

## 近红外光谱及成像检测影响因素与校正方法研究进展

周禹, 张睿加, 袁伟东, 蒋雪松, 周宏平, 孙梦梦, 张聪, 姜洪喆\*

南京林业大学机械电子工程学院, 江苏 南京 210037

**摘要** 近红外光谱及成像检测凭借其高效、无损、非接触等优点近年来被广泛应用于农林产品、食品检测等方面。该技术可快速获取样品光谱和图像信息,进而结合化学计量学、机器学习建模等对样品进行品质安全、掺杂掺假、理化指标和产地溯源等方面检测,深受各行各业的认可。但光学仪器使用环境以及被测样品性质具有局限性,光学检测结果易受到各种因素干扰,从而影响检测精度,应当予以消除或削弱。简述了近红外光谱和高光谱成像的检测基本原理,并对国内外近红外光谱及成像技术在检测时受到的影响因素进行总结与归纳,结合国内外研究学者在相关方面的研究内容,重点在温度、光照、水分、曲率变化和湿度等 5 个方面及相关校正方法的应用进行阐述,对当前存在的部分问题提出总结与建议,以期对相关方向的研究人员提供参考及借鉴。

**关键词** 近红外光谱; 高光谱成像; 无损检测; 化学计量学; 影响因素; 校正方法

中图分类号 O657.33

文献标志码 A

DOI: 10.3788/L0P231066

## Research Progress on Influencing Factors and Correction Methods of Near Infrared Spectroscopy and Imaging

Zhou Yu, Zhang Ruijia, Yuan Weidong, Jiang Xuesong, Zhou Hongping, Sun Mengmeng, Zhang Cong, Jiang Hongzhe\*

College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China

**Abstract** Near infrared spectroscopy and hyperspectral imaging techniques have been widely used in agricultural and forestry products as well as food detection in recent years due to their advantages of high efficiency, nondestructive, and noncontact. These two techniques are applied to obtain spectral and imaging information of samples, and then chemometrics and machine learning modeling methods are combined to detect their quality and safety traits, adulteration issues, physical and chemical indicators, and origin traceability. Currently, they are both well recognized by people worldwide. However, the operating environment of optical instruments and the properties of the tested samples have their own limitations. The optical detection results are susceptible to various factors, which significantly affect the detection accuracy and should be eliminated or weakened. In this manuscript, the basic principles of near infrared spectroscopy and hyperspectral imaging are briefly described, and the influencing factors of these techniques at home and abroad are summarized. Considering the works of domestic and foreign researchers in related areas, the application of related correction methods regarding five aspects including temperature, illumination, moisture, curvature change and humidity is elaborated. Suggestions are finally presented for several existing problems to provide reference for researchers in this field.

**Key words** near infrared spectroscopy; hyperspectral imaging; nondestructive detection; chemometrics; influencing factor; correction method

## 1 引言

近红外(NIR)光谱及成像技术以反射与透射等方式对样品理化信息进行检测,在食品安全、样品分类和

石化成分分析等无损检测方面应用广泛。传统检测技术通过人工经验判断样品品质或采用气相色谱-质谱法、液相色谱法等化学方法进行检测,这类检测技术耗时、效率低,且对样品也有一定破坏<sup>[1-3]</sup>。与传统检测

收稿日期: 2023-04-11; 修回日期: 2023-05-22; 录用日期: 2023-06-01; 网络首发日期: 2023-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(32102071)、国家十四五重点研发计划(2022YFD2202100)、江苏省高等学校自然科学研究项目(21KJB220013)、江苏省高等学校大学生创新创业训练计划(202210298094Y)

通信作者: \*jianghongzhe@njfu.edu.cn

技术相比,近红外光谱及成像技术具有高效、便捷和无损的显著优势,在市场应用更加广泛。但各种环境因素的变化以及样品性质的不同会影响光谱及图像,干扰检测结果。因此,亟须了解近红外光谱及成像的多类影响因素,并结合系列方法建立校正模型,进行因素校正,提高模型抗干扰能力。一般来说影响光谱检测结果的因素分为3类:仪器方面、样品方面和实验员操作方面<sup>[4]</sup>。仪器和实验员方面因素因千差万别较难把控,本文将仅从温度、光照、水分、曲率变化和湿度等5个环境因素出发,重点讨论致使样品发生变化从而影响检测结果的原因,针对出现的相关问题提出建议,为后续研究提供参考与借鉴,并对近红外光谱及成像技术在未来的应用进行展望。

## 2 近红外光谱及成像技术

### 2.1 近红外光谱

近红外光谱是基于化学计量学产生的定量和定性分析技术,波长范围为780~2526 nm。短波近红外光(Short wave near infrared, SWNIR)波长范围为780~1100 nm,中波近红外光(Medium wave near infrared, MWNIR)波长范围为1100~1700 nm,长波近红外光(Long wave near infrared, LWNIR)波长范围为1700~2526 nm<sup>[5]</sup>。近红外光谱区是人们发现的第一个不可见光区,其主要由分子通过非谐性振动从基态跃迁至高能级产生,具有含氢基团(C—H、O—H、N—H和S—H等)振动吸收时频率呈倍频与合频的关系<sup>[6]</sup>。通过目标在近红外光谱区形成的特征峰与特征性质成分建立对应的关系,分析近红外光谱可得被测物的理化信息。Pan等<sup>[7]</sup>通过近红外光谱装置检测飞行员体内血红蛋白含量,识别其疲劳状态,可有效预防事故发生。Razieh等<sup>[8]</sup>通过改进的元启发式算法结合近红外光谱检测苹果的酸度,其具有较高的精度。

### 2.2 高光谱成像

高光谱成像(Hyperspectral imaging, HSI)技术是将样品的图像信息与光谱信息相结合的一种多窄波段无损检测技术,从而获得目标的外部信息以及内部理化品质信息。高光谱图像是由二维空间坐标( $x$ 和 $y$ 表示)和光谱信息波长 $\lambda$ 组成的三维立体数据<sup>[9]</sup>,其拥有高效、数据处理准确度高和图谱结合等优点<sup>[10]</sup>,应用范围较广。Zhang等<sup>[11]</sup>利用HSI技术成功检测出马铃薯面条的蛋白质含量。Gao等<sup>[12]</sup>应用HSI技术对壁画颜料的成分实现准确检测,这对壁画的保护与修复具有重要意义。Kiah等<sup>[13]</sup>通过HSI技术可以很好地对不同类型的生牛肉饼进行快速判别。

