doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.025

近红外传感器测量不同种类土壤含水率的适应性研究*

殷　哲　雷廷武　陈展鹏　晏清洪　董月群
（中国农业大学水利与土木工程学院，北京 100083）

摘要：采用我国不同土壤类型地区的 5 种土壤样品，利用自行设计的近红外传感器测量不同土壤含水率对应的反射光强。选取中心波长 1 940 nm 的近红外光为测量光，1 800 nm 为参考光，将两波长的反射光强值换算为相对吸收深度。实测结果表明，随着土壤含水率的增加，相对吸收深度增加，两者间呈线性相关关系。选取独立样品对线性标定模型进行验证，除红土外，其他 4 种样品的均方根误差均小于 6%。通过标定，所设计的传感器能够较好地测定不同土壤的含水率。

关键词：土壤含水率　近红外　传感器　模型适应性
中图分类号：S152.7；TN219　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2014)03-0148-04

引言

传统的土壤含水率测量方法依靠土壤电导率、介电常数、中子衰减和 γ 射线等，测量过程费力，对土壤有破坏性，并且测量结果反映的是某一体积内的平均土壤含水率，无法实现对土壤表面水分的测量。近红外反射法以其便携、快速、非接触、重复性强等优点，被广泛应用于土壤含水率的测量，同时，能够满足野外实时、快速测量的要求[1-3]。

土壤是由矿物质、有机质、水和空气组成的多孔介质[4]。土壤的近红外光谱图(780 ~ 2 500 nm)表明，土壤中的水分对中心波长 970、1 450 和 1 940 nm 的光有强烈吸收，其中对波长 1 940 nm 的光吸收最强烈，由于土壤对近红外光的吸收来自于 C—H、O—H 和 N—H 键的振动，因此近红外反射法可以有效定量测量土壤中的碳、水分和氮[5-8]。

土壤的反射强度是由土壤颗粒内部的散射和土壤中特定成分对近红外光的吸收决定的，大量学者研究了土壤水分对土壤表面近红外反射光强的影响，结果表明，随着土壤含水率的增加，土壤表面近红外反射光强减小[9-16]。同时，土壤类型对土壤表面的反射光强及近红外反射法土壤含水率预测模型有很大影响。由于土壤样品的黏度和表面质地等变化都会使标定模型不同，因此对不同类型的土壤建立统一的模型仍十分困难。以上研究都是利用光谱仪在实验室内对不同类型土壤进行研究，本文利用自行设计的近红外传感器测量不同土壤含水率对应的反射光强，选取中心波长 1 940 nm 的近红外光为测量光，1 800 nm 为参考光，建立标定模型并验证传感器对不同种类土壤含水率的适应性。

1　试验材料与方法

1.1　试验材料

选用不同类型的 5 种土壤作为试验用土，分别为我国东北地区的黑土(Soil 1)、陕西杨凌地区的粘黄土(Soil 2)、延安地区的黄绵土(Soil 3)、重庆的紫色土(Soil 4)和江西地区红土(Soil 5)。土壤特性参数如表 1 所示。由于近红外光在土壤内部的传播深度很浅，只能与土壤表面产生反射和吸收，因此，在配置不同含水率的土壤样品时，为保证土壤内部与表面含水率的均匀性，将土壤放入压力膜仪内，设置不同压力加压排水，排完水后对样品称量，直到土壤在 1.5 MPa 压力作用下没有水分排出，对样品进行加热干燥(105℃，24 h)，通过计算得到不同含水率的土壤样品。取 1.5 MPa 压力是因为一般土壤在 1.5 MPa 压力作用下的土壤含水率已接近凋萎系数，土壤中的水分无法满足植物生长需求。

将每种土壤的样本分为标定集和验证集，标定集用来建立预测模型，验证集用来检验传感器测量结果。表 2 给出了每种土壤对应的标定集和验证集的样本数，以及土壤水分的统计特征。表 2 中土壤含水率变化较大，具有较大的标准差，便于建立预测模型。

