Advances in Analytical Chemistry 分析化学进展, 2026, 16(4), 263-271
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/aac
https://doi.org/10.12677/aac.2026.164028

Hans汉斯

光谱技术在谷物水分检测中的应用研究

张　继[1,2]，田向成[1,2]，贺　丹[1,2]，马炜懿[1,2]，周　杰[3]，陈　立[4]，谭　超[1,2]，邱　笛[1,2*]

[1]宜宾学院材料与化学工程学院，四川　宜宾
[2]宜宾学院过程分析与控制四川省教育厅高校重点实验室，四川　宜宾
[3]宜宾天原集团股份有限公司，四川　宜宾
[4]和光同程光伏科技(宜宾)有限公司，四川　宜宾

收稿日期：2026年9月28日；录用日期：2026年10月19日；发布日期：2026年11月2日

摘　要

谷物是全球口粮的主体，其水分含量又是决定收获时机、储藏稳定性、加工品质与食用安全的关键指标。传统测定方法虽准确度可靠，却难以满足收购、仓储与加工环节的快速在线检测需求；相比之下，光谱检测无需试剂与前处理，可在整粒谷物上直接测定，近红外与中红外还能同时给出蛋白、脂肪等指标。本文从原理、检测方式与优缺点三方面比较近红外光谱、中红外光谱、高光谱成像、太赫兹与微波介电五类技术在小麦、玉米、水稻、大豆等谷物水分检测中的应用，梳理光谱预处理、特征波长选择、定量建模等化学计量学方法，并说明可解释人工智能用于识别关键波段的做法。

关键词

谷物，水分检测，近红外光谱，中红外光谱，高光谱成像，太赫兹，微波介电，化学计量学

Research on the Application of Spectral Technology in Grain Moisture Detection

Ji Zhang[1,2], Xiangcheng Tian[1,2], Dan He[1,2], Weiyi Ma[1,2], Jie Zhou[3], Li Chen[4], Chao Tan[1,2], Di Qiu[1,2*]

[1]College of Materials and Chemical Engineering, Yibin University, Yibin Sichuan
[2]Key Laboratory of Process Analysis and Control of Sichuan Universities, Yibin University, Yibin Sichuan
[3]Yibin Tianyuan Group Co., Ltd., Yibin Sichuan
[4]Heguang Tongcheng Photovoltaic Technology (Yibin) Co., Ltd., Yibin Sichuan

Received: September 28, 2026; accepted: October 19, 2026; published: November 2, 2026

*通讯作者。

文章引用: 张继, 田向成, 贺丹, 马炜懿, 周杰, 陈立, 谭超, 邱笛. 光谱技术在谷物水分检测中的应用研究[J]. 分析化学进展, 2026, 16(4): 263-271. DOI: 10.12677/aac.2026.164028

Abstract

Cereals form the staple of the global food supply, and their moisture content is a key indicator governing harvest timing, storage stability, processing quality and food safety. Conventional determination methods give adequate accuracy, yet cannot meet the demand for rapid on-line determination at purchasing, storage and processing stages; in contrast, spectroscopic methods need no reagents or sample pretreatment and can measure intact kernels directly, and near-infrared and mid-infrared spectroscopy can additionally report protein and fat contents. This review compares five techniques (near-infrared spectroscopy, mid-infrared spectroscopy, hyperspectral imaging, terahertz, and microwave dielectric) for moisture detection in wheat, corn, rice, soybean and other grains, in terms of detection principles, detection modes, and advantages and disadvantages. It also outlines chemometric methods including spectral preprocessing, characteristic wavelength selection and quantitative modeling, and describes how explainable artificial intelligence is used to identify key spectral bands.

Keywords

Grain, Moisture Detection, Near-Infrared Spectroscopy (NIRS), Mid-Infrared Spectroscopy (MIRS), Hyperspectral Imaging (HSI), Terahertz (THz), Microwave Dielectric, Chemometrics

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

小麦、水稻、玉米、大豆等谷物是我国粮食安全、农业经济和食品工业的重要基础，其产后收购、储藏、加工与流通的每个环节都以水分含量为据[1]。守住粮食安全底线，既要保产量，也要在产后环节减少损失、确保品质。水分含量决定收获时机、收购等级、储藏稳定性与加工品质，偏高还会诱发霉变和真菌毒素积累。我国现行粮食质量标准据此对收购水分上限作出规定：小麦 ≤12.5% (GB 1351-2023)，籼稻 ≤13.5%、粳稻 ≤14.5% (GB 1350-2009)，玉米 ≤14.0% (GB 1353-2018) [2]-[4]。