近红外光谱及成像技术近些年在样品掺杂掺假和预测分类等方面效果显著,但使用时受环境因素限制,实际应用困难较多,如温度和光照等自然因素易干扰实验结果。因此在现有基础上,采用3种校正思路:1)采用多种预处理方式来降低自然因素的影响;2)选

择抗干扰能力强的特征波段;3)建立全局校正模型。由于波长精度是光谱仪器的重要质量指标之一,对光谱仪定期的光谱定标及辐射定标尤为重要,可尽量避免实验结果的误差偏大。光谱定标指确定成像光谱仪各个通道的中心波长位置及带宽,可使用分辨率高的单色仪分光产生不同通道且连续可调的窄带光谱进行光谱标定<sup>[14]</sup>。辐射定标指建立成像光谱仪输出的数字量化值(Digital number, DN)与光谱辐射亮度值的定量关系,如在平行光管物镜的焦平面处放置点源黑体,使其发出平行的定标光束布满仪器的入瞳和视场,最后完成定标<sup>[15]</sup>。进一步提高近红外光谱及成像技术在使用时模型的稳健性,以此对各种因素及校正方法进行探讨与总结。

## 3 近红外光谱及成像的影响因素与校正方面研究

### 3.1 基于温度的影响

近红外光谱的谱峰存在大量重叠、倍频与合频向高能级跃迁时概率低等缺点,导致其吸收强度弱、信噪比低,同时氢键与温度会干扰分子振动时倍频与合频的吸收<sup>[16]</sup>。当温度改变时,分子之间的相互作用力会随温度变化而变化,导致分子之间的振动与转化状态在跃迁到不同能级时受到干扰,进而影响光谱吸收带的形状或漂移<sup>[17-19]</sup>。HSI技术能同时获取样品的外部物理结构和内部生物化学等信息,但温度的变化会导致被测物的化学成分改变,进而影响光谱检测结果。阚相成等<sup>[20]</sup>在常温(20℃)和低温(-20℃)条件下利用近红外光谱对水曲柳含水率进行检测,利用9种预处理算法对光谱进行优化,结果表明,两种条件下的平均光谱的吸光度和位置皆不同,低温导致水曲柳的平均光谱在不同波段分离明显,模型预测精度受到影响。Xu等<sup>[21]</sup>在研究不同温度对近红外光谱结合化学计量学识别不同种类动物油脂模型的影响时,发现不同温度的光谱图中不同种类油脂的吸光度差异较大。通过建立偏最小二乘回归(Partial least squares regression, PLSR)模型,结果表明:猪油、羊脂和牛脂在55℃时识别效果最好,分类误差都为0;猪油、羊脂和牛脂在80℃时分类误差分别减少0.1420、0.1810、0.1210。张小敏等<sup>[22]</sup>利用HSI技术研究在温度胁迫条件下识别油菜苗,经过预处理和选取特征波长后建立判别模型,检测准确率为95.56%,结果表明该模型可以较好地区分受温度影响的油菜苗。

温度会干扰样品的吸光度,还会导致波长位移发生变化,若样品检测时与模型建立时之间的温差较大,则结果会出现较大的偏差。因此,需要建立温度校正模型,以此来降低温度对光谱的影响。孙彦华等<sup>[23]</sup>依据粗蛋白含量随机选择玉米作为样品,在不同的温度下采集光谱,预处理消除其他因素后进行建模预测,研究结果显示在去除光谱噪声大的波段后,同一波长不

同温度的光谱数据存在线性关系,通过提出温度校正理论,对不同波长的光谱进行一元线性回归处理后作为校正光谱,校正模型的预测性能得到提高。史婷等<sup>[24]</sup>针对温度影响近红外光谱的吸收度和波长峰值的现象,将温度设为隐含变量并建立 PLSR 温度校正模型,通过对比温度变化时原模型与温度校正模型的置信区间来判断模型精度。结果显示,原模型置信区间为 1.8 kPa·s,温度校正模型的置信区间为 0.9 kPa·s,温度校正模型精度较原模型提高一倍,说明该模型稳健性更强。万顺宽等<sup>[25]</sup>利用便携式近红外光谱仪在 25 °C 条件下用 PLSR 建立柴油凝点预测模型,结果显示柴油吸光度与温度呈线性关系,将温度校正因子代入预测模型并建立温度校正模型,预测集相关系数  $R_p$  从 0.4 提高至 0.7,预测集均方根误差 (RMSEP) 从 14.6 减小至 8.8,可有效降低温度对模型的影响。

研究表明温度易对光谱检测结果产生影响,温度

变化会引起样品成分的改变,使结果误差增大。理论上建立温度校正模型可有效提高其稳健性,但需要考虑适用性,并不存在一劳永逸的校正模型。在样品检测时,随天气与季节的变化,若温度值在校正模型训练范围之外,检测效果可能不佳。因此,在实际应用中,需考虑模型的更新,将范围之外的样品温度导入模型中提高模型覆盖范围,这会降低模型的精度,但能提高模型的稳健性。在检测时,要注意样品所处的环境温度,还需保证光谱仪器的工作状态。通过建立温度校正模型可有效地提高模型预测能力,模型稳健性的增强也是校正模型具备传递性的前提,以实现校正方法在同型号光谱仪器中的资源共享,降低成本并提高推广性。近红外光谱及成像技术在温度影响下的应用如表 1 所示。表 1 中:Fisher 为 Fisher 判别分析;SEP 为标准误差预测 (Standard error prediction);Acc 为准确率;MLR 为多元线性回归 (Multiple linear regression) 模型。

表 1 近红外光谱及成像技术在温度影响下的应用

Table 1 Application of near infrared spectroscopy and imaging technology under the influence of temperature

Detection method	Object	Detection index	Modeling method	Model-evaluation index	Reference
NIR	Ashtree	Water	PLSR	$R_p=0.9128$ , RMSEP is 0.1774	Ref. [20]
	Animal fat	Lard, Goat, Butter	PLSR		Ref. [21]
	Maize	Protein content	PLSR	$R_p=0.9100$ , RMSEP is 0.5580	Ref. [23]
	Glucose	Solution concentration	MLR	SEP<0.3000	Ref. [24]
	Diesel	Condensation point value	PLSR	$R_p=0.6874$ , RMSEP is 8.7828	Ref. [25]
HSI	Rapeseed seedling	Average spectral	Fisher	Acc is 88.68%	Ref. [22]

