

黄绵土风干过程中土壤含水率的光谱预测*

刘秀英^{1,2} 王力¹ 宋荣杰¹ 刘淼¹ 常庆瑞¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 河南科技大学农学院, 洛阳 471003)

摘要: 以2014年两次在陕西省乾县田间采集的129个黄绵土土壤样本为研究对象,建立土壤含水率定量反演模型。在土壤风干过程中测量光谱反射率及含水率,分析土壤含水率与光谱反射率之间的关系,并利用一元线性及指数回归建立土壤含水率光谱预测模型。结果表明在400~1340、1460~1790、1960~2390 nm波长范围内,与含水率相关性最大的反射率对应的波长分别为570、1460、1960 nm;吸收深度最大的波长位于490、1460、1960 nm。土壤光谱特征指标与含水率之间的线性相关关系优于指数相关关系。以特征波长1980 nm(C1980)、1980 nm的吸收深度(D1980)和1480 nm的吸收深度(D1480)为自变量建立的线性模型为土壤含水率预测的最优模型,校正和验证的决定系数 R^2 大于0.92,相对预测偏差(RPD)大于2.5,均方根误差(RMSE)小于2.5%。研究表明利用自然土样,在风干过程中进行土壤含水率光谱快速预测是完全可行的,从而为遥感实时、快速监测土壤水分含量及大面积土壤水分反演提供了参考。

关键词: 风干黄绵土 土壤含水率 光谱特征 预测模型

中图分类号: S153 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0266-07

Prediction of Soil Moisture Content in Air-drying Loess Using Spectral Data

Liu Xiuying^{1,2} Wang Li¹ Song Rongjie¹ Liu Miao¹ Chang Qingrui¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Agronomy College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: 129 loess soil samples taken from the field in Qian County of Shaanxi Province in 2014 were chosen as objects to build the inversion model between soil moisture content and spectra. The spectra and gravimetric moisture content of soil samples were measured during the process of soil air drying, and the relationship between spectra and soil moisture content was analyzed. The spectral predictive models of soil moisture content were established by using the linear regression and exponential analysis. Results showed that the biggest correlation coefficients and absorption depth bands located in 570, 1460, 1960 nm and 490, 1460, 1960 nm in the region of 400~1340, 1460~1790, 1960~2390 nm, respectively. The linear relationship between spectral characteristic indexes and moisture content was better than the index relationship. The linear models were optimum models for predicting moisture content of loess by using characteristic band (C1980) and absorption depth (D1980 and D1480) as independent variables. The calibration and validation coefficient of determination R^2 and residual prediction deviation (RPD) were higher than 0.92 and 2.5, respectively, and the root mean square error (RMSE) was less than 2.5%. These results showed that the moisture content of natural soil samples can be predicted rapidly by using spectral reflectance during the soil drying process. The study can provide a reference for real-time and rapid soil moisture content monitoring and soil moisture quantitative inversion in large area by using remote sensing technology.

Key words: Air-drying loess Soil moisture content Spectral characteristic Predictive model

收稿日期: 2015-01-05 修回日期: 2015-02-06

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA102401-2)

作者简介: 刘秀英, 博士生, 河南科技大学讲师, 主要从事农业遥感及GIS应用研究, E-mail: csfulxy@126.com

通讯作者: 常庆瑞, 教授, 博士生导师, 主要从事资源环境和3S技术应用研究, E-mail: changqr@nwsuaf.edu.cn

引言

土壤水分是植物生长的一个重要因子,土壤中的水与灌溉及土壤与大气之间的物质和能量交换有密切的关系。土壤水分也是化学物质(例如肥料和杀虫剂)的主要运载工具,这些物质被运输到土壤表面、土体内部以及植物器官^[1]。土壤水分含量的高低不仅直接影响作物的生长,而且对农田小气候和土壤的机械性能等方面均具有影响。因此,土壤水分含量在农业、水利、气象等许多方面的研究中是一个重要的测量项、一个必不可少的分析参数,是反映土地质量的一个重要指标^[2]。高光谱遥感技术具有较高的光谱分辨率,在可见光和近红外区域有几十甚至几百个光谱波段,可以形成连续的光谱曲线,能够快速获取地面土壤反射光谱信息,探测表层土壤含水率细微差异的变化,为动态监测区域或地块级土壤含水率提供了一种新的技术手段^[3]。