收稿日期：2013-04-17　修回日期：2013-05-25
*国家自然科学基金重点项目(41230746)和中国农业大学研究生科研创新专项资助项目(KYCX2010101)
作者简介：殷哲，博士生，主要从事水土保持研究，E-mail：yinzhe-2002@163.com
通讯作者：雷廷武，教授，博士生导师，主要从事土壤侵蚀和旱地农业研究，E-mail：leitingwu@cau.edu.cn

表 1　土壤特性

Tab. 1　Character of five soils

土壤编号	沙粒质量分数/%	粉粒质量分数/%	粘粒质量分数/%	土壤容重/(g·cm^{-3})	负压 1.5 MPa 时土壤含水率/%
Soil 1	45	40	15	1.33	13.6
Soil 2	23	48	29	1.31	11.1
Soil 3	25	36	39	1.26	6.0
Soil 4	61	20	19	1.41	9.5
Soil 5	25	32	43	1.40	8.9

表 2　土壤含水率参数特征

Tab. 2　Measured value of soil water parameters

	土壤编号	样品数	含水率/%	均值/%	标准差/%
标定集	Soil 1	45	0 ~ 50.1	33.3	11.2
	Soil 2	53	0 ~ 50.0	31.5	10.5
	Soil 3	41	0 ~ 52.0	32.7	13.4
	Soil 4	43	0 ~ 47.1	30.5	11.2
	Soil 5	43	0 ~ 46.4	26.5	12.3
验证集	Soil 1	29	16.6 ~ 48.5	33.3	8.5
	Soil 2	28	16.7 ~ 49.0	31.6	8.6
	Soil 3	28	8.4 ~ 51.3	32.0	11.4
	Soil 4	28	15.1 ~ 45.0	30.9	7.6
	Soil 5	26	11.7 ~ 44.0	22.9	10.8

1.2　试验仪器

利用实验室设计的近红外土壤含水率传感器测量土壤表面的近红外反射光强，传感器的光源包括 1 800 nm 波长的参考光和 1 940 nm 波长的测量光。图 1 所示，传感器中光电转换器垂直于土壤上方，距离土壤表面 15 mm，测量波长和参考波长对应光源的入射光线分别与土壤表面成 45 °夹角。围绕光电传感器，在其侧面均匀安装 6 个发光二极管(LED)，分别是 3 个参考波长光源和 3 个测量波长光源，相邻两个光源的水平投影夹角是 60°。单片机系统控制光源的闭合，相隔一定时间交替发射脉冲光。LED 发出的光直射到土壤表面，在土壤表面形成直径为 6 mm 的光斑。光电转换器具有很宽的波长响应范围(800 ~ 2 600 nm)，峰值波长 2.0 ~ 2.2 μm，对 1 800 nm 和 1 940 nm 波长的光具有很强的感应特性。

试验选用 GaInAsSb 型光电二极管。GaInAsSb 型光电二极管的暗电流是锗(Ge)光电二极管的百分之一，甚至千分之一，在常温条件下约为 10^{-5} A，最小可达到 10^{-7} A 级别，是一种有利于对红外微弱信号进行精密、快速探测的新型光电探测器。图 2 为光电二极管的响应曲线，它具有快速的响应时间，敏感区域直径 0.3 mm，截止波长 2.4 μm，暗电流 0.7 ~ 3 μA，峰值波长 2.0 ~ 2.2 μm，波长为 1 800 nm 和 1 940 nm 的光都位于其敏感检测波段范围。

