

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

李民赞, 潘 变, 郑立华, 安晓飞

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 开发了一款基于近红外漫反射测量的便携式土壤有机质测定仪。测定仪主要由光学单元和电路单元组成。光学单元包括光源、入射和反射光信号传导光纤、光电转换器件等。电路单元包括光源驱动电路, 放大电路、A/D转换电路、液晶显示和U盘存储电路等。工作时探头部分插入土壤形成密闭空间, 光源发出的光通过入射光纤传送到探头的顶端, 并照射顶端周围的土壤; 来自土壤的漫反射光沿反射光纤被传送到光电转换器件, 产生的电流再被送至电路单元进行放大、滤波、A/D转换、显示和存储。分别针对自然土样和烘干土样的性能试验结果表明, 反射率和SOM含量之间具有很高的相关性, 在土壤有机质实际含量大于2%时, 平均相对误差率低于5%。开发的仪器能够满足农业生产需要。

关键词 近红外光谱学; 漫反射; 土壤有机质; 测定仪

中图分类号: O657.3; S151.9 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)04-1146-05

引言

土壤有机质(soil organic matter, SOM)是土壤养分的重要组成部分, 因此探测土壤的有机质含量是了解土壤肥力的重要途径^[1]。标准的实验室化学分析方法虽然准确, 但是分析、测试过程还过于复杂, 分析设备也过于昂贵, 要求操作者必须具备较高的知识和技能, 所有这些都限制了它在农业第一线的普及和推广。

另一方面, 很多研究证明, 利用近红外光谱技术分析土壤参数是一个快速有效的手段。Bowers, Al-Abbsa, Krishnan等的早期研究分别指出土壤有机质在NIR区具有与有机化合物几种官能团相关的特征纹迹(如羟基, 羧基和胺)^[2-5]。Dalal, Morra, Ben-Dor, Sudduth, Reeves, Hummel等也研究了NIRS法预测较均匀土壤有机碳和总氮的能力, 所建立的预测模型, 都达到了很高的预测精度^[6-12]。我国科学家在利用光谱技术检测SOM含量方面也作了很深入的研究, 探索了基于多元线性回归、偏最小二乘回归方法、人工神经网络、小波变换、支持向量机等多种算法的预测模型, 取得了令人满意的分析效果^[13-18]。

目前, 利用近红外技术实现土壤参数的快速分析又成为更多学者的研究方向和课题^[19, 20]。唐宁、左月明分别提出了基于光谱技术的土壤有机质快速测定仪的设计方案, 并在实验室条件下进行性能试验, 获得了较高的检测精度^[21]。但

些设计还没有成为产品, 还不能满足便携式、实用化仪器的需要。为此, 本研究利用光、机、电一体化先进技术研制开发性能稳定, 价格合理, 适合国情的土壤有机质快速检测技术工具, 并通过试验验证仪器的性能。

1 仪器的设计

1.1 总体方案设计

作为一款实用化的便携式光学仪器设计, 确定仪器的工作方式如下。首先将光源发出的特定波长的光导入地下作物根区(深度不超过30 cm), 入射光到达土壤表面之后, 一部分被土壤吸收, 一部分产生漫反射。如果光源光的波长是土壤有机质的敏感波长, 土壤吸收的光将与土壤有机质含量成正比, 换言之来自于土壤的漫反射光的强度将与土壤有机质的含量成反比。因而, 通过测量土壤的漫反射, 就可以间接测量土壤有机质含量。

根据以上工作方式, 确定开发的土壤有机质测定仪包括光学单元和电路单元。光学单元包括光源、入射和反射光信号传导光纤、光电转换器件等。电路单元包括光源驱动电路, 放大电路、A/D转换电路、液晶显示和U盘存储电路等。土壤有机质测定仪的总体结构如图1所示。工作时探头部分插入土壤形成密闭空间, 探头中空安装有入射和反射两束光纤, 光纤开口在探头的顶端; 光源发出的光通过入射光纤传送到探头的顶端, 并照射顶端周围的土壤; 来自土壤的