目前,许多研究者利用近红外、可见光/近红外区域的土壤光谱曲线随土壤含水率的变化规律,提取各种特征指标进行土壤水分反演,取得了较好的结果^[4-11]。但是,较多研究者^[7-11]都是利用风干的土壤样本,经研磨、过筛后进行土壤水分配比,得到不同梯度的含水率土壤样本,然后对样本的光谱特征进行研究,对土壤含水率进行反演。土壤研磨、过筛和水分配比都需要大量的人力、物力,并且土壤经预处理后,其结构被破坏;此外不同研究者进行土壤水分配比的方法和标准各不相同,最终建立的模型及模型的预测精度存在较大的差异;许多研究者利用光谱数据进行水分反演研究时,没有考虑自然状态下大气中水蒸气的干扰,得到的敏感波段大多位于水蒸气吸收干扰波段^[12-15],而这些波段在利用航空、航天遥感影像进行大面积土壤水分反演时很少具有实用价值,因此进行波段选择时需要避开大气水蒸气吸收的干扰波段影响^[16]。本文在土壤风干过程中进行土壤光谱和水分测量,利用去除大气干扰的波段进行研究,探讨土壤含水率与风干土壤光谱特征参数之间的关系,并进行土壤水分反演,为土壤水分实时、快速测定提供理论依据和技术支持,为遥感影像进行大面积土壤含水率定量反演提供参考。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集与处理

研究区域位于陕西省乾县,该区土壤类型为黄绵土。分别于2014年4月和2014年9月采集田间土壤样本129个,采样深度均为0~20 cm。土样风

干前,剔除土壤以外的侵入体(如植物残茬、石粒、砖块等杂物),然后用木棒将大的土块轻轻敲碎。为了得到具有一定梯度的土壤含水率样本,根据土壤的干燥程度,第1次采集的36个土壤样本分别于风干第1天、第2天和第3天上午,进行了土壤光谱和水分测量。其中,有4个光谱样本数据由于实验误差明显异常,因而进行剔除,得到104个有效样本数据,作为验证集;同理,第2次采集的93个土壤样本在风干的第1天和第3天上午进行土壤样本光谱和水分测量,剔除有明显误差的3个光谱样本数据,得到183个有效样本数据,作为校正集。土壤含水率(质量百分比)的测定采用经典的烘干称重法(%)。

1.2 土壤光谱测量

土壤反射率采用美国 Spectra Vista 公司生产的 SVC HR-1024i 型便携式光谱仪测定,光谱范围 350~2 500 nm,其中 350~1 000 nm 光谱分辨率小于等于 3.5 nm,1 000~1 850 nm 光谱分辨率小于等于 9.5 nm,1 850~2 500 nm 光谱分辨率小于等于 6.5 nm。将土样置于直径 15 cm 的容器中,装满后将土壤表面刮平,进行室内光谱测量。根据周清等^[17]的研究成果,光谱测量采用 8°视场角的光纤探头,垂直放置于目标物正上方 15 cm 处;光源为功率 50 W 的卤素灯,距土壤表面 30 cm,光源入射角度为 15°。测量时水平转动被试样品 3 次,每次约 90°,测试土样 4 个方向的光谱曲线,每个方向测定 3 条样本线,去掉异常线后取算术平均作为该土样的光谱反射率值,并以标准白色参照板获取相对反射率。

1.3 光谱数据处理与模型建立

由于光谱仪各波段对能量响应的差异,使得光谱曲线上存在一些噪声,为消除高频噪声的影响,采用何挺等^[18]所述九点加权移动平均法对高光谱反射率数据进行平滑去噪处理。其他专家的研究结论表明将高光谱反射率重采样到 10 nm 间隔不会损失重要信息^[19],因此对光谱反射率进行重采样,得到 10 nm 间隔的光谱反射率,以降低数据维数,提高数据运算速度。在 350~2 500 nm 波长范围内有 3 个受水蒸气干扰波段,主要是野外自然光源条件下,因大气中的水蒸气吸收作用,获取的地物光谱反射率变动较大,数据无法用于应用分析,故根据实测野外土壤光谱,并借鉴相关文献的结论^[18, 20-21],剔除 2 个水蒸气吸收峰影响严重的波段区域和 2 个信噪比较低的区域,具体剔除范围为 350~390、1 350~1 450、1 800~1 950、2 400~2 500 nm,因而将波长分成了 3 段,即 400~1 340、1 460~1 790、1 960~2 390 nm。

