

# 基于光谱学原理的便携式土壤有机质检测仪设计与实验

崔玉露 杨玮 王炜超 王懂 孟超 李民赞

(中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 为快速无损获取土壤有机质含量信息,基于光谱学原理设计了一款便携式土壤有机质含量检测仪。检测仪主要由机械部分、光路系统和控制部分组成,其中机械部分为检测仪提供平台支撑,光路部分由光源、蓝宝石玻璃、滤光片和光电探测器组成,控制系统实现对土壤测量信号的采集和处理。便携式土壤有机质检测仪工作时,光源发出光照射到待测土壤表面,漫反射光经过滤光片滤波后由光电转换器实现光信号转换成电信号,再经信号处理单元计算出各个敏感波长处的反射率,通过测量光谱反射率检测土壤有机质含量。采集了北京市中国农业大学上庄实验站土壤的光谱数据和土壤有机质含量实测值,经过光谱数据预处理后,对比了 CARS、MCUVE、MWPLS 和随机蛙跳 4 种波长筛选算法对土壤光谱的处理结果,建立了土壤有机质含量的偏最小二乘和随机森林预测模型。结果表明,基于 CARS 算法挑选出的 4 个特征波长建立的随机森林模型预测精度最好,建模集  $R^2$  为 0.923,预测集  $R^2$  为 0.888。将 CARS-RF 模型嵌入有机质检测仪系统,实验结果表明检测仪测量值与标准值的相关系数达到 0.891。开发的检测仪精度较高,可以实现快速检测土壤有机质含量。

**关键词:** 土壤有机质; 便携式检测仪; 光谱学原理

**中图分类号:** S158.2; S237      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0323-06

## Design and Experiment of Portable Soil Organic Matter Detector Based on Spectroscopy Principle

CUI Yulu YANG Wei WANG Weichao WANG Dong MENG Chao LI Minzan  
(Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education,  
China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to obtain the information of soil organic matter content quickly and non-destructively, a portable instrument for measuring soil organic matter content was designed based on spectroscopy principle. The detector was mainly composed of mechanical part, optical path system and control part, in which the mechanical part provided platform support for the detector, while the optical path part consisted of light source, sapphire glass, filter and photoelectric detector, and the control system realized the collection and processing of soil measurement signals. When the portable soil organic matter detector worked, the light emitted by the light source irradiated the surface of the soil to be detected, the diffuse reflection light was filtered by the optical filter, and then converted into an electrical signal by the photoelectric converter, and then the reflectivity at each sensitive wavelength was calculated by the signal processing unit, and the content of soil organic matter was detected by measuring the spectral reflectivity. The spectral data of soil and the measured values of soil organic matter content in Beijing Shangzhuang Experimental Station were collected. After preprocessing the spectral data, the processing results of four wavelength screening algorithms, CARS, MCUVE, MWPLS and Random Frog Leaping, were compared, and the partial least squares and random forest prediction models of soil organic matter content were established. The results showed that the random forest model based on four characteristic wavelengths selected by CARS algorithm had the best prediction accuracy, with the modeling set  $R^2$  being 0.923 and the prediction set  $R^2$  being 0.888. The CARS-RF model was embedded into the organic matter detector system. The experimental results showed that the correlation coefficient between the measured value and the standard value of the detector reached 0.891. The developed detector had high precision and can quickly detect the content of soil organic matter.

**Key words:** soil organic matter; portable detector; spectroscopy principle

收稿日期: 2021-07-13 修回日期: 2021-09-11

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2021C02023)

作者简介: 崔玉露(1996—),女,硕士生,主要从事土壤有机质含量检测研究,E-mail: cuiyulu2021@163.com

通信作者: 杨玮(1981—),女,副教授,主要从事精细农业系统集成研究,E-mail: cauyw@cau.edu.cn

## 0 引言

土壤有机质作为主要养分,是评估土壤肥力水平的一项重要指标,对作物的生长有着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。目前,土壤有机质分析仍采用室内化学测定的方法,该方法虽然精度较高,但存在费时费力、操作复杂、成本高、破坏性和污染性强等缺点,不能达到现场快速测量的目的,只适用于科研层面的检测,无法得到普及和推广<sup>[2-4]</sup>,因此,寻找一种快速、有效、无损检测土壤有机质的方法和设备变得至关重要。

