

便携式土壤全氮测定仪性能研究*

安晓飞¹ 李民赞¹ 郑立华¹ 刘玉萌¹ 张亚静²

(1. 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;

2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

【摘要】 为研究土壤全氮含量,自主开发了基于近红外光谱技术的便携式土壤全氮测定仪。以中国农业大学上庄实验站采集的60个土壤样本作为实验材料,分别对土壤全氮测定仪的稳定性、准确性和预测模型精度进行了测试。使用模型的测定系数(R_c)、验证系数(R_v)、校正均方根误差(RMSEC)、预测均方根误差(RMSEP)和相对分析误差(RPD)作为模型精度的评价指标。实验结果显示,本测定仪在波长940、1 050、1 100、1 200、1 300、1 450和1 550 nm处的吸光度重复性误差分别为1.57%、1.80%、1.59%、0.94%、0.61%、0.64%和3.13%,平均误差1.80%;测定仪吸光度和傅里叶光谱分析仪吸光度相关系数分别达到0.971、0.948、0.928、0.873、0.920、0.901和0.913,平均值为0.922;使用测定仪平均吸光度数据,通过BP神经网络建立的土壤全氮预测模型 R_c 、 R_v 、RMSEC、RMSEP和RPD分别达到0.81、0.80、0.029、0.019和3.44。使用该预测模型建立的土壤全氮分布图和实际土壤全氮分布图具有高度的一致性。实验结果表明,便携式土壤全氮测定仪工作稳定,使用平均吸光度数据建立的土壤全氮预测模型具有较好的预测能力和较强的鲁棒性,可以在土壤全氮含量实时检测中应用。

关键词: 土壤 近红外光谱 全氮 便携式土壤传感器

中图分类号: O657.3; S126 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)S0-0283-06

Performance of Portable Soil TN Detector Based on NIR Spectroscopy

An Xiaofei¹ Li Minzan¹ Zheng Lihua¹ Liu Yumeng¹ Zhang Yajing²

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education,

China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract

In order to detect soil total nitrogen (TN) content, a portable soil TN detector was developed. The stability, accuracy and precision of the detector were tested with the sixty soil samples collected from Shangzhuang Experiment Station of China Agricultural University. The models were evaluated by the correlation coefficient of calibration (R_c), the correlation coefficient of validation (R_v), root mean square error of calibration (RMSEC), root mean square error of prediction (RMSEP) and residual prediction deviation (RPD). The results showed that the repeatability error of 940 nm, 1 050 nm, 1 100 nm, 1 200 nm, 1 300 nm, 1 450 nm and 1 550 nm were 1.57%, 1.80%, 1.59%, 0.94%, 0.61%, 0.64% and 3.13%, respectively. The correlation coefficients between the absorbance of soil TN detector and that of MATRIX_I Fourier spectral analyzer were 0.971, 0.948, 0.928, 0.873, 0.920, 0.901 and 0.913, respectively. The R_c , R_v , RMSEC, RMSEP and RPD of the model established by BP neural network was 0.81, 0.80, 0.029, 0.019 and 3.44, respectively. The experiment indicated that the portable soil TN detector performed well.

Key words Soil, Near infrared reflectance spectroscopy, Total nitrogen, Portable soil sensor

收稿日期: 2012-07-07 修回日期: 2012-07-16

* 国家自然科学基金资助项目(61134011)

作者简介: 安晓飞, 博士生, 主要从事电子信息技术在农业中的应用研究, E-mail: anxiaofei@cau.edu.cn

通讯作者: 李民赞, 教授, 博士生导师, 主要从事精细农业系统集成研究, E-mail: pact@cau.edu.cn

引言

精细农业变量施肥取决于对农田的土壤养分分布信息的了解,快速获取土壤养分信息是实施精细农业的基础^[1~2]。近红外光谱分析方法具有快速、高效、无损和适合在线分析等优点。近年来,采用近红外光谱技术获取土壤养分信息,成为国内外学者研究的重点^[3~16]。