基于模型构建简单、实用的原则,采用一元线性回归和指数回归建立土壤含水率与特征波长及吸收

深度之间的高光谱预测模型,模型的预测精度采用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和相对预测偏差(Residual prediction deviation, RPD)来衡量,其计算式分别为式(1)~(3)^[22];RPD的评价标准采用Chang等提出的阈值划分方法^[23],当RPD大于2时表明模型具有极好的预测能力,当RPD在1.4~2之间时,表明模型可对样品作粗略预测,而RPD小于1.4则表明模型无法对样品进行准确预测。一个好的预测模型应该有大的 R^2 和RPD,小的RMSE。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$RPD = \frac{SD_V}{RMSE_V \sqrt{n/(n-1)}} \quad (3)$$

式中 \hat{y}_i ——预测值 y_i ——观测值
 \bar{y} ——观测值均值 n ——样本数
 SD_V ——验证集的标准偏差
 $RMSE_V$ ——验证集的均方根误差

2 结果与分析

2.1 土壤含水率状况

验证集和校正集的土壤样本含水率统计特征见表1。由表1可知验证集的样本含水率的变化范围为2.32%~19.38%,标准差为6.33%;而校正集的样本含水率的范围为2.84%~18.76%,标准差为4.66%。含水率均小于20%,处于中等水平。经独立样本 t 检验,校正集和验证集的土壤样本含水率均值差异不显著($t = -0.589$, $df = 167.419$, $P > 0.05$)。

表1 土壤含水率的统计特征

Tab.1 Statistical characteristic of soil water content in measured soil samples

类别	参数						
	样本数	均值/%	标准差/%	最小值/%	最大值/%	峰度系数	偏度系数
验证集	104	10.40	6.33	2.32	19.38	-1.55	0.17
校正集	183	9.97	4.66	2.84	18.76	-1.49	-0.01

2.2 土壤光谱反射特征及与含水率的相关分析

现有的研究表明在土壤含水率低于临界值田间持水率时,随土壤含水率的增加反射率下降,而当土壤含水率超过这一临界值时,土壤反射率随土壤含水率增加而增加^[21,24]。图1为400~2390 nm

波长范围内,不同含水率的黄绵土土壤光谱曲线图。由图1可知,当土壤含水率小于20%时,土壤反射率随含水率的变化规律与其他类型土壤类似,随土壤含水率增加反射率下降。在400~600 nm波长范围内,反射率随波长增加呈上升趋势,但斜率增高的程度不同;进入短波红外波段后,在1420、1930 nm附近有强烈的水分吸收谷,2200 nm附近有小的水分吸收谷。

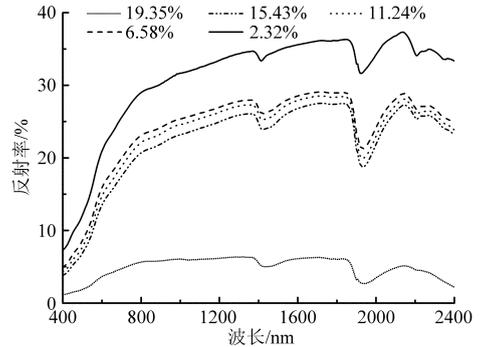


图1 不同含水率土壤的反射曲线

Fig.1 Spectral curves at different soil moisture levels

应用可见/近红外光谱技术,通过相关系数法寻找出光谱对于土壤水分的敏感波段,并通过单一敏感波段建立一元回归模型检测土壤含水率,可以实现对土壤含水率的快速准确检测^[7]。图2为400~1340、1460~1790、1960~2390 nm波长范围内土壤含水率与土壤光谱反射率之间的相关系数图。由图2可知,土壤含水率与土壤光谱反射率呈极显著负相关,相关系数大于0.94。在400~1340 nm波长范围内,相关系数呈现先增大后减小的趋势;而在另外2个波长范围内,相关系数均呈现由大变小的趋势。特征波长选择的标准:在不同波长范围内,具有较大的相关系数值,并且处于相关系数曲线特定的峰和谷的位置,以便探测不同波长范围土壤光谱反射率对含水率预测的潜力。由图2可知,3个波长范围内最大相关系数分别为-0.972、-0.965、-0.966,对应的波长分别为570、1460、1960 nm,由于1460、1960 nm处于水蒸气吸收带的边缘,因此朝长波方向移动20 nm,选择1480、1980和570 nm(分别表示为:C1480、C1980、C570)作为特征波长进行土壤含水率反演。将3个波长的反射率与土壤含水率作散点图(图3)可知,随土壤含水率增大,3个波长反射率具有线性减小的趋势。

