基于可见–近红外光谱的土壤氮磷钾检测研究进展

刘洪旭
大连市现代农业生产发展服务中心　辽宁　大连　116000

摘　要：土壤氮磷钾是衡量土壤肥力水平的核心指标，也是指导农田精准施肥与耕地质量评价的重要依据。本文系统梳理可见-近红外光谱用于土壤氮磷钾检测的完整技术体系，从土壤光谱采集规范、噪声干扰机制、光谱预处理方法等基础技术入手，总结各类特征筛选算法、传统线性模型、机器学习模型及深度学习模型的研究进展，对比不同定量模型对土壤氮、磷、钾养分的检测精度与稳定性能，分析现阶段光谱检测技术存在的信号微弱、环境干扰难消除、模型通用性不足、标准化体系不完善等现实问题。

关键词：可见-近红外光谱；土壤；氮磷钾；检测

引言

现阶段国内外针对土壤氮磷钾光谱检测已经形成大量研究成果，涵盖光谱采集优化、预处理算法改进、特征变量筛选、定量建模优化等多个方向。不同建模算法、预处理组合方式对养分检测效果差异明显，各类模型的适配场景、精度水平和稳定特性仍缺乏系统性梳理。同时田间复杂土壤环境带来的光谱干扰、弱养分信号识别困难、模型泛化能力不足等问题，依旧制约着光谱检测技术的落地应用。

1 土壤光谱数据采集与预处理技术进展

1.1 土壤样品制备与光谱采集方式

（1）室内光谱采集是目前技术体系最为成熟、数据稳定性最高的采集方式。该模式需要对采集的原状土壤样品进行统一规范化处理，去除土壤内部混杂的石块、植物残体以及各类杂质，规避异物对光谱信号的干扰。处理完成的土壤样品需要置于自然环境下充分风干，弱化土壤水分带来的光谱偏移影响。风干后的土壤需要经过研磨和过筛处理，统一土壤颗粒粒径标准，最大程度降低土壤粗糙度和结构差异造成的光谱散射误差。经过标准化制备的土壤样品，可以在恒温恒湿的密闭实验环境中完成光谱扫描。（2）野外原位光谱采集属于快速无损检测的主流发展方向，无需对土壤样品进行取样和实验室预处理工作。该采集方式直接在田间原位完成光谱扫描作业，能够最大程度保留土壤的原始状态，包括土壤含水率、原状结构和表层覆盖情况等真实田间属性。（3）野外原位采集容易受到自然环境的综合干扰，外界光照强度变化、空气湿度、表层杂草残茬以及土壤表层微结构差异，都会对原始光谱信号造成噪声影响，导致采集数据波动幅度更大。相较于室内标准化采集模式，原位采集的数据稳定性相对偏弱，对后期光谱预处理和模型校正的依赖程度更高。两种采集方式各有优劣，在实际土壤氮磷钾光谱研究中，通常会根据检测精度需求、检测范围和试验条件灵活选用，以此兼顾检测效率与数据精度。

1.2 常见光谱噪声来源与干扰因素

（1）土壤水分是影响光谱信号最为突出的干扰因子。水分子在可见 近红外区间具备多处强吸收特征，土壤中不同含量的水分会改变整体光谱反射率水平。水分的吸收信号强度远大于氮磷钾养分产生的光谱响应，会对养分的特征波段形成覆盖和掩蔽效应。土壤含水率发生小幅波动，就可以引起整条光谱曲线的明显变化，直接干扰养分信息的提取。即便是少量残留水分，也会增加原始光谱的噪声水平，给氮磷钾定量反演带来阻碍。（2）土壤颗粒粒度会通过散射作用改变光谱反射特征[1]。不同粒径的土壤颗粒对入射光线的散射能力存在明显区别，颗粒粗细变化会直接改变光谱基线的高低走势。即便土壤养分组分保持不变，仅仅颗粒大小发生改变，也会造成反射光谱出现系统性偏移。颗粒不均匀带来的散射噪声，会混淆养分本身的光谱特征，增大样本之间的光谱差异，进而降低模型的泛化性能。（3）土壤盐分也会引入不可忽视的光谱干扰。盐分晶体可以改变土壤表层光学特性，改变光线散射路径。盐分的离子基团会带来局部吸收特征，同时盐分积累还会间接改变土壤团聚状态，间接改变光谱反射水平。盐分带来的扰动属于叠加型噪声，不会完全淹没养分信号，但会加大样本之间光谱的离散程度，使得模型训练过程中误差持续增加。