### 3.2 基于光照的影响

使用光谱仪器进行检测时,光照强度、角度、位置和光源类型等因素在检测样品时都易导致光谱检测结果误差较大,光谱曲线发生偏移,这些客观因素都是无法避免的。在实际处理过程中,首先进行黑白校正,尽可能降低光照影响,防止图像失真。张立虎等<sup>[26]</sup>使用便携式近红外检测仪,在田间检测甜瓜的糖度 (Soluble solids content, SSC)。结果发现光照会影响果皮颜色,深色皮比浅色皮的糖度检测值更高,光强度与检测值呈正相关,当光强变化很小时,其影响程度较小。韩岷杰等<sup>[27]</sup>研究发现在光纤光源、卤素灯杯光源、环形光源等 3 种光源下,环形光源对马铃薯产生的光谱噪声最小。在光源功率、光源距马铃薯表面、光纤距马铃薯表面距离等 3 种检测指标下,检测马铃薯 SSC,结果表明,采用 PLSR 建立的回归模型预测效果较好。刘燕德等<sup>[28]</sup>采用可见近红外漫透射光谱技术检测苹果 SSC,发现卤素灯对苹果照射的位置不同,光谱采集到的 SSC 不同,从而影响模型预测结果。基于多元散射校正法 (Multiplicative scatter correction, MSC) 建立 PLSR 模型,在 MSC-PLSR 建模且照射位置在苹果上部的条件下,模型预测能力最佳。龚志远等<sup>[29]</sup>利用近红外光谱检测苹果糖度,在不同光源照射角度 (30°、

45°、60°) 建立 PLSR 模型。结果表明,在光源照射角度为 45° 时,模型的检测能力最强,其效果最为理想。原因是当光源照射角度较低时,照射到苹果表面的光较多,但由于苹果果肉较厚,有效信息较少;当光源照射角度过高时,透射过苹果的光线较少,有效信息较少。

大多数因素中,光照是最容易影响光谱测量的因素,由于其跟天气情况、时间、湿度和温度等都有关联,光照变化具有不可控性。与室内相比,户外测量的难度更高。因此检测时通常考虑选择在室内进行,相对于户外光照的随机性和不可抗性,室内可以通过卤素灯及暗箱等设备进行人为调整,保证实验效果最佳。建立光照校正模型,提高模型的稳健性,对光谱的实际应用具有重要意义。姜小刚等<sup>[30]</sup>利用近红外光谱 (350~1150 nm) 预测苹果 SSC,在不同光照强度 (光照强度分别由电流为 4.5、5.5、6.5、7.5 A 的直流配电箱控制) 条件下,发现模型预测性能在光照强度为 6.5 A 时最好,随着光照强度提高,仪器检测到苹果内部的信息变多,模型性能变优。王承琨等<sup>[31]</sup>针对木材在户外采集时高光谱图像易受到光照、温度的影响,将纹理特征与光谱结合获得融合特征,并结合支持向量机 (Support vector machine, SVM) 和反向传播 (Back propagation, BP) 神经网络建立识别模型,结果表明,

在图像失真的情况下,两个分类器识别准确率接近 100%。Dong 等<sup>[32]</sup>通过主成分分析法(Principal component analysis, PCA)和 B 样条算法(B-Spline)光照校正方法来识别青皮柑橘上的蓟马缺陷,结果显示模型准确率达 96.5%,减少柑橘表面缺陷,从而降低不均匀光照对检测的影响。

目前,近红外光谱及成像对光照的研究主要是对农产品进行分析,在农产品的品质检测方面已较为成熟,但针对光照因素的研究相对缺乏。由于光照变化无规律以及近红外相关技术的缺乏,减小光照因素的

影响成为难点。并且多数研究在室内进行建模校正,在室内特定条件下建立的校正模型在室外的适用性以及模型对新仪器的适配性都是需要考虑的问题。当前主要解决方法是通过模型传递减小仪器之间的光谱差异性,采用分段直接标准化(Piecewise direct standardization, PDS)算法、直接标准化(Direct standardization, DS)算法和斜率/截距(Slope/bias, S/B)算法等建立转移矩阵进行主从仪器光谱的转换,从而进行光谱校正,减小光照干扰。近红外光谱及成像技术在光照影响下的应用如表 2 所示。

表 2 近红外光谱及成像技术在光照影响下的应用

Table 2 Application of near infrared spectroscopy and imaging technology under the influence of light

Detection method	Object	Detection index	Modeling method	Model-evaluation index	Reference
NIR	Melon	SSC			Ref. [26]
	Potato	SSC	PLSR	$R_p=0.9140$ , RMSEP is 0.1320	Ref. [27]
	Apple	SSC	PLSR	$R_p=0.9499$ , RMSEP is 0.3010	Ref. [28]
	Apple	SSC	PLSR	$R_p=0.8400$ , RMSEP is 0.7300	Ref. [29]
	Apple	SSC	PLSR	$R_p=0.9910$ , RMSEP is 0.1490	Ref. [30]
HSI	Wood	Texture feature	S/B、DS		Ref. [31]
	Citrus	Thrip defect			Ref. [32]

### 3.3 基于水分的影响

水主要由氢键小分子组成,在近红外光谱的一定波段间存在较弱的水吸收峰,因此近红外光谱可测量水分较多的样品<sup>[33]</sup>。但近红外光谱是由分子振动产生的,水分子中的氢键变化会影响含氢基团的吸收,从而影响光谱的吸光度和反射率等特性,干扰检测结果<sup>[34-35]</sup>。一般在近红外光谱分析时样品无须进行预处理,但当样品含水率过高或水分含量不均时,应该进行干燥处理,这样才能防止样品在校正集中因含水率不同而导致检测结果准确性降低。鲍一丹等<sup>[36]</sup>应用 NIR 检测土壤参数的氮含量,研究土壤在不同含水率等条件下对光谱的影响,结果表明,近红外光谱区域对水分最为敏感,土壤含水率较高时,NIR 检测精度不理想,经过干燥处理,模型检测结果精度得到提高。刘阁等<sup>[37]</sup>利用近红外光谱结合 PLSR 建立定量分析模型,检测发动机油中的含水情况,以预防事故发生。结果表明,采用最优预处理建立的 PLSR 模型对发动机油中含水率进行检测是可行的,特征波长的选取提高了模型的校正能力,模型泛化性增强。Zou 等<sup>[38]</sup>发现水分会影响红茶的最终品质,利用近红外小型光谱仪与算法建立红茶含水量检测模型。通过比较 PLSR 和非线性支持向量回归(Support vector regression, SVR)两类模型,结果发现混合模型标准正态变量变换(Standard normal variate transformation, SNV)-PCA-灰狼优化器(Grey wolf optimizer, GWO)-SVR 检测效果最好,具有一定的实用性。谢永凯等<sup>[39]</sup>研究高光谱在田间不同含水量(80%、60%、45%、35%、30%)胁迫下,冬小麦脯氨酸(proline)含量与光谱的关系。结果表明,脯氨酸与冬小麦冠层红边区域的反射率存在一

