

# 土壤水分光谱特征研究\*

何挺<sup>1</sup> 王静<sup>1</sup> 程焱<sup>1</sup> 林宗坚<sup>2</sup>

(1 国土资源部土地利用重点实验室, 北京 100035)

(2 中国测绘科学研究院, 北京 100039)

## SPECTRAL FEATURES OF SOIL MOISTURE

He Ting<sup>1</sup> Wang Jing<sup>1</sup> Cheng Ye<sup>1</sup> Lin Zongjian<sup>2</sup>

(1 Key Lab of Land Use, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China)

(2 China Academy of Mapping and Surveying, Beijing 100039, China)

关键词 土壤水分; 光谱特征; 逐步回归

中图分类号 S153.2

文献标识码 A

土壤水分是土壤的最重要的组成部分之一,也是反映土地质量的一个重要指标。土壤中水分含量的高低对热量平衡、土壤温度、农业墒情均有重要意义。遥感技术具有快速、广域、现势性强等优点,所以用可见光、近红外、热红外以及微波等遥感手段探测土壤含水量的研究在国内外已得到广泛的重视和应用。目前,土壤水分遥感监测主要采用 4 类研究方法,即土壤水分光谱法、热红外方法(热惯量方法)、微波方法和植被指数法<sup>[1~3]</sup>。

土壤光谱受土壤母质、有机质、水分等多种复杂因素的影响。在母质等其余因素一致的情况下,土壤含水量对土壤光谱反射率有着重要影响,特别是在水汽吸收峰处尤为明显。潮湿土壤在 1 400 nm 和 1 900 nm 附近有明显的吸收峰,在 970 nm、1 200 nm 和 1 770 nm 处有弱吸收峰,它们都是土壤水分子振动的倍频或合频引起的。普杜大学研究人员对 3 个水分吸收谱段 1 430 ~ 1 450 nm、1 620 ~ 1 650 nm 和 1 920 ~ 1 940 nm 分析后表明,应用反射率的量值能确定土壤水分含量<sup>[4]</sup>。许多学者研究表明<sup>[5~12]</sup>,土壤含水量的升高,土壤光谱反射率会相应降低,干燥的土壤具有较高的反射率,然而最大的反射率则取决于土壤类型;沙质土就比壤质土的反

射率大。当土壤湿度从干燥态演变到风干态时,土壤反射率几乎不产生变化,继续增加含水量到田间持水量时,则反射率下降。超过田间持水量,反射率又重新增加,这是因为土壤颗粒表面形成薄水层,增加镜面反射所致。Irons 等<sup>[13]</sup>认为反射率的下降是土壤颗粒四周水膜内部反射引起的。Idso 等<sup>[14]</sup>发现反射率的下降是由土壤颗粒四周水膜厚度成正比例,可以据此来测定土壤含水量及土壤吸附水的能量状态。Peterson 等<sup>[15]</sup>研究了土壤引起的反射率变化,并讨论了这种变化的大体规律。Stoner 等<sup>[16]</sup>报道了土壤含水量和 2 080 ~ 2 320 nm 波段的土壤反射率呈现非常高的相关性,但未指明其相关的形式。朱永豪等<sup>[17]</sup>认为,同一土壤随含水量增加在各波长或波段上的光谱反射率并非是简单的线性变化,而是遵循二次回归方程。从各波长点的土壤水分-反射率曲线图,田国良<sup>[18]</sup>发现土壤水分含量约大于 5% 时,随土壤水分含量的增加反射率呈指数下降趋势。

本文通过对分属于黄绵土、绵沙土、风沙土和水稻土的 129 个土样的实验室测试光谱数据和它们的土壤含水量建立起一个定量关系,探测与土壤水分含量最为敏感的光谱特征,为今后遥感数据的判读