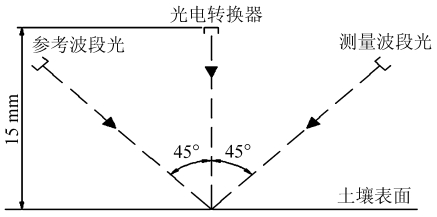

图 1　近红外土壤含水率传感器光路图

Fig. 1　Beam orientation of soil water sensor

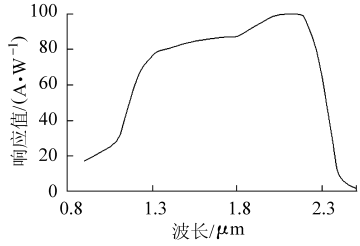

图 2　光电二极管光谱响应分布图

Fig. 2　Wavelength response of photodiode

1.3　试验方法

土壤含水率与相对吸收深度存在一定的相关关系，首先测量 1 940 nm 和 1 800 nm 两波长的反射光强，然后分别用 1 800 nm 的反射光强进行归一化处理，相对吸收深度定义为

$$D = \frac{R_1 - R_2}{R_1} = 1 - \frac{R_2}{R_1} \tag{1}$$

式中　R_2 ——测量波长的反射光强

R_1 ——参考波长的反射光强

2　结果与讨论

2.1　一元线性回归分析

对相对吸收深度与土壤含水率作一元线性回归分析，建立的一元线性回归模型为

$$y = ax + b \tag{2}$$

式中　y——预测土壤含水率

x——相对吸收深度

a、b——拟合系数

图 3 分别对 5 种土壤建立了土壤体积含水率与相对吸收深度之间的线性相关关系，受土壤类型影响，线性拟合参数不同，但变化趋势一致，随着土壤体积含水率的增加，相对吸收深度也增大，说明土壤中的水分对 1 940 nm 波长的近红外光有强烈吸收，紫色土的决定系数(R^2)最大，达到 0.863。当土壤中没有水分时，1 800 nm 和 1 940 nm 波长近红外光照射到土壤表面后会发生散射，不会被吸收，两波长的反射光强大小接近，R_2 与 R_1 的比值接近于 1，相对吸收深度趋于零；当水分进入土壤后，1 940 nm 波长光会被土壤中的水分吸收，含水率越大，吸收越强烈，R_2 与 R_1 的比值就越小，相对吸收深度就越大。