传统谷物水分测定方法以 105℃恒重烘干法为主，卡尔费休法作为补充，两者结果准确，但前者需破坏样品并反复烘干、冷却至恒重，难以在收购现场快速完成[5]；后者虽精度高，却依赖滴定试剂与专业操作，同样不适于在线快速检测[6]。相比之下，光谱检测可在不破坏样品的前提下直接测定，既不用化学试剂，也不必烘干至恒重。其中，近红外光谱应用最广，已广泛用于谷物品质快速检测[7] [8]；中红外光谱、高光谱成像、太赫兹和微波介电等技术也已应用于谷物水分检测。但五类技术的测量依据并不一致：微波介电法依靠介电响应，其余四种依据的是水分子在不同波段的吸收，适用样品形态、穿透深度和定量精度因此差别明显，选型时要分别对待。

现有谷物水分光谱检测研究在样品形态、波段范围和评价指标上各不相同，所得结果难以直接对照。已有综述分别对粮食品质近红外无损检测与谷物含水率测量技术作了梳理[9] [10]，但多按单一谱区组织，五类技术放在一起比较的工作不多。本文从原理、检测方式与优缺点三方面对比这五类技术，梳理光谱预处理、特征波长选择与定量建模等化学计量学方法以及可解释人工智能用于识别关键波段的做法，最后归纳现有技术的主要局限。

2. 光谱技术检测谷物水分的原理与进展

各类光谱技术测定谷物水分，依据的都是水分子 O-H 基团对特定波段电磁辐射的特征吸收，再由化学计量学模型将光谱信号反演为含水率。近红外对应 O-H 的倍频与合频吸收，中红外对应 O-H 的基频振动，高光谱成像在可见光至短波红外逐像素记录连续光谱，太赫兹对水等极性分子的转动与集体振动敏感。微波介电法通过测量谷物复合电常数反演水分，机理不同于分子振动光谱，但在穿透包装和散装物料在线检测中与光学方法互补，故一并比较。

2.1. 近红外光谱

近红外光谱在作物种子品质无损检测中研究最为充分[11]，在谷物水分检测方面，其应用也已从实验室建模延伸至收购、储藏等现场检测环节。以水稻为例，其近红外区的主要吸收谱带如图 1 所示，其中 1450 nm 和 1940 nm 附近为水的 O-H 吸收带，是近红外水分定量的主要依据。