目前,采用光谱学原理对土壤有机质含量的检测研究在国内外已经取得了较多进展。SUDDUTH等<sup>[5]</sup>开发了实时测量土壤参数的便携式土壤分光仪器,该仪器工作稳定,能采集连续光谱曲线,但由于该设备体积大、耗电快,不适用于田间实时测量。SHIBUSAWA等<sup>[6]</sup>设计了一款实时测量全氮含量、土壤含水率、电导率、有机质含量等参数的多功能土壤参数光谱仪,该光谱仪可以针对多个土壤参数进行检测,精度较高,但是价格昂贵且不适合我国国情。近年来国内采用光谱分析技术开发了很多类似的土壤养分含量检测仪。杨海清<sup>[7]</sup>以OEM光谱仪模块为核心开发的土壤养分快速检测仪也能达到土壤光谱吸光度快速测量的目的,但仪器存在噪声大,数据采集不稳定且只能液晶显示不能进行触屏控制操作等问题,其便携性和田间适用性还有待进一步提高。李民赞等<sup>[8]</sup>基于近红外反射光设计了一款便携式土壤有机质检测仪,该检测仪测得的土壤吸光度与有机质含量具有良好的相关性,模型决定系数 $R^2$ 为0.950,虽然达到了便携式检测的目的,但该检测仪没有与现代智能通信技术相结合,没有达到数据远程采集存储的目的。安晓飞等<sup>[9]</sup>开发设计了一款基于ARM的便携式土壤全氮光谱检测仪,该检测仪相比采用51单片机作为主控芯片的土壤全氮含量检测仪,运算能力强,但检测仪不能实现7个波段土壤吸光度的同时测量。

本研究基于光谱学原理,针对光强损失、仪器精度不高的问题,开发一款便携式土壤有机质检测仪。通过机械外壳设计和光学采集单元设计,不再使用光纤结构,减少光强损失,提高仪器检测精度。通过实验及数据处理找到适合北京壤土的有机质特征波长,并开展仪器性能实验,以实现土壤有机质含量快速准确检测。

## 1 土壤有机质检测仪设计

### 1.1 整体结构设计

检测仪主要由机械部分、光路系统和控制部分

组成,其中机械部分为检测仪提供平台支撑,光路部分由光源、蓝宝石玻璃、滤光片和光电探测器组成,控制系统实现对土壤测量信号的采集和处理。

光照射到土壤表面,会发生反射现象,反射光携带了与土壤物理结构和化学组分相关的信息,通过对反射光的分析,可以反演出土壤的物理化学信息<sup>[10]</sup>。便携式土壤有机质检测仪系统整体结构如图1所示,在设备内部集成了卤钨灯光源、蓝宝石玻璃、滤光片、光电转换器、树莓派、脚踏板机械结构等。蓝宝石玻璃可以保护光电探测器和滤光片等不被检测土壤污染,保证检测仪的正常工作,同时对反射光的损耗最小。脚踏板最下端连接蓝宝石玻璃,采样前,蓝宝石玻璃在采样管最下端,最先接触土壤,随着采样管插入土壤的过程中,土壤会推着蓝宝石往上移动,脚踏板随着蓝宝石玻璃也会被推到高处,到达理想土壤深度时,拔出检测仪,踩脚踏板将采集的土推出,再次将仪器插入原采样点,当脚踏板升至设定的高度,此时即可进行有机质含量检测。

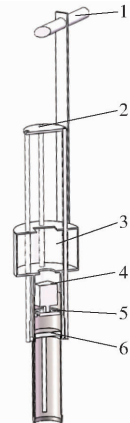


图1 便携式土壤有机质检测仪系统整体结构示意图

Fig.1 Schematic of overall structure of portable soil organic matter detector system

1.扶手 2.脚踏板 3.电路和树莓派 4.光源 5.滤光片 6.蓝宝石玻璃

### 1.2 工作原理

光路系统是便携式土壤有机质含量检测仪的核心,图2为便携式土壤有机质含量检测仪总体方案图,检测仪工作时卤素灯发出入射光,光照射到待测土壤表面发生漫反射光,漫反射光通过蓝宝石玻璃和滤光片滤光,由光电转换器将滤波后的光信号转换成电信号,再经信号处理单元计算出各个敏感波

