信息。MSC 的使用首先需建立待测样品的“理想光谱”, 即光谱的变化与样品中成分的含量满足直接的线性关系, 以该“理想光谱”为标准修正所有其他样品的近红外光谱, 其中包括基线平移和偏移校正。实际应用中, 很难获得“理想光谱”, 便以所有光谱的平均光谱作为理想的标准光谱作为代替。

标准正态变量校正 (Standard Normal Variable Correction, SNV)^[16]: SNV 主要用于消除固体颗粒大小、表面散射以及光程变化对近红外漫反射的影响。该算法的基本原理是假设每一条光谱中各波长点的反射吸光度值满足一定的分布 (如正态分布), 然后在此基础上, 将原始光谱反射吸光度值减去该光谱的平均反射吸光度值后, 再除以该光谱反射吸光度数据的标准偏差。相比于 MSC, SNV 是对每条光谱进行单独校正, 因而常被认为其去噪能力比 MSC 更强, 特别是在校正组分变化较大的样本数据时。

基线校正法 (Baseline Correction, BC)^[17]: 由于仪器背景、样品粒度和其他因素的影响, 近红外分析中常出现基线漂移和倾斜现象。采用 BC 可以明显抑制基线漂移现象, 改善信号质量。操作时可选用峰谷点扯平、偏移扣减、微分处理和基线倾斜等方法, 其中最常用的是一阶微分和二阶微分, 但在微分处理时, 要注意微分级数和微