\* 国家自然科学基金项目(40271007)和国土资源部百名优秀青年科技人才计划项目资助

作者简介:何挺(1974~),男,浙江东阳人,博士,主要从事高光谱遥感技术应用研究等。E-mail: landuselab@yahoo.com.cn

收稿日期:2005-06-15;收到修改稿日期:2005-10-13

解译提供物理基础的依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 土壤水分含量的测定

土壤采样在东经 109°13'48" ~ 109°29'03", 北纬 37°40'40" ~ 38°10'08" 的范围内进行, 采集表层土(大约 5 cm)。在采集土样时, 选择地势较为平坦、土壤裸露的地区作为样区。样区的选择考虑各种不同的土地利用类型和土壤类型, 每个样区内选择具有代表性的测点 4~5 个, 每个测点采集一个土样。采用烘干法来获取土样的含水量, 其测定的简要过程是, 先在田间地块选择代表性取样点, 按所需深度分层取土样, 将土样放入铝盒并立即盖好(以防水分蒸发影响测定结果), 称重(即湿土加铝盒重, 记为  $W_1$ ), 然后打开盖, 置于烘箱, 在 105~110 °C 条件下, 烘至恒重(约需 6~8 h), 再称重(即干土加盒重, 记为  $W_2$ )。则该土壤质量含水量可以按下式求出, 设空铝盒重为  $W_3$ :

$$m = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_3} \quad (1)$$

### 1.2 光谱测量

反射率的测量在一个允许控制光照条件的黑暗实验室内进行, 一台 1 000 W 卤灯光以提供平行光, 用 ASD Pro FR 地物光谱仪获得 350~2 500 nm 波长范围的土壤光谱反射率。光谱分辨率在可见光部分为 1.4 nm, 在近红外部分为 2 nm。光源离土样约 50 cm, 采用 3 视场角的探头, 探测器头部垂直对准样品(原状土), 距离约为 20 cm, 探测面积直径约为 2 cm(2 × 20 cm × tan 3°), 以保证土样充满整个视场。直径为 5 cm 的圆形白板用于获取绝对反射率。对一条光谱曲线的扫描时间设定为 5 s, 每个土样的光谱测量重复 4 次, 最后取平均得出土样的光谱反射率。

### 1.3 微分光谱技术

除了直接对反射率进行分析, 我们还对反射率进行了对数变换和光谱微分变换, 从中寻找对土壤水分含量敏感的光谱指标。这是因为光谱反射率经对数变换后, 不仅趋向于增强可见光区的光谱差异(可见光区的原始光谱值一般偏低), 而且趋向于减少因光照条件变化引起的乘性因素影响; 而微分光谱则有助于限制低频噪声对目标光谱的影响。在测谱学已经发展的方法中, 微分光谱技术是一种在遥感数据处理中特别有应用前景的分析方法。不同阶

数的微分(差分)值可以帮助人们迅速确定光谱的拐点及最大最小反射率的波长位置。Cloutis 的研究表明, 光谱的低阶微分处理对噪声影响敏感性较低, 因而在实际应用中更为有效<sup>[19]</sup>。在实际计算中, 一般用光谱的差分作为微分的有限近似, 计算公式如下:

$$R'(i) = [R(i) - R(i-1)] / (2 \Delta \lambda) \quad (2)$$

$$R''(i) = [R(i) - R(i-1)] / (2 \Delta \lambda) \\ = [R(i+1) - 2R(i) + R(i-1)] / (2 \Delta \lambda)^2 \quad (3)$$

式中,  $i$  为每个波段的波长;  $R'(i)$  和  $R''(i)$  分别为波长  $i$  的一阶和二阶微分光谱;  $\Delta \lambda$  为波长  $i-1$  到  $i$  的间隔, 视波段波长而定。

### 1.4 光谱吸收特征峰的归一化定量分析

由于光谱仪波段间对能量响应上的差异, 使光谱曲线总存在一些噪声。因此对其进行了 9 点移动平均<sup>[20]</sup>, 对光谱数据光滑去噪声。由此得到的新光谱曲线保留了旧光谱的总体趋势, 部分消除了高频成分, 使光谱曲线较为光滑, 为进一步的光谱特征吸收带的分析和土壤光谱特性的分析带来了便利和良好的效果(式(4))。

$$R_i = 0.04 R_{i-4} + 0.08 R_{i-3} + 0.12 R_{i-2} + 0.16 R_{i-1} \\ + 0.20 R_i + 0.16 R_{i+1} + 0.12 R_{i+2} + 0.08 R_{i+3} \\ + 0.04 R_{i+4} \quad (4)$$