收稿日期: 2009-04-08, 修订日期: 2009-07-10

基金项目: 国家(863计划)项目(2006AA10A301)和国家自然科学基金项目(30871453)联合资助

作者简介: 李民赞, 1963年生, 中国农业大学教授 e-mail: limz@cau.edu.cn

漫反射光沿反射光纤被传送到光电转换器件,产生的电流再被送至电路单元进行放大、滤波、A/D 转换、显示和存储。

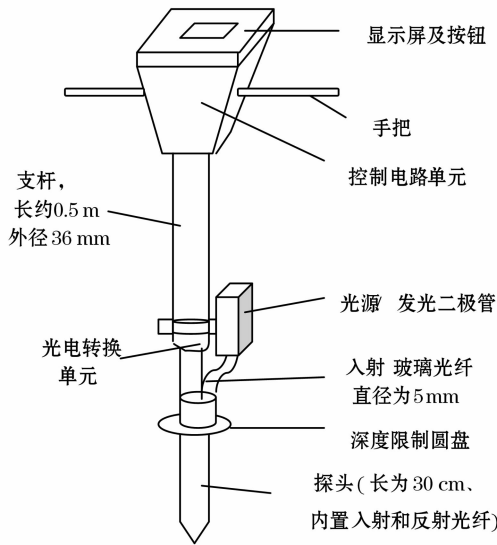


Fig. 1 Sketch map of the portable SOM detector

1.2 光路系统设计

根据仪器的总体结构,确定的光路系统结构如图 2 所示。为了尽可能地减少入射光和反射光的损失,采用 Y 型玻璃光纤进行光源的输入和输出,包括一个光入射端,一个反射光测量端,和一个同时兼有照射和收集功能的土壤探测端口。入射光纤束及反射光纤束直径均为 5 mm,入射端连接光源接收入射光,反射光测量端通过反射光纤与光电传感器相连。入射光纤束和反射光纤束在土壤探测端聚成一束(光纤束直径为 7 mm),起到同时传入射光和反射光的目的。采用玻璃光纤,不但在传输过程中损耗小,而且其本身的柔软特性能够适应分束制作成 Y 型结构的要求。

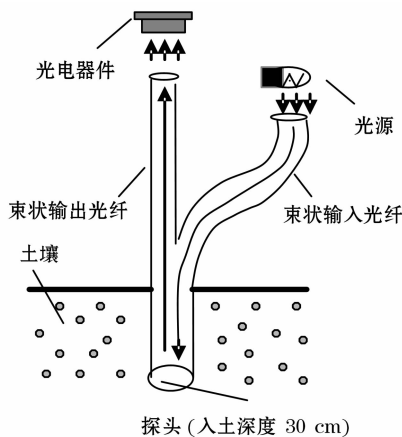


Fig. 2 The structure of the optical system

1.3 光源的设计

对光源的要求,要能够提供土壤有机质特征波长的光,要能够在较长时间内维持稳定的光通量,还要从便携式和实时测量需求出发,能耗要低。可提供近红外光线的光源有激

光器光源、卤素钨灯、发光二极管等。比较这几种光源,激光器光源和卤素钨灯或价钱较高、工作条件苛刻,或者要求大功率电源提供能量,都不能满足便携式仪器实时测量的要求。发光二极管(LED)寿命长,可靠性高,能耗小,调制电路简单,成本低,较符合便携式仪器设计的要求。最终选定 LED 作为便携式土壤有机质测定仪的光源。根据文献的研究结果,在单波长测量条件下,850 nm 被认为是测量土壤有机质含量的最佳波长,本研究确定选用中心频率为 850 nm 的 LED 光源。选用的光源的性能参数如下:直径 5 mm,半值带宽 20 nm,最大功率 100 mW,最大正向电流 50 mA,反向耐压 5 V,正向压降 1.5 V,反向电流 $\leq 10 \mu A$ 。

1.4 光学系统中其他器件的设计

(1)探头:由于仪器的设计要求以作物根区土壤作为被测对象,所以探头必须能方便地插入土壤,在插入过程中要保证光纤端面的清洁,使得入射光能够到达土壤表面,来自于土壤表面的反射光能够进入光纤并被传导至光纤传感器;同时还要保护光纤端面,避免被土壤中的小石子等损伤。因此,探头被设计成 3 段式,由锥头、光纤端头和光纤导向接头 3 部分组成,锥头是探头的顶端,以螺纹和光纤端头连接。锥头采用不锈钢材质,一方面能够更方便插入土壤测量,另一方面保护光纤。

(2)光电探测器:对光电探测器的要求是有较短的响应时间和较高的灵敏度,暗电流也要求尽量小,而对噪声等效功率、信噪比等要求不是很高,因而选定光电二极管作为光电探测器器件。