2.3 土壤光谱相对吸收深度分析

确定吸收深度最常用的处理是连续统去除^[25],具体计算吸收深度的方法参照文献[26]。图4为土壤不同含水率反射波谱吸收深度曲线,由图4可知,在400~1340、1460~1790、1960~2390 nm波

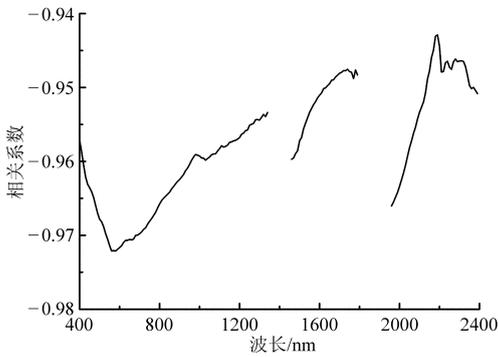


图 2 土壤含水率与反射率光谱相关系数

Fig. 2 Correlation coefficient between soil moisture content and reflection spectrum

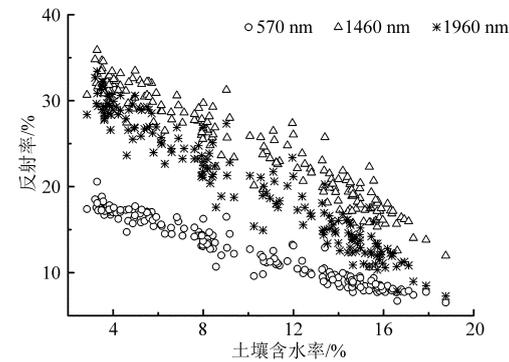


图 3 土壤不同波长的反射率

Fig. 3 Soil reflectance with different bands

长范围内,不同含水率土壤特征吸收峰的强弱更加明显反映出来,水分的最大吸收深度位置主要位于 490、1 460 和 1 960 nm。随着土壤含水率的增大,土壤的水分吸收深度增大,因此这些波长的吸收深度可以作为土壤含水率研究的一个特征指标,同上,选择 490、1 480 和 1 980 nm 处的吸收深度(分别表示为:D490、D1480、D1980)进行土壤含水率反演。将土壤含水率在不同波长的吸收深度作散点图(图 5),可以发现随土壤含水率增加,波长的吸收深度具有线性增大的趋势,并且波长吸收深度的位置具有向长波方向移动的趋势;但是,当含水率达到一定值时,490 nm 处的波长吸收深度变化趋于平缓,说明当土壤含水率达到一定值时,其光谱反射率趋于饱和。

