

基于卤钨灯光源和多路光纤的土壤全氮含量检测仪研究

李民赞 姚向前 杨 玮 周 鹏 郝子源 郑立华

(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: 为了克服 LED 作为主动光源的土壤全氮含量检测仪波段单一、光强信号较弱、仪器信噪比难以提高的不足, 基于卤钨灯光源和特制多路光纤设计了一款便携式土壤全氮含量检测仪。检测仪选用 1 108、1 248、1 336、1 450、1 537、1 696 nm 作为土壤全氮敏感波长, 选用高功率卤钨灯作为光源以提高信号强度, 采用“一分六”特制光纤实现 1 路入射光通道和 6 路反射光通道。性能试验表明, 调理电路和卤钨灯光源工作稳定, 并且卤钨灯作为主动光源测量精度更高, “一分六”石英光纤测量精度高于其他类型光纤。根据检测仪吸光度和土壤全氮含量标准值建立了不同预测模型, 结果表明, 采用 PLS 建模精度最高, 建模 R_c^2 为 0.861 3, 验证 R_v^2 为 0.804 2, 可以用于检测仪模型嵌入。田间试验结果表明, 检测仪测量值和标准值的相关系数达到 0.828 0。设计的检测仪测量精度较高, 可以满足田间快速准确检测的目的。

关键词: 土壤全氮; 近红外光谱; 卤钨灯光源; 检测仪; 一分六光纤

中图分类号: S158.2; S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)11-0169-06

Design of New Portable Detector for Soil Total Nitrogen Content Based on High-power Tungsten Halogen Lamp and “One-Six” Special Optical Fiber

LI Minzan YAO Xiangqian YANG Wei ZHOU Peng HAO Ziyuan ZHENG Lihua

(Key Laboratory on Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Soil total nitrogen content is an important soil fertility parameter. However, the existed portable detector of soil total nitrogen content had several deficiencies, such as weak light intensity and low signal-to-noise ratio. Hence, a new portable soil total nitrogen content detector was designed based on high intensity light source and special optical fiber. Six sensitive wavelengths were used, which were 1 108 nm, 1 248 nm, 1 336 nm, 1 450 nm, 1 537 nm and 1 696 nm. A high-power tungsten halogen lamp was used as the light source to improve the signal intensity, and one-way incident optical channel and six-way reflected optical channel were realized by using a “one-six” special optical fiber. The performance test of the detector showed that the conditioning circuit and the tungsten halogen lamp source worked stably, and the tungsten halogen lamp had higher measurement accuracy than the LED as the active light source. The prediction model was established by the absorbance values of the detector and the soil total nitrogen standard value. The highest model accuracy was obtained from a PLS model. The calibration R_c^2 of the model was 0.861 3 and the verification R_v^2 of the model was 0.804 2, which showed that the model had high precision and could be used for detector model embedding. A field experiment was conducted and the correlation coefficient between the real-time measurement result of the detector and the soil total nitrogen standard value reached 0.828 0. The detector had high measurement accuracy and can meet the purpose of fast and accurate detection of the soil total nitrogen content in the field.

Key words: soil total nitrogen; near infrared spectroscopy; halogen tungsten light source; detector; one-six optical fiber

收稿日期: 2019-07-29 修回日期: 2019-09-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0201500-2017YFD0201501、2016YFD0700300-2016YFD0700304)

作者简介: 李民赞(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事精细农业系统集成研究,E-mail: limz@cau.edu.cn

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

0 引言

土壤全氮含量是衡量土壤肥力的一项重要指标,传统的化学方法对土壤全氮含量的检测具有破坏性和污染性,不能现场实时分析,且存在费时、费力等问题^[1-3]。近红外光谱技术作为一种快速、无损的检测方法在作物、土壤等物质检测方面得到广泛应用,近红外光谱检测主要依靠其对C—H、O—H和N—H功能键的能量吸收,反映相应土壤养分含量等信息^[4-8]。因此,将近红外光谱技术与现代智能通信技术相结合能够达到快速分析的目的^[9-12]。

目前,采用近红外光谱技术对土壤全氮含量的检测研究在国内外已经取得了很多进展。美国公司生产的ASD光谱辐射仪能够测量土壤的连续吸光度光谱曲线,通过光谱分析实现全氮含量的检测,但是ASD光谱仪属于精密仪器,价格昂贵、操作要求高,不适于农田现场快速测量^[13]。文献[14-15]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,但便携性和田间适用性还有待进一步提高。文献[16]设计的便携式土壤全氮检测仪虽达到了便携式检测的目的,但该仪器采用LED作为主动光源,波段单一,光强信号较弱,仪器信噪比难以提高。

