

# 光谱技术在土壤水分含量检测中的研究进展

李鑫星<sup>1</sup>, 梁步稳<sup>1</sup>, 白雪冰<sup>1</sup>, 李娜<sup>2\*</sup>

1. 中国农业大学信息与电气工程学院食品质量与安全北京实验室, 北京 100083

2. 承德石油高等专科学校工业技术中心, 河北 承德 067000

**摘要** 土壤水分是影响农业生产的重要因素之一, 对农作物生长发育情况和最终产量起着关键的作用, 然而农业用水浪费现象普遍存在, 预计至2020年我国灌溉水利用系数仅为0.55, 远低于0.7~0.8的世界先进水平, 因此准确地判断土壤含水量丰缺情况对农业生产实践具有重要意义, 光谱技术利用物体特征谱线的不同, 能够同时获取目标的图像信息和光谱信息, 从而更直观地表达目标的特征, 从而精确、快速、无损地对土壤水分的含量进行动态的检测, 该技术极大地促进了农业的精准化、智能化和现代化, 在土壤水分含量检测中占有重要地位。文章综述了国内外土壤水分含量检测的最新文献, 对基于光谱技术的土壤水分含量检测的研究进展进行了系统地讨论, 分析了传统方法的不足, 并阐述了光谱成像技术的优势: (1)实时性; (2)无损性; (3)精确性; 及其在土壤水分含量检测中的局限性: (1)土壤的构造复杂; (2)泛化能力不足; (3)气候条件制约。重点阐述了光谱在土壤水分检测中的三个关键技术: (1)光谱数据预处理技术, 重点对比了常见的预处理技术原理及其效果; (2)光谱特征提取技术, 对比了常见的特征光谱提取方法, 重点分析了土壤水分的敏感波段; (3)光谱建模技术, 重点对比了土壤水分含量检测的线性和非线性模型, 分析其原理、应用范围及模型精度, 得出非线性模型将成为光谱技术在土壤水分含量检测的主流建模方法。最后依据上述分析, 对光谱技术在土壤水分检测领域中的应用前景和研究趋势进行了展望: 一是要提高该技术的泛化能力和鲁棒性, 建立可用于多种土壤类型的水分检测模型; 二是要建立大范围区域并动态实时更新的土壤光谱数据库, 为提高模型精度做好数据基础。

**关键词** 光谱技术; 土壤水分检测; 光谱预处理; 光谱特征提取; 光谱建模

**中图分类号:** O657.3 **文献标识码:** R **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)12-3705-06

## 引言

土壤是影响农业生产的重要因素之一, 是保障农作物品质、产量和区域生态环境稳定的基础。目前我国面临土壤资源紧张、农业用水资源相对紧缺等重大挑战, 截至2018年, 我国人均水资源量 $2\,007.57\text{ m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$ , 不足世界的三分之一, 年总用水量 $6\,110.00\text{ 亿 m}^3$ , 农业用水 $3\,807.00\text{ 亿 m}^3$ , 农业用水占据全国总用水量的 $2/3$ 。然而, 农业用水利用率较低, 高效利用水资源已成为农业生产亟待解决的问题<sup>[1-3]</sup>。如何节约土壤水资源, 精确地检测土壤水分含量, 保证作物的生产已经成为目前研究的热点问题。

传统获取土壤水分含量的方法包括取样测定法(烘干法、核磁共振法等)和定点测定法(中子仪法、时域反射仪法等), 虽然可以精确地获取地面部分区域的含水量数据, 但成本高、时效性差, 少量的单点数据无法反映全部土壤的含水情况, 不适用于农业生产<sup>[4-5]</sup>。因此土壤水分含量检测亟需从静态向动态、实时持续高效的监测, 而光谱土壤水分检测技术正适应这种发展的需求。

光谱技术具有快速性、精确性和无损性等特点<sup>[6-7]</sup>, 近五年来国内外光谱技术在土壤水分含量检测领域应用有很多报道, 本文对光谱技术在土壤水分含量检测中的优势和局限性进行了总结, 阐述了光谱土壤水分含量检测的关键技术并展望其发展趋势, 为土壤水分研究提供系统的综合参考。