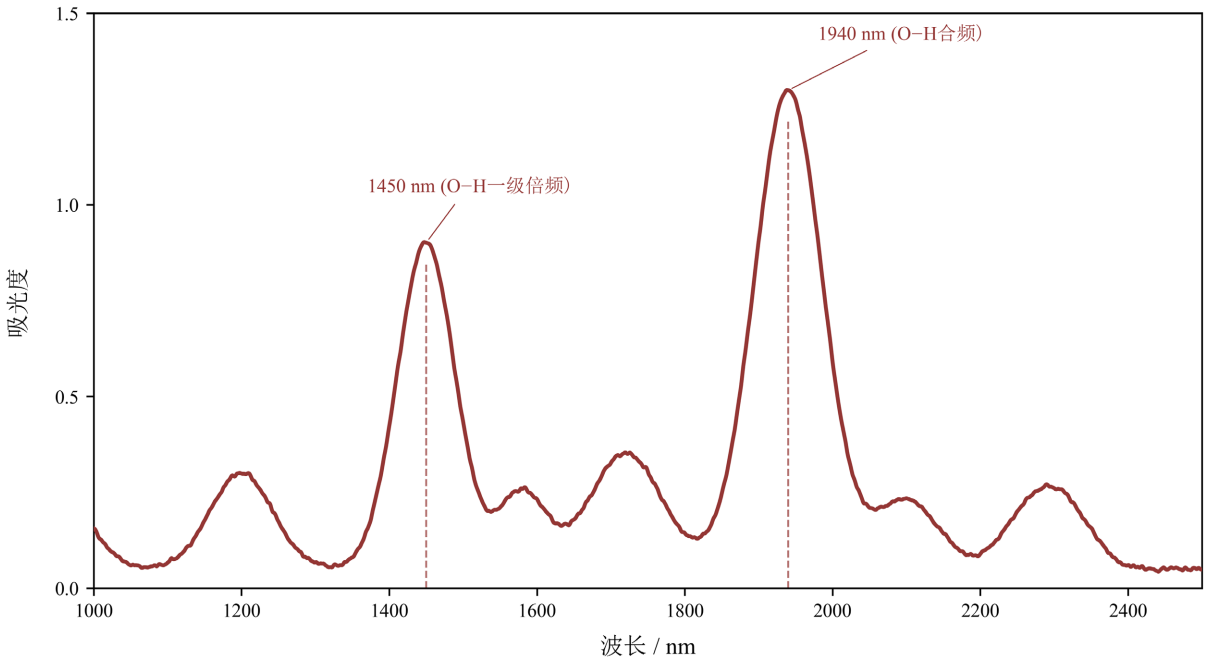


Figure 1. Typical NIR absorption bands of moisture in rice
图 1. 水稻水分近红外吸收谱带示意图

上述两条吸收带是近红外水分定量的主要依据，据此建立的模型已用于稻谷、玉米、小麦等谷物的整粒水分测定。吕都等[12]从 5 个产地收集 161 份稻谷样品，剔除异常光谱并预处理后建立偏最小二乘回归模型，验证集决定系数 R^2 达 0.9801，预测均方根误差为 0.36%、相对分析误差为 7.14，90%以上样品的预测误差在±0.5%以内。除样品来源差异外，取样位置同样会带来偏差：王雪等[13]在不破坏玉米果穗的前提下采集中部籽粒光谱，建立偏最小二乘回归模型跟踪灌浆期水分变化，随后提出遗传算法–迭代保留信息变量法–直接校正策略，将穗尖部籽粒光谱校正到中部籽粒水平，通用模型在中部与穗尖部样本上的 R^2 分别为 0.9715 与 0.9012。在仪器便携化方面，Himawan 等[14]比较了多种便携式可见–近红外光谱仪对玉米籽粒水分的预测能力，分别以偏最小二乘回归与人工神经网络建模，前者预测集决定系数最高约 0.90，后者约 0.95。目前，近红外仪器已从台式扩展到便携与手持，前者支持在线检测，后者则适用于现场抽检。Monti 等[15]比较了多种便携式近红外传感器对硬质小麦水分与蛋白的筛查能力，表明

手持机型可同时完成整粒小麦水分与蛋白的现场测定。

尽管应用已趋成熟，近红外校准模型对品种、产地与年份的依赖仍然明显；同时，籽粒大小、装料密度与籽粒朝向引起的散射差异，需通过规范装料与光谱预处理加以抑制。此外，长波透射要求光线穿过整粒谷物，而籽粒厚、散射强，水分越高衰减越快，实测信号难以稳定，因此整粒谷物的水分检测多采用漫反射方式。

2.2. 中红外光谱

中红外光谱利用 O-H 基频振动吸收，其水分定量性能通常要对照近红外来评价。Shi 等[16]采集加拿大西部 80 个小麦样品，分别获取近红外(680~2500 nm)与衰减全反射傅里叶变换中红外(4000~700 cm^{-1})光谱，在比较多种预处理与波长筛选组合的基础上建立偏最小二乘回归模型。在水分预测上，近红外(R^2 = 0.86)优于中红外(R^2 = 0.72)，而在粗蛋白预测上两者差距要小得多。上述优劣只针对水分，被测成分更换后两法的相对位置可能反转：Wang 等[17]在小麦籽粒上比较了两种技术对抗性淀粉的测定能力，衰减全反射中红外的预测集决定系数 R_p^2 达 0.828，近红外仅为 0.552。这一对比针对整粒样品；在粉末或面粉状态下，颗粒散射显著减弱，中红外基频吸收的信息优势才能发挥出来[18]。两个谱区各有所长，融合使用可以互补：邹小波等[19]先用联合区间偏最小二乘分别筛出近红外与中红外的特征谱区，再将两组谱区融合建模，用于判别小麦产地与烘干程度，融合后模型的判别正确率均高于任一单一谱区。

然而，就水分定量而言，中红外通常不如近红外稳定，根本原因在于衰减全反射附件下倏逝波穿透深度仅为数百纳米至数微米，整粒谷物难以与晶体紧密贴合，接触一致性直接影响重复性。中红外的优势在于单张谱图即可同时测定水分、蛋白与脂肪，更适合实验室中粉末、面粉等样品的多指标快速测定。衰减全反射晶体、薄膜波导与空芯光纤等中红外传感元件的改进[20]，已使倏逝波穿透浅、样品需紧密贴合这两项限制有所缓解。