本文基于近红外光谱学原理,考虑体积小、成本低、便于携带和能够进行田间远程采集等因素,设计一款便携式土壤全氮含量检测仪,并开展性能试验。通过光源和光学通道设计,提高仪器的信噪比和测量精度,通过软硬件结合,实现现场测量与数据的远程采集、传输、存储和处理,以达到土壤全氮含量快速、实时、在线检测和存储的目的。

1 系统设计

近红外便携式土壤全氮含量检测仪主要包括传感器、服务器数据库和移动终端。传感器包括光学单元和控制电路单元。

光学单元主要由光源、光传输光纤、不同波段滤光片及光电探测器组成。控制电路单元由多通道选择电路、I/U转换电路、放大电路、滤波电路、A/D转换电路、STM32单片机、ZigBee终端节点、GPS模块、ZigBee主协调器和4G模块等组成。

1.1 光学单元设计

根据本课题组的已有研究成果,土壤全氮含量测量选取6个敏感波段1 108、1 248、1 336、1 450、1 537、1 696 nm^[17-19]。同时考虑到便于携带和光强可调的要求,选用海洋光学HL-2000-HP-FHSA型高功率卤钨灯作为光源。卤钨灯光源的性能参数

为:工作电压为24 V,最大功率8.4 W,光源尺寸6.2 cm×6 cm×15 cm,光源光斑为2 mm,质量为0.5 kg,波长范围360~2 400 nm。该光源的光强分布如图1所示,该光源相比单波段LED光源、激光光源,具有光照强度大、光强可调、工作持续稳定的优点,相比其他卤钨灯光源具有体积小、质量轻、自带散热的优点,并且该光源发出光的波长范围覆盖了所选定的6个敏感波长,满足仪器对光信号波长选择的要求。

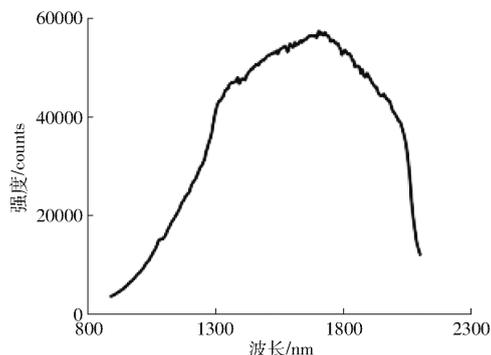


图1 光强分布图

Fig. 1 Light intensity distribution map

由于被测土壤表面土壤颗粒大小不同,入射光照射到不同的土壤表面,反射光的分散性会对测量结果带来误差,因此光纤设计时需要进行结构性补偿。为了满足同时完成入射光和6个反射光的传输,并且保证光信号在光纤传输过程中获得最大的光通量和减少光纤制作的成本,课题组与北京玻璃研究院合作开发了一款特制分叉型一分六石英光纤,光纤结构设计如图2所示。该光纤探头直径为4.4 mm,由19根多模入射光纤和72根多模反射光纤组成。入射光纤由19根多模入射光纤拟合而成,直径为2 mm,6根反射光纤由72根多模反射光纤拟合而成。石英光纤性能优于玻璃光纤,反射光纤包围入射光纤,可以更有效地将漫反射光收集到反射光纤内,从而减少入射光在反射过程中光信号的损失,并且得到能够稳定通过的光信号波长为400~2 500 nm,满足在土壤全氮含量预测过程中敏感波段的测量要求。

光学通路结构如图3所示。高功率卤钨灯光源

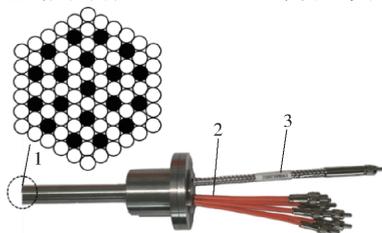


图2 分叉型一分六光纤

Fig. 2 Bifurcation type one-six optical fiber

1. 主光纤 2. 反射光纤 3. 入射光纤

发出的光信号通过入射光纤照射到耕层深度 (5 ~ 30 cm) 的土壤表面,一部分光信号被土壤吸收,一部分光信号进入土层后经过投射、散射又从土层射出作为漫反射光进入反射光纤。反射光通过一分六反射光纤传输至 6 个不同波段滤光片,不同波长的光再由光电探测器进行光电转换生成电信号。