定的规律性变化,构建的 PLSR 模型有着较好的模型精度。金诚谦等<sup>[40]</sup>采用 HSI 技术对大豆的水分进行可视化研究,经过筛选最优特征波长,建立 Normalize-连续投影算法(Successive projections algorithm, SPA)-主成分回归(Principle component regression, PCR)最终检测模型,并进行灰度及伪彩色变化处理,得到大豆水分的可视化图形,其检测效果较好,可为高光谱检测大豆水分提供一定的参考性。

相对于上述模型建模时通过设置含水量梯度作为对照样本,以此来增强模型的抗干扰能力和采用特征波段区间进行建模从而进行实现水分校正,使用不同预处理算法进行光谱校正也可降低水分的影响。如 Liu 等<sup>[41]</sup>利用植物光谱校正(Plant spectrum correction, PSC)的方法减少水分对植物的影响,通过校正后的光谱建立 PSC-多元线性回归(Multivariable linear regression, MLR)模型。结果表明,PSC-MLR 模型比 MLR 模型具有更高的精度,能有效降低含水率对模型的影响。Kunze 等<sup>[42]</sup>提出采用外部参数正交化(External parameter orthogonalized, EPO)方法降低不同含水量的巴西木材对光谱的影响,通过建立偏最小二乘判别分析(Partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)模型,结果发现模型经校正后准确率得到提高,证明 EPO 校正具有一定可行性和重要的意义。李硕等<sup>[43]</sup>采用 EPO 和 PDS 算法降低水分对近红外光谱检测土壤有机碳(SOC)含量的影响,从而提高模型的检测精度。结果表明,两种校正方法在农田中都具有较好的效果,在草地方面模型检测精度 PDS 方法优于 EPO 方法。

以上研究表明:水分在农林产品和食品安全等检测中占据重要的位置,其对光谱检测的影响不可忽略,

通过建立模型实时观测被测物的含水率,并进行可视化处理,可更好应用于实际生产中。在近红外光谱发展的早期阶段,样品建模时严格遵循背景条件与测量条件高度相似,但随着相关校正方法的改进提高和在线快速实时检测的需求,近红外光谱分析已逐渐从对条件严格的一致性向模型稳健性转变,这要求建立的校正模型不受水分的干扰或允许其干扰范围在一定程

度之内。近红外光谱及成像技术在水分影响下的应用如表 3 所示。表 3 中:RF 为随机蛙跳(Random frog);RPIQ 为绩效与四分位间距之比(Ratio of performance to inter quartile distance);SECV 为交叉验证的标准误差(Standard error of cross validation);RPD 为相对分析误差(Relative percent deviation);R 为预测集相关系数; $R^2$  为预测集决定系数。

表 3 近红外光谱及成像技术在水分影响下的应用

Table 3 Application of near infrared spectroscopy and imaging technology under the influence of water

Detection method	Object	Detection index	Modeling method	Model-evaluation index	Reference
NIR	Soil	Nitrogen content	PLSR	$R=0.8100$ , SECV is 2.4000	Ref. [36]
	Engine oil	Water	PLSR	RMSEP is 0.2419, $R^2=0.9930$ , RPD is 11.9884	Ref. [37]
	Black tea	Water	SVR	$R_p=0.9892$ , RMSEP is 0.0362, RPD is 6.5001	Ref. [38]
	Leaf	Water	MLR	RPD is 1.3492, $R^2=0.6959$ , RMSE is 0.0220	Ref. [41]
	Brazil	Water	PLS-DA		Ref. [42]
HSI	Soil	Carbon content	RF	$R^2=0.7800$ , RMSE is 3.0500, RPIQ is 1.4800	Ref. [43]
	Winter wheat	Proline	PLSR	$R^2=0.7410$ , RMSEP is 0.1740, RPD is 1.9350	Ref. [39]
	Soybean	Water	PCR	RMSEP is 0.2380, $R^2$ is 0.9778	Ref. [40]

### 3.4 基于曲率变化的影响

在进行实验时,通常光谱仪器拍摄的图像会受被测物表面形状呈圆形或椭圆形的影响,出现不必要的阴影区域,从而影响光谱检测结果<sup>[44]</sup>。Stephen 等<sup>[45]</sup>利用高光谱研究曲率对小麦种子的影响,根据朗伯特余弦定律将聚四氟乙烯(PTFE)圆柱体和扁椭球体(近似小麦种子)进行对比,结果发现像素点中心区域反射率较好,边缘处偏离程度较大。为了降低曲率变化对光谱的影响,有必要对类球体进行曲率校正。胡逸磊等<sup>[46]</sup>在检测油茶果成熟度时,发现光谱强度随着油茶果(随机选取的像素点)从中心区域往四周移动时逐渐降低,反射率也随之降低,导致模型分类效果较差。利用均值归一化(Z-score normalization)方法对油茶果光谱曲线进行校正,结果发现同像素点周围的光谱强度差异性减小,提高了模型对油茶果成熟度分类的准确率。郭志明等<sup>[47]</sup>针对高光谱检测苹果糖度时球体曲率产生的影响,提出了通过归一化来校正光强度。结果表明该方法是有用的,利用伪彩色图像可判断光强度是否得到校正。Sanchis 等<sup>[48]</sup>采用基于可调谐液晶滤光片计算机视觉系统校正光反射对柑橘形状所产生的影响,该方法将柑橘视为朗伯椭球体,采集柑橘的图像获得三维模型,使得柑橘表面的辐射强度趋于均匀,反射

率相似,这对建立数字高程模型(Digital elevation model, DEM)分类具有重要意义。Zhao 等<sup>[49]</sup>利用 HSI 技术预测冬枣 SSC,分别采用小波变化+移动平均平滑预处理和区域归一化预处理建立最小二乘支持向量机(Least squares support vector machine, LSSVM)模型。结果发现归一化预处理可有效校正冬枣像素点周围反射率不均匀的影响,提高对冬枣 SSC 的检测精度。