2.3. 高光谱成像

高光谱成像在可见光至短波红外波段逐像素记录连续光谱，每个像素都对应一条完整光谱曲线，因此既能定量分析，也能给出水分的空间分布[21]。Wang 等[22]搭建长波近红外高光谱系统采集单粒玉米光谱，经无信息变量消除–连续投影算法(UVE-SPA)筛选特征波长，结合 Savitzky-Golay 一阶导数预处理建立最小二乘支持向量机模型，预测集相关系数 R_p = 0.9325、预测均方根误差为 1.2109%，实现了单粒玉米水分的稳定无损检测。在水分空间分布表征方面，金诚谦等[23]基于近红外高光谱成像(900~2500 nm)采集 96 个大豆品种的光谱，经归一化预处理与连续投影算法筛选特征波长后建立主成分回归模型，预测集决定系数 R_p^2 = 0.9778；进一步对图像逐像素反演含水率并作伪彩色变换，得到大豆籽粒的水分分布图。观测若从某一时点扩展到干燥过程的不同阶段，还能反映水分的动态变化：Huang 等[24]采用可见–近红外高光谱成像系统(400~1000 nm)采集干燥过程中玉米籽粒的反射光谱，经相对反射率校正后提取均值光谱，建立偏最小二乘回归模型直接预测水分含量均匀度，以 50 粒为一批时预测效果最优(R_p = 0.848，预测均方根误差为 2.73%)。籽粒内部的水分分布也随干燥工艺改变：Ivanenko 等[25]将含水率 22%的小麦籽粒分别经吸附、热风与自然干燥降至 13%，磁共振成像显示吸附干燥下籽粒组织微观结构与水分分布保持得最为完好。

然而，高光谱成像的数据维度高，对特征提取、降维与建模算法的依赖较强；同时，检测效果受样本摆放、光照均匀性和背景校正影响较大，通常需结合掩膜分割与背景扣除以保证模型稳定性。

2.4. 太赫兹

太赫兹波对水等极性分子的转动与集体振动敏感，且非电离、能穿透部分包装材料[26] [27]。吴静珠

等[28]以 120 份玉米种子粉末(含水率 9.58%~12.71%)为对象，采集太赫兹衰减全反射(THz-ATR)光谱，采用区间联合偏最小二乘结合径向基函数支持向量机建模，所建模型校正集均方根误差为 0.0212%，预测集均方根误差为 0.0697%，相对分析误差为 12.3457，实现了玉米种子水分的定量检测。除定量检测外，太赫兹成像还可用于表征水分的空间迁移：Li 等[29]以冬小麦为对象，采用太赫兹透射成像监测离体植株的脱水与复水过程，发现 0.6 THz 处成像灰度值与含水率的相关系数达 0.9，可清晰反映水分的空间分布及其迁移过程。然而，太赫兹设备成本高、检测速度慢，目前在现场快速检测中的应用仍受限。

2.5. 微波介电

微波介电法适合散装物料的在线检测，但其校准需重点处理装料密度与品种差异两类因素。针对密度影响，Trabelsi 等[30]提出了与密度无关的微波水分校准函数，并以小麦为对象验证了该函数可消除装料密度变化对水分预测的影响，使散装谷物在密度波动时仍能获得一致的水分读数。品种差异是否需要单独标定则是另一关键问题：Soltani 等[31]以 3 个伊朗小麦品种为对象，采用圆柱型电容传感器测定其介电特性并预测水分，所建模型对各品种的最低决定系数 R^2 达 0.985，表明品种差异对校准影响不大。在更宽频段上，郭交等[32]利用微波自由空间测量系统在 1~4 GHz 内采集小麦的介电参数，建立支持向量机回归模型预测含水率，全频段模型预测集相关系数 R_p 达 0.9929，均方根误差为 0.0513%。不过，微波介电法的空间分辨率较低，不适合单粒或局部水分的表征；同时，测量对温度与装料密度的敏感性仍需通过校准函数加以抑制。

2.6. 五类技术的横向比较与适用场景

五类技术在波段、测量方式和穿透深度上的差异，决定了各自的检测对象与适用场景。近红外长波波段穿透深度有限，漫反射信号主要反映籽粒表面与浅层信息。中红外在衰减全反射附件下倏逝波仅进入样品几百纳米到几微米，本质上是准表面测量，更适合粉末与面粉等接触良好的样品。高光谱成像继承近红外穿透特性并增加空间维度，适合单粒水分均匀度评价与干燥过程监测。太赫兹对极性分子敏感、成像分辨率高，适合水分空间分布表征；微波介电法穿透能力最强，密度无关校准使其适合散装物料在线检测。综合来看，单粒与表面水分宜优先考虑高光谱成像，散装或带包装样品的整体水分更适合太赫兹或微波介电法，现场与在线场合仍以近红外最为实用。表 1 比较五类技术的原理、检测方式与优缺点，表 2 汇总各自的典型检测对象与代表性模型性能。