Dalal 等^[3]在 1 100~2 500 nm 范围内使用近红外光谱反射率建立了土壤水分、有机质和土壤全氮的预测模型。Reeves 等^[4~5]使用近红外光谱技术建立了土壤全氮预测模型,决定系数都在 0.9 以上。何勇等^[6]使用近红外光谱技术建立了土壤全氮、有机质和 pH 值的预测模型,决定系数分别为 0.93、0.93 和 0.91,预测标准差分别为 3.28、0.06 和 0.07。李颀等^[7]使用傅里叶光谱分析仪,对北京市郊 72 个土样使用偏最小二乘(PLSR)方法建立了土壤全氮、钾、磷和 pH 值的预测模型,模型的决定系数分别达到了 0.95、0.86、0.90 和 0.87。郑立华^[8~12]等使用 BP 神经网络(BPNN)、支持向量机(SVM)和小波变换(WT)的方法分别建立了土壤全氮和有机质的预测模型。此外,Shibusawa 等^[14~16]在便携式近红外光谱仪的设计和研究中也取得了一些结果。

近年来使用近红外光谱技术检测土壤全氮的研究取得了不少的进展,但是大部分都是在室内条件下,使用光谱仪进行数据获取和建模。到目前为止,还没有一款能够实际应用在田间实时检测条件下的便携式设备和模型。本研究的目的是对自主开发的便携式土壤全氮测定仪的稳定性和准确性进行测试,建立土壤全氮预测模型,实现土壤全氮的田间测量。

1 材料与方法

1.1 实验材料

中国农业大学上庄实验站位于北京市海淀区上庄镇辛力屯村,占地 66.67 hm²。本研究的土壤采自实验站玉米田,采集范围为东经 116.103 650 82°~116.103 742 39°,北纬 40.075 829 492°~40.075 844 864°,土壤类型属褐土土质,有很强的代表性。采样深度为除表层土壤后 1~20 cm,采样质量 1.0~1.5 kg。为了减少人为操作带来的误差,本次采集的土样同属一个批次,统一烘干后的土样过 20 目筛,进行统一编号后,用自封袋对土样进行密封保存。用四分法取 2 份各 60 个土样,一份进行常规化学测量值分析,另一份进行近红外光谱检测分析,光谱仪分别使

用自主开发的土壤全氮测定仪和 MATRIX-1 型傅里叶近红外光谱分析仪。

1.2 实验仪器

1.2.1 便携式土壤全氮测定仪

本研究使用的实验仪器是自主开发的基于近红外光谱技术的便携式土壤全氮测定仪。测定仪采用自带光源发出的光信号取代太阳光,测量土壤相关参数的检测探头深入到土壤表层以下 30 cm 处^[17]。测定仪由光学部分和控制部分组成。光学部分包括 7 个波长的近红外光源^[18~20](1 550、1 450、1 300、1 200、1 100、1 050 和 940 nm)、光源驱动电路、Y 型入射/反射光纤、探针以及 InGaAs 光电探测器;控制部分包括放大电路、滤波电路、A/D 转换电路、液晶显示电路以及 U 盘存储电路。

图 1 是测定仪总体结构设计图,图 2 是测定仪原理图。近红外光源提供的单波段光信号经过 Y 型光纤传输到土壤样本表面进行光谱信息测量,其中一部分光信号被土壤吸收,另一部分光信号在土壤表面形成漫反射,反射的光信号通过光纤将信息反馈回来,传至 InGaAs 光电探测器表面,光电探测器将光信号转换为电信号。电路系统对电信号进行放大、滤波和 A/D 转换等,最后送入 89S52 单片机系统^[21]。数据经系统处理后,在 LCD 显示检测结果,并可以通过串口方便地实现与上位机进行数据传送或进行 U 盘存储。图 3 是测定仪示意图。