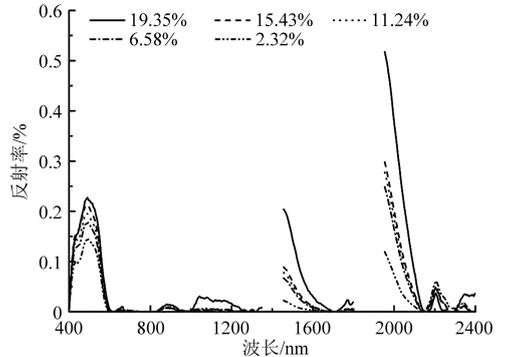


图 4 波长吸收深度曲线

Fig. 4 Curves of band absorption depth

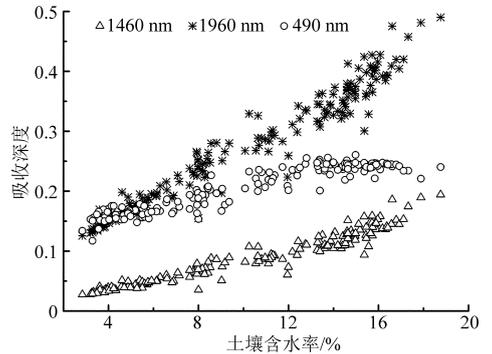


图 5 土壤不同波长吸收深度

Fig. 5 Absorption depth of soil with different bands

2.4 土壤含水率光谱预测模型的建立

利用 3 个波长范围内选择的特征波长 (C570、C1480、C1980) 和最大的吸收深度 (D490、D1480、D1980) 作为特征指标,对土壤含水率进行一元线性回归和指数回归分析,结果见表 2。分析各模型的决定系数 R^2 和建模集交互验证结果,表明以特征波段为指标建立的一元线性模型和指数模型最好的均为 C570,其 R^2 分别为 0.945 和 0.922,RPD 分别为 4.286 和 3.716, RMSE 比较小;其次为 C1980。而以波长吸收深度为特征指标建立的线性模型和指数模型均以 D1980 为最优,特别是线性模型,其 R^2 为 0.947, RPD 值为 4.352,相对所有模型来说都是最大的,而 RMSE 是最小的,为 1.074%;其次为 D1480。总之,所有的特征指标与含水率建立的估测模型都达到了极显著检验水平,并且线性模型都优于指数模型。

表 2 土壤含水率反射光谱预测模型 ($n = 183$)

Tab. 2 Predicted models of soil moisture content and reflectivity spectrum ($n = 183$)

特征指标	线性模型	R^2	RMSE/%	RPD	指数模型	R^2	RMSE/%	RPD
C570	$y = 25.547 - 1.234x$	0.945	1.090	4.286	$y = 53.067e^{-0.143x}$	0.922	1.257	3.716
C1480	$y = 28.823 - 0.751x$	0.920	1.317	3.547	$y = 74.945e^{-0.086x}$	0.869	1.899	2.461
C1980	$y = 24.180 - 0.658x$	0.931	1.221	3.829	$y = 44.852e^{-0.076x}$	0.898	1.688	2.768
D490	$y = -13.886 + 117.283x$	0.882	1.595	2.930	$y = 0.535e^{13.727x}$	0.879	1.738	2.693
D1480	$y = 1.299 + 120.110x$	0.931	1.218	3.837	$y = 3.273e^{13.585x}$	0.865	2.531	1.847
D1980	$y = -2.053 + 52.174x$	0.947	1.074	4.352	$y = 2.209e^{5.962x}$	0.898	2.125	2.199

注: y 表示土壤含水率, x 表示特征指标。

2.5 模型的精度评价

利用不同时间采集的独立样本对校正模型的预测效果进行验证,其结果见表3。由表3可知,以波长反射率为特征指标建立的一元线性模型比指数模型预测效果好,其中尤其以C1980为指标建立的线性模型的RMSE最小,为1.997%,而 R^2 和RPD值最大,分别为0.927和3.172,并且校正和验证 R^2 相差最小,仅差0.004,说明模型非常稳定,可以对含水率进行准确预测;其次为以C570为指标建立的线性模型验证效果也比较好,但是模型相对来说稳定性差一些;而以波长反射率为特征指标建立的指数模型的RMSE均较大, R^2 和RPD值均较小,尤其RPD值都小于1.4,无法用于土壤含水率的预测。同样,以波长吸收深度为特征指标建立的一元线性模型比指数模型预测效果好。以D1980为特征指标建立的线性模型预测效果最好,其RMSE最小,为1.965%,而 R^2 和RPD值均最大,分别为0.953和3.224,并且校正和验证 R^2 相差较小,为0.006,说明模型很稳定,可以对土壤水分进行准确的预测;其次为以D1480为指标建立的线性模型验证结果也比较好, R^2 为0.933,RPD为2.584,RMSE也比较小。指数模型中,除D490为自变量建立的指数模型RPD值为1.881,大于1.4外,其他的指数模型RPD值都小于1.0,无法用于土壤含水率预测。综合各项指标可知,进行土壤含水率估算的最佳模型为以C1980、D1980和D1480为光谱特征指标建立的线性模型。

表3 模型的验证结果($n=104$)

Tab.3 Validation results of model($n=104$)