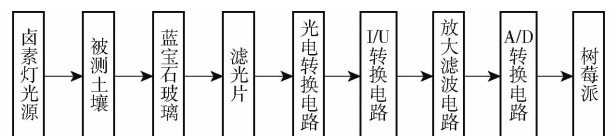


图2 便携式土壤有机质检测仪总体方案

Fig.2 Overall scheme of portable soil organic matter detector

长处的反射率,最后由树莓派实现有机质含量预测以及数据的存储和显示。

### 1.3 装置硬件设计

#### 1.3.1 机械采集单元

光信号在光纤传播中存在损耗和衰减,因此将光源置于采集土样的管道内部,直接贴合蓝宝石玻璃表面。检测仪采集装置结构如图3所示。检测仪下端为采集土样的管道,采样管插入土壤内部时,管道内部在土壤表面和光源之间形成一个暗室,可以减少光强的损失,避免了其他光源的干扰<sup>[11]</sup>。

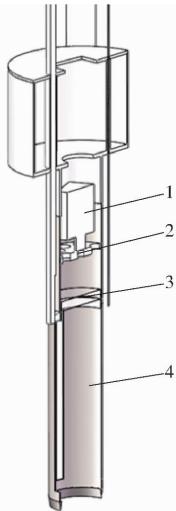


图3 便携式土壤有机质检测仪采集装置结构示意图

Fig. 3 Schematic of acquisition device of portable soil organic matter detector

1. 光源 2. 滤光片 3. 蓝宝石玻璃 4. 采集管

#### 1.3.2 光学采集单元

光学采集单元是装置的核心部件,主要由光源、滤光片、蓝宝石玻璃组成。便携式土壤有机质检测仪最突出的优点在于其便携性和快速准确性,所以检测仪的光源选择尤其重要。本研究选用上海闻奕光学公司的LS-1型卤素灯光源,该光源具有体积小、光谱宽泛、寿命长、质量轻并且功耗低等优点。卤素灯的性能参数为:光源尺寸(长×宽×高)为4 cm×7 cm×5.5 cm,波长为360~2 500 nm,工作电压5 V,最大功率5 W,质量为0.2 kg,工作寿命为10 000 h。

#### 1.3.3 控制电路单元

检测仪控制电路由光电转换电路、I/U转换电路、放大滤波电路、A/D转换电路和树莓派组成。控制电路单元设计如图4所示。

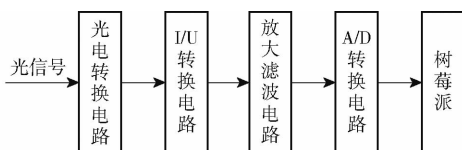


图4 控制电路单元框图

Fig. 4 Block diagram of control circuit system

## 2 土壤有机质检测模型建立

### 2.1 数据采集

研究区域在北京市海淀区中国农业大学上庄实验站的实验田(40.141 1°N, 116.189 4°E)。实验田长42 m,宽40 m。为了使土样之间有明显的差异,并具有一定的代表性,进行不同深度采样。采集8列样本,每列采集12个,共采集96个样本。用铲子拨开土壤表层杂草、石子,采集距离表层5~30 cm的土壤,装入带标签的防水自封袋,采集完密封。从第1个样本点开始,按照S形顺序依次采集96个土样。将样品送回实验室,先经过自然风干,剔除其中的植物根系和石块并通过0.9 mm筛,以减小粒径的影响<sup>[12]</sup>。采用“四分法”将土壤样本分为2份,1份利用GaiaSorter高光谱分选仪获取高光谱图像,选用波段在382~1 027 nm的镜头在暗室使用自带光源拍摄土样图像,获取干燥后的土壤光谱数据,其中高光谱仪使用的是标准白光光源,采用的是漫射照明方式,光谱覆盖波段382~2 500 nm,总功率可达100 W,光照空间均匀性超过90%。第2份土壤样本通过灼烧法测定土壤有机质含量<sup>[13]</sup>。

### 2.2 数据处理

#### 2.2.1 光谱数据预处理

首先,对原始的光谱数据用Envi 5.3软件提取样品反射率。为了减少光谱信号的噪声,以得到平滑的光谱曲线,除去382~424 nm和981~1 027 nm的噪声较大的边缘波段,处理后的光谱波段为425~980 nm。使用蒙特卡罗抽样方法的异常值检测对数据进行异常值剔除,该过程在Matlab 2018a软件中实现。

利用The Unscramble软件对光谱曲线进行SG平滑处理,去除背景噪声。为了增强原始光谱数据中不明显的特征差异,提高光谱数据与有机质含量之间的相关性,对平滑后的原波段光谱反射率( $R$ )进行一阶微分(1st)、多元散射校正(MSC)、多元散射校正与一阶微分相结合(1st+MSC)、倒数的对数(ILR)、反射率倒数对数一阶微分(ILR+1st)以及反射率倒数对数多元散射校正与一阶微分相结合(ILR+1st+MSC)处理。其中微分处理技术可以消除背景噪声的影响,提高光谱反射率与有机质含量的相关性,易找到相关性高的波段,减小噪声干扰的敏感性。MSC是现阶段多波长定标建模常用的数据处理方法,处理后的光谱数据可以消除散射影响,增强光谱信息质量。