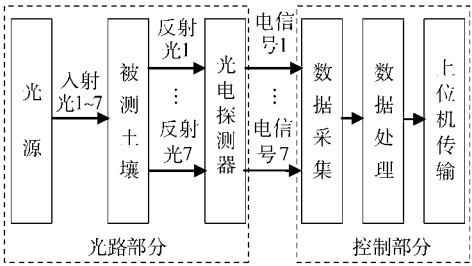


图 1 测定仪总体结构设计图

Fig. 1 Overall structure

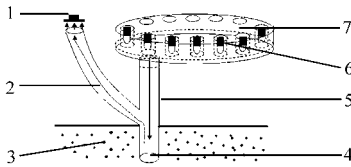


图 2 测定仪原理图

Fig. 2 Schematic diagram of TN detector

1. InGaAs 光电探测器 2. 反射光纤 3. 土壤 4. 探头 5. 入射光纤 6. LED 光源 7. LED 光源位置

当测定仪开始工作时,首先将测定仪探头放置在标准白板上,测得输出电压信号;然后将探头插入土壤中,测得输出电压信号,依次测得土壤在波长 1 550、1 450、1 300、1 200、1 100、1 050 和 940 nm 处的

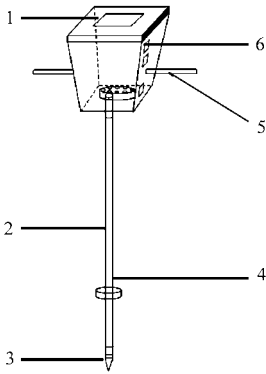


图 3 测定仪示意图

Fig. 3 Prototype of TN detector

1. 液晶屏 2. 光纤 3. 探头 4. 30 cm 处标志 5. 手柄 6. 开关

土壤反射率和土壤吸光度为

$$r_i = \frac{V'_i}{V_i} \times 100\% \tag{1}$$

$$A_i = \lg \left(\frac{1}{r_i} \right) \quad (i = 1, 2, \cdots, 7) \tag{2}$$

式中 V_i ——在 7 个波长处测定仪探头在标准板上测得的电压输出值

V'_i ——在 7 个波长处测定仪探头在土壤中测得的电压输出值

1.2.2 MATRIX-I 型傅里叶光谱分析仪

德国布鲁克公司生产的 MATRIX-I 型傅里叶变换近红外光谱仪带有旋转样品池,可以直接将少许土样放入样品池中进行测量。光谱测量范围、分辨率和扫描次数可以根据需要设置^[8]。光谱仪的光谱测量范围设定为 12 798 ~ 3 599 cm⁻¹ (781 ~ 2 779 nm);分辨率为 4 cm⁻¹;波数精度为 0.1 cm⁻¹;扫描次数为 32 次。

2 结果讨论与分析

2.1 数据预处理

将采集到的 60 个土壤样本经过烘干箱烘干,过 20 目筛粉碎,使用 FOSS 2300 型定氮仪对土壤全氮进行测定。使用便携式土壤全氮测定仪和 MATRIX-I 型傅里叶近红外光谱分析仪分别对 60 个样本进行光谱吸光度的扫描。便携式土壤全氮测定仪扫描 7 个波长的土壤吸光度, MATRIX-I 型傅里叶近红外光谱分析仪扫描 781 ~ 2 500 nm 的土壤吸光度。测定仪平均后的吸光度和 MATRIX-I 型傅里叶近红外光谱分析仪 15 nm 半带宽平均吸光度为

$$A_{iavg} = \frac{\sum_{n=1}^6 A_i}{6} \quad (i = 1, 2, \cdots, 7) \tag{3}$$

$$M_{iavg} = \frac{\sum_{n=1}^{30} M_{i-15+n}}{30} \tag{4}$$

式中 M_i ——7 个波长处 MATRIX-I 型傅里叶光谱分析仪吸光度

2.2 实验数据统计分析

对 60 个土样的土壤含水率 (SM)、土壤全氮 (TN) 和 pH 值进行统计发现,土壤全氮质量分数在 0.037% ~ 0.357% 之间,平均质量分数为 0.132%。样本范围分布合理,梯度明显,适合于光谱仪建模。表 1 是实验样本统计结果。