1.5 电路单元设计

电路单元包括放大电路、A/D 转换电路、液晶显示和 U 盘存储电路。电路单元原理框图,如图 3 所示。

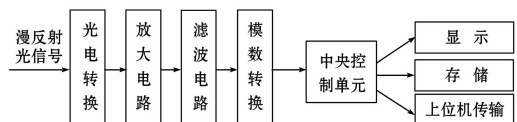


Fig. 3 The block diagram of the electronic circuits

由于仪器所采集的信号是由发光二极管发出,由光纤传输,信号比较微弱,再经光电探测器转换后得到的电信号更是微弱,另外还会有各种噪声的影响,因此,放大电路部分的设计对整个系统的稳定性和可靠性都起到十分重要的作用。本设计选用了高输入阻抗的集成运算放大器 CA3140,它具有高速、宽带和低噪声等优点。并进一步通过在 2 个调零管脚并联电阻,消除了偏置电压,获得了线性度非常高的输出。AD 转换芯片选用的是 MAX187,它是一款 12 位单通道串行输入的模数转换器,采用 +5 V 电源进行供电,采样速率是 75 kHz,内部参考电压是 4.096 V。另外,还完成了液晶显示电路和 U 盘存储电路的设计。

2 仪器的性能试验

2.1 试验材料和方法

利用人工配制的土样,对仪器进行了性能试验。土样采

用采集的东北黑土和北京郊区采集的非耕作层黄土混合调配而成。土样具体配制方法如下：将田间采集的黄土和黑土粉碎后分别经过直径为 1 mm 的筛子，使得混和后的样品颗粒比较均匀。每个样品选用黄土 75 g，然后依次分别加入 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 45, 55, 65, 75, 85 和 95 g 等 13 份黑土，搅拌均匀，得到土壤有机质含量不同的 13 种制备土样。制备土样的干基质量含水率为 20% dB 左右。每种土样被等分为 6 份子样品，5 份子样品用于仪器性能试验测量，另一份用于测量土壤有机质含量。土壤有机质的测量采用箱式电阻炉灼烧法，先将土样在 400 °C 预热 2 h，之后调至 800 °C 连续灼烧 4 h，称量样本灼烧前和灼烧后的重量，计算出 SOM 含量。13 种土样的 SOM 含量见表 1。

Table 1 SOM contents of the soil samples

序号	SOM 含量/%	序号	SOM 含量/%
1	0.39	8	3.30
2	0.78	9	3.96
3	1.14	10	4.43
4	1.59	11	5.01
5	1.95	12	5.23
6	2.26	13	5.81
7	2.68		

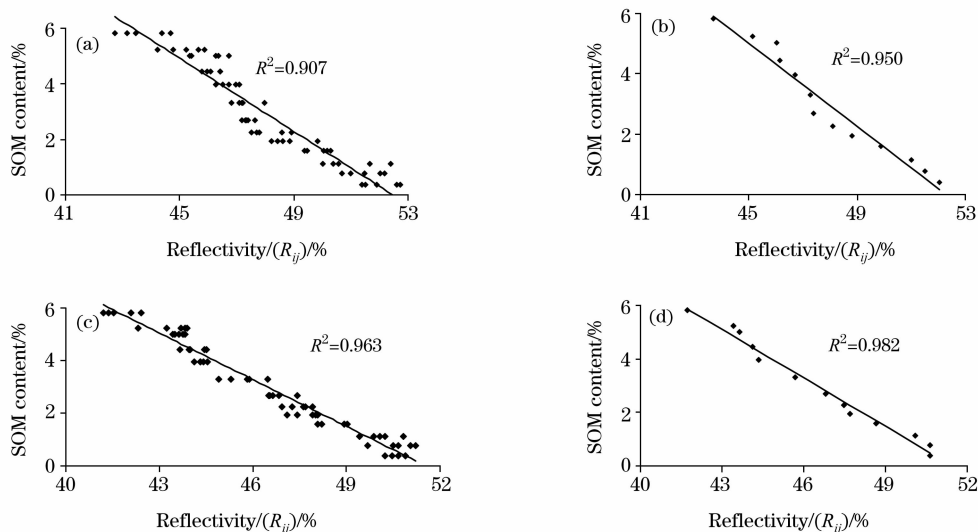


Fig. 4 The correlation between the reflectivity of the soil samples and SOM content(850 nm)

(a): Measurement results of all untreated soil samples;