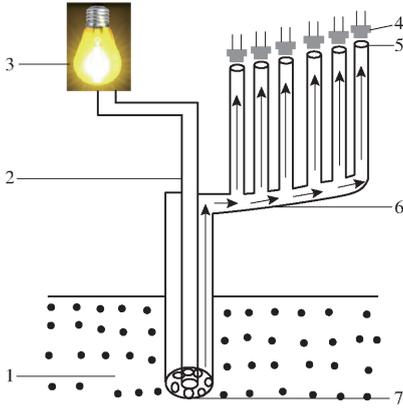


图 3 光学单元

Fig. 3 Light section

- 1. 被测土壤 2. 入射光纤 3. 卤钨灯光源 4. 光电探测器 5. 滤光片 6. 反射光纤 7. 一分六光纤

1.2 电路单元设计

为了使检测仪既具备单点实时在线测量功能又有多点同时测量功能,检测仪上不设置存储和显示单元,由具有无线传输功能的掌上计算机(数据采集器)统一采集、存储和显示,传感器和数据采集器之间采用 ZigBee 传输系统。检测仪的电路单元结构如图 4 所示,主控芯片采用 STM32F103ZET6 开发板(简称 STM32),该模块能实现数据的采集和快速分析处理。采用恩智浦公司的 ZigBee JN5168 芯片进行数据传输,该模块既能完成数据采集又能实现数据田间远距离发送,能够满足后续增加采集节点的要求^[20]。经光电转换后的电流信号较小,设计制作了检测仪信号调理电路,选用 TLC2201 模块进行 I/U 转换和信号一级信号放大,采用 NE5532 模块对电压信号进行二级运算放大和后续的滤波处理, A/D 转换模块进行模数转换,然后通过 STM32 主控芯片程序中嵌入的土壤全氮含量预测模型进行全氮含量预测, JN5168 终端节点将采集的全氮含量数据发送到 JN5168 主协调器, JN5168 主协调器将数

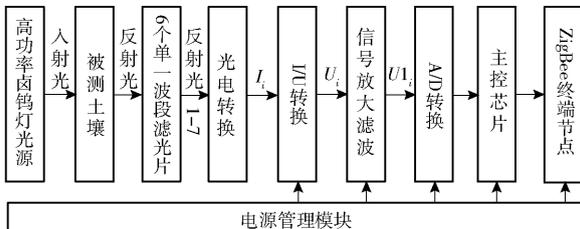


图 4 电路单元结构图

Fig. 4 Structure diagram of electronic section

据传输至数据采集器。

电源管理模块包括高功率卤钨灯光源电源,信号调理电路电源、GPS 模块电源、STM32 电源、ZigBee 终端节点和协调器工作电源。高功率卤钨灯光源工作电压为 24 V,输入功率为 20 W,因此电源选用 5 A·h 的锂电池,可满足仪器 5 h 以上的连续稳定工作。记录测量位置的 GPS 模块、信号调理电路和 STM32 工作电压均为 5 V,通过采用 LM1117 模块对 12 V 电源进行降压处理,从而为 GPS 模块、调理电路和 STM32 供电。ZigBee 终端节点和协调器工作电压为 3.3 V,采用 3.3 V 电源为该部分提供稳定工作电压。

1.3 工作过程

1.3.1 总体结构设计

检测仪的总体结构如图 5 所示,在机箱内集成了卤钨灯光源、百叶窗、分叉型一分六光纤、主控芯片、ZigBee 终端节点、USB 模块、3 层机械结构。百叶窗设计可以保证卤钨灯光源产生的热量充分散发,避免长时间工作高温影响其他元器件工作的稳定性。USB 模块可以进行程序的修改。3 层机械结构设计可以改变光信号在传输过程中光信号的损失。