收稿日期: 2019-10-15, 修订日期: 2020-02-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0201502)资助

作者简介: 李鑫星, 1983年生, 中国农业大学信息与电气工程学院食品质量与安全北京实验室副教授 e-mail: lxxcau@cau.edu.cn

\* 通讯联系人 e-mail: cdpn\_ln@cdpc.edu.cn

## 1 光谱土壤水分含量检测技术概述

土壤是一个多因素的综合系统,在保持其他因素一致的情况下,土壤水分含量对土壤光谱有着重要的影响,因此,建立特定的波谱组合能够有效地反映土壤水分含量的变化<sup>[8-9]</sup>。基于光谱的土壤水分含量检测技术,可以精确、快速、无损地对土壤水分含量进行实时动态的检测,其在土壤水分检测的研究中表现出非凡的潜力。

### 1.1 光谱技术的特点

光谱土壤水分分析技术是利用土壤介质的物理结构和化学性质的不同,有效地检测土壤水分含量,与传统土壤水分含量检测方法相比有比较明显的优势,是目前获取土壤水分数据的最重要手段<sup>[10]</sup>,具体的优势表现为以下三个方面:

(1)实时性。传统的土壤水分含量检测方法需对特定的坐标点进行检测,效率低、时效性差,难以对大面积区域进行检测,而光谱技术可以利用遥感平台搭载光谱传感器快速获取检测区域的全部土壤光谱信息,并对含水量进行预测,达到实时检测的效果<sup>[11]</sup>。

(2)无损性。光谱土壤水分检测技术仅需要通过传感器来获取土壤的光谱信息,无需损害土壤的内部物理构造和化学性质,保证了土壤水分含量不因检测而发生改变,因此保证了土壤水分含量的准确性<sup>[12]</sup>。

(3)精确性。不同的土壤含水量和土壤中不同物质对应光谱反射率曲线中不同的特征吸收峰谷,光谱传感器可同时获取土壤的图像数据和光谱数据,并提取土壤光谱数据的敏感波段。由该数据建立的土壤检测模型较为精确,因此目前已成功应用于便携式土壤含水量传感器。

### 1.2 光谱技术的局限性

(1)土壤的构造复杂。土壤是由母质在气候、地形、生物等因素经过长时间形成的复杂系统,并随气候环境变化而不断改变,任一影响因子的改变都可能导致土壤光谱的改变,因此土壤光谱具有时空变异性。采集的光谱数据中包含了较多的干扰物质,而研究中仅需利用对水分敏感性较强的波段。目前解决办法均是对数据进行预处理,消除其他信息的影响,增强水分敏感波段的光谱特征<sup>[13]</sup>。

(2)泛化能力不足。土壤由多种物质组成,有机质含量、盐分含量等和粒径大小对光谱有很大影响,不同物质的含量会导致土壤光谱的水分敏感波段的不同,进而影响光谱模型的适用性和泛化能力,因此多数光谱土壤水分检测模型仅针对某一地区或某种土壤类型进行研究<sup>[14-15]</sup>。

(3)气候条件制约。光谱数据采集条件要求要高,需要考虑光照、风力等天气的影响,恶劣的气候条件下采集的数据误差较大,为保证测量的精确性,采集需要在环境理想的条件下进行。

### 1.3 光谱技术的分类

(1)基于光谱分辨率。针对光谱分辨能力的不同,光谱可分为多光谱、高光谱和超光谱。随着光谱分辨率的不断提高,可获得更多的土壤信息,根据光谱特性的差异更容易判断土壤水分的丰缺情况<sup>[16]</sup>。

(2)基于信息获取方式。一是通过卫星、无人机等航空航天平台携带的传感器采集数据,该方法具有获取数据量大,效率高等优点,但是易受到气候环境的严重影响;二是使用地物光谱仪或成像高光谱仪直接进行光谱数据的获取,该方法获取的数据较为精确,但是采集数据速度较慢<sup>[17]</sup>。

(3)基于波段。综述目前国内外光谱土壤水分检测技术的研究现状,多数研究者基于可见光—近红外之间土壤水分含量与光谱的关系进行检测,少数研究者使用热红外波段通过辐射平衡估算土壤水分,或通过微波和紫外波段进行检测<sup>[18-20]</sup>。