在使用高光谱仪器检测如各种肉类切片和叶片叶绿素含量(Soil and plant analyzer development, SPAD)等特征成分位于同一平面的样品时,通常采用黑白板校正光强度以消除影响。但针对形状呈球体、椭球体等产品时,由于检测时其空间光强度分布不均匀,曲率变化与光谱反射率密切相关,因此对产品检测尤其是在线检测的影响不容忽视。目前大部分研究均采用归一化对感兴趣区域的光谱进行处理,对校正前后的光谱曲线的伪色彩能量图进行比对,上述研究表明该方法可有效解决曲率变化引起不同位置像素点光强度差别较大的问题,并降低其对模型的影响程度,这对其他类球体农产品具有一定参考价值,该方法的局限性在于处理位置仅选择中心区域,因此需要通过连续选择感兴趣区域的中心位置从而获得连续图像以减小其影响。近红外光谱及成像技术在曲率变化影响下的应用如表 4 所示。

表 4 近红外光谱及成像技术在曲率变化影响下的应用

Table 4 Application of near infrared spectroscopy and imaging technology under the influence of curvature changes

Detection method	Object	Detection index	Modeling method	Model-evaluation index	Reference
HSI	Wheat grain	Reflectivity			Ref. [45]
	Oil-tea fruit	Maturity	SVM	Acc is 97%	Ref. [46]
	Apple	SSC	PLSR	$R_p=0.9232$ , RMSEP is 0.4568	Ref. [47]
	Citrus	Correction factor	DEM		Ref. [48]
	Winter jujube	SSC	LSSVM	$R_p^2=0.8940$ , RPD is 3.0700	Ref. [49]

### 3.5 基于湿度的影响

湿度是指水蒸气在空气中的含量,当湿度发生变化时,仪器中的光学镜片受到其影响,导致成像光线的光程发生改变,并出现检测误差。尤其是在建立模型时,湿度变化程度不容忽视,光源中的部分光会被空气中的水蒸气吸走,这会对检测结果产生干扰。张锐等<sup>[50]</sup>利用高光谱遥感研究土壤湿度,建立最佳反演模型。结果发现光谱反射率随着土壤湿度下降呈整体先下降后上升的趋势,波段在 1300 nm 后反射率和相对反射率与土壤湿度的相关性较高。余敏行等<sup>[51]</sup>研究红外光谱差减技术受不同湿度的影响,结果表明湿度较大时,水分子团簇( $H_2O$ )<sub>n</sub>尺寸及比例改变,那么光谱会出现不同的特征,光谱发生变化会影响测量结果。Zoltan 等<sup>[52]</sup>通过近红外光谱仪检测不同的地下水,并建立 PLSR 模型,结果表明光谱会受不同温度、湿度的影响,并确定了吸光度和湿度的关系。Li 等<sup>[53]</sup>研究湿度和纺织品厚度对近红外光谱的影响,通过样品建立 BP-人工神经网络(Artificial neural network, ANN)。结果表明该模型识别性能较好,准确率超过 99%。

上述研究表明不同的样品,受湿度的影响程度不同,因此建立相关的校正模型以此来降低湿度对光谱及模型的影响迫在眉睫,从而提高模型在复杂环境下的稳定性。肖航等<sup>[54]</sup>针对湿度影响近红外光谱检测

水泥问题,采用不同湿度的样本进行建模以此进行湿度校正。结果表明,湿度变化会影响检测结果,但进行湿度校正后模型稳定性提高,误差减小。Hu 等<sup>[55]</sup>利用傅里叶变化近红外(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)光谱检测水泥成分( $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $CaO$ )时发现环境湿度的变化对检测存在干扰,提出了背景水分消除的方法。结果表明在高、低湿度条件下,消除背景水分的模型比未消除背景水分的模型具有更高的精度, $R$ 均超过 90%,模型效果较好。

环境湿度的变化对光谱存在一定的影响,通过建立校正模型可以有效提高模型预测精度。相关样品的湿度校正模型在理论上分为两种:1)将湿度作为自变量或因变量矩阵,检测当前湿度值并进行校正;2)对同一种样品在不同湿度干扰下建立校正模型并进行湿度校正,且在不同湿度梯度下进行光谱校正的效果更好。以上方法主要是从软件模型方面降低湿度影响,同时也可从硬件考虑,为保持室内温、湿度维持稳定,有研究通过在近红外光谱仪中增加具有温度和湿度检测功能的传感器,实现对样品、仪器和环境的温、湿度实时监测,为后续建立校正模型提供相关参数。但目前国内外近红外光谱及成像与湿度相关的研究较少,相关的湿度校正问题也有待进一步研究。近红外光谱及成像技术在湿度影响下的应用如表 5 所示,表 5 中:RMSEC 为校正集均方根误差; $R_c^2$  为校正集决定系数。

表 5 近红外光谱及成像技术在湿度影响下的应用

Table 5 Application of near infrared spectroscopy and imaging technology under the influence of humidity

Detection method	Object	Detection index	Modeling method	Model-evaluation index	Reference
	Water vapour	Humidity			Ref. [51]
NIR	Groundwater	Absorbance	PLSR	RMSEC is 1.0900, $R_c^2=0.9049$	Ref. [52]
	Textile	Humidity	BP-ANN	Acc is 97%	Ref. [53]
	Cement	Humidity	PLSR	$R^2=0.7700$ , RMSEP is 0.0960	Ref. [54]
	Cement	Humidity	FTIR	$R_p=0.9407$ , RMSEP is 0.1200	Ref. [55]
HSI	Winter wheat	Proline	PLSR	$R^2=0.8000$ , RPD is 2.2900	Ref. [50]

## 4 总结与展望

利用近红外光谱及成像检测,通过建立相应因素的预测及校正模型,以此来降低其对被测物及光谱的影响,提高检测效率,降低成本的方法是可行的。目前建立稳健的光谱检测模型主要按照如下标准流程:1)获取样品数据;2)剔除异常样本;3)校正样品数据;4)样品按比例划分为训练集与测试集;5)光谱数据预处理;6)选择特征波长;7)采用不同算法建立模型;8)根据不同指标对检测模型性能和稳定性进行评估<sup>[56]</sup>。未来可根据仪器及算法模型的优化进一步简化流程,提高检测效率。近红外光谱及成像技术的检测流程如图 1 所示。