表 1 实验样本统计

Tab. 1 Statistics of soil samples

参数	样本个数	最大值	最小值	平均值	中位值	方差
SM/%	60	30.90	0.39	16.18	15.12	10.12
TN/%	60	0.357	0.037	0.132	0.120	0.006
pH 值	60	8.60	7.94	8.37	8.42	0.03

2.3 测定仪稳定性测试

选取单个土壤样本,在实验室室温下对土壤 7 个波长的吸光度进行 15 次重复测试。表 2 是土壤吸光度稳定性的测试结果,从表 2 中可以看出,7 个波长处的测试误差结果均小于 3.50%,满足土壤光谱的测定要求。

表 2 土壤吸光度稳定性测试结果 (室温)

Tab. 2 Stability test of detector

波长 /nm	测试次 数/次	吸光度 最大值	吸光度 最小值	吸光度 平均值	误差 /%
940	15	0.971	0.921	0.946	1.57
1 050	15	0.922	0.871	0.896	1.79
1 100	15	0.925	0.877	0.901	1.59
1 200	15	0.883	0.856	0.869	0.94
1 300	15	0.869	0.850	0.860	0.61
1 450	15	0.919	0.894	0.907	0.64
1 550	15	0.946	0.853	0.900	3.13

2.4 测定仪准确性测试

为了更好地描述便携式测定仪的性能,用测定仪和 MATRIX-I 型傅里叶光谱分析仪吸光度数据进行了相关性分析。7 个波长测定的 A_i 和 M_i 的相关系数分别达到 0.936、0.874、0.760、0.846、0.832、0.779 和 0.810;将测定仪吸光度数据通过式 (3) 进行处理后, A_{iavg} 和 M_i 相关系数分别达到 0.946、0.895、0.842、0.863、0.870、0.886 和 0.855;将傅里叶近红外光谱分析仪吸光度数据通过式 (4) 处理后, A_{iavg} 和 M_{iavg} 相关系数分别达到 0.971、0.948、0.928、0.873、0.920、0.901 和 0.913。

从 3 种不同的吸光度处理方式可以看出, A_i 和 M_i 、 A_{iavg} 和 M_i 、 A_{iavg} 和 M_{iavg} 的相关系数依次提高,从

平均为 0.834 提高到了平均为 0.922。这说明使用 LED 作为主动光源可以获取土壤样本反射的光谱信息。

表 3 测定仪准确性测试结果
Tab.3 Accuracy test of detector

波长/nm	相关系数		
	A_i 和 M_i	A_{iavg} 和 M_i	A_{iavg} 和 M_{iavg}
940	0.936	0.946	0.971
1 050	0.874	0.895	0.948
1 100	0.760	0.842	0.928
1 200	0.846	0.863	0.873
1 300	0.832	0.870	0.920
1 450	0.779	0.886	0.901
1 550	0.810	0.855	0.913

2.5 土壤全氮性能验证

2.5.1 土壤全氮预测模型

用傅里叶光谱分析仪吸光度数据和经过式(3)、(4)处理过的吸光度数据分别建立土壤全氮预测模型。建模方法采用 BP 神经网络方法。BPNN 算法能避免人为操作因素对模型的影响。随着训练的进行,目标值与理论计算输出值越来越接近,直到满足所需的值。6 个波长(940、1 050、1 100、1 200、1 300、1 550 nm)的土壤吸光度数据作为输入层,土壤全氮作为输出层。学习速率、动量因子都设置为默认值,回归误差设置为 0.006,最大迭代次数设定为 3 000 次。最佳的网络结构为 6-20-1。图 4 是 BPNN 建模结果,模型 a 是使用 MATRIX-I 型傅里叶光谱分析仪 6 个波长吸光度的建模(图 4a),模型 b 是使用 MATRIX-I 经式(4)处理后的 6 个波长吸光度的建模(图 4b),模型 c 是使用测定仪经式(3)处理后的 6 个波长吸光度的建模(图 4c)。