## 2 光谱土壤水分含量检测中关键技术

了解光谱土壤水分检测中的关键技术并深入探讨基于光谱技术在土壤水分含量检测中的可行性十分必要。第一,对原始的光谱数据预处理;第二,提取对土壤水分敏感的光谱特征;第三,建立土壤水分含量检测模型并进行验证。

### 2.1 光谱预处理技术

光谱数据的采集和建模过程中存在由不同因素引起的实验误差,为建立一个更加稳定、准确的光谱土壤水分检测模型,需对数据进行预处理,消除干扰信息,突出土壤水分光谱的吸收和反射峰谷,提取有效信息<sup>[18-22]</sup>。不同的预处理方法如表 1 所示。

(1)Savitzky-Golay 平滑算法(S-G)。S-G 算法通过多项式最小二乘拟合,计算出窗口内中心点关于其周围点的加权平均和。该算法相比于其他算法更稳定、误差更小,适用于去除土壤光谱中出现下高频光谱信号<sup>[23]</sup>,采用 S-G 算法有效地减弱了其他因素对土壤水分的影响,但该算法也会削弱水分的敏感波段,因此需要在土壤水分光谱中寻求去噪不足和过度去噪之间的平衡点,但目前对光谱的去噪平衡点很难确定<sup>[27]</sup>。

(2)多元散射校正(MSC)。该算法将采集的数据与标准光谱进行一元线性回归运算,增强了与主成分含量相关的光谱信息<sup>[24]</sup>,可以增强土壤光谱中水分的信息,消除分布不均匀产生的散射影响。MSC 算法在去除大气散射和消除土壤粒径大小影响的效果较好,因此最适用于气候条件不佳和土壤粒径问题的光谱信息的预处理。

(3)微分处理。微分适用于消除背景的影响,根据微分的不同阶数,可以显示光谱的变化规律,突出光谱曲线的波峰波谷。Morellos 等<sup>[25-26]</sup>采用一阶微分的方法,对比了多种土壤光谱的变化规律,突出了土壤水分的特征波段,为建模提供了精确的数据支持。

### 2.2 特征光谱提取算法

采集的光谱数据能显示丰富的空间、光谱、辐射信息,不仅包含光谱土壤水分检测所需的特定光谱数据,而且还包含大量的冗余数据和无关信息,与全波长范围相比,特定变量选择重要的波长范围会得到性能更好的模型<sup>[28]</sup>,因此选取适当的特征光谱提取算法来降低数据的冗余程度和无关信息,可以提高光谱土壤水分检测模型的精度,优化预测模型的性能。常见的光谱特征波段选择方法如表 2 所示。

表 1 光谱预处理技术特点分析

Table 1 Characteristic analysis of spectral pretreatment technology

| 方法  | 原理  | 特点                                  | 参考文献    |
|---|---|-------------------------------------|---------|
| Savitzky-Golay 平滑算法<br>Savitzky-Golay smoothing algorithm(SG) | $X_i^* = \frac{\sum_{j=-l}^l X_{i+j} W_j}{\sum_{j=-l}^l W_j}$ <p><math>W_j</math> 是移动窗口平滑中的权重因子(窗口长度 <math>2l+1</math>)</p> | 不受样本数据限制, 适用于光谱信号的稳定去噪, 对高频噪音消除效果较好 | [23]    |
| 多元散射校正<br>Multiplicative scatter correction(MSC)              | $X_i^* = \frac{\bar{X}_i - b_i}{m_i}$ <p><math>m_i</math> 和 <math>b_i</math> 表示 <math>X_i</math> 与线性回归后的相对偏移系数和平移量</p>      | 消除分布不均匀和颗粒大小造成的散射影响                 | [24]    |
| 微分处理<br>Differential algorithm                                | $X_i^* = \frac{X_{i+g} - X_i}{g}$ <p><math>G</math> 为差分宽度</p>   | 消除背景干扰的影响, 突出光谱变化规律                 | [25-26] |