特征 指标	线性模型			指数模型		
	R^2	RMSE/%	RPD	R^2	RMSE/%	RPD
C570	0.919	2.086	3.037	0.789	5.710	1.110
C1480	0.880	2.845	2.226	0.701	10.452	0.606
C1980	0.927	1.997	3.172	0.813	6.418	0.987
D490	0.916	3.126	2.026	0.916	3.368	1.881
D1480	0.933	2.452	2.584	0.797	9.701	0.653
D1980	0.953	1.965	3.224	0.843	7.533	0.841

3 讨论

在野外条件下获取土壤光谱曲线或遥感影像时,处于大气水蒸气吸收干扰波段(1350~1450、1800~1950、2400~2500 nm)的数据质量较差,应用这些波段的吸收特性来估测土壤含水率误差较大。本研究在进行波段选择时充分考虑水蒸气的干扰作用,结合实测土壤光谱并参考前人的研究成果将水蒸气干扰波段进行去除,然后对去除水蒸气干

扰的3个波长的光谱与土壤含水率进行研究,可知1980 nm附近波长对土壤水分非常敏感,而1920 nm或1940 nm^[27-28]虽然位于水分的最大吸收波长位置,对水分最敏感,但由于受大气水蒸气干扰^[16],室外测量或遥感影像上该波长位置的数据含有大量的大气水分信息,不能唯一的确定土壤水分,用于精确地监测,因而相比之下1980 nm附近波长在进行野外土壤含水率实时分析及利用航空、航天遥感影像进行大面积土壤含水率反演时更加实用。

本研究对自然土壤光谱反射率与土壤含水率进行相关分析,发现两者之间呈极显著负相关,相关系数大于0.94,这与其他研究者的结论一致^[27]。表明未经研磨、过筛、水分配比的自然土壤样本其光谱反射率与土壤含水率之间有很强的相关性,因而利用风干过程进行土壤含水率预测具有很大的潜力。采用这种方法,自然土壤由于没有经过研磨、筛选,土壤的结构特征没有太大的改变^[21],因此与土壤的自然状态更加接近,对其进行研究更具实用价值。以C570和D490建立的模型稳定性较差,主要由于土壤含水率增大到一定值时土壤光谱反射率在可见光波段趋于饱和^[29],对于黄绵土来说含水率阈值可能小于20%;以C1980、D1980和D1480为光谱特征指标建立的线性模型比较稳定,1980和1480 nm都位于短波红外波段,从而说明近红外波段更适合含水率较低的土壤样本的估计,这与刘伟东等的研究结论一致^[30],具体的土壤含水率阈值有待进一步研究和验证。本文所建立的指数模型,经独立样本检验,预测效果较差,RMSE均较大,RPD值均小于1.4(仅D490大于1.4),无法进行土壤含水率预测;而建立的一元线性预测模型,经独立样本检验,预测效果较好,能对土壤含水率进行快速预测。即土壤含水率较低时,自然风干过程中土壤样本的含水率与相关系数最大的波长及水分吸收深度之间的线性关系较好,优于指数相关关系,这与其他研究者的结论一致^[29-30]。总之,利用自然土样,在风干过程中进行土壤含水率光谱快速预测是完全可行的,这为野外利用光谱反射率进行土壤含水率实时、快速分析及大面积土壤含水率反演提供了参考,具有较强的实践意义。

4 结论

(1) 在400~1340、1460~1790、1960~2390 nm波长范围内,土壤含水率与其光谱反射率呈极显著负相关关系,相关系数最大的波长是570、1460、1960 nm;具有最大吸收深度的波长位于490、1460和1960 nm。

(2)土壤含水率较低时,其光谱特征指标与含水率之间的线性相关关系优于指数相关关系。建立的线性模型比较稳定,预测能力较好,其校正和验证的 R^2 都大于 0.92, RMSE 小于 2.5%, RPD 值都