从图 4 可以明显看出,使用 MATRIX-I 型傅里叶光谱分析仪建立的模型 b 效果最优, R_c 、 R_v 、RMSEC、RMSEP 和 RPD^[22] 分别达到 0.88、0.85、0.026、0.038 和 3.55;使用测定仪建立的模型 c,虽然 R_c 和 R_v 有所下降,分别为 0.81 和 0.80,但是 RMSEC 和 RMSEP 和模型 b 相差无几,分别达到 0.029 和 0.019,RPD 的 3.44 虽然与模型 b 的 3.55 相比,有所降低,但是模型具有实用精度,仍然可以用于定量测定土壤全氮。

2.5.2 土壤全氮对比

使用 Surfer 8.0 软件对玉米田的土壤全氮进行分布图生成。从图 5 可以看出,在 3 幅图中均可以明显看出土壤全氮的走向均为北低南高的走向,而

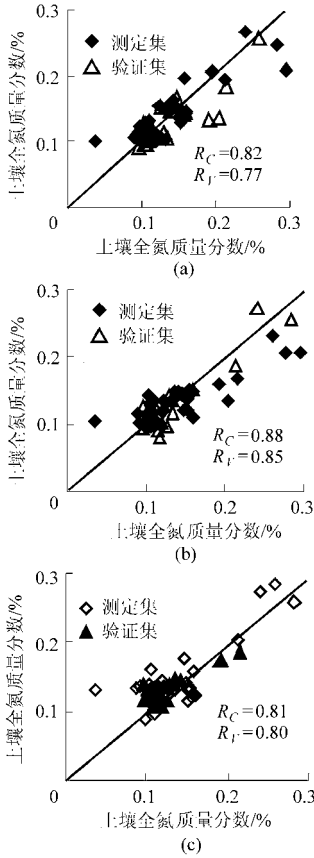


图 4 土壤全氮建模结果
Fig.4 Results of soil TN models
(a) 模型 a (b) 模型 b (c) 模型 c

本区玉米田实施了变量施肥,施肥方式也是北低南高的模式。通过土壤全氮分布图的对比说明使用傅里叶光谱分析仪和土壤全氮测定仪均可以反映出土壤全氮的真实分布情况。

2.6 讨论

本研究中使用自主开发的土壤全氮测定仪进行了一系列的性能实验和研究。使用 LED 作为主动光源实现了土壤全氮测定仪的便携性和实时性。对 7 个波长 940、1 050、1 100、1 200、1 300、1 450 和 1 550 nm 的吸光度分别进行重复性测量,发现各个波长的重复误差均在 3.50% 以下,和傅里叶光谱分析仪的对应波长的相关性分别为 0.936、0.874、0.760、0.846、0.832、0.779 和 0.810;使用数据预处理方法可以明显提高吸光度的相关性,从平均 0.834 提高到 0.922。

测定仪有良好的稳定性和准确性,在这个基础上,使用 BP 神经网络方法建立了多个土壤全氮预测模型,模型结果显示测定仪建立的模型结果较优,相对分析误差达到 3.44,虽然较 MATRIX-I 型傅里叶光谱分析仪的 3.55 稍低,但是模型已经达到定量预测水平。从对应的土壤全氮分布图也可以看出该模型的预测效果和真实土壤全氮分布图规律高度一致。