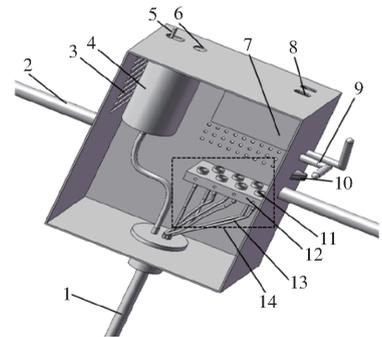


图 5 总体结构图

Fig. 5 Hardware mechanical structure

- 1. 分叉型对地光纤 2. 手把 3. 百叶窗 4. 高功率卤钨灯光源 5. 卤钨灯电源开关 6. 卤钨灯光源供电电池 7. 主控芯片和 ZigBee 开发板 8. USB 模块 9. 开发板天线 10. 内部电源开关 11. 光电探测器 12. 滤光片 13. 一分六光纤 14. 3 层机械结构

1.3.2 数据处理

根据朗伯-比尔定律计算土壤吸光度。测量时,首先将光纤探头端按压在漫反射标准白板上,测得仪器上面的反射输出电压 $V_i (i = 1, 2, \dots, 6)$,然后用特制的黑色接头完全遮盖光纤探头,不同反射光纤对应的测量电路的暗电流输出电压 $V_{Di} (i = 1, 2, \dots, 6)$ 。光纤探头插入到土层测得 6 个敏感波段的反射输出电压为 $V_j (j = 1, 2, \dots, 6)$,通过朗伯-比尔定律测得在每个不同波长处的吸光度为

$$A_i = \lg \frac{V_i - V_{Di}}{V_j - V_{Dj}} \quad (1)$$

2 试验结果及分析

2.1 性能试验

2.1.1 调理电路和光强稳定性试验

为了减少调理电路设计不合理对检测仪测量精度的影响,对设计的调理电路进行了性能稳定性试验。以高功率卤钨灯作为主动光源,采用示波器分别监测 InGaAs 光电探测器输出的电流信号 I_0 和调理电路输出放大后的电压信号 U_0 ,测试结果如图 6 所示,由图 6 可知,调理电路输入电流信号与输出电压信号呈现良好的线性关系,决定系数接近 1,表明可以对原始信号进行稳定放大、滤波。

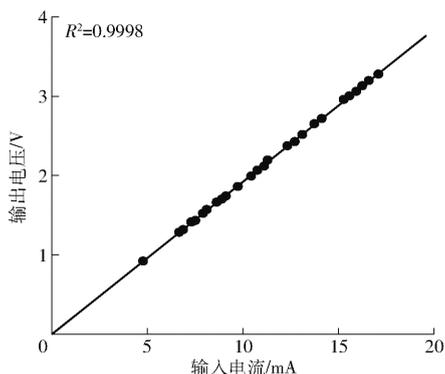


图 6 调理电路稳定性试验结果

Fig. 6 Circuit stability test

为了更好地保证卤钨灯在长时间工作条件下的稳定性,对卤钨灯光源光强稳定性进行了测试。将检测仪连续工作 3 h,采用示波器每间隔 10 min 在 1 108 nm 波长处测量输出电压,并计算光强的变动系数为 2.53%,表明在长时间工作下光源工作稳定,满足仪器开发的需要。

2.1.2 光纤性能对比试验

为了更好地验证分叉型一分六石英光纤对土壤漫反射光的收集能力,针对同一个土壤样本,在 1 108 nm 波长下进行了不同类型光纤的性能测试,结果如表 1 所示。采用分叉型石英光纤测得输出电压最高,误差最小,并且石英光纤测量精度明显优于玻璃光纤,表明该分叉型一分六石英光纤可以应用于检测仪中。

表 1 不同光纤性能对比

Tab. 1 Comparison of different optical fiber properties

光纤类型	测量次数	电压最大值/V	电压最小值/V	平均电压/V	误差/%
玻璃光纤	50	2.21	2.02	2.12	4.3
分叉型石英光纤	50	2.86	2.83	2.84	0.7
同轴型石英光纤	50	2.81	2.78	2.80	1.2
随机型石英光纤	50	2.78	2.75	2.76	1.3

2.1.3 吸光度稳定性试验

选取单个土壤样本,对土壤样本进行干燥,过

20 目筛,使用检测仪对土壤样本进行 100 次的吸光度稳定性试验,结果如表 2 所示,可以看出测量误差均不大于 1.53%,符合土壤全氮光谱信息的测量要求。

表 2 检测仪吸光度稳定性

Tab. 2 Absorbance stability of detector

波长/nm	采集次数	吸光度最小值	吸光度最大值	吸光度平均值	误差/%
1 108	100	0.863	0.881	0.871	1.14
1 248	100	0.818	0.827	0.821	0.95
1 336	100	0.806	0.825	0.813	1.03
1 450	100	0.801	0.820	0.810	0.59
1 537	100	0.795	0.821	0.811	1.21
1 654	100	0.785	0.819	0.805	1.53