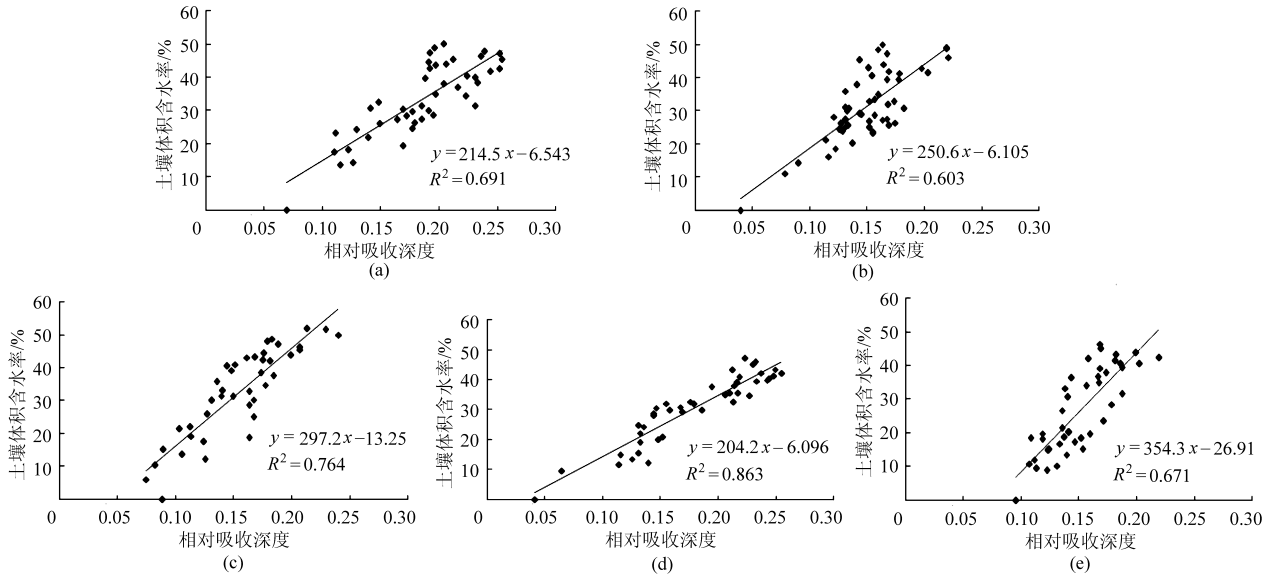

图 3 不同土壤的土壤体积含水率与相对吸收深度之间的关系

Fig. 3 Relative absorption depth as a function of soil moisture for five soils

(a) Soil 1 (b) Soil 2 (c) Soil 3 (d) Soil 4 (e) Soil 5

图 3 表明,对于不同类型土壤而言,土壤含水率相同时,相对吸收深度值却不同,这是由不同类型土壤的质地特征引起的。与其他 3 种土壤类型相比,Soil 1 和 Soil 4 具有更多的沙粒含量,与粉粒和粘粒相比,沙粒粒径大。颗粒粒径越大,比表面积就越小,当土壤颗粒被水分湿润后,颗粒表面会形成一层水膜,大粒径的土壤颗粒与小粒径颗粒相比,具有小的比表面积,因此需要较少的水去覆盖土壤颗粒表面,而对于 Soil 2、Soil 3 和 Soil 5 而言,土壤中粉粒和粘粒的含量较大,颗粒粒径小,比表面积大,因此需要更多的水去覆盖土壤颗粒表面,引起对辐射光吸收强度的增加。所以在相同的土壤含水率时,Soil 1和 Soil 4 比其他 3 种土壤具有较大的相对吸收深度。

决定系数是衡量拟合效果的重要指标。当 $0.66 \leqslant R^2 \leqslant 0.80$ 时,预测结果较好,当 $0.81 \leqslant R^2 \leqslant 0.90$ 时,预测结果很好;当 $R^2 \geqslant 0.90$ 时,预测结果极好。5 种土壤中,Soil 4 的 R^2 值最大,相比其他 4 种土壤,具有最好的预测效果,但 Soil 2 的 R^2 值小于 0.66, Soil 5 的回归公式斜率最大,土壤含水率对相对吸收深度的变化敏感,吸收深度的微弱变化都会引起土壤含水率很大的波动。受土壤类型的影响,5 种土壤的拟合公式参数有一定差别,但 Soil 2 和 Soil 3 两种土壤拟合公式的斜率相近,因为这两种土壤质地相似。

2.2 模型验证

以干燥法实测的土壤含水率为横坐标,线性标定模型计算的土壤含水率预测值为纵坐标,进行实测值和预测值比较,如图 4 所示。图中干燥法测得的土壤质量含水率已换算为土壤体积含水率。对于 5 种土壤,Soil 1 的预测效果最好,模型计算结果和实测结果非常接近 1∶1 直线,均方根误差为 2.88%,但 Soil 2 和 Soil 3 模型预测结果略小于实测结果,同时,Soil 2 和 Soil 3 的平均相对误差都接近 10%,均方根差都小于 6%。Soil 4 和 Soil 5 的模型预测值大于实测值,其中 Soil 5 的平均相对误差接近 22%,无法满足测量要求,需要对预测模型和试验作进一步改进,提高模型对不同土壤类型的适应性,平均相对误差偏大可能来源于模型校正过程中的不确定性因素和试验的系统误差,以及电路单元对土壤表面光反射信号处理后可能出现的信号波动,因此,下一步建模时,需要对数据采集系统的放大电路选取合适的放大倍数,减少信号波动,提高测量系统的准确度。另外,可以选取其他建模方法,验证建模方法对模型预测准确度的影响。总体而言,前 4 种土壤对土壤水分的预测准确度高,能够满足测量要求,但 Soil 5 的预测效果比其他 4 种土壤差,可能是由于红土中含有大量的粘粒,粘粒的吸水能力强,导致相对吸收深度对红土含水率的变化不敏感。

3 结束语

本文利用近红外土壤含水率传感器,测量了土壤表面含水率变化对波长 1 800 nm 和 1 940 nm 近红外光的反射强度,并建立了土壤含水率与相对吸收深度之间线性标定模型。