但在复杂多变的环境下,鉴于当前研究还存在以下问题:1)模型训练时,样本量少、结构简单和参数多、

结构复杂分别容易出现欠拟合和过拟合现象,模型泛化性较差;2)大量研究主要是针对单一因素建立校正模型,这类模型不能在复杂环境下很好地应用,存在一定局限性;3)仅总结常见的宏观影响因素,在微观尺度上还缺乏具体研究分析;4)大多数研究都是在可控光环境下进行,缺少在自然光照条件下校正模型的研究和普适性验证,模型稳健性有待进一步提高;5)多数企业和学校相关研究人员在实际应用中所建立的模型都依赖于同型号的仪器,模型传递性较差,仪器在硬件指标的发展有待提高。

近红外光谱及成像技术近些年在我国飞速发展,其结合人工智能、深度学习和云计算相关的技术广泛应用于农林、石油化工、医学等领域,推动相关领域的发展,给国家和社会带来巨大的经济效益,基于其高效、无损和无接触式等优点,未来将会更加广泛地应用

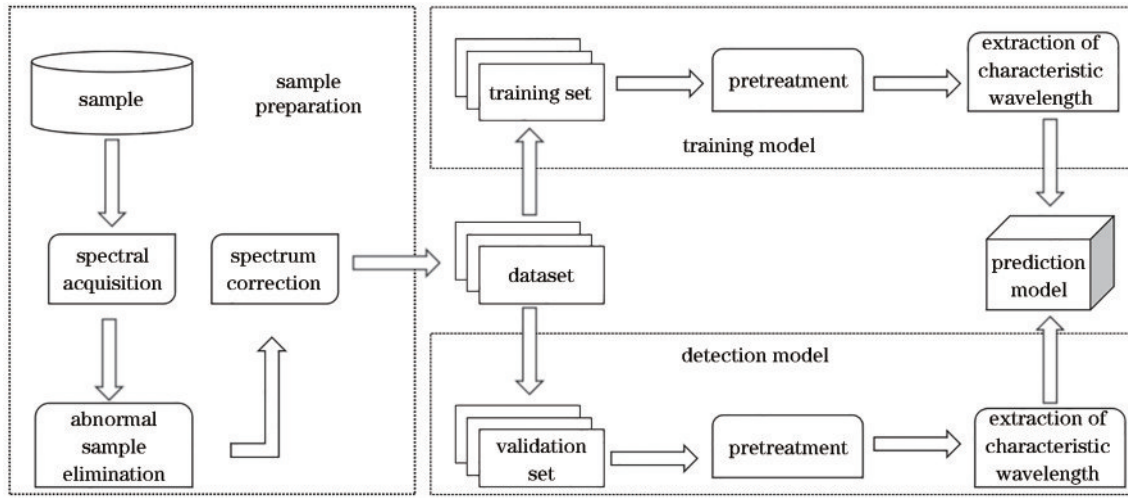


图 1 近红外光谱及成像技术检测流程

Fig. 1 Detection flow chart of near infrared spectroscopy and imaging technology

于各领域。因此,结合目前的发展趋势,未来近红外光谱及成像技术可从以下几个方面进行深入研究:1)目前只有少量文献涉及到通用模型的研究,且应用范围较小,模型使用较单一,可重点研究近红外光谱及成像技术在通用模型方面的发展,以节省成本并提高推广性。2)随着技术的发展,近红外光谱仪器应向微型便携化方向发展,减少使用时受性能指标的约束,以提高分辨率和增强抗干扰能力。3)高光谱仪器以大型仪器为主,价格昂贵,对使用环境要求较高,一般用于室内环境,因此约束较大。应将其与其他技术和算法相结合,向微型化,便捷化及智能化方向发展,以降低成本,便于推广和提高其在实际环境中的可应用性。4)结合深度学习和机器学习等方法校正相关模型,使模型稳健性更强,以适应复杂多变的环境。5)结合主动学习、即时学习和无监督等方法对校正模型进行更迭,提高模型的传递性,使得模型与在线检测仪器匹配时具有更优的适配性,以降低成本。

## 参 考 文 献

- [1] 苏东林,张菊华,李高阳,等.近红外光谱结合化学计量学在茶籽调和油品质检测中的应用研究进展[J].中国食品学报,2018,18(7):332-338.  
Su D L, Zhang J H, Li G Y, et al. Research progress in application of near-infrared spectroscopy and chemometrics for the quality inspection of camellia blended oil[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(7): 332-338.
- [2] Wang D, Wang K, Wu J Z, et al. Progress in research on rapid and non-destructive detection of seed quality based on spectroscopy and imaging technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(1): 52-59.
- [3] 尚宇瀚,郭项雨,白桦,等.消费品快速检测技术研究进展[J].分析测试学报,2022,41(6):921-930.  
Shang Y H, Guo X Y, Bai H, et al. Research progress on rapid detection technology for consumer products[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2022, 41(6): 921-930.
- [4] 李勇,魏益民,王锋.影响近红外光谱分析结果准确性的因素[J].核农学报,2005,19(3):236-240.  
Li Y, Wei Y M, Wang F. Affecting factors on the accuracy of near-infrared spectroscopy analysis[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2005, 19(3): 236-240.
- [5] 张欣欣,李跑,余梅,等.柑橘近红外光谱无损检测技术研究进展[J].食品科学,2022,43(1):260-268.  
Zhang X X, Li P, Yu M, et al. Progress in non-destructive citrus quality detection using near-infrared spectroscopy[J]. Food Science, 2022, 43(1): 260-268.
- [6] 田燕龙,王毅,王箫,等.近红外光谱技术在微生物检测中的应用进展[J].光谱学与光谱分析,2022,42(1):9-14.  
Tian Y L, Wang Y, Wang X, et al. Advances in detection of microorganisms using near-infrared spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(1): 9-14.
- [7] Pan T, Wang H B, Si H Q, et al. Research on the identification of pilots' fatigue status based on functional near-infrared spectroscopy[J]. Aerospace, 2022, 9(3): 173.
- [8] Pourdarbani R, Sabzi S, Rohban M H, et al. Using metaheuristic algorithms to improve the estimation of acidity in Fuji apples using NIR spectroscopy[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2022, 13(6): 101776.
- [9] 高毅,黄涛,郝静如,等.高光谱成像技术在生物物证领域的研究进展[J].法医学杂志,2022,38(5):640-649.  
Gao Y, Huang T, Hao J R, et al. Research progress of hyperspectral imaging technology in the field of biological evidence[J]. Journal of Forensic Medicine, 2022, 38(5): 640-649.
- [10] 孙梦梦,鞠皓,姜洪喆,等.水果成熟度无损检测技术研究进展[J/OL].食品与发酵工业:1-11[2023-02-06].  
<https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033166>.  
Sun M M, Ju H, Jiang H Z, et al. Research progress of nondestructive testing technology of fruit ripen[J/OL]. Food and Fermentation Industry: 1-11[2023-02-06].