2.1.4 卤钨灯光源与 LED 对比试验

采用卤钨灯和 LED 作为主动光源对检测仪检测精度进行对比,选择傅里叶 MATRIX_I 型光谱分析仪作为吸光度检测标准仪器^[21]。采用实验室人工调配的土壤样本,将 2 种光源的便携式土壤全氮测定仪探头分别插入 30 cm 深的土壤中,获得土壤样本在敏感波长 1 108、1 248、1 336、1 450、1 537、1 696 nm 处的吸光度,并采用傅里叶光谱仪进行土壤样本 800 ~ 2 500 nm 吸光度光谱曲线的扫描。由表 3 可得,检测仪以卤钨灯作为光源与傅里叶光谱仪所测得的吸光度相关系数平均值为 0.935,检测仪以 LED 作为主动光源与傅里叶光谱仪所测得的吸光度相关系数平均值为 0.708,卤钨灯作为主动光源的检测仪的测量精度明显高于 LED 作为主动光源的检测仪。

表 3 卤钨灯光源与 LED 对比试验结果

Tab. 3 Comparison of halogen light source and LED

波长/nm	卤钨灯和傅里叶光谱仪吸光度相关系数	LED 和傅里叶光谱仪吸光度相关系数
1 108	0.935	0.701
1 248	0.931	0.707
1 336	0.946	0.696
1 450	0.938	0.705
1 537	0.929	0.719
1 696	0.924	0.702

2.2 土壤全氮检测试验

2.2.1 实验室标定试验

试验土样为采集于北京市海淀区中国农业大学上庄试验站玉米田的 60 个土壤样本,每个土样为 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吸光度,第 2 份土样样本称量 2.0 g 和催化剂混合后加浓硫

酸在 400℃ 条件下进行 2 h 的高温硝化处理,然后采用瑞典福斯公司生产的 FOSS2300 型全自动凯氏定氮仪测得每份土壤样本的全氮 (TN) 含量^[21],结果如表 4 所示,土壤全氮含量(质量比)分布 0.021 ~ 0.257 g/kg 之间,样本分布合理,表明可以用于检测仪全氮含量预测。

表 4 试验样本统计

Tab. 4 Experimental sample statistics

参数	样本数	最大值/ (g·kg ⁻¹)	最小值/ (g·kg ⁻¹)	平均值/ (g·kg ⁻¹)	方差/ (g ² ·kg ⁻²)
TN	60	0.257	0.021	0.131	0.01

为了实现土壤全氮含量的快速检测,选取 40 个土壤样本作为建模集,20 个土壤样本作为验证集,根据土壤全氮含量检测仪所测得的吸光度数据和凯氏定氮仪测得的全氮含量分别建立多元线性回归模型(Sparse multinomial logistic regression, SMLR)、BP 神经网络预测模型(Back propagation neural networks, BPNN)和偏最小二乘法(Partial least squares, PLS)预测模型,结果如图 7 和表 5 所示。采用 PLS 建模时模型精度最高, R_c^2 为 0.861 3,验证 R_v^2 为 0.804 2,可以用于检测仪的土壤全氮含量嵌入模型。

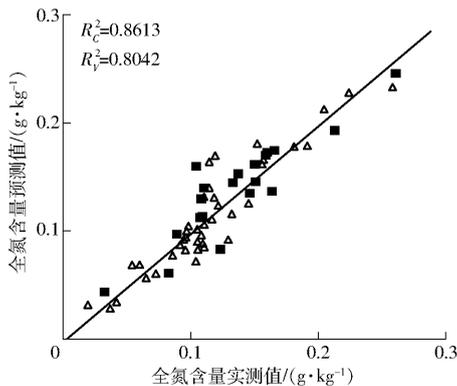


图 7 土壤全氮含量 PLS 建模

Fig. 7 PLS modeling of soil total nitrogen content

表 5 不同建模方法性能比较

Tab. 5 Performance comparison of different modeling

methods

模型	校准集		预测集	
	R_c^2	RMSEC/ (g·kg ⁻¹)	R_v^2	RMSEV/ (g·kg ⁻¹)
SMLR	0.767 9	0.212 0	0.704 1	0.128 3
BPNN	0.796 1	0.155 4	0.730 7	0.176 1
PLS	0.861 3	0.036 8	0.804 2	0.023 0