相对吸收深度随着土壤含水率的增加而增大。受土壤类型的影响,线性模型具有不同的拟合系数。对标定模型预测效果的验证结果表明,除红土外,其

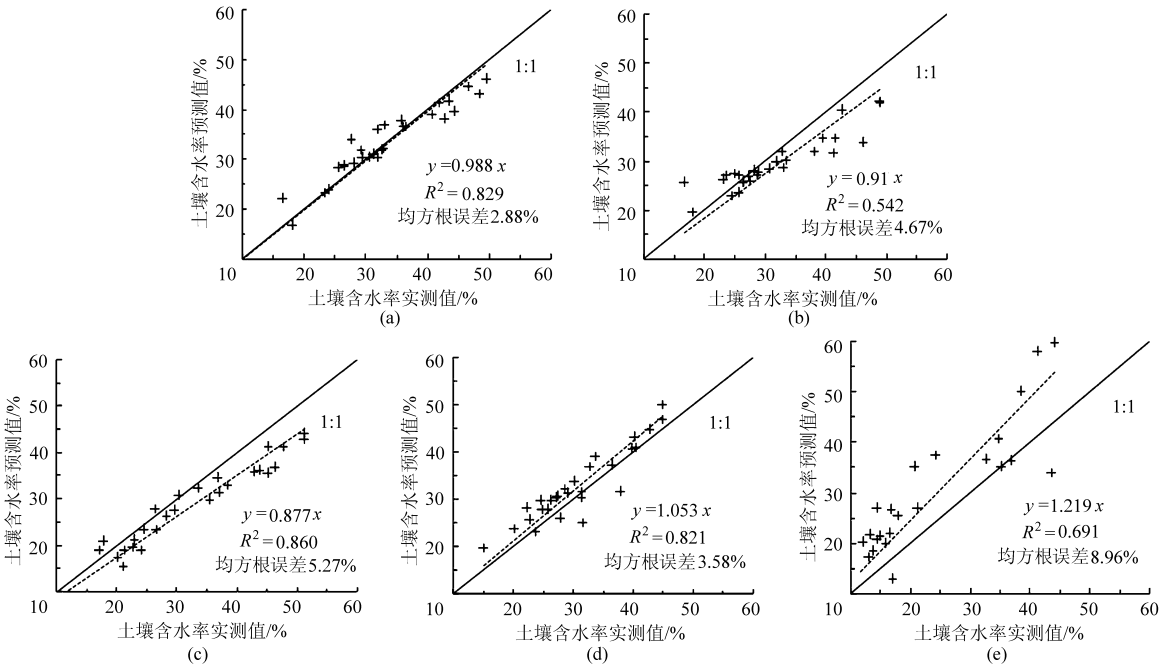

图 4　土壤含水率实测值与线性模型预测值关系图

Fig 4　Relationship between soil moisture measured by standard laboratory procedures and predicted by linear model

(a) Soil 1　(b) Soil 2　(c) Soil 3　(d) Soil 4　(e) Soil 5

他 4 种土壤的均方根误差均小于 6%，说明近红外土壤含水率传感器能够准确预测土壤含水率，但红土的预测平均相对误差大，需要进一步研究提高模型对红土的适应性。

参 考 文 献

1　Dalal R C, Henry R J. Simultaneous determination of moisture, organic carbon, and total nitrogen by near infrared reflectance spectrophotometry [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(1): 120 – 123.

2　Ben-Dor E, Banin A. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties [J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59(2): 364 – 372.

3　Islam K, Singh B, McBratney A. Simultaneous estimation of several soil properties by ultra-violet, visible, and near-infrared reflectance spectroscopy [J]. Australian Journal of Soil Research, 2003, 41(6): 1101 – 1114.

4　雷志栋，杨诗秀，谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京：清华大学出版社，1988.

5　Cierniewski J, Courault D. Bidirectional reflectance of bare soil surfaces in the visible and near-infrared range [J]. Remote Sensing Reviews, 1993, 7: 321 – 339.