(b): Calculation results of average SOM data of each group of untreated soil samples;

(c): Measurement results of all dried soil samples;

(d): Calculation results of average SOM data of each group of dried soil samples

图 4(a)和图 4(b)是自然土样的测量结果，图 4(a)显示，即使是土壤水分在 20% dB 左右的自然土样，仪器测得的近红外光反射率(850 nm)也和土壤有机质含量之间有着很高的线性相关，2 者之间的 $R^2 = 0.907$ 。图 4(b)是对同一种土样 5 个子样的反射率求平均后绘制的散点图，精度得到明显的提高， $R^2 = 0.950$ 。平均值计算前后的精度均满足农业土

仪器性能试验时，先将探头端部按压在标准白板上，测量仪器的输出电压 V_s ，然后将探头插入每份土样，分别测出仪器的输出电压 V_{ij} ($i=1, \dots, 13, j=1, \dots, 5$)，这里 i 是土样种类的序号， j 是每种土样的子样品的序号。则每份样品对应的近红外漫反射率(850 nm)由(1)式计算。

$$R_{ij} = \frac{V_{ij}}{V_s} \times 100\% \quad (1)$$

根据(2)式，可以计算每种土样的 5 份子样品反射率的平均值。

$$\bar{R}_i = \sum_{j=1}^5 R_{ij} \quad (2)$$

2.2 结果分析与讨论

性能试验共分 2 个阶段，首先对自然土样的制备土样进行测量，按上述方法共有 $13 \times 5 = 65$ 个子样品，根据(1)式计算得到 65 个漫反射率数据，并对每一种土样，依据(2)式计算了 5 个子样的反射率平均值。自然土样中含有约 20% dB 的水分。为了考察水分对 SOM 含量预测模型精度的影响，将 13 种 65 个子样品进行烘干(105 °C, 24 h)，然后对烘干土样进行了同样的测量，也获得了 65 个反射率数据和 13 个反射率平均值。

将所有的试验和计算结果绘制在散点图上，如图 4 所示。

地肥力调查以及精细农业和测土配方施肥的要求。

图 4(c)和图 4(d)是烘干土样的测量结果，用于考察土壤水分对仪器测量结果的影响。可以看到土样烘干之后，测量精度进一步得到大幅度提高。全子样测量结果显示[图 4(c)]，近红外光反射率(850 nm)和土壤有机质含量之间的线性相关度(R^2)已经达到 0.963。同一种土样 5 个子样的反射

率平均之后,相关性更高达 $R^2=0.982$ [图 4(d)]。在土壤有机质实际含量大于 2% 时,平均相对误差率低于 5%。但是本研究的目的,是开发田间实时测量的仪器,如何量化水分的影响,进而对自然土样的测量结果进行修正,使其达到烘干土样的测量精度,将是下一步中间试验的主要课题。

3 结 论

(1)开发了一款基于近红外漫反射测量的便携式土壤有机质测定仪。仪器采用 850 nm 的 LED 作为光源,采用 Y 型光纤实现光信号由光源到地下土层再由地下土层表面到光电器件的传递,设计了可以消除噪声和偏置电压的优化放大与

滤波电路。以上措施保证了仪器可以向地下土层提供稳定可靠的近红外光源,可以获得高精度的试验信号,并且降低了能耗,满足便携式仪器实时测量的要求。

(2)性能试验表明,仪器可以稳定正常工作。对自然土样的测量结果显示,反射率和 SOM 含量之间的具有很高的相关性。在自然土样的条件下(含水率在 20% dB 左右), $R^2=0.907$; 如果将同一土样 5 个子样的测量结果平均作为测量值, R^2 可提高到 0.950, 这表明开发的仪器已能满足农业生产需要。对于烘干土样,平均前后的 R^2 更分别达到 0.963 和 0.982。如何量化水分的影响,进而对自然土样的测量结果进行修正,使其达到烘干土样的测量精度,将是下一步中间试验的主要课题。