2.2.2 田间试验

2018 年 8 月 20 日,在北京市海淀区中国农业大学上庄试验站玉米田,采用设计的土壤全氮含

量实时检测仪进行 60 个采样点的土壤全氮含量检测。检测时,首先将检测仪探头插入到 30 cm 深的土壤中,打开开关进行土壤全氮含量的检测,移动端进行土壤全氮含量的显示和存储。用保鲜袋进行采样点土壤样本的采样保存,在实验室内用凯氏定氮仪进行每个土壤样本的全氮含量检测。检测仪与凯氏定氮仪所测得的全氮含量的相关分析如图 8 所示,相关系数 r 为 0.828 0,作为田间实时检测仪测量精度较高,能够满足施肥指导的目的。

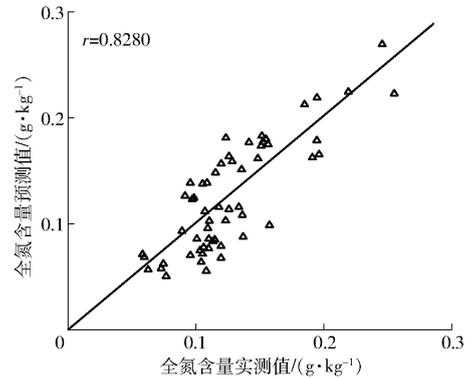


图 8 田间试验结果

Fig. 8 Result of field test

通过实验室标定试验和田间试验数据对比,发现检测仪在田间进行土壤全氮含量检测时,测量精度比实验室内检测时测量精度低,主要原因是田间实时测量的对象是原始土样,没有经过样本预处理消除土壤水分、土壤粒度和环境温度等因素的影响,在后续的研究中会加入水分和粒度修正参数,从而可进一步提高检测的精度。

3 结论

(1) 选用高功率卤钨灯代替 LED 作为主动光源,提高了检测仪的光源强度和工作稳定性。分叉型一分六光纤的设计,实现了 6 个波长吸光度同时测量,并提高了测量精度;3 层机械结构的设计,减少了检测过程中光信号的损失;设计的检测仪调理电路可以对原始信号进行稳定放大和滤波。综合性能测试结果表明,仪器精度和稳定性显著提高。

(2) 根据检测仪所测得的吸光度和定氮仪测得的全氮含量分别建立多元线性回归模型、BP 神经网络预测模型和 PLS 预测模型,其中,PLS 模型精度最高,建模 R_c^2 为 0.861 3,验证 R_v^2 为 0.804 2,可以用于检测仪土壤全氮含量预测模型的嵌入。检测仪田间实时测量结果和定氮仪测量结果的相关系数达到 0.828 0,测量精度较高,可以满足田间快速准确检测的目的。