Table 1. Comparison of five techniques for grain moisture detection
表 1. 五种谷物水分检测技术的对比

检测技术	检测方式	原理	优点	缺点
近红外光谱	漫反射/透射	O-H 倍频与合频(1450, 1940 nm)	快速无损、形态多样	穿透浅、受装料影响、依赖品种
中红外光谱	衰减全反射/透射	O-H 伸缩 3300、弯曲 1640 cm^{-1}	基频信息丰富、可同步测多组分	受制样影响大、难测整粒
高光谱成像	逐像素连续波段成像	逐像素连续光谱与空间图像信息融合	均匀度表征、迁移监测、分布可视化	依赖降维与建模、设备成本高
太赫兹	透射/反射时域光谱与成像	水分子转动与集体振动强吸收	非接触、穿透强、可整体与分布成像	检测速度慢、现场应用受限
微波介电	自由空间/传输线测复介电常数	由复介电常数反演水分	穿透强、适合散装、非接触在线	空间分辨低、依赖校准

Table 2. Typical detection targets and representative model performance of the main techniques for grain moisture detection
表 2. 谷物水分检测五类技术的典型对象与模型性能

检测技术	典型检测对象	数据处理与建模方法	代表性模型性能指标	参考文献
近红外光谱	稻谷	剔除异常光谱 + 预处理；PLSR	R^2 = 0.9801, RMSEP = 0.36%, RPD = 7.14	[12]
近红外光谱	玉米果穗(原位)	GA-IRIV-DS 光谱校正；PLSR	中部/穗尖部 R^2 = 0.9715/0.9012	[13]
近红外光谱	玉米籽粒、硬质小麦	便携式可见–近红外；PLSR、ANN	PLSR R^2 ≈ 0.90, ANN R^2 ≈ 0.95	[14] [15]
中红外光谱	小麦(整粒)	预处理 + 波长选择；PLSR	近红外 R^2 = 0.86 优于中红外 0.72	[16]
高光谱成像	单粒玉米种子	SG 一阶导数；UVE-SPA；LS-SVM	R_p = 0.9325, RMSEP = 1.2109%	[22]
高光谱成像	大豆籽粒	归一化；SPA；PCR	R_p^2 = 0.9778	[23]
高光谱成像	玉米籽粒	相对反射率校正；PLSR	R_p = 0.848, RMSEP = 2.73%	[24]
太赫兹	玉米种子(粉末)	THz-ATR；区间联合 PLS + RBF-SVM	RMSEC = 0.0212%, RMSEP = 0.0697%, RPD = 12.3457	[28]
太赫兹	冬小麦	太赫兹透射成像	0.6 THz 灰度值与含水率相关系数|r| = 0.9	[29]
微波介电	小麦(散装)	密度无关校准函数	密度波动下读数一致	[30]
微波介电	小麦(3 个品种)	圆柱电容传感器；介电模型	各品种 R^2 最低 0.985	[31]
微波介电	小麦	自由空间测量(1~4 GHz)；SVR	R_p = 0.9929, RMSE = 0.0513%	[32]

3. 光谱数据处理与化学计量学方法

光谱数据需经预处理、特征波长选择、定量建模、性能评价，才能得到可靠的水分预测模型。这些环节不仅决定预测精度，也影响模型跨仪器、跨年份的适用性；处理不当，模型换一台仪器或跨一年使用，精度便可能明显下降。

原始光谱常受光程差异、颗粒散射与表面不均等因素影响，产生基线漂移，需先经预处理才能用于建模。多元散射校正以全体样品的平均光谱为参照作线性回归，消除颗粒散射造成的系统性偏移；标准正态变量变换按样本自身的均值与标准差标准化，逐条校正样本间的基线差异；求导与 SG 平滑则用于分离重叠谱带并压制噪声。然而，预处理效果与样品基质、仪器状态密切相关，过度叠加反而可能损失水分特征信息，需在交叉验证下逐项选择，而非简单堆叠。