1.3 光谱预处理技术应用进展

（1）平滑去噪是光谱预处理最基础的操作方式，主要用于消除光谱采集过程中设备波动、环境扰动带来的高频随机噪声。原始光谱曲线常会出现无规律的细小波

动，这类波动不具备土壤养分的特征意义，只会增加数据的离散误差。平滑处理可以在保留光谱整体变化趋势和特征吸收峰的基础上，弱化局部杂乱波动，让光谱曲线更加规整平稳。现阶段相关技术研究主要集中在优化平滑窗口参数，适配不同土壤样本的噪声特征，避免过度平滑造成有效养分光谱信息丢失的问题。（2）基线校正技术主要用于解决光谱基线偏移和整体漂移的问题。受土壤底色差异、环境光线微弱变化以及设备初始参数浮动的影响，不同土壤样本的光谱基线会出现高低不一的情况[2]。这种系统性偏差会造成样本光谱数据对比失衡，干扰养分含量与光谱反射率的对应关系。基线校正可以统一所有样本的光谱基准位置，消除非养分因素带来的整体光谱偏移，强化不同样本之间光谱数据的可比性，为后续数据建模提供统一的数据基础。（3）散射校正专门用于消除土壤颗粒不均匀、表面粗糙带来的散射干扰效应。土壤样本粒径差异、团聚结构不同都会引发多重散射现象，造成光谱数据出现系统性偏差，掩盖真实的养分光谱响应。散射校正能够有效剥离颗粒散射带来的无效信号，最大程度还原土壤化学成分对应的光谱特征，大幅降低土壤物理性状对检测结果的负面影响，显著提升模型的通用适配能力。

2 土壤氮磷钾光谱定量反演模型研究进展

2.1 传统线性回归模型应用进展

（1）多元线性回归是基础的线性建模方式，通过筛选若干典型光谱特征波段，建立波段反射率与土壤氮磷钾养分含量的线性拟合关系。该模型的核心应用优势在于变量关系直观，物理意义清晰，能够直接体现特定光谱区间对土壤养分的响应作用[3]。在光谱干扰较少、样本数据分布均匀、养分与光谱参数线性关联显著的场景中，可以快速构建稳定的预测模型。但该模型自身存在明显局限性，无法处理多重共线性较强的光谱数据，对全波段海量光谱信息的利用率较低，在土壤组分复杂、干扰因素较多的场景下预测精度会出现明显下降。（2）偏最小二乘回归是现阶段线性模型中适配性最优、应用范围最广的光谱建模方法。该算法可以同时整合光谱自变量与土壤养分因变量的数据信息，在提取主成分的同时保留与养分高度相关的有效光谱信息。能够有效解决光谱变量多重共线性、样本数量有限、有效特征信号微弱等常见问题，大幅适配土壤光谱数据维度高、噪声残留多的数据特点。相比于传统多元线性回归，偏最小二乘回归可以充分利用全波段光谱数据，挖掘隐藏在海量光谱信息中的微弱养分响应特征。（3）目前国内相关研究大多聚焦于结合不同预处理方式、特征筛选算法优化偏最小二乘模型的拟合效果。通过搭配不同的光谱降噪、基线校正与特征提取手段，逐步提升模型对土壤氮磷钾的预测精度。虽然线性模型难以完全拟合土壤光谱与养分之间的微弱非线性关联，整体精度上限有限，但凭借极强的稳定性与可解释性，依旧是土壤养分光谱检测的基础优选模型，也为后续非线性智能模型的优化迭代提供了重要的数据与理论支撑。

2.2 机器学习模型研究进展

（1）支持向量机是适配小样本、高维度光谱数据的经典机器学习算法，在土壤养分光谱建模中应用广泛。该算法可以通过高维空间映射的方式，处理光谱变量与氮磷钾养分之间的非线性对应关系，有效规避传统线性模型拟合度不足的问题。其核心优势是具备良好的泛化能力，能够有效解决光谱数据维度高、样本分布不均、有效特征信号分散等常见问题，降低模型过拟合风险。在土壤组分差异较大、光谱干扰复杂的样本集中，支持向量机的预测稳定性和精度都显著优于传统线性模型，常被用于优化复杂土壤养分的定量反演效果。（2）随机森林属于集成类机器学习算法，依托多棵决策树并行运算完成数据建模与预测工作。该模型可以自主筛选光谱有效特征，弱化无效噪声波段对建模结果的影响，具备极强的抗干扰能力与容错性。随机森林能够精准捕捉土壤光谱中隐藏的微弱养分特征，适配氮磷钾养分光谱响应信号弱、易被背景干扰覆盖的特点。同时算法可以输出特征重要性参数，直观区分不同光谱波段对养分检测的贡献程度，为光谱特征筛选提供数据支撑，在大样本土壤光谱数据集建模中优势尤为突出。（3）BP神经网络是一种多层前馈式神经网络模型，具备极强的自主学习和非线性拟合能力。模型可以通过反向传播算法持续修正网络权值与阈值，不断缩小养分预测值与实测值的误差，深度拟合复杂的光谱养分关联规律。相比于其他算法，BP神经网络可以处理更加复杂的光谱数据映射关系，适配多因素耦合干扰下的土壤光谱建模场景。