- <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033166>.
- [11] Zhang J, Guo Z, Ren Z S, et al. A non-destructive determination of protein content in potato flour noodles using near-infrared hyperspectral imaging technology[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 130: 104595.
- [12] Gao Z H, Du M Y, Cao N, et al. Application of hyperspectral imaging technology to digitally protect murals in the Qutan temple[J]. *Heritage Science*, 2023, 11(1): 8.
- [13] Edwards K, Hoffman L C, Manley M, et al. Raw beef patty analysis using near-infrared hyperspectral imaging: identification of four patty categories[J]. *Sensors*, 2023, 23(2): 697.
- [14] 石晶晶, 李孟凡, 胡亚东, 等. 紫外可见偏振成像光谱仪的光谱定标与匹配方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(9): 0930002.  
Shi J J, Li M F, Hu Y D, et al. Spectral calibration and matching method for ultraviolet-visible polarization imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9): 0930002.
- [15] 李秀举, 曹琦, 周树添, 等. FY-4B GHI长波红外波段的发射前辐射表征和定标[J]. *光学学报*, 2023, 43(12): 1212005.  
Li X J, Cao Q, Zhou S T, et al. Prelaunch radiometric characterization and calibration for long wave infrared band of FY-4B GHI[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(12): 1212005.
- [16] 褚小立. 化学计量学方法与分子光谱分析技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 259.  
Chu X L. *Molecular spectroscopy analytical technology combined with chemometrics and its applications*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 259.
- [17] 蒋焕煜, 谢丽娟, 彭永石, 等. 温度对叶片近红外光谱的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(7): 1510-1513.  
Jiang H Y, Xie L J, Peng Y S, et al. Study on the influence of temperature on near infrared spectra[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(7): 1510-1513.
- [18] 汪志强, 李大鹏, 刘强, 等. 基于温度修正和可见/近红外光谱的油茶籽含水率检测[J]. *食品与机械*, 2022, 38(12): 127-132.  
Wang Z Q, Li D P, Liu Q, et al. Moisture content detection of camellia oleifera seeds based on temperature correction and visible/near infrared spectroscopy[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(12): 127-132.
- [19] 白心爱, 刘艳娥, 薛丽丽. 温度对近红外光谱检测结果的影响研究[J]. *激光杂志*, 2020, 41(10): 97-101.  
Bai X A, Liu Y E, Xue L L. Study on the influence of temperature on the results of NIRS[J]. *Laser Journal*, 2020, 41(10): 97-101.
- [20] 阚相成, 李耀翔, 王立海, 等. 基于光谱预处理的低温水曲柳原木含水率检测[J]. *中南林业科技大学学报*, 2022, 42(11): 154-163.  
Kan X C, Li Y X, Wang L H, et al. Moisture content detection of low temperature fraxinus mandshurica logs based on spectral pretreatment[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2022, 42(11): 154-163.
- [21] Xu X D, Gao B, Li Y Y, et al. The effect of temperature on the identification of NIR animal fats and oils species and its mechanism[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2023, 124: 103498.
- [22] 张小敏, 张延宁, 姜海益, 等. 基于高光谱成像的油菜苗期温度胁迫检测方法[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(6): 232-241, 276.  
Zhang X M, Zhang Y N, Jiang H Y, et al. Temperature stress detection method of rapeseed seedling based on hyperspectral imaging[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(6): 232-241, 276.
- [23] 孙彦华, 范永涛. 近红外光谱分析中温度影响的修正[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(6): 1690-1695.  
Sun Y H, Fan Y T. Correction of temperature influence in near infrared spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(6): 1690-1695.
- [24] 史婷, 栾小丽, 刘飞. 近红外全局隐含温度补偿模型的预测精度分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(4): 1058-1063.  
Shi T, Luan X L, Liu F. Theoretical analysis and verification of prediction variances and confidence limits for global temperature compensation modeling approaches [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(4): 1058-1063.
- [25] 万顺宽, 吕波, 张洪明, 等. 基于温度修正模型的柴油凝点快速检测方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(10): 3111-3116.  
Wan S K, Lü B, Zhang H M, et al. Quick measurement method of condensation point of diesel based on temperature-compensation model[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(10): 3111-3116.
- [26] 张立虎, 李冠, 张自强, 等. 便携式糖度无损检测仪在甜瓜糖度检测中的应用[J]. *新疆农业科学*, 2014, 51(12): 2347-2352.  
Zhang L H, Li G, Zhang Z Q, et al. Application of nondestructive portable sugar content taster in inspection of sugar content in melons[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2014, 51(12): 2347-2352.
- [27] 韩岷杰, 王相友, 许英超, 等. 马铃薯近红外光谱无损检测影响因素研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(1): 37-42.  
Han M J, Wang X Y, Xu Y C, et al. Study on influencing factors of nondestructive testing of potato by near infrared spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(1): 37-42.
- [28] 刘燕德, 崔惠桢, 李斌, 等. 基于可见-近红外光谱技术的苹果糖度光照位置优化研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(11): 3373-3379.  
Liu Y D, Cui H Z, Li B, et al. Study on optimization of apple sugar content illumination position based on visible-near infrared spectroscopy technology[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(11): 3373-3379.
- [29] 龚志远, 李轶凡, 刘燕德, 等. 光源照射角度对苹果糖度近红外光谱检测的影响研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(2): 023004.