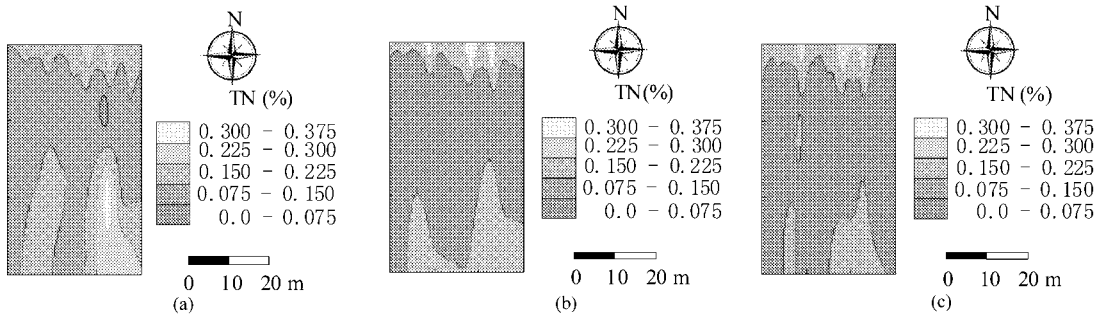


图5 土壤全氮分布图对比

Fig.5 Distributions of soil TN contents

(a) 土壤全氮实测值分布图 (b) 土壤全氮 MATRIX-I 型傅里叶光谱分析仪预测值分布图 (c) 土壤全氮测定仪预测值分布图

3 结论

(1)自主开发的便携式土壤全氮测定仪具有良好的稳定性和准确性,重复性误差小于 3.50%,测定仪吸光度和 MATRIX-I 型傅里叶光谱分析仪吸光度相关系数达到 0.873 以上。

(2)使用 BP 神经网络建立的土壤全氮预测模

型测定系数、验证系数、校正均方根误差、预测均方根误差和相对分析误差分别达到 0.81、0.80、0.029、0.019 和 3.44,和傅里叶光谱分析仪数据所建模型基本一致,满足田间的需要;多种方法生成土壤全氮分布图显示,各模型的预测值和真实的土壤全氮分布图走向高度一致,可以反映出土壤全氮的真实情况。

参 考 文 献

- 汪懋华. “精细农业”发展与工程技术创新[J]. 农业工程学报,1999,15(1):1~8.
Wang Maohua. Development of precision agriculture and innovation of engineering technologies [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15(1):1~8. (in Chinese)
- Jerry W J, Lois W. Practical guide to interpretive near-infrared spectroscopy [M]. Boca Raton: American CRC Press, 2007.
- Dalal R C, Henry R J. Simultaneous determination of moisture, organic carbon, and total nitrogen by near infrared reflectance spectroscopy [J]. Soil Sci. Plant Anal., 1986, 2(2):73~84.
- Reeves J B, McCarty G W, Meisinger J J. Near infrared reflectance spectroscopy for the analysis of agricultural soils [J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 1999, 7(3):179~193.
- Reeves J B, McCarty G W. Quantitative analysis of agricultural soils using near infrared reflectance spectroscopy and fibre-optic probe [J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2001, 9(1):25~34.
- He Y, Huang M, Garcia A, et al. Prediction of soil macronutrients content using near-infrared spectroscopy [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 58(2):144~153.
- 李颀,张小超,苑严伟,等. 北京典型耕作土壤养分的近红外光谱分析[J]. 农业工程学报,2012,28(2):176~179.
Li Jie, Zhang Xiaochao, Yuan Yanwei, et al. Analysis of soil nutrient content based on near infrared reflectance spectroscopy in Beijing region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(2):176~179. (in Chinese)
- 郑立华. 基于光谱学土壤参数检测方法研究[D]. 北京:中国农业大学,2007.
- 郑立华,李民赞,潘雯,等. 基于近红外光谱技术的土壤参数 BP 神经网络预测[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(5):1160~1164.
Zheng Lihua, Li Minzan, Pan Luan, et al. Estimation of soil organic matter and soil total nitrogen based on NIR spectroscopy and BP neural network[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(5):1160~1164. (in Chinese)
- 郑立华,李民赞,潘雯. 近红外光谱小波分析在土壤参数预测中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(6):1549~1552.
Zheng Lihua, Li Minzan, Pan Luan. Application of wavelet packet analysis in estimating soil parameters based on NIR spectra[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(6):1549~1552. (in Chinese)
- 孙建英,李民赞,郑立华,等. 基于近红外光谱的北方潮土土壤参数实时分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(3):426~429.
Sun Jianying, Li Minzan, Zheng Lihua, et al. Real-time analysis of soil moisture, soil organic matter, and soil total nitrogen with NIRS[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26(3):426~429. (in Chinese)
- 孙建英,李民赞,唐宁,等. 东北黑土的光谱特性及其与土壤参数的相关性分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2007,

27(8):1 502 ~ 1 505.