光谱吸收特征参数包括吸收波段波长位置( $P$ )、深度( $H$ )、宽度( $W$ )、对称度( $S$ )、面积( $A$ )和光谱绝对反射值。如图 1 所示, 吸收波段位置  $P$  是吸收峰反射率最小值处的波长; 吸收深度  $H$  为吸收谷点  $M$  到两个肩部端点  $S_S$ 、 $S_E$  所组成的“非吸收基线”的距离( $S_S$ 、 $S_E$  为两端点  $S_S$ 、 $S_E$  相应的波长); 宽度  $W$  指最大吸收深度一半处的光谱带宽; 面积  $A$  为宽度和深度的综合参数; 对称度可定义为  $S = A_L/A_R$ , 其中  $A_L$  为吸收峰左边区域面积,  $A$  为吸收峰整体面积。

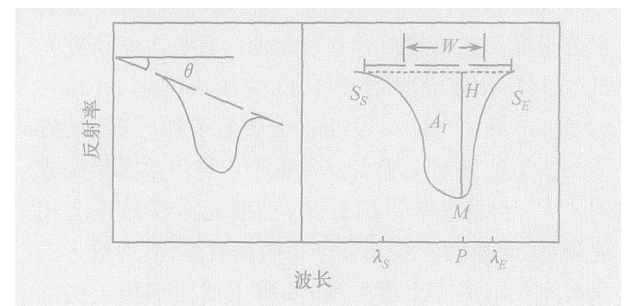


图 1 地物光谱吸收特征参数示意图<sup>[21]</sup>

一般采用“包络线消除法”来提取这些光谱吸收特征参数<sup>[22]</sup>。从直观上看, 包络线相当于光谱曲线的“外壳”。进行包络线消除后的反射率归一化到

0~1.0,光谱的吸收特征也被归一化到一个一致的光谱背景上,可以和其他光谱的吸收特征进行数值

比较和光谱间的匹配分析,图2为实验室土壤光谱曲线包络线消除前后的对比。

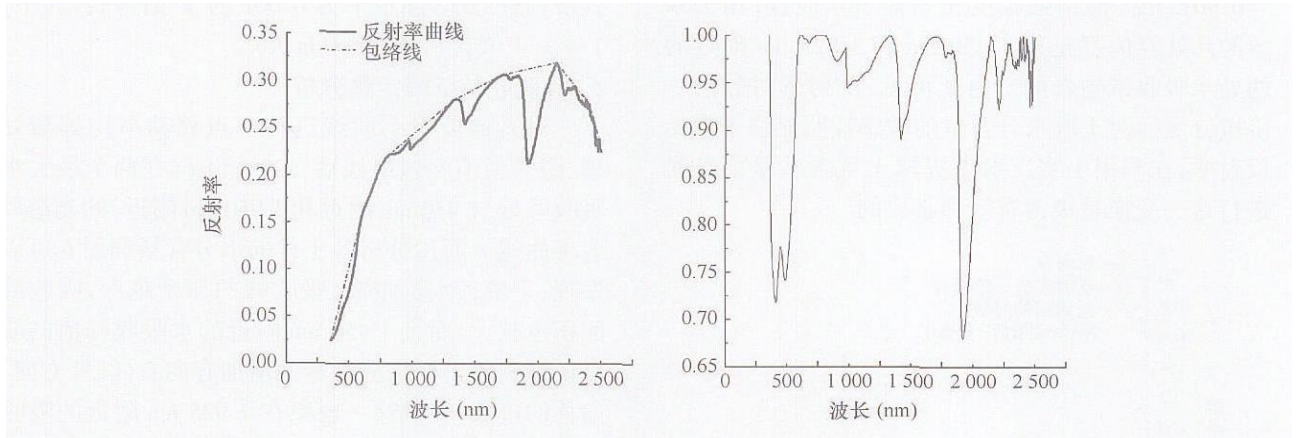


图2 包络线消除前后光谱曲线的对比

表1为通过包络线消除对光谱曲线归一化处理后提取的部分土样在1450 nm附近的水吸收峰特征参数。

表1 部分土样在1450 nm附近的吸收特征参数

编号	面积	位置	宽度	深度
1	33.9	1 449	131	0.235
2	20.6	1 420	126	0.146
3	9.8	1 415	111	0.080
4	18.4	1 416	114	0.144
6	9.7	1 414	92	0.088
7	15.6	1 416	107	0.135
8	7.6	1 414	95	0.073
9	14.6	1 415	108	0.121