将剔除异常样本后的80个土壤样本分为建模集(60个)和检验集(20个)。各数据集有机质

(SOM)含量的描述性统计如表1所示。

表1 样本土壤有机质统计量

Tab.1 Sample soil organic matter statistics

样本集	样本数量	有机质质量比/(g·kg <sup>-1</sup> )			
		最大值	最小值	均值	标准差
总集	80	22.705	17.929	20.777	1.057
建模集	60	22.705	17.929	20.747	1.076
检验集	20	22.239	18.792	20.864	1.022

由表1可知,SOM最大值为22.705 g/kg,最小值为17.929 g/kg,表明取样点的SOM含量相差不太大。

将原始光谱(R)进行1st、MSC、1st+MSC、ILR、ILR+1st、ILR+MSC与ILR+1st+MSC处理,并分析原始光谱(R)和预处理光谱与SOM含量的相关性,预处理光谱与有机质含量之间的相关系数最大值以及最敏感波长如表2所示。从表2可以看出,原始光谱与SOM含量的相关系数最低,经过不同方法的预处理之后,部分波长反射率与SOM含量的相关性均有不同程度的提升,其中与SOM含量相关性最高的预处理是1st+MSC变换,其次为ILR+1st+MSC变换,最低的是ILR变换,其次是1st变换。

表2 预处理光谱与有机质含量之间的相关性

Tab.2 Correlation between pretreatment spectrum and organic matter content

光谱变换	最敏感	相关系数绝对	相关性系数
	波长/nm	值最大值	绝对值均值
原始光谱	578	0.313	0.267
1st	483	0.453	0.219
MSC	528	0.601	0.289
1st+MSC	662	0.677	0.285
ILR	575	0.325	0.275
ILR+1st	684	0.482	0.208
ILR+MSC	834	0.484	0.284
ILR+1st+MSC	662	0.646	0.251

与原始光谱相比,光谱预处理可提高其与SOM含量的相关性,其中,经1st处理后的最敏感波长483 nm与SOM含量的相关系数绝对值最高达到0.453,这可能是因为微分变换使曲线的倾斜效应和基线偏移减少,增强了光谱变换和压缩的影响,最终使得相关系数得以提高<sup>[14]</sup>。经MSC变换后的最敏感波长528 nm与SOM含量的相关系数绝对值最高达0.601,这可能是因为MSC变换可以消除大小不一的样品颗粒对光谱曲线的影响<sup>[15]</sup>。经1st+MSC处理后的最敏感波长662 nm与SOM含量的相关系数绝对值最高达到0.677,是本研究中与SOM含量的相关系数绝对值的最大值,可见通过对原始光谱

进行数据变换可以有效提高土壤光谱反射率与其SOM的相关性<sup>[16]</sup>。

## 2.2.2 不同特征波长筛选方法条件下的土壤反射光谱建模

竞争性自适应重加权采样算法(Competitive adaptive reweighted sampling, CARS)<sup>[17]</sup>是通过自适应重加权采样(Adaptive reweighting sampling, ARS)技术选择出偏最小二乘(Partial least square, PLS)模型中回归系数绝对值大的波动点,去掉权重小的波动点,再利用交互验证选出区间的交叉验证均方根误差(Root mean square error of cross validation, RMSECV)最低的子集,可有效寻找出最优变量组合。

随机蛙跳算法的基本思路是把问题的解群分为若干个种群,每个种群包含若干个子解<sup>[18]</sup>。按照均方根误差也就是适应度函数值进行升序排序,每只青蛙都视为一个问题的解,每个种群都会在其内部进行局部搜索,每个种群中的子个体都会进化,当子个体进化到一定程度以后,每个种群就进行种群之间的交流,实现全局信息交换,反复迭代直到得到全局最优解。

移动窗口偏最小二乘(Moving window partial least square, MWPLS)是一种波长区间优选方法,该方法以一定宽度的窗口移过全谱区间,在每个窗口区间下分别建立PLS模型,区间的RMSECV小于全谱RMSECV的区间入选<sup>[19-20]</sup>。