注:  $X_i^*$  是校正后的数据值,  $X_i$  是原数据值,  $\bar{X}_i$  是样本光谱的平均值

表 2 特征提取算法的对比分析

Table 2 Comparative analysis of feature extraction algorithms

| 方法   | 特点                           | 适用范围                       | 参考文献 |
|--|------------------------------|----------------------------|------|
| 包络线消除法<br>(continuum-removal, C-R)           | 具有降低非目标光谱数据影响, 扩大水分吸收特征信息的优势 | 适用于单一敏感波段特征提取              | [25] |
| 主成分分析<br>(principal component analysis, PCA) | 将众多且较强相关性的光谱数据转化为维数较少的特征信息   | 适用于多因素的光谱特征提取, 使其主要的特征信息保留 |      |
| 遗传算法<br>(genetic algorithm, GA)              | 具有全局搜索手段和的可拓展性               | 多与机器学习结合提取信息               |      |

(1)包络线消除法(C-R)。以包络线作为背景, 去掉包络线, 即可有效突出单个感兴趣的光谱吸收特征。有研究发现土壤光谱曲线一般情况下差异不大, 利用 C-R 算法可以突出土壤光谱中某一具体光谱特征, 例如土壤水分, 并确定土壤水分最为敏感的波段为 1 481 和 1 616 nm, 为精确建模奠定了基础。

(2)主成分分析法(PCA)。通过正交变换将存在相关性的光谱信息转换为线性不相关的特征信息。该算法不破坏原始的光谱信息, 适用于对大规模数据的处理, 提取所需光谱信息, 例如 Morellos 等<sup>[25]</sup> 基于 PCA 算法可以准确提取大样本土壤光谱中水分敏感信息, 减少其他因素对水分敏感波段的影响。

(3)遗传算法(GA)。GA 算法通过模仿自然界的遗传机理来寻找最优信息的全局优化算法。虽然通过牺牲效率来保证精度, 但其具有可拓展性、易与其他算法结合等优点。有研究利用 GA 算法提取归一化水体指数, 效果较好; 将优化遗传算法与连续投影算法结合, 达到了较好的效果。

2.3 土壤水分检测模型的建立

光谱技术改进了特定的农业特征的模型, 极大地提升了土壤水分含量检测的精度和效率, 使有效评估农业特性方面得到了显著增强。目前利用土壤光谱特性建立土壤水分检测模型的方法主要分为一元线性模型、多元线性模型和其他非

线性模型。线性模型高效简便且精度较高, 非线性模型较为复杂但是具有更好的泛化性能<sup>[29,32]</sup>。常见的光谱建模算法如表 3 所示。

(1)一元线性模型。自 20 世纪 70 年代, Bowers 等<sup>[33]</sup> 研究发现土壤水分和光谱特征有显著相关性并建立土壤水分检测模型, 光谱土壤水分检测技术正式进入到应用阶段。有研究基于特定单一波段已建立指数、倒数、对数等大量一元模型。一元模型面向单一波长, 建模流程简单且精确性较高, 但不具有普遍性<sup>[34-35]</sup>, 仅适用于特定的区域和时间, 不适合进行大区域统一的土壤水分检测。

(2)多元线性模型。多元线性模型在一元模型的基础上考虑数个光谱水分敏感波段或加入其他外界因素对土壤水分的影响, 有研究采用 1 481 和 1 616 nm 等多个波段与土壤水分含量的关系建立多元线性回归模型; 有报道在多光谱的基础上增添了气候地形植被等外界影响因子, 大大提高模型的精度和适用范围。用少量的关键参数可以有效地建立土壤水分模型, 高效简便, 适用性相比于一元线性模型有很大的提高。

(3)非线性模型。土壤水分含量与光谱特征曲线有着极大的相关性, 然而二者并不是理想的线性关系, 使用线性模型进行预测无法达到预期的效果, 非线性模型可以更好地反映土壤水分含量与特征曲线的关系。目前土壤水分含量检测