(3)以 C1980、D1980 和 D1480 为光谱特征指标 大于 2.5, 是进行土壤含水率反演的最优模型。

参 考 文 献

- Loan P, James L S. Soil water measurement: capacitance [M]//Trimble S W. Encyclopedia of water science. Boca Raton: CRC Press Inc, 2007, 1: 1054 - 1057.
- 宋海燕. 基于光谱技术的土壤、作物信息获取及其相互关系研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
Song Haiyan. Study of the soil and crop information collection and their relationships based on spectroscopy technique [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- 姚艳敏, 魏娜, 唐鹏钦, 等. 黑土土壤水分高光谱特征及反演模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 95 - 100.
Yao Yanmin, Wei Na, Tang Pengqin, et al. Hyper-spectral characteristics and modeling of black soil moisture content [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 95 - 100. (in Chinese)
- Mouazen A M, Baerdemaeker J D, Ramon H. Towards development of on-line soil moisture content sensor using a fibre-type NIR spectrophotometer[J]. Soil & Tillage Research, 2005, 80(1 - 2): 171 - 183.
- Zhu Y, Weindorf D C, Chakraborty S, et al. Characterizing surface soil water with field portable diffuse reflectance spectroscopy [J]. Journal of Hydrology, 2010, 391(1 - 2): 133 - 140.
- 王海江, 张花玲, 任少亭, 等. 基于高光谱反射特性的土壤水盐状况预测模型研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 133 - 138.
Wang Haijiang, Zhang Hualing, Ren Shaoting, et al. Predict model and soil water-salt based on hyperspectral reflectance characteristic [J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 133 - 138. (in Chinese)
- 宋韬, 鲍一丹, 何勇. 利用光谱数据快速检测土壤含水量的方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(3): 675 - 677.
Song Tao, Bao Yidan, He Yong. Research on the method for rapid detection of soil moisture content using spectral data [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(3): 675 - 677. (in Chinese)
- 李美婷, 武红旗, 蒋平安, 等. 利用土壤的近红外光谱特征测定土壤含水量[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(8): 2117 - 2121.
Li Meiting, Wu Hongqi, Jiang Ping'an, et al. Measuring soil water content by using near infrared spectral characteristics of soil [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(8): 2117 - 2121. (in Chinese)
- Hummel J W, Sudduth K A, Hollinger S E. Soil moisture and organic matter prediction of surface and subsurface soils using an NIR soil sensor[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 32(2): 149 - 165.
- Liu Huanjun, Zhang Yuanzhi, Zhang Xinle, et al. Quantitative analysis of moisture effect on black soil reflectance [J]. Pedosphere, 2009, 19(4): 532 - 540.
- Yin Zhe, Lei Tingwu, Yan Qinghong, et al. A near-infrared reflectance sensor for soil surface moisture measurement [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 99: 101 - 107.
- 肖武, 李小昱, 李培武, 等. 基于近红外光谱土壤水分检测模型的适应性[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 33 - 36.
Xiao Wu, Li Xiaoyu, Li Peiwu, et al. Adaptability of the model for soil moisture measurement based on near-infrared spectroscopy [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(3): 33 - 36. (in Chinese)
- Peng Jian, Shen Hong, He Sanwei, et al. Soil moisture retrieving using hyperspectral data with the application of wavelet analysis [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(1): 279 - 288.
- 何挺, 王静, 程焯, 等. 土壤水分光谱特征研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(6): 1027 - 1032.
He Ting, Wang Jing, Cheng Ye, et al. Spectral features of soil moisture [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(6): 1027 - 1032. (in Chinese)
- Whiting M L, Li Lin, Ustin S L. Predicting water content using Gaussian model on soil spectra [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(3): 535 - 552.
- 吴代晖, 范闻捷, 崔要奎, 等. 高光谱遥感监测土壤含水量研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(11): 3067 - 3071.
Wu Daihui, Fan Wenjie, Cui Yaokui, et al. Review of monitoring soil water content using hyperspectral remote sensing [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(11): 3067 - 3071. (in Chinese)
- 周清, 周斌, 王人潮, 等. 室内几何测试条件对土壤高光谱数据离散性的影响[J]. 华南农业大学学报, 2005, 26(1): 31 - 35.
Zhou Qing, Zhou Bin, Wang Renchao, et al. Effect of geometric conditions on soil hyperspectral data scatter characteristic in laboratory test [J]. Journal of South China Agricultural University, 2005, 26(1): 31 - 35. (in Chinese)
- 何挺, 王静, 林宗坚, 等. 土壤有机质光谱特征研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 31(11): 975 - 979.
He Ting, Wang Jing, Lin Zongjian, et al. Spectral features of soil organic matter [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(11): 975 - 979. (in Chinese)
- Shepherd K D, Walsh M G. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties [J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(3): 988 - 998.