参 考 文 献

- [1] BAO Shi-dan(鲍士旦). Soil and Agricultural Chemistry Analysis(土壤农化分析). Beijing: China Agriculture Press(北京:中国农业出版社), 2000.
- [2] Bowers S, Hanks R. Soil Sci., 1965, 100: 130.
- [3] Al-Abbas A, Swain H, Baumgardner M. Soil Sci., 1972, 114: 477.
- [4] Krishnan P, Alexander J, Butler B. Soil Sci. Soc. Am. J, 1980, 44: 1282.
- [5] Krishnan P, Butler B J, Hummel J. Transactions of the ASAE, 1981, 24(2): 306.
- [6] Dalal R, Henry R. Soil Sci. Soc. Am. J., 1986, 50: 120.
- [7] Morra M, Hall M, Freeborn L. Soil Sci. Soc. Am. J., 1991, 55: 288.
- [8] Ben-Dor E, Banin A. Soil Sci. Soc. Am. J., 1995, 59: 364.
- [9] Sudduth K, Hummel J. Transactions of the ASAE, 1993, 36(1): 185.
- [10] Reeves E, McCarty G, Meisinger J. Journal of Near Infrared Spectrosc., 1999, 7: 179.
- [11] Reeves E, Van Kessel J. Journal of Near Infrared Spectrosc., 1999, 7: 195.
- [12] Hummel J, Sudduth K, Hollinger S. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 32: 149.
- [13] PENG Yu-kui, ZHANG Jian-xin, HE Xu-sheng, et al(彭玉魁, 张建新, 何绪生, 等). Acta Pedologica Sinica(土壤学报), 1998, 35(4): 553.
- [14] YU Fei-jian, MIN Shun-geng, JU Xiao-tang, et al(于飞健, 闽顺耕, 巨晓棠, 等). Chinese Journal of Analytical Laboratory(分析试验室), 2002, 21(3): 49.
- [15] LI Min-zan(李民赞). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2003, 19(5): 36.
- [16] ZHU Deng-sheng, WU Di, SONG Hai-yan, et al(朱登胜, 吴迪, 宋海燕, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2008, 24(6): 196.
- [17] DING Hai-quan, LU Qi-peng, PIAO Ren-guan, et al(丁海泉, 卢启鹏, 朴仁官, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2007, 15(12): 1946.
- [18] CHEN Peng-fei, LIU Liang-yun, WANG Ji-hua, et al(陈鹏飞, 刘良云, 王纪华, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2008, 28(2): 295.
- [19] Shonk J, Gaultney L, Schulze D, et al. Transactions of the ASAE, 1991, 34(5): 1978.
- [20] Li M, Sasao A, Shibusawa S, et al. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2000, 62(3): 111.
- [21] LI Jin-yang, ZUO Yue-ming, ZHANG Jun(李晋阳, 左月明, 张军). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2007, 38(8): 117.

Development of a Portable SOM Detector Based on NIR Diffuse Reflection

LI Min-zan, PAN Luan, ZHENG Li-hua, AN Xiao-fei

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

Abstract A portable soil organic matter detector based on near infrared diffuse reflectance was developed. The detector uses a microprocessor 89S52 as the micro controller unit (MCU) and consists of an optical system and a control system. The optical system includes an 850 nm near-infrared LED lamp-house, a lamp-house driving-circuit, a Y type optical fiber, a probe, and a photoelectric sensor. The control system includes an amplifying circuit, an A/D circuit, a display circuit with LCD, and a storage circuit with USB interface. Firstly the single waveband optical signal from the near-infrared LED is transferred to the surface of the target soil via the incidence fibers. Then the reflected optical signal is collected and transferred to the photoelectric sensor, where the optical signal is converted to the electrical signal. Subsequently, the obtained electrical signal is processed by 89S52 MCU. Finally, the calculated soil organic matter content is displayed on the LCD and stored in the USB disk. The calibration experiments using the estimation model of the soil organic matter were conducted. Thirteen kinds of natural soil samples were prepared, each divided into five sub-samples. After measurement, the natural samples were dried under the condition of 105 °C for 24 h, and then the same measurements were performed. The analysis of the correlation between the detected SOM content and the measured reflectance was carried out. For the natural soil samples, $R^2=0.907$, while R^2 reached 0.963 for the dried soil samples. The average reflectance of the five sub-samples from the same kind soil was calculated for each kind of soil. And then the same correlation analysis was conducted, for the natural samples $R^2=0.950$, and for the dried samples $R^2=0.982$. The results showed that the developed detector is practical. And the soil moisture has an effect on the accuracy of the detector. It is necessary to correct the real time measurement result of the detector based on soil moisture.

Keywords NIR spectroscopy; Diffuse reflection; Soil organic matter; Detector

(Received Apr. 8, 2009; accepted Jul. 10, 2009)