蒙特卡罗无信息变量消除法(Monte Carlo uninformative variables elimination, MCUVE)是蒙特卡罗采样和无信息变量消除法的结合,其变量重要性衡量依据依然是回归系数的稳定性,通过设定阈值,去除稳定性小于阈值的波长<sup>[21-22]</sup>。

基于土壤光谱反射率进行MSC+1st变换处理以及分别基于CARS、MWPLS、MCUVE和随机蛙跳算法挑选出的特征波段建立PLS模型。筛选出的波长数量分别为43、23、20、30个。波长数量还是过多,不适合嵌入到机器模型中使用。将筛选出的特征波长分别再经过多元逐步回归处理,剔除没有通过t检验的波长,CARS算法筛选出的波长通过t检验的波长分别为662、760、671、645 nm,这与朱亚星等<sup>[23]</sup>的结论一致;MWPLS算法筛选出的波长且通过t检验的波长分别为518、599、662、683 nm;MCUVE算法筛选出的波长且通过t检验的波长分别为526、457、760、873 nm;随机蛙跳算法筛选出的波长且通过t检验的波长分别为642、662、671、760 nm。表3为通过t检验的波长用PLS模型建模的精度。

表3 不同特征波长筛选方法 PLS 建模精度

Tab.3 PLS modeling accuracy of different characteristic wavelength screening methods

筛选方法	变量数量	训练集		预测集	
		$R^2$	RMSE/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	$R^2$	RMSEP/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )
随机蛙跳	4	0.712	0.58	0.578	0.53
CARS	4	0.672	0.61	0.611	0.64
MWPLS	4	0.615	0.65	0.335	0.85
MCUVE	4	0.514	0.77	0.276	0.71

表4为通过 $t$ 检验的波长用随机森林(RF)模型建模的精度。从表4可以看出,4种变量筛选方法简化PLS模型能力由大到小依次为CARS、随机蛙跳、MWPLS、MCUVE。

表4 不同特征波长筛选方法的随机森林建模精度

Tab.4 Accuracy of random forest modeling with different characteristic wavelength screening methods

筛选方法	变量数量	训练集		预测集	
		$R^2$	RMSE/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	$R^2$	RMSE/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )
随机蛙跳	4	0.946	0.0383	0.869	0.058
CARS	4	0.923	0.0369	0.888	0.062
MWPLS	4	0.950	0.0385	0.839	0.063
MCUVE	4	0.933	0.0411	0.775	0.071

由处理结果可以看出,不同的特征波长筛选方法筛选出的特征波段不一样。其中随机蛙跳和CARS两种算法筛选出的模型预测效果较好,无论是PLS建模还是RF建模,两者建模精度相比较MWPLS和MCUVE都比较高,说明这两种算法比较稳定。比较PLS模型精度和RF模型精度,发现RF模型精度比PLS高,这与可见近红外光谱数据中含有较强的非线性信息有关,RF模型可以考虑所有线性和潜在的非线性有用信息,而PLS模型只能处理土壤有机质与光谱数据之间的线性关系,与PLS模型相比,RF模型鲁棒性更好,对异常值和噪声的敏感度更低<sup>[24]</sup>。最终选定CARS挑选出的4个波长(662、760、671、645 nm)作为特征波长,选取随机森林模型嵌入检测仪系统。

### 3 实验验证

实验土样为采集于北京市海淀区中国农业大学上庄实验站小麦田的60个土壤样本,每个土样质量为2 kg。采用“四分法”将土壤样本分为2份,1份土样用于自主开发的土壤全氮含量检测仪检测反射率,第2份土样用灼烧法测得有机质含量实测值。

结果表明,土壤有机质含量为18.222~27.256 g/kg,平均值为21.15 g/kg,标准差为0.865 g/kg。

检测仪在实验室内测量的有机质含量实测值与灼烧法测得的有机质标准值进行相关分析(图5),相关系数 $r$ 为0.891,测量精度能满足实验要求。后续会开展大田实验进一步验证仪器的准确性。