- 20 Price J C. An approach for analysis of reflectance spectra[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 64(3): 316-330.
- 21 王昌佐, 王纪华, 王锦地, 等. 裸土表层含水量高光谱遥感的最佳波段选择[J]. *遥感信息*, 2003(4): 33-36.
Wang Changzuo, Wang Jihua, Wang Jindi, et al. The choice of best detecting band of hyperspectral remote sensing on surface water content of bare soil[J]. *Remote Sensing Information*, 2003(4): 33-36. (in Chinese)
- 22 Hu Xueyu. Application of visible/near-infrared spectra in modeling of soil total phosphorus[J]. *Pedosphere*, 2013, 23(4): 417-421.
- 23 Chang Chengwen, Laird D A. Near-infrared reflectance spectroscopic analysis of soil C and N[J]. *Soil Science*, 2002, 167(2): 110-116.
- 24 刘伟东, Baret F, 张兵, 等. 应用高光谱遥感数据估算土壤表层水分的研究[J]. *遥感学报*, 2004, 8(5): 434-442.
Liu Weidong, Baret F, Zhang Bing, et al. Using hyperspectral data to estimate soil surface moisture under experimental conditions[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(5): 434-442. (in Chinese)
- 25 Meer F V D. Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2004, 5(1): 55-68.
- 26 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- 27 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)
- 28 Bowers S A, Smith S J. Spectrophotometric determination of soil water content[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1972, 36(6): 978-980.
- 29 Lobell D B, Asner G P. Moisture effects on soil reflectance[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(3): 722-727.
- 30 Liu Weidong, Baret F, Gu Xingfa, et al. Relating soil surface moisture to reflectance[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2-3): 238-246.

(上接第 225 页)

- 14 董庆利, 高翠, 丁甜, 等. 不同试验条件下猪肉中气单胞菌生长预测模型的建立和验证[J]. *华南农业大学学报*, 2012, 33(1): 82-86.
Dong Qingli, Gao Cui, Ding Tian, et al. Establishment and validation of growth predictive model of *Aeromonas* spp. from pork under different experimental conditions[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2012, 33(1): 82-86. (in Chinese)
- 15 董庆利, 高翠, 郑丽敏, 等. 冷却猪肉中气单胞菌的定量暴露评估[J]. *食品科学*, 2012, 33(15): 24-27.
Dong Qingli, Gao Cui, Zheng Limin, et al. Quantitative exposure assessment of *Aeromonas* spp. in chilled pork[J]. *Food Science*, 2012, 33(15): 24-27. (in Chinese)
- 16 王海梅, 董庆利, 刘箐, 等. 不同场景下冷却猪肉中气单胞菌到青菜的交叉污染[J]. *食品科学*, 2014, 35(21): 196-200.
Wang Haimei, Dong Qingli, Liu Qing, et al. Cross-contamination of *Aeromonas* spp. from chilled pork to *Brassica chinensis* under different food-handling scenarios[J]. *Food Science*, 2014, 35(21): 196-200. (in Chinese)
- 17 董庆利, 王海梅, Pradeep K Malakar, 等. 气单胞菌在不同食物接触表面的存活与交叉污染[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(3): 65-71.
Dong Qingli, Wang Haimei, Pradeep K Malakar, et al. Survival and cross-contamination of *Aeromonas* spp. on different food-contact surfaces[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3): 65-71. (in Chinese)
- 18 陈天寿. 微生物培养基的制造与应用[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 250-579.
- 19 Pérez-Rodríguez F, Posada-Izquierdo G D, Valero A, et al. Modelling survival kinetics of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* O157:H7 on stainless steel surfaces soiled with different substrates under static conditions of temperature and relative humidity[J]. *Food Microbiology*, 2013, 33(2): 197-204.
- 20 Perez-Rodriguez F, Valero A, Carrasco E, et al. Understanding and modelling bacterial transfer to foods: a review[J]. *Trends Food Scientific Technology*, 2008, 19(3): 131-144.
- 21 Soares V M, Pereira J G, Viana C, et al. Transfer of *Salmonella enteritidis* to four types of surfaces after cleaning procedures and cross-contamination to tomatoes[J]. *Food Microbiology*, 2012, 30(2): 453-456.