预处理后全谱波段仍过多，需进一步筛选与水分 O-H 吸收相关的有效波长。筛选后模型更为简洁、计算量更小，所选波长还能直接用于低成本多光谱仪器的通道设计。Cataltas 等[33]将近红外光谱与一维卷积自编码器相结合提取特征，再对玉米籽粒的水分含量建模，预测集决定系数 R_p^2 = 0.9716、预测均方根误差为 0.0628%，表明自编码器可自动学习近红外光谱中的水分特征；王超鹏等[34]以玉米种子为对象，采用竞争性自适应重加权采样筛选特征波长建立含水率模型，验证了该方法在高光谱种子水分检测中的适用性。

建模时，偏最小二乘回归因对共线光谱数据稳健而长期作为基准方法，并被多数谷物水分定量研究

用作对照。最小二乘支持向量机、随机森林、人工神经网络及一维卷积神经网络等非线性模型在复杂基质下表现更优[35]，但需要更多样本与参数调优；深度学习在样本充足、维度较高时可自动提取分层特征[36]，却存在可解释性下降、在小样本下易过拟合等问题。因此，实际建模宜将样本划分为训练集、验证集与预测集，并结合交叉验证，避免仅凭训练集拟合优度得出结论；把装料密度、籽粒朝向等物理因素一并纳入模型输入，也有助于提高稳健性。模型性能以决定系数、预测均方根误差与相对分析误差衡量，其中相对分析误差大于 2.5 时可用于定量分析、大于 3.0 时预测精度较好[37]。

传统数据驱动模型虽然可以输出品质预测结果，但无法说明哪些光谱波段参与决策，这也是该类模型在产业现场应用中难以获得认可的重要原因。解释类工具无需改动已经训练完成的原始模型，利用沙普利加性解释(SHAP)、局部可解释模型无关解释(LIME)以及类激活映射(CAM，多用于高光谱图像数据)可以量化各光谱波段对预测结果的贡献程度，常被用于识别关键光谱带[38]。借助这类事后解释手段，不只是筛选得到特征波长，更有助于解析光谱信号与水果果实水分子、糖类、细胞壁组分之间的“谱－构－效”构效关系：通过量化每一波段对品质预测的贡献权重，将模型输出与水分子 O-H 基团 1450 nm、1940 nm 等特征吸收峰开展关联校验，甄别模型是否错误学习果皮颜色、果形大小等无关干扰信息，规避深度学习“黑盒”特性带来的虚假拟合风险[39]。

4. 结论

谷物水分是粮食收购分级、仓储安全管控与加工工艺调控的关键质控指标。传统理化检测方法精度可靠，但存在样品损毁、操作流程繁琐、检测耗时较长的问题，难以满足粮食产业现场快速、在线检测的实际需求。近红外、中红外、高光谱成像、太赫兹以及微波介电等非破坏检测技术无需化学试剂，为谷物水分快速检测提供了可行路径。

立足粮食安全与智慧粮储的现实需求，针对现存瓶颈，后续可以重点开展四项可执行的研究工作：一是推进多模态数据融合与轻量化迁移模型研究，在特征层、决策层融合近红外、高光谱与微波介电数据，面向边缘设备完成模型裁剪，攻克实验室模型向便携、在线设备移植失效的难题；二是发展机理约束下的可解释 AI 建模框架，利用 SHAP、物理信息神经网络等工具厘清光谱信号与谷物自由水、结合水之间的构效关系，抑制伪相关拟合，提升模型的可监管性；三是建设包含多品种、多产地、多年份样本的公开标准化光谱－理化真值数据集，统一算法评价基准，提高研究结果的可复现性；四是推动光谱感知与物联网深度融合，打通收购－仓储－加工全链条检测数据流，构建粮食质量数字追溯体系，基于时序水分信息实现储藏霉变发热风险预警，使光谱检测成为智慧粮食供应链的重要感知底座。

基金项目

2026 年省级大学生创新创业训练计划项目(S202610641057)和宜宾学院本科工程(教学改革)项目。

参考文献

[1] 孙丽娟, 徐春春, 胡学旭, 等. 我国谷物质量安全隐患浅析[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(9): 8-14.

[2] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB 1351-2023 小麦[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.

[3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 1350-2009 稻谷[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[4] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 1353-2018 玉米[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[5] 王虹, 秦维. 105 ˚C 恒重法与两次烘干法对于玉米水分测定的定量研究[J]. 粮食加工, 2008, 33(2): 82-83.

[6] 段海波, 马晓年, 李超, 范多青, 王庆华. 卡尔费休法在大米水分测定中的应用[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(10): 3056-3057.