### 1.5 逐步回归分析

逐步回归分析的基本思想是将回归变量逐个选入,选入的条件是其偏回归平方和显著;每选入一个新的变量后,对已选入的各变量逐个进行显著性检验,并剔除不显著变量。如此反复选入、检验、剔除,直至无法剔除且无法选入为止。用逐步回归分析法来确定那些与土壤水分含量相关的波段组合时,输入变量是实验室测定的土壤水分含量值和经过单相关分析确定的具有最大相关系数的若干波段的土样的光谱反射率及其变换值,输出结果是一系列包含不同通道的多元线性方程及相应的判定系数 $R^2$ (式(5)),最后由多变量回归模型估计出的是土样的水分含量值。判定系数 $R^2$ 又称复相关系数或曲线的拟合度,是回归效果一个很好的度量。当回归效果

特别不好时, $R^2$ 近似为0,表示拟合值 $\hat{Y}_i$ 与观测值 $Y_i$ 完全不相关。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / (n - k - 1)}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 / (n - 1)} \quad (5)$$

式中, $k$ 为自变量个数(入选波段数), $n$ 为观测量数目(样本数)。可以看出,自变量数大于1时,其值小于判定系数。自变量越多,与判定系数的差值越大。

预测方程的精度用总均方根差( $R_{MSE}$ )来评价(式(6))。

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n - k - 1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (6)$$

式中, $Y_i$ 和 $\hat{Y}_i$ 分别为测定值和预测值, $n$ 为样本数, $k$ 为入选波段数。

方程建立后,我们还采用方差分析方法对回归方程进行检验,检验的假设是总体的回归系数均为0或不都为0,它是对整个回归方程的显著性检验。

## 2 分析与结果

### 2.1 相关分析

对反射率进行对数变换和微分变换,然后与土壤水分含量之间进行相关分析,取得较好的结果,相关分析结果见图3。从图3可以看出,微分变换前的土壤光谱反射率与土壤含水量之间的相关性很弱,相关系数最大值只有1935 nm处的-0.525,几乎不相关。进行微分变换后,相关性普遍得到增强,

尤其是反射率的对数的一阶微分,变换后相关系数的最大值为 - 0.901 (1 423 nm 处),从 - 0.525 到 - 0.901,相关性增强幅度相当显著。而且,相关系数的几处峰值都是与 1 450 nm 和 1 925 nm 附近的两处水吸收带吻合的。由此可见:反射率对数的一阶微分变换对土壤水分含量的敏感性明显强于原始反射率,在利用土壤反射率提取土壤含水量信息时进行这一变换是极为有效和必要的。

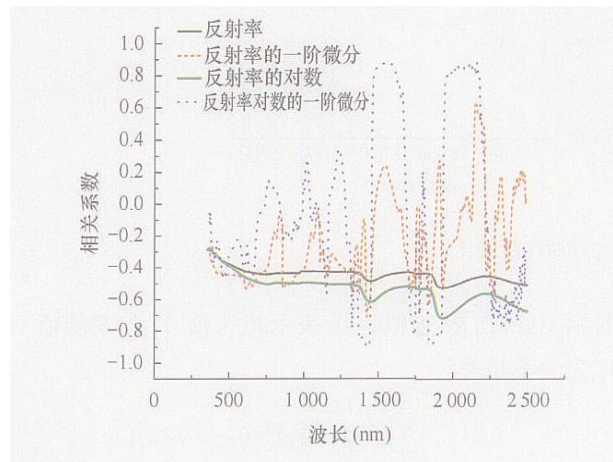


图3 若干反射率变换形式与土壤含水量相关系数

## 2.2 逐步回归

表2列出了反射率的对数的一阶微分与土壤含水量之间相关系数的峰值的位置以及相关系数的值。

表2 相关系数峰值处的几个波段及其峰值

峰值位置 (nm)	相关系数
470	- 0.450
659	- 0.440
757	0.151
1 020	0.276
1 151	- 0.562
1 235	0.338
1 423	- 0.901
1 524	0.875
1 746	- 0.828
1 795	0.211
1 849	- 0.877
2 158	0.882