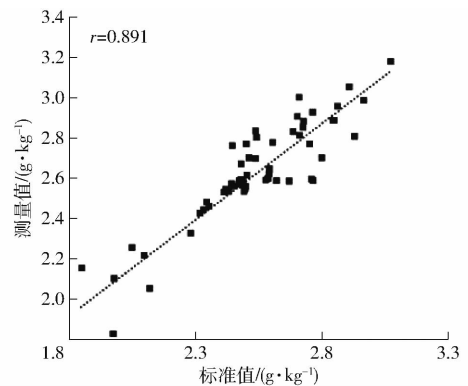


图5 土壤有机质含量实验室内测量结果

Fig.5 Laboratory measurement results of soil organic matter content

### 4 结论

(1)基于光谱学原理开发了一款便携式土壤有机质检测仪。检测仪主要由机械部分、光路系统和控制部分组成,其中机械部分为检测仪提供平台支撑,光路部分由光源、蓝宝石玻璃、滤光片和光电探测器组成,控制系统实现对土壤测量信号的采集和处理。选用小体积光源和蓝宝石玻璃相结合嵌入有机质检测仪采样管内部,不再使用光纤传输光信号,减少了光强损失,提高了仪器检测精度。

(2)为了克服光谱数据吸光度非线性、噪声大、共线性强等特点对土壤有机质含量检测带来的影响,引入CARS-RF方法选择出具有较好预测能力的波长组合,建立高精度土壤有机质含量预测模型。实验采集了中国农业大学上庄实验站土壤的光谱数据和土壤有机质含量实测值,经过光谱数据预处理后,对比了处理后的结果,建立了土壤有机质含量的偏最小二乘和随机森林预测模型。结果表明,基于CARS算法挑选出的4个特征波长建立的随机森林模型预测精度最好,建模集 $R^2$ 为0.923,预测集 $R^2$ 为0.888。将CARS-RF模型嵌入有机质检测仪系统,室内实验结果显示检测仪测量值与标准值的相关系数达到0.891,说明开发的检测仪精度较高,达到了快速检测的目的,可以为后续开展田间实验奠定基础。