[7] Walker, C.K., Assadzadeh, S., Wallace, A.J., Delahunty, A.J., Clancy, A.B., McDonald, L.S., *et al*. (2023) Technologies and Data Analytics to Manage Grain Quality On-Farm—A Review. *Agronomy*, **13**, Article No. 1129. https://doi.org/10.3390/agronomy13041129

[8] 王子熙, 沈群, 赵卿宇. 近红外光谱技术在谷物检测中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(3): 267-273.

[9] 王加华, 王一方, 屈凌波. 粮食品质近红外光谱无损检测研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2011, 32(6): 80-87.

[10] 蔡泽宇, 刘政, 张光跃, 杨腾祥, 金诚谦. 谷物含水率测量技术研究进展[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(4): 99-109.

[11] Hacisalihoglu, G. and Armstrong, P. (2023) Crop Seed Phenomics: Focus on Non-Destructive Functional Trait Phenotyping Methods and Applications. *Plants*, **12**, Article No. 1177. https://doi.org/10.3390/plants12051177

[12] 吕都, 唐健波, 姜太玲, 陈中爱, 潘牧. 基于近红外光谱技术快速检测稻谷水分含量[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 51-56, 63.

[13] 王雪, 张广月, 马铁民, 赵肖宇, 刘金明, 衣淑娟. 基于近红外光谱的灌浆期玉米籽粒水分定量分析通用模型[J]. 农业工程学报, 2025, 41(8): 291-300.

[14] Himawan, H., Alghifari, M.D., Nainggolan, R.J., Hermanto, M.B., Nawi, N.M., Omwange, K.A., *et al*. (2026) Comparative Study of Portable Vis-Nir Spectrometers for Corn Moisture Content Prediction Using Machine Learning. *Research in Agricultural Engineering*, **72**, 132-141. https://doi.org/10.17221/88/2025-rae

[15] Monti, M., Pellacani, S., Strani, L., D'Alessandro, A., Cocchi, M., Giussani, B., *et al*. (2026) Smart Screening of Durum Wheat: A Comparative Study of NIR Portable Sensors for Protein and Moisture Content. *Microchemical Journal*, **220**, Article ID: 116378. https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.116378

[16] Shi, H. and Yu, P. (2017) Comparison of Grating-Based Near-Infrared (NIR) and Fourier Transform Mid-Infrared (ATR-FT/MIR) Spectroscopy Based on Spectral Preprocessing and Wavelength Selection for the Determination of Crude Protein and Moisture Content in Wheat. *Food Control*, **82**, 57-65. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.06.015

[17] Wang, R., Wei, X., Wang, H., Zhao, L., Zeng, C., Wang, B., *et al*. (2021) Development of Attenuated Total Reflectance Mid-Infrared (ATR-MIR) and Near-Infrared (NIR) Spectroscopy for the Determination of Resistant Starch Content in Wheat Grains. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, **2021**, Article ID: 5599388. https://doi.org/10.1155/2021/5599388

[18] Sujka, K., Koczoń, P., Ceglińska, A., Reder, M. and Ciemniewska-Żytkiewicz, H. (2017) The Application of FT-IR Spectroscopy for Quality Control of Flours Obtained from Polish Producers. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, **2017**, Article ID: 4315678. https://doi.org/10.1155/2017/4315678

[19] 邹小波, 封韬, 郑开逸, 石吉勇, 黄晓玮, 孙悦. 利用近红外及中红外融合技术对小麦产地和烘干程度的同时鉴别[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(5): 1445-1450.

[20] da Silveira Petruci, J.F., da Silva Sousa, D. and Mizaikoff, B. (2025) Advanced Mid-Infrared Sensors for Molecular Analysis. *Analytical Chemistry*, **97**, 6871-6890. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.4c06799

[21] Feng, L., Zhu, S., Liu, F., He, Y., Bao, Y. and Zhang, C. (2019) Hyperspectral Imaging for Seed Quality and Safety Inspection: A Review. *Plant Methods*, **15**, Article No. 91. https://doi.org/10.1186/s13007-019-0476-y

[22] Wang, Z., Zhang, Y., Fan, S., Jiang, Y. and Li, J. (2020) Determination of Moisture Content of Single Maize Seed by Using Long-Wave Near-Infrared Hyperspectral Imaging (LWNIR) Coupled with UVE-SPA Combination Variable Selection Method. *IEEE Access*, **8**, 195229-195239. https://doi.org/10.1109/access.2020.3033582

[23] 金诚谦, 郭榛, 张静, 马成业, 唐小涵, 赵男, 印祥. 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.