参 考 文 献

- [1] 李民赞. 光谱分析技术及其应用[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [2] JERRY W J, LOIS W. Practical guide to interpretive near-infrared spectroscopy [M]. Boca Raton: American CRC Press, 2007.
- [3] 张娟娟,田永超,姚霞,等. 基于近红外光谱的土壤全氮含量估算模型[J]. 农业工程学报,2012,28(12):183-188.
ZHANG Juanjuan, TIAN Yongchao, YAO Xia, et al. Estimation model of soil total nitrogen content based on near infrared spectroscopy[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(12): 183-188. (in Chinese)
- [4] 杨梅花,赵小敏,方倩,等. 基于可见-近红外光谱变量选择的土壤全氮含量估测研究[J]. 中国农业科学,2014,47(12):2374-2383.
YANG Meihua, ZHAO Xiaomin, FANG Qian, et al. Study on soil total N estimation by vis-NIR spectra with variable selection [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(12): 2374-2383. (in Chinese)
- [5] 章海亮,罗微,刘雪梅,等. 应用遗传算法结合连续投影算法近红外光谱检测土壤有机质研究[J]. 光谱学与光谱分析,2017,37(2):584-587.
ZHANG Hailiang, LUO Wei, LIU Xuemei, et al. Application of genetic algorithm combined with continuous projection algorithm to detect soil organic matter by near infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectra Analysis, 2017, 37(2): 584-587. (in Chinese)
- [6] SHI T, CUI L, WANG J, et al. Comparison of multivariate methods for estimating soil total nitrogen with visible/near-infrared spectroscopy [J]. Plant and Soil, 2013, 366(1): 363-375.
- [7] VOHLAN M, LUDWIG M, THIELE B, et al. Determination of soil properties with visible to near- and mid-infrared spectroscopy: effects of spectral variable selection[J]. Geoderma: an International Journal of Soil Science,2014,223/225:88-96.
- [8] DEBAENE G, NIEDZWIECK J, PECIO A, et al. Effect of the number of calibration samples on the prediction of several soil properties at the farm-scale[J]. Geoderma: an International Journal of Soil Science,2014,214/215:114-125.
- [9] 陈通. Android系统的微型近红外光谱仪开发及在食品质量检测中的应用[D]. 镇江:江苏大学,2016.
CHEN Tong. Development of micro-near-infrared spectrometer for Android system and its application in food quality testing [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)
- [10] 倪力军,栾绍嵘,张立国. 互联网共享模式下采用(近红外)光谱技术进行中药(材)质量快速检测的探索[J]. 中国中药杂志,2016,41(19):3520-3527.
NI Lijun, PEI Shaorong, ZHANG Ligu. Exploration of rapid detection of traditional Chinese medicine (material) quality by (near infrared) spectroscopy in Internet sharing mode[J]. Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine, 2016, 41(19): 3520-3527. (in Chinese)
- [11] 糜蓉,王永,熊显名. 基于Android平台的微型光谱仪数据传输与显示研究[J]. 计算机测量与控制,2015,23(12):4259-4262.
MI Rong, WANG Yong, XIONG Xianming. Research on data transmission and display of micro spectrometer based on Android platform[J]. Journal of Computer Measurement and Control, 2015, 23(12): 4259-4262. (in Chinese)
- [12] 孙浩. 基于可见/近红外光谱技术的抹茶品质快速无损检测方法及便携式装备研发[D]. 镇江:江苏大学,2018.
SUN Hao. Rapid and non-destructive testing method of Matcha quality based on visible/near infrared spectroscopy and research and development of portable equipment[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (in Chinese)
- [13] 刘雪梅. 基于可见近红外光谱检测土壤养分及仪器开发[D]. 上海:东华大学,2014.
LIU Xuemei. Detection of soil nutrients and instrument development based on visible near-infrared spectroscopy [D]. Shanghai: Donghua University, 2014. (in Chinese)
- [14] 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. Rapid acquisition modeling and instrumentation of soil composition and plant growth information based on spectroscopy [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [15] 章海亮. 基于光谱和高光谱成像技术的土壤养分及类型检测与仪器开发[D]. 杭州:浙江大学,2015.
ZHANG Hailiang. Soil nutrient and type detection and instrument development based on spectral and hyperspectral imaging technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2015. (in Chinese)
- [16] AN X F, LI M Z, ZHENG L H, et al. A portable soil nitrogen detector based on NIRS[J]. Precision Agriculture, 2014, 15(1):3-16.
- [17] AN X F, LI M Z, ZHENG L H, et al. Eliminating the interference of soil moisture and particle size on predicting soil total nitrogen content using a NIRS-based portable detector[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 112:47-53.
- [18] YAO Xiangqian, YANG Wei, LI Minzan, et al. Prediction of total nitrogen in soils based on random frog leaping wavelet neural network[J]. Int Federat Automat Control, 2018, 201(51):660-665.
- [19] 周鹏,杨玮,李民赞,等. 基于灰度关联-极限学习机的土壤全氮预测[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(增刊):271-276.
ZHOU Peng, YANG Wei, LI Minzan, et al. Prediction of soil total nitrogen based on gray correlation-extreme learning machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.):271-276. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s041&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.041. (in Chinese)
- [20] 王星明,杨玮,李民赞,等. 集成3S,ZigBee和射频识别的土壤采样远程智能管理系统[J]. 农业工程学报,2017,33(增刊1):143-149.
WANG Xingming, YANG Wei, LI Minzan, et al. Remote sensing management system for soil sampling with integrated 3S, ZigBee and radio frequency identification[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(Supp.1):143-149. (in Chinese)
- [21] 张瑶,李民赞,郑立华,等. 基于近红外光谱分析的土壤分层氮素含量预测[J]. 农业工程学报,2015,31(9):121-126.
ZHANG Yao, LI Minzan, ZHENG Lihua, et al. Prediction of soil total nitrogen content in different layers based on near infrared spectral analysis[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(9):121-126. (in Chinese)