Sun Jianying, Li Minzan, Tang Ning, et al. Spectral characteristics and their correlation with soil parameters of black soil in northeast China[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007,27(8): 1 502 ~ 1 505. (in Chinese)

- 13 Shibusawa S, Hirako S, Otomo A, et al. Real-time soil spectrophotometer for in-situ underground sensing[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2000, 62(5):79 ~ 86.
- 14 Shibusawa S. On-line real time soil sensor[C]//Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechanics, 2003: 1 061 ~ 1 066.
- 15 Adamchuk V I, Hummel J W, Morgan M T, et al. Feasibility of on-the-go mapping of soil nitrate and potassium using ion-selective electrodes[C]//ASABE Annual Meeting, Paper No.021183, 2002.
- 16 Adamchuk V I, Hummel J W, Morgan M T, et al. On-the-go soil sensors for precision agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 44(1): 71 ~ 91.
- 17 潘雯. 基于近红外光谱技术的土壤有机质测定仪的开发[D]. 北京:中国农业大学,2007.
- 18 An Xiaofei, Li Minzan, Zheng Lihua. Estimation of soil total nitrogen and soil moisture based on NIRS technology[C]//The Fifth International Conference of Computer and Computing Technology in Agriculture, 2011.
- 19 李民赞. 光谱分析技术及其应用[M]. 北京:科学出版社,2006.
- 20 陆婉珍. 现代近红外光谱分析技术[M]. 2 版. 北京:中国石化出版社,2006.
- 21 王东锋,王会良,董冠强. 单片机 C 语言应用 100 例[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
- 22 Mouazen A M, Karoui R, De Baerdemaeker J,et al. Characterization of soil water content using measured visible and near infrared spectra [J]. Soil Science Society of American Journal, 2006, 70(4):1 295 ~ 1 302.

(上接第 234 页)

参 考 文 献

- 1 董宽虎,王常慧,牧原. 干燥方法对苜蓿草粉营养价值的影响[J]. 草地学报,2003,7(4):334 ~ 337.
Dong Kuanhu, Wang Changhui, Mu Yuan. Effects of different drying methods on the nutritive value of alfalfa meal[J]. Acta Agrestia Sinica, 2003,7(4): 334 ~ 337. (in Chinese)
- 2 杨世昆,苏正范. 饲草生产机械与设备[M]. 北京:中国农业出版社,2009.
- 3 杨世昆,杨文大,刘贵林,等. 交替供热式太阳能饲草干燥设备: 中国,ZL200320124589.3[P]. 2003-11-14.
- 4 Bolsen K C. Personal communication—unpublished data[M]. ManhaRen;Kansas State University, 1985.
- 5 Collins M. Wetting and maturity effects on the yield and quality of legume hay[J]. Agronomy Journal,1983,75(3):523 ~ 527.
- 6 Montague W D,Teuber L R. Changes in forage equality of improved alfalfa populations[J]. Crop Science, 1986,26(6):1 137 ~ 1 143.
- 7 Llovera J,Ferran J. Harvest management effects on alfalfa production and quality in mediterranean areas[J]. Grass and Forage Science, 1998,53(1):88 ~ 92.
- 8 Rotz C A,Abrams S M. Losses and quality changes during alfalfa hay harvest and storage[J]. Transactions of the ASAE,1988, 31(2):350 ~ 355.
- 9 Tomes N J,Soderlund S,Lampsey,et al. Preservation of alfalfa hay by microbial inoculation at baling[J]. Journal of Production Agriculture,1990,3(4):491 ~ 497.