[24] Huang, M., Zhao, W., Wang, Q., Zhang, M. and Zhu, Q. (2015) Prediction of Moisture Content Uniformity Using Hyperspectral Imaging Technology during the Drying of Maize Kernel. *International Agrophysics*, **29**, 39-46. https://doi.org/10.1515/intag-2015-0012

[25] Ivanenko, T.Y., Fomenko, E.V., Morozov, E.V., Matsulev, A.N., Lutoshkin, M.A., Shestakov, N.P., *et al*. (2025) Determination of Spectral Characteristics and Moisture Distribution in Wheat Grains after Sorption, Thermal, and Natural Drying. *International Journal of Molecular Sciences*, **26**, Article No. 8952. https://doi.org/10.3390/ijms26188952

[26] 吴静珠, 李晓琪, 孙丽娟, 刘翠玲, 孙晓荣, 余乐. 太赫兹时域光谱及成像技术在农作物品质检测中的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(2): 358-367.

[27] Ge, H., Lv, M., Lu, X., Jiang, Y., Wu, G., Li, G., *et al*. (2021) Applications of THz Spectral Imaging in the Detection of Agricultural Products. *Photonics*, **8**, Article No. 518. https://doi.org/10.3390/photonics8110518

[28] 吴静珠, 李晓琪, 孙丽娟, 刘翠玲, 孙晓荣, 孙梅, 余乐. 基于 THz-ATR 光谱的玉米种子水分定量模型优化方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(7): 2005-2011.

[29] Li, B., Wang, R., Ma, J. and Xu, W. (2020) Research on Crop Water Status Monitoring and Diagnosis by Terahertz Imaging. *Frontiers in Physics*, **8**, Article ID: 571628. https://doi.org/10.3389/fphy.2020.571628

[30] Trabelsi, S., Krazsewski, A.W. and Nelson, S.O. (1998) New Density-Independent Calibration Function for Microwave Sensing of Moisture Content in Particulate Materials. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **47**, 613-622. https://doi.org/10.1109/19.744310

[31] Soltani, M. and Alimardani, F. (2012) Moisture Content Prediction of Iranian Wheat Using Dielectric Technique. *Journal of Food Science and Technology*, **51**, 3500-3504. https://doi.org/10.1007/s13197-012-0845-2

[32] 郭交, 段凯文, 郭文川. 基于微波自由空间测量的小麦含水率检测方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 338-343, 378.

[33] Cataltas, O. and Tutuncu, K. (2023) Detection of Protein, Starch, Oil, and Moisture Content of Corn Kernels Using One-Dimensional Convolutional Autoencoder and Near-Infrared Spectroscopy. *PeerJ Computer Science*, **9**, e1266. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1266

[34] 王超鹏, 黄文倩, 樊书祥, 张保华, 刘宸, 王晓彬, 陈立平. 基于高光谱成像技术与 CARS 算法的玉米种子含水率检测[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 123001.

[35] LeBlanc, A.P., Trabelsi, S., Rasheed, K. and Miller, J.A. (2025) Machine Learning Algorithms for Nondestructive Sensing of Moisture Content in Grain and Seed. *IEEE Open Journal of Instrumentation and Measurement*, **4**, 1-14. https://doi.org/10.1109/ojim.2025.3568080

[36] Zou, Z., Ku, Q., Li, M., Yuan, D., Zhen, J., Wang, Q., *et al*. (2025) A Method for Monitoring Moisture Content in Maize Seeds Using a Deep Temporal Network Based on Hyperspectral Features. *Journal of Food Composition and Analysis*, **148**, Article ID: 108609. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.108609

[37] Yang, H. and Sheng, K. (2012) Characterization of Biochar Properties Affected by Different Pyrolysis Temperatures Using Visible-Near-Infrared Spectroscopy. *ISRN Spectroscopy*, **2012**, Article ID: 712837. https://doi.org/10.5402/2012/712837

[38] Contreras, J. and Bocklitz, T. (2024) Explainable Artificial Intelligence for Spectroscopy Data: A Review. *Pflügers Archiv-European Journal of Physiology*, **477**, 603-615. https://doi.org/10.1007/s00424-024-02997-y

[39] Wu, C., Yang, S., Zeng, K., Dai, X., Duan, Y., Zhang, S., *et al*. (2025) Physics-Informed Deep Learning for Plasmonic Sensing of Nanoscale Protein Dynamics in Solution. *Science Advances*, **11**, eadw0783. https://doi.org/10.1126/sciadv.adw0783