## 参 考 文 献

- [1] 张娟娟,席磊,杨向阳,等. 砂姜黑土有机质含量高光谱估测模型构建[J]. 农业工程学报,2020,36(17):135-141.  
ZHANG Juanjuan, XI Lei, YANG Xiangyang, et al. Establishment of hyperspectral estimation model of organic matter content in shajiang black soil[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(17):135-141. (in Chinese)
- [2] 蒋璐璐,张瑜,王艳艳,等. 基于光谱技术的土壤养分快速测试方法研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2010,36(4):445-450.  
JIANG Lulu, ZHANG Yu, WANG Yanyan, et al. Study on rapid test method of soil nutrients based on spectral technology[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences Edition), 2010,36(4):445-450. (in Chinese)
- [3] 卢艳丽,白由路,王贺,等. 利用光谱技术监测土壤主要养分含量潜力分析[J]. 土壤通报,2012,43(3):756-760.  
LU Yanli, BAI Youlu, WANG He, et al. Potential analysis of monitoring soil main nutrient content by spectral technology [J]. Soil Bulletin, 2012,43(3):756-760. (in Chinese)
- [4] 刘垚,万辉,朱焕庭. 近红外光谱分析技术在果品品质无损检测中的应用[J]. 广东农业科学,2009(3):157-158,163.  
LIU Yao, WAN Hui, ZHU Huanting. Application of near infrared spectroscopy in nondestructive testing of fruit quality [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2009(3):157-158,163. (in Chinese)
- [5] SUDDUTH K A, HUMMEL J W. Portable, near-infrared spectrophotometer for rapid soil analysis[J]. Transactions of the ASAE,1993,36(1):185-193.
- [6] SHIBUSAW S, HIRAKO S, OTOMO A, et al. Real-time underground soil spectrophotometer[J]. The Japanese Society of Agricultural Machinery and Food Engineers,1999,61:131-133.
- [7] 杨海清. 基于光谱技术的土壤成分和植物生长信息快速获取建模和仪器研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.  
YANG Haiqing. Modeling and instrument research on rapid acquisition of soil composition and plant growth information based on spectral technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [8] 李民赞,潘雯,郑立华,等. 基于近红外漫反射测量的便携式土壤有机质测定仪的开发[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(4):1146-1150.  
LI Minzan, PAN Luan, ZHENG Lihua, et al. Development of portable soil organic matter analyzer based on near infrared diffuse reflectance measurement[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010,30(4):1146-1150. (in Chinese)
- [9] 安晓飞,李民赞,郑立华,等. 便携式土壤全氮测定仪性能研究[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊):283-288.  
AN Xiaofei, LI Minzan, ZHENG Lihua, et al. Study on the performance of portable soil total nitrogen analyzer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(Supp.):283-288. (in Chinese)
- [10] 刘燕德,应义斌,傅霞萍. 近红外漫反射用于检测苹果糖度及有效酸度的研究[J]. 光谱学与光谱分析,2005,25(11):51-54.  
LIU Yande, YING Yibin, FU Xiaping. Study on the application of near infrared diffuse reflectance in detecting sugar content and effective acidity of apples [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005,25(11):51-54. (in Chinese)
- [11] 雷肇棣. 光纤通信基础知识(二)[J]. 激光通信,1981(3):81-83.  
LEI Zhaodi. Basic knowledge of optical fiber communication (II) [J]. Laser Communication, 1981(3):81-83. (in Chinese)
- [12] 曾远文,段松江. 土壤粒径的光谱响应特性研究[J]. 山东国土资源,2019,35(11):78-82.  
ZENG Yuanwen, DUAN Songjiang. Spectral response characteristics of soil particle size[J]. Shandong Land and Resources, 2019,35(11):78-82. (in Chinese)
- [13] 李静. 土壤有机质测定方法对比分析[J]. 绿色科技,2012(5):203-204.  
LI Jing. Comparative analysis of determination methods of soil organic matter[J]. Green Science and Technology, 2012(5):203-204. (in Chinese)
- [14] 张东辉,赵英俊,秦凯,等. 光谱变换方法对黑土养分含量高光谱遥感反演精度的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(20):141-147.  
ZHANG Donghui, ZHAO Yingjun, QIN Kai, et al. Influence of spectral transformation method on the retrieval accuracy of nutrient content in black soil by hyperspectral remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(20):141-147. (in Chinese)
- [15] 郭斗斗,黄绍敏,张水清,等. 多种潮土有机质高光谱预测模型的对比分析[J]. 农业工程学报,2014,30(21):192-200.  
GUO Doudou, HUANG Shaomin, ZHANG Shuiqing, et al. Comparative analysis of several hyperspectral prediction models of fluvo-aquic soil organic matter[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(21):192-200. (in Chinese)
- [16] 王永敏,李西灿,田林亚,等. 土壤有机质含量地面高光谱估测模型对比分析[J]. 国土资源遥感,2019,31(1):110-116.  
WANG Yongmin, LI Xican, TIAN Linya, et al. Comparative analysis of ground hyperspectral estimation models of soil organic matter content [J]. Remote Sensing of Land and Resources, 2019,31(1):110-116. (in Chinese)
- [17] 唐海涛,孟祥添,苏循新,等. 基于 CARS 算法的不同类型土壤有机质高光谱预测[J]. 农业工程学报,2021,37(2):105-113.  
TANG Haitao, MENG Xiangtian, SU Xunxin, et al. Hyperspectral prediction of different types of soil organic matter based on CARS algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(2):105-113. (in Chinese)
- [18] 罗嗣卿,刘昊天. 混合算法优化的 BP 神经网络的大气污染度预测[J]. 黑龙江大学自然科学学报,2020,37(4):389-394.  
LUO Siqing, LIU Haotian. Prediction of air pollution degree based on BP neural network optimized by hybrid algorithm[J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2020,37(4):389-394. (in Chinese)