表 3 光谱建模方法的特点分析  
Table 3 Characteristic analysis of spectral modeling methods

| 类型   | 建模方法   | 土壤类型      | 模型精度测试集   | 参考文献 |
|------|--|-----------|---|------|
| 一元线性 | 一元线性 $y=1.271x-0.0151$                         | 浙江省红壤     | 验证集 $r=0.9665$ , RMSE=0.0121  |      |
|      | 一元线性 $y=17.706-2.167x$                         | 北京郊区褐土    | 建模集 $R_2=0.935$ , 验证集 $R_2=0.936$                                     |      |
| 多元线性 | 多元线性模型<br>(multiple regression analysis, MRA)  | 新疆干旱区土壤   | 多种线性模型, 建模集<br>最高精度可达 $R_2=0.963$                                     | [30] |
|      | 偏最小二乘<br>(partial least-square method, PLS)    | 银川地区半干旱土壤 | $R_2=0.976$   |      |
|      | 支持向量机<br>(support vector machine, SVM)         | 新疆绿洲干旱区土壤 | 建模集 $R_2=0.86$ , RMSE=4.16<br>验证集 $R_2=0.92$ , RMSE=2.83              |      |
|      | 高斯核函数支持向量机                                     | 德国半湿润性黏土  | 建模集 $R_2=0.983$ , RMSEP=0.457   |      |
| 非线性  | 多关联向量机<br>(relevance vector machines, RVM)     | 犹他州半干旱土壤  | Bubble 验证集 RMSE=0.06<br>Laplace 验证集 RMSE=0.08<br>Cauchy 验证集 RMSE=0.10 | [31] |
|      | 卷积神经网络<br>(convolutional neural networks, CNN) | 江苏句容市湿润黏土 | 建模集 $R_2=0.968$ , RMSE=0.57<br>验证 $R_2=0.956$ , RMSE=0.804            |      |

的非线性建模主要有机器学习和人工神经网络两种建模方法。

向量机目前被广泛应用于光谱建模的领域。Morellos 等<sup>[25,33]</sup>通过对比在不同核函数支持向量机(SVM)的效果,选择高斯核函数,得到了精度较高的检测模型,然而传统的 SVM 无法适用于大样本数据的训练。随着光谱数据的海量化,为得到更好的检测速率和模型性能,国内外研究者开始使用相关向量机(RVM)对光谱数据进行建模。RVM 具有接近于 SVM 的精度,但其速度更快,更加适合处理大量数据,因此 Alfonso 等<sup>[31]</sup>基于美国犹他州大区域的海量光谱数据建立了 RVM 非线性土壤水分检测模型。

人工神经网络通过模仿人类的中枢神经系统,可以通过外界的数据改变内部结构,具有很强的自学习和自适应能力,在非线性模型上取得较好的效果,是目前土壤水分检测模型研究的最前沿问题。该方法简化了土壤光谱数据的预处理要求,考虑所有的外界影响因子及时空信息,有效地提取所需波段,且泛化能力强,模型精度高。例如 Hassan-Esfahani 等<sup>[32,36]</sup>利用不同的人工神经网络(BP, RBF 和 CNN 等),将气候、环境和时间等影响因子和土壤光谱数据作为输入量,建立多层网络模型,因此这些模型在不同天气情况、尺度、时间及地区的土壤水分检测中有较优良的性能。

3 光谱土壤水分检测技术的发展趋势

光谱技术在土壤水分检测中的应用前景十分广泛,目前取得了一定的成果,光谱检测的实时性、无损性和准确性,

大大提高了土壤水资源的利用率,促进了精准农业、智慧农业的发展。

(1)光谱数据的处理的精度、效率将不断提高。传统的光谱数据存在不一致和冗余度高等问题。未来预处理和特征提取算法的不断创新与发展,应更加注重提高算法对实际数据采集环境和尺度的适应能力,消除其他因素对光谱的影响,保证数据的准确性。

(2)光谱建模技术逐渐由线性模型向非线性模型发展,非线性模型考虑区域大小、采集数据的环境和土壤的内部构造等因素的影响,因此非线性模型建模难度较大,但是其鲁棒性和实际泛化性优于传统线性建模方法。研究多种土壤的光谱特征,考虑地理、气候环境的影响,建立通用于多种土壤类型的光谱水分检测模型是未来研究的重点。