- Gong Z Y, Li Y F, Liu Y D, et al. Study on influence of irradiation angle on detection of sugar content of apple by near infrared spectroscopy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(2): 023004.
- [30] 姜小刚, 朱明旺, 姚金良, 等. 基于近红外在线装置苹果糖度模型参数优化研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(1): 116-121.
- Jiang X G, Zhu M W, Yao J L, et al. Study on parameter optimization of apple sugar content model based on near infrared on-line device[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(1): 116-121.
- [31] 王承琨, 赵鹏. 对光照变化不敏感的微观高光谱图像木材树种识别算法研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2020, 39(1): 72-85.
- Wang C K, Zhao P. Wood species recognition using hyper-spectral images not sensitive to illumination variation[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2020, 39(1): 72-85.
- [32] Dong C W, Ye Y, Zhang J Q, et al. Detection of thrips defect on green-peel citrus using hyperspectral imaging technology combining PCA and B-spline lighting correction method[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(10): 2229-2235.
- [33] 樊梦丽, 赵越, 刘言, 等. 近红外光谱水光谱组学[J]. *化学进展*, 2015, 27(S1): 242-250.
- Fan M L, Zhao Y, Liu Y, et al. Aquaphotomics of near infrared spectroscopy[J]. *Progress in Chemistry*, 2015, 27(S1): 242-250.
- [34] 孙岩, 蔡文生, 邵学广. 水光谱探针及其在结构分析中的应用[J]. *分析测试学报*, 2020, 39(10): 1204-1208.
- Sun Y, Cai W S, Shao X G. Water as a spectroscopic probe for detection of structural analysis[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2020, 39(10): 1204-1208.
- [35] 李晓静, 虞澜, 祖恩东. 近红外光谱分析技术在宝石研究中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(1): 54-57.
- Li X J, Yu L, Zu E D. Application of near infrared spectroscopy in the study of gems[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(1): 54-57.
- [36] 鲍一丹, 何勇, 方慧, 等. 土壤的光谱特征及氮含量的预测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(1): 62-65.
- Bao Y D, He Y, Fang H, et al. Spectral characterization and N content prediction of soil with different particle size and moisture content[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(1): 62-65.
- [37] 刘阁, 陈彬, 商芷萱, 等. 发动机油中水分的近红外光谱分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(2): 449-454.
- Liu G, Chen B, Shang Z X, et al. Analysis of moisture in engine oil by near infrared spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(2): 449-454.
- [38] Zou H T, Shen S A, Lan T M, et al. Prediction method of the moisture content of black tea during processing based on the miniaturized near-infrared spectrometer[J]. *Horticulturae*, 2022, 8(12): 1170.
- [39] 谢永凯, 宋晋瑶, 刘敏, 等. 水分胁迫下冬小麦脯氨酸含量高光谱监测[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(2): 463-470.
- Xie Y K, Song J Y, Liu M, et al. Hyperspectral monitoring of proline content in winter wheat under water stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(2): 463-470.
- [40] 金诚谦, 郭榛, 张静, 等. 大豆水分含量的高光谱无损检测及可视化研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(10): 3052-3057.
- Jin C Q, Guo Z, Zhang J, et al. Study on hyperspectral nondestructive testing and visualization of soybean moisture content[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(10): 3052-3057.
- [41] Liu X X, Lin L X, Wang Y J. Improving the multiple linear regression method of biomass estimation using plant water-based spectrum correction[J]. *Remote Sensing Letters*, 2022, 13(7): 716-725.
- [42] Kunze D C G C, Pastore T C M, Rocha H S, et al. Correction of the moisture variation in wood NIR spectra for species identification using EPO and soft PLS2-DA [J]. *Microchemical Journal*, 2021, 171: 106839.
- [43] 李硕, 李春莲, 陈颂超, 等. 基于野外可见近红外光谱和水分影响校正算法的土壤剖面有机碳预测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(4): 1234-1239.
- Li S, Li C L, Chen S C, et al. Removing the effects of water from visible-near infrared spectra in soil profiles for the estimation of organic carbon[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(4): 1234-1239.
- [44] Rogelj L, Simončič U, Tomanic T, et al. Effect of curvature correction on parameters extracted from hyperspectral images[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2021, 26(9): 096003.
- [45] Delwiche S R, Baek I, Kim M S. Effect of curvature on hyperspectral reflectance images of cereal seed-sized objects[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 202: 55-65.
- [46] 胡逸磊, 姜洪喆, 周宏平, 等. 高光谱成像技术检测油茶果成熟度[J]. *食品科学*, 2022, 43(16): 324-331.
- Hu Y L, Jiang H Z, Zhou H P, et al. Maturity detection of camellia oleifera by hyperspectral imaging[J]. *Food Science*, 2022, 43(16): 324-331.
- [47] 郭志明, 赵春江, 黄文倩, 等. 苹果糖度高光谱图像可视化预测的光强度校正方法[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 227-232.
- Guo Z M, Zhao C J, Huang W Q, et al. Intensity correction of visualized prediction for sugar content in apple using hyperspectral imaging[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 227-232.
- [48] Gómez-Sanchis J, Moltó E, Camps-Valls G, et al. Automatic correction of the effects of the light source on spherical objects. An application to the analysis of hyperspectral images of citrus fruits[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 85(2): 191-200.
- [49] Zhao Y Y, Zhang C, Zhu S S, et al. Shape induced reflectance correction for non-destructive determination and visualization of soluble solids content in winter jujubes using hyperspectral imaging in two different spectral ranges[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 161: 111080.
- [50] 张锐, 李兆富, 辛强, 等. 原状水稻土土壤湿度高光谱

- 特征及反演模型[J]. 土壤通报, 2017, 48(1): 32-38.  
Zhang R, Li Z F, Xin Q, et al. Spectral characteristics and inversion model of soil moisture in undisturbed paddy [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(1): 32-38.
- [51] 余敏行, 王海水, 张韞宏. 红外光谱差减技术扣除水汽吸收干扰的局限性[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(6): 1673-1677.  
Yu M X, Wang H S, Zhang Y H. Limitations of spectral subtraction in the elimination of infrared water vapor bands[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(6): 1673-1677.
- [52] Kovacs Z, Muncan J, Veleva P, et al. Aquaphotomics for monitoring of groundwater using short-wavelength near-infrared spectroscopy[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2022, 279: 121378.
- [53] Li W X, Wei Z H, Liu Z D, et al. Qualitative identification of waste textiles based on near-infrared spectroscopy and the back propagation artificial neural network[J]. Textile Research Journal, 2021, 91(21/22): 2459-2467.
- [54] 肖航, 杨振发, 张雷, 等. 湿度对水泥生料近红外光谱检测的影响及补偿方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(3): 867-872.  
Xiao H, Yang Z F, Zhang L, et al. Effect of humidity on determination of main components in cement raw meal using near infrared spectroscopy and compensation method[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(3): 867-872.
- [55] 胡荣, 刘文清, 徐亮, 等. 基于背景水分扣除的水泥生料成分的近红外光谱建模[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(4): 1051-1055.  
Hu R, Liu W Q, Xu L, et al. Near infrared spectroscopic modeling method for cement raw meal components by eliminating background moisture[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(4): 1051-1055.
- [56] 胡建, 冯耀泽, 王益健, 等. 基于近红外光谱的鲜味物质与鲜味强度检测[J]. 光学学报, 2022, 42(1): 0130002.  
Hu J, Feng Y Z, Wang Y J, et al. Detection of umami substances and umami intensity based on near-infrared spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 0130002.