- [12] ARNAUD G, TEBO A G. Sensing cellular biochemistry with fluorescent chemical-genetic hybrids[J]. *Current Opinion in Chemical Biology*, 2020, 57: 58 – 64.
- [13] LIU Min, YU Xia, LI Ming, et al. Fluorescent probes for the detection of magnesium ions ( $Mg^{2+}$ ): from design to application [J]. *RSC Advances*, 2018, 8(23):12573 – 12587.
- [14] CHOWDHURY S, BIPIN R, ANKITA D, et al. Review on recent advances in metal ions sensing using different fluorescent probes[J]. *Journal of Fluorescence*, 2018, 28(4):999 – 1021.
- [15] YOSHIO S, YOKOYAMA K. Development of functional fluorescent molecular probes for the detection of biological substances [J]. *Biosensors*, 2015, 5(2): 337 – 363.
- [16] ZHANG Qin, WANG Hongqing, WANG Yuyuan, et al. A new Schiff base fluorescent indicator for the detection of  $Mg^{2+}$  and its application to real samples[J]. *Research on Chemical Intermediates*, 2016, 42(8): 6681 – 6693.
- [17] 张勤. 水杨酰脲类席夫碱荧光传感器的合成及性能研究[D]. 衡阳:南华大学, 2016.  
ZHANG Qin. Synthesis and performance study of salicylhydrazone Schiff base fluorescent sensors[D]. Hengyang:South China University, 2016. (in Chinese)
- [18] MEN Guangwen, ZHANG Guirong, LIANG Chunshuang, et al. A dual channel optical detector for trace water chemodosimetry and imaging of live cells[J]. *The Analyst*, 2013, 138(10): 2847 – 2857.
- [19] MEN Guangwen, CHEN Chunrong, ZHANG Shitong, et al. A real-time fluorescent sensor specific to  $Mg^{2+}$ : crystallographic evidence, DFT calculation and its use for quantitative determination of magnesium in drinking water[J]. *Dalton Transactions (Cambridge, England; 2003)*, 2015, 44(6): 2755 – 2762.
- [20] 周丽娜,程树朝,于海业,等. 初期稻叶瘟病害的叶绿素荧光光谱分析[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(2): 203 – 207.  
ZHOU Li'na, CHENG Shuzhao, YU Haiye, et al. Chlorophyll fluorescence spectroscopy analysis of initial rice leaf blight disease[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(2): 203 – 207. (in Chinese)
- [21] ZHANG Zhipeng, FENG Jiayu, HANG Pengcheng, et al. Ratiometric fluorescent detection of phosphate in human serum with functionalized gold nanoclusters based on chelation-enhanced fluorescence[J]. *Sensors and Actuators: B. Chemical*, 2019, 298: 686 – 692.
- [22] WANG G, QIN J, FAN L, et al. A turn-on fluorescent sensor for highly selective recognition of  $Mg^{2+}$  based on new Schiff's base derivative[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology, A: Chemistry*, 2016, 314: 29 – 34.
- [23] ABHA P, AJIT K, SIDDHARTH V, et al. A highly specific 'Turn-On' fluorescent detection of  $Mg^{2+}$  through a xanthen based fluorescent molecular probe[J]. *RSC Adv.*, 2016, 6(8): 6724 – 6729.
- [24] 漆明星,杨普,邹铃,等. 基于量子点荧光探针的重金属离子  $Hg^{2+}$  检测方法[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(增刊): 195 – 199.  
QI Mingxing, YANG Pu, ZOU Ling, et al. A quantum dot fluorescent probe based method for the detection of heavy metal ions  $Hg^{2+}$  [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(Supp.): 195 – 199. (in Chinese)

(上接第 328 页)

- [19] 王加华,李鹏飞,曹楠宁,等. 基于 iPLS 原理最优化信息区间的桃糖度组合权重 PLS 模型研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2009,28(5):386 – 391.  
WANG Jiahua, LI Pengfei, CAO Nanning, et al. Study on PLS model for optimizing information interval based on iPLS principle[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Wave*, 2009,28(5):386 – 391. (in Chinese)
- [20] 孙旭东,董小玲. 近红外光谱快速检测马铃薯全粉还原糖[J]. *农业工程学报*,2013,29(14):262 – 268.  
SUN Xudong, DONG Xiaoling. Rapid detection of reducing sugar in potato powder by near infrared spectroscopy [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013,29(14):262 – 268. (in Chinese)
- [21] HAN Qingjuan, WU Hailong, CAI Chenbo, et al. An ensemble of Monte Carlo uninformative variable elimination for wavelength selection[J]. *Analytica Chimica Acta*,2008, 612(2):121 – 125.
- [22] 李红,张凯,陈超,等. 基于高光谱成像技术的生菜冠层含水率检测[J]. *农业机械学报*,2021,52(2):211 – 217,274.  
LI Hong, ZHANG Kai, CHEN Chao, et al. Detection of water content in lettuce canopy based on hyperspectral imaging technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021,52(2):211 – 217,274. (in Chinese)
- [23] 朱亚星,于雷,洪永胜,等. 土壤有机质高光谱特征与波长变量优选方法[J]. *中国农业科学*,2017,50(22):4325 – 4337.  
ZHU Yaxing, YU Lei, HONG Yongsheng, et al. Hyperspectral characteristics of soil organic matter and optimization method of wavelength variables[J]. *Scientia Agriculture Sinica*, 2017,50(22):4325 – 4337. (in Chinese)
- [24] 李冠稳,高小红,肖能文,等. 基于 sCARS – RF 算法的高光谱估算土壤有机质含量[J]. *发光学报*,2019,40(8):1030 – 1039.  
LI Guanwen, GAO Xiaohong, XIAO Nengwen, et al. Hyperspectral estimation of soil organic matter content based on sCARS – RF algorithm[J]. *Acta Luminifera Sinica*, 2019,40(8):1030 – 1039. (in Chinese)