将表2的波段作为输入变量进行逐步回归分析,得到由 1 423 nm、2 158 nm、1 746 nm 三个波段构成的回归方程(式(7)),该式的拟合度  $R^2 = 0.836$ ,  $R_{MSE} = 2.64$ ,建模样本数为 129。

$$Y = 28.36 - 15.612X_{1423} + 20.513X_{2158} + 16.146X_{1746} \quad (7)$$

式(7)通过显著性水平为 0.001 的  $F$  值检验,式中,  $Y\%$  = 土壤含水量、 $X = (\lg R)$ 。

## 2.3 吸收特征峰定量分析

对光谱反射率曲线进行 9 点移动平均等预处理,图4为消除包络线后,129 个土样在两个最大水吸收峰处(1 450 nm 附近和 1 950 nm 附近)的光谱反射率曲线。通过分析各土样的水分含量和图6可以发现:土壤含水量越高,吸收峰的深度越深,吸收峰面积也越大,而且 1 450 nm 附近的水吸收峰值的波段位置随着土样水分含量的增加有向右(红外方向)偏移的迹象,但是这一现象在 1 925 nm 附近的吸收峰中则不明显。这也可以从各吸收特征参数与土样水分含量的相关分析结果中看出:1 450 nm 附近的吸收峰位置与土壤水分含量高度相关,相关系数为 0.862,而 1 925 nm 附近的吸收峰对应的相关系数只有 0.640,相关性不如前者显著(表3、表4)。这也表明在预测土壤含水量方面,1 450 nm 附近的水吸收峰比 1 925 nm 附近的吸收峰要有更为有效。这一方面是由于 1 450 nm 附近的光谱反射率吸收峰仅反映土壤水分的吸收作用,而 1 925 nm 附近的光谱反射率吸收峰除了受水分含量影响外,还受其他因素的影响,如有机质中的腐殖酸、纤维素、淀粉等;另一方面 1 925 nm 附近的光谱数据的信噪比普遍比 1 450 nm 附近的低。

表3 土样含水量与 1 450 nm 附近吸收峰各特征参数的相关系数矩阵

	土壤含水量	吸收峰面积	吸收峰位置	吸收峰宽度	吸收峰深度
土壤含水量	1				
吸收峰面积	0.864	1			
吸收峰位置	0.862	0.905	1		
吸收峰宽度	0.572	0.764	0.591	1	
吸收峰深度	0.863	0.994	0.907	0.723	1

用 129 个土样的含水量与相应的 1 450 nm 处光谱吸收特征峰深度、位置和面积分别建立线性回归方程:

$$Y = - 1.998 + 107.8X \quad (8)$$

式中,  $X$  为吸收峰深度、 $Y\%$  = 土壤含水量。该式判定系数  $R^2 = 0.742$ ,  $R_{MSE} = 3.31$ 。

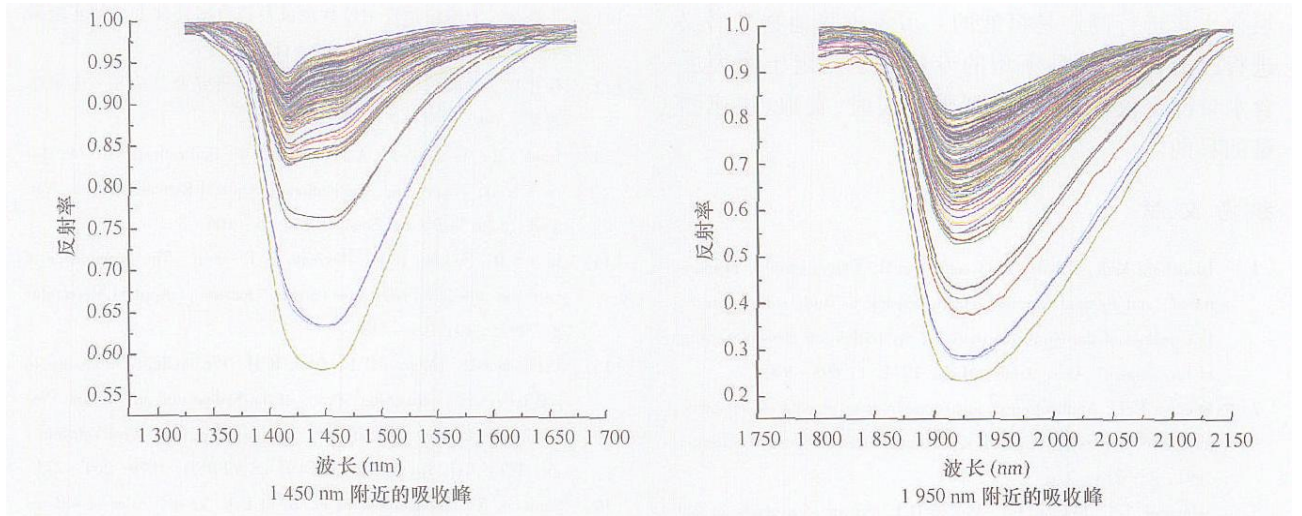


图4 129个土样的两个最大的水吸收峰(消除包络线后)

$$Y = -1261.7 + 0.898X \quad (9)$$

式中,  $X$  为吸收峰位置、 $Y\%$  = 土壤含水量。该式判定系数  $R^2 = 0.741$ ,  $R_{MSE} = 3.32$ 。

$$Y = 1.099 + 0.670X \quad (10)$$

式中,  $X$  为吸收峰面积、 $Y\%$  = 土壤含水量。该式判定系数  $R^2 = 0.744$ ,  $R_{MSE} = 3.30$ 。

表4 土壤含水量与1950 nm附近吸收峰各特征参数的  
相关系数矩阵

	土壤含水量	吸收峰面积	吸收峰位置	吸收峰宽度	吸收峰深度
土壤含水量	1				
吸收峰面积	0.833	1			
吸收峰位置	0.640	0.726	1		
吸收峰宽度	0.838	0.971	0.723	1	
吸收峰深度	0.785	0.991	0.738	0.942	1

1925 nm处光谱吸收特征峰面积、宽度和深度与129个土样的含水量与建立的线性回归方程分别为:

$$Y = -3.252 + 0.309X \quad (11)$$

式中,  $X$  为1925 nm附近的特征吸收峰面积、 $Y\%$  = 土壤含水量。该式判定系数  $R^2 = 0.692$ ,  $R_{MSE} = 3.62$ 。

$$Y = -59.63 + 0.558X \quad (12)$$

式中,  $X$  为1925 nm附近的特征吸收峰宽度、 $Y\%$  = 土壤含水量。该式判定系数  $R^2 = 0.701$ ,  $R_{MSE} = 3.57$ 。

$$Y = -6.128 + 51.24X \quad (13)$$

式中,  $X$  为1925 nm附近的特征吸收峰深度、 $Y\%$  =

土壤含水量。该式判定系数  $R^2 = 0.614$ ,  $R_{MSE} = 4.06$ 。

上述回归方程均通过上式通过显著性水平为0.001的  $F$  值检验。

### 3 结 论

1) 反射率的对数的一阶微分这一变换能大幅度增强光谱数据与土壤含水量之间的相关性。129个土样的数据分析结果显示其相关性较好的几个波段分别为1423 nm、1524 nm、1746 nm、1849 nm, 而变换以前的反射率与土壤含水量的相关性较差。

2) 在预测土壤含水量时,1450 nm吸收峰比1950 nm吸收峰要更为敏感、有效,而且前者的吸收峰位置与含水量高度相关。因为土样1450 nm附近的反射率更纯粹地受水分含量的影响,而1925 nm附近除了受水分影响外,还受其他物质的影响,如土壤有机质的主体-腐殖酸、纤维素、淀粉、蛋白质等;其二为光谱数据在1450 nm附近区域的信噪比比1925 nm附近的区域高,后者曲线有时能看出明显的锯齿状,这跟光谱仪有关系。