6　Cho R K, Lin G, Kwon Y K. Nondestructive analysis for nitrogens of soils by near infrared reflectance spectroscopy [J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 1998, 6(A): A87 – A91.

7　Fystro G. The prediction of C and N content and their potential mineralization in heterogeneous soil samples using Vis-NIR spectroscopy and comparative methods [J]. Plant and Soil, 2002, 246(2): 139 – 149.

8　Sudduth K A, Hummel J W. Soil organic matter, CEC, and moisture sensing with a portable NIR spectrophotometer [J]. Transactions of the ASAE, 1993, 36(6): 1571 – 1582.

9　Baumgardner M F, Silva L F, Biehl L L, et al. Reflectance properties of soils [J]. Advances in Agronomy, 1985, 38: 1 – 44.

10　Bowers S A, Hanks R J. Reflection of radiant energy from soil[J]. Soil Science, 1965, 100(2): 130 – 138.

11　Ishida T, Ando H, Fukuhara M. Estimation of complex refractive index of soil particles and its dependence on soil chemical properties [J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 38(3): 173 – 182.

12　Twomey S A, Bohren C F, Mergenthaler J L. Reflectance and albedo differences between wet and dry surfaces [J]. Applied Optics, 1986, 25(3): 431 – 437.

13　Liu Weidong, Baret F, GuXingfa, et al. Relating soil surface moisture to reflectance[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2 – 3): 238 – 246.

14　Lobell D B, Asner G P. Moisture effects on soil reflectance [J]. Soil Science Society of American Journal, 2002, 66(3): 722 – 727.

15　Zhu Y, David C, Weindorf S C, et al. Characterizing surface soil water with field portable diffuse reflectance spectroscopy [J]. Journal of Hydrology, 2010, 391(1 – 2): 133 – 140.

16　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 NIR spectra[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26(3): 426 – 429. (in Chinese)

(下转第 190 页)

Numerical Study on Blade Dynamic Stall of Vertical Axis Wind Turbine

Mei Yi Qu Jianjun Xu Mingwei
(*School of Mechatronics*, *Harbin Institute of Technology*, *Harbin* 150001, *China*)

Abstract: The blade dynamic stall behavior of a vertical axis wind turbine with high height to radius ratio was studied using a numerical method. The numerical modeling technique reliability was validated through a comparison of the computational results with the wind tunnel measurement. Below constant wind condition 8 m/s, combined with the velocity vector and vorticity contours, the dynamic stall behavior and the rotor power performance were investigated with different tip speed ratios and variant turbine configurations. Illustrated by the simulation, lowering the tip speed ratio and increasing the rotor cord to radius ratio and the blade number will enhance the vortex generation and the flow separation on blades, leading to significant degradation of turbine performance. It can be concluded from the numerical analysis, a vertical axis wind turbine with high height to radius ratio applied in urban area will experience a better performance when operating in the optimal tip speed ratio, with rotor cord to radius ratio between 0.2 and 0.4, and 3 or 4 blades.

Key words: Vertical axis wind turbine Dynamic stall Numerical simulation Sliding mesh Turbulence model

(上接第 151 页)

Adaptability of Near-infrared Sensor for Moisture Measurement of Different Soils

Yin Zhe Lei Tingwu Chen Zhanpeng Yan Qinghong Dong Yuequn
(*College of Water Resources and Civil Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The sensor for soil moisture measurement should have broad adaptability, and the soil moisture can be measured by the sensor upon the determination of the relationship between soil moisture and relevant variable. Five typical soils from different geographic locations of China were sampled for soil moisture measurement test with the near infrared sensor designed with 1 940 nm as measuring wavelength and 1 800 nm as reference wavelength. The reflectance of those two wavelengths was transformed to relative absorbance depth to minimize the influencing factors. The results indicate there existing strong linear correlation between soil moisture and relative absorption depth for different soils. Independent data sets were used to validate the calibration model, and the root mean square error is less than 6% except for the red soil from southern China. The research shows the adaptability of the sensor for different soils and the calibration steps.

Key words: Soil moisture Near-infrared Sensor Model adaptability