(3)基于 SVM 和人工神经网络的土壤水分检测方法能够有效解决泛化能力不足和精确度较低等问题,但目前仅是比较经典的模型与土壤光谱相结合,如 BP 神经网络、SVM 等,很少将最新的机器学习或深度学习算法如 Xgboost、CNN 等与土壤光谱相结合。未来的重要研究方向是结合光谱数据的特点和土壤系统的复杂性,提出或改进最新的神经网络模型或支持向量机,将更为先进、优良的模型应用于土壤水分含量检测上,提高土壤水分检测模型的精确性和泛化能力。

(4)目前土壤水分检测技术的重要发展趋势是加强土壤光谱数据库的建设,实现全国乃至全球范围内的土壤光谱数据共享,为模型提供数据支持<sup>[37]</sup>,如机器学习的精度和泛化能力依赖于训练样本的数量与精确性。

References

[1] The National Bureau of Statistics(国家统计局). China Statistical Yearbook(中国统计年鉴), 2018.  
[2] SHANG Song-hao, JIANG Lei, YANG Yu-ting(尚松浩, 蒋磊, 杨雨亭). Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery(农业机械学报), 2015, 46(10): 81.  
[3] Mccoll K A, Alemohammad S H, Akbar R, et al. Nature Geoscience, 2017, 10(2): 100.  
[4] YANG Zheng-wei, Shrestha R, Crow W, et al. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016. 5244.

- [5] Peng J, Loew A, Merlin O, et al. *Reviews of Geophysics*, 2017, 55(2): 341.
- [6] Ben-Dor E, Chabrillat S, Demattê J A M, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(supp-S1): 0.
- [7] BAI Lian-fa, WANG Xu, HAN Jing, et al(柏连发, 王旭, 韩静, 等). *Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程)*, 2019, 48(6): 11.
- [8] YAO Yan-min, WEI Na, TANG Peng-qin, et al(姚艳敏, 魏娜, 唐鹏钦, 等). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2011, 27(8): 95.
- [9] Nawar S, Cipullo S, Douglas R K, et al. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2019, (8): 525.
- [10] Polcher J, Piles M, Gelati E, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 174: 69.
- [11] Cozzolino D. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 2015, 9: 1.
- [12] LI Xin-xing, ZHU Chen-guang, ZHOU Jing, et al(李鑫星, 朱晨光, 周婧, 等). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2018, 34(19): 184.
- [13] Baroni G, Ortuani B, Facchi A, et al. *Journal of Hydrology*, 2013, 489: 148.
- [14] JI Wen-jun, SHI Zhou, ZHOU Qing, et al(纪文君, 史舟, 周清, 等). *Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报)*, 2012, 31(3): 277.
- [15] SI Hai-qing, YAO Yan-min, WANG De-ying, et al(司海青, 姚艳敏, 王德营, 等). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2015, 31(9): 114.
- [16] Onojeghuo A O, Blackburn G A, Huangb J, et al. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 64: 62.
- [17] Pengcheng N, Tao D, Yong H, et al. *Sensors*, 2017, 17(5): 1102.
- [18] Divya Y, Gopinathan P. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2019, 14: 1.
- [19] Srivastava, Prashant K. *Water Resources Management*, 2017, 31(10): 3161.
- [20] YAO Yuan, CHEN Xi, QIAN Jing, et al(姚远, 陈曦, 钱静, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2019, 39(4): 1005.
- [21] Thacker N A, Tar P D, Seepujak A P, et al. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2018, 428: 62.
- [22] Gholizadeh A, Boruvkal L, Saberioon M M, et al. *Soil and Water Research*, 2016, 10(4): 218.
- [23] Savitzky A, Golay M J E. *Analytical Chemistry*, 1964, 36(8): 1627.
- [24] Sadeghi M, Jones S B, Philpot W D. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 164: 66.
- [25] Morellos A, Pantazi X E, Moshou D, et al. *Biosystems Engineering*, 2016, 152: 104.
- [26] Rossel R A V. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2008, 90(1): 72.
- [27] LU Yi-bing, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-ju, et al(鲁一冰, 刘文清, 张玉钧, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2019, 39(9): 2657.
- [28] Haitao S, Pei-qiang Y. *Food Control*, 2017, 82: 57.
- [29] Thenkabail P, Gumma M K, Teluguntla P, et al. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2014, 80: 697.
- [30] ZHANG Jun-yong, DING Jian-li, TAN Jiao(张钧泳, 丁建丽, 谭娇). *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery(农业机械学报)*, 2019, 50(3): 228.
- [31] Alfonso T R, Andres T, Roula B, et al. *Water*, 2016, 8(4): 167.
- [32] WU Long-guo, WANG Song-lei, HE Jian-guo, et al(吴龙国, 王松磊, 何建国, 等). *Chinese Journal of Luminescence(发光学报)*, 2017, 38(10): 1366.
- [33] Bowers S A, Smith S J. *Soilence Society of America Journal*, 1972, 36(6): 978.
- [34] HAN Xiao-ping, WANG Pei-hua, CUI Chuan-jin, et al(韩小平, 王沛华, 崔传金, 等). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2010, 26(6): 47.
- [35] CHEN Zhen(陈桢). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2012, 28(4): 76.
- [36] Hassan-Esfahani L, Torres-Rua A, Jensen A, et al. *Remote Sensing*, 2015, 7(3): 2627.
- [37] Rossel R A V, Behrens T, Ben-Dor E, et al. *Earth-Science Reviews*, 2016, 155: 198.