2.3 深度学习模型最新应用成果

（1）CNN卷积神经网络具备优异的局部特征提取与降噪能力，十分适配一维土壤可见近红外光谱数据的分析处理。该模型可以通过卷积层与池化层的逐层运算，自主筛选光谱序列中的有效特征波段，自动过滤采集过程残留的随机噪声和无效背景信息，减少人工特征筛选带来的主观性误差。深度卷积网络可以实现光谱细节信息的分层提取，精准捕捉氮磷钾养分对应的细微光谱吸收特征，有效解决传统模型对微弱养分信号识别不足的问题。近年研究多通过优化网络层数、卷积核尺寸与损

失函数，适配不同类型土壤的光谱数据，进一步提升模型对复杂土壤样本的拟合精度。（2）Transformer模型是近期光谱检测领域的创新型深度学习架构，依托多头自注意力机制突破了传统模型局部感受野的限制。该模型可以对全光谱波段进行全局关联性分析，自主捕捉不同光谱区间的长距离依赖关系，精准定位被多重土壤干扰掩盖的养分敏感波段。相比于卷积网络，Transformer能够更全面解析高维光谱数据的整体特征，有效解决光谱信号重叠、特征混杂等难题，对土壤氮磷钾这类弱响应养分的识别效果提升尤为明显[4]。（3）目前行业研究不再局限于单一模型的独立应用，更多转向CNN与Transformer的融合建模思路。结合卷积网络局部精细特征提取优势和Transformer全局特征关联分析能力，构建复合型深度预测模型，能够兼顾光谱细节信息与全局波段关联规律。这类融合模型可以有效抵御土壤水分有机质等耦合干扰，大幅提升模型在不同土壤类型、不同检测场景下的稳定性与通用性，成为现阶段土壤氮磷钾光谱高精度检测的核心发展方向，持续推动光谱检测技术从实验室精准建模向田间实际规模化应用过渡。

2.4 不同模型对土壤氮、磷、钾检测的精度与稳定性对比

（1）传统线性模型整体运行稳定性较高，模型结构简单且拟合逻辑固定，不容易出现过拟合的问题。这类模型对于光谱响应特征相对明显的土壤氮元素具备较好的检测适配性，预测结果波动较小，数据重复性表现良好。但线性模型的非线性拟合能力偏弱，无法拆解复杂的光谱重叠信息。土壤磷元素和钾元素本身光谱信号微弱，极易被土壤有机质和水分干扰，线性模型很难捕捉其有效特征，最终检测精度普遍偏低，整体拟合效果难以满足高精度检测要求。（2）常规机器学习模型的综合检测能力优于线性模型，对三类养分的适配范围更加广泛。这类模型可以自主拟合光谱数据与养分含量的非线性关联，有效处理复杂土壤背景带来的信号干扰。在氮元素检测中，机器学习模型相比线性模型精度提升幅度有限，但数据适应性更强。（3）深度学习模型在检测精度层面具备明显优势，融合卷积与注意力机制的深度网络可以分层提取精细光谱特征，精准剥离各类背景干扰。深度学习模型对氮磷钾三类养分均表现出良好的拟合效果，尤其适配磷钾弱信号养分的反演检测，能够突破传统模型的精度上限[5]。但复杂深度学习结构参数量大，对样本数量和数据质量要求更高，小样本条件下容易出现过拟合问题，造成模型稳定性下降。

结束语

综上所述，线性模型稳定性强但难以拟合养分微弱非线性光谱特征。机器学习模型适配性更广，能够有效提升复杂土壤样本的检测精度。深度学习模型凭借全局特征挖掘能力，在磷钾弱信号养分检测中优势显著，是现阶段技术研究的核心热点。但目前光谱检测技术仍存在明显短板，土壤复杂耦合干扰难以彻底消除，养分光谱特征微弱导致模型通用性不足，野外原位检测精度远低于室内检测，行业统一标准化体系尚未完善。

参考文献

[1]郭文川,马恒,龚城圩,等.基于可见/近红外光谱的中国北方苹果园土壤有机质含量检测方法[J].农业机械学报,2026,57(9):350-357.

[2]张付杰,曾庆宇,孔丹丹,等.基于近红外光谱技术结合机器学习的咖啡粉掺假检测分析[J].食品科学,2026,47(1):309-316.

[3]贾碎林,徐晓彬,陈光东,等.功能性近红外光谱检测对酒精依赖综合征复发的预测价值研究[J].浙江医学,2026,48(3):250-256.

[4]吕博文,温馨,李军乔,等.基于近红外光谱分析技术的蕨麻产地判别及定量检测模型评价[J].草业学报,2026,35(1):140-153.

[5]陈卓,白林,张成宇,等.功能性近红外光谱技术在失眠障碍中的应用进展[J].分子影像学杂志,2026,49(4):522-528.