# Research Progress of Spectroscopy in the Detection of Soil Moisture Content

LI Xin-xing<sup>1</sup>, LIANG Bu-wen<sup>1</sup>, BAI Xue-bing<sup>1</sup>, LI Na<sup>2\*</sup>

1. Beijing Laboratory of Food Quality and Safety, College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Industrial Technology Center, Chengde Petroleum College, Chengde 067000, China

**Abstract** Soil moisture is one of the important factors affecting agricultural production, and plays a key role in crop growth and development and final yield. However, the waste of agricultural water is widespread, and the utilization rate of water is low. It is estimated that by 2020, China's irrigation water utilization coefficient will only be 0.55, far below the advanced world level of 0.7~0.8. Therefore, the accurate and effective judgment of soil water content abundance is of great significance to agricultural production practice. The detection of soil moisture content has gradually become a research hotspot at home and abroad. Spectral technology can obtain the image information and spectral information of the target simultaneously by utilizing the different characteristic lines of the object, thereby more intuitively expressing the characteristics of the target, and can dynamically and accurately detect the soil moisture content accurately and non-destructively. The technology has greatly promoted the precision, intelligence and modernization of agriculture, and plays an important role in the detection of soil moisture content. This paper reviews the latest literature on soil moisture content detection at home and abroad, systematically discusses the research progress of soil moisture content detection based on spectroscopy technology, analyzes the shortcomings of traditional methods, and expounds the advantages of spectral imaging technology: (1) Real-time; (2) non-destructive; (3) accuracy; and its limitations in the detection of soil moisture content: (1) complex soil structure; (2) insufficient generalization ability; (3) climatic conditions. Three key technologies of spectrum in soil moisture detection are highlighted: (1) Spectral data pretreatment technology, which focuses on the common pretreatment technology principles and effects; (2) Spectral feature extraction technology, which compares common feature spectrum extraction and focuses on the sensitive band of soil moisture. (3) Spectral modeling technology, which focuses on the linear and nonlinear models of soil moisture content detection, analyzes its principle, application range and model accuracy, concludes that the nonlinear model will become the mainstream modeling method of spectral technology in soil moisture content detection. Finally, based on the above analysis, the application prospects and research trends of spectroscopy in the field of soil moisture detection have prospected: Firstly, the generalization ability and robustness of the technology should be improved, and a moisture detection model that can be used for various soil types is established. Secondly, establish a large-area field and dynamically update the soil moisture spectrum database to improve the accuracy of the model.

**Keywords** Spectral technology; Soil moisture content detection; Spectral pretreatment; Spectral feature extraction; Spectral modeling

\* Corresponding author

(Received Oct. 15, 2019; accepted Feb. 19, 2020)