3) 目前常用的水分含量测定方法有烘干法、中子法、TDR方法等,各有不足。如烘干法的过程比较繁琐,需要时间较长,不能即时得出结果。中子法虽然较精确,但目前的设备只能测出较深土层中的水,而不能用于土表的薄层土。本研究和其他研究结果均表明土壤含水量与1450 nm处的光谱吸收特征峰面积、位置和深度存在良好的线性回归关系,说明利用地物光谱仪直接测量土壤光谱,从而对土壤表

层含水量进行测定是可能的。可考虑将地物光谱仪进行改造,建立一种新型的专门用于测定土壤表层含水量测定仪器,有望达到野外实时、实地、快速测量的目的。

## 参考文献

- [ 1 ] Blanchard M B , Grealey R , Goettelman R . Use of visible , near-infrared , and thermal infrared remote sensing to study soil moisture . Proceedings of the Ninth International Symposium on Remote Sensing of Environment . Ann . Arbor . Mich . , 1974 , 1 : 693 ~ 900
- [ 2 ] Engman E T . Application of microwave remote sensing of soil moisture for water resources and agriculture . Rem . Sens . Environ . , 1991 , 35 : 213 ~ 226
- [ 3 ] Schmugge T J , Jackson T J , McKim H L . Survey of methods for soil moisture determination . Water Resour . Res . , 1980 , 16(6) : 961 ~ 979
- [ 4 ] 彭德福 . 农业资源光谱数据的分类识别 . 见 : 中国自然资源研究会编 . 自然资源研究的理论和方法 . 北京 : 科学出版社 , 1985
- [ 5 ] 刘伟东 , Frederic B , 张兵 , 等 . 高光谱遥感土壤湿度信息提取研究 . 土壤学报 , 2004 , 41(5) : 700 ~ 706
- [ 6 ] Bedidi A , Cervelle B , Madeira J , *et al.* Moisture effects on visible spectral characteristics of lateritic soils . Soil Sci . , 1992 , 153 : 129 ~ 141
- [ 7 ] Muller E , Decamps H . Modeling soil moisture reflectance . Remote Sens . Envir . , 2000 , 76 : 173 ~ 180
- [ 8 ] Bower S A , Hanks R J . Reflectance of radiant energy from soils . Soil Science , 1965 , 100 : 130 ~ 138
- [ 9 ] Hoffer R M , Johannsen C J . Ecological potential in spectral signatures analysis . In : Johnson P C . ed . Remote Sensing in Ecology . Athens : University of Georgia Press , 1969 . 1 ~ 6
- [ 10 ] Stone E R , Baumgardner M F . Characteristic variations in reflectance of surface soils . Soil Sci . Soc . Am . J . , 1981 , 45 : 1 161 ~ 1 165
- [ 11 ] 卜兆宏 . 土壤波谱反射特性测试及其数据处理方法的实验研究 . 土壤学报 , 1986 , 40 : 109 ~ 117
- [ 12 ] 徐彬彬 , 季耿善 . 土壤光谱反射特性研究及其应用 . 土壤学进展 , 1987 , 15(1) : 1 ~ 9
- [ 13 ] Irons J R , Weismiller R A , Petersen G W . Soil reflectance . In : Asrar G . ed . Theory and Applications of Optical Remote Sensing . New York : John Wiley and Sons , 1989 . 66 ~ 106
- [ 14 ] Idso S B , Jackson R D , Reginato R J , *et al.* The dependence of bare soil albedo on soil water content . Journal of Applied Meteorology , 1975 , 14 : 109 ~ 113
- [ 15 ] Peterson J B , Robison B F , Beck R H . Predictability of change in soil reflectance on wetting . Proc . of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data . Purdue University , West Lafayette , In : IEEE Cat . No . 1979 CH 1430 - 8 MPRSD , 1979 : 264 ~ 273
- [ 16 ] Stoner E R , Baumgardner M F , Biehl L L , *et al.* Atlas of soil reflectance properties . Research Bulletin 962 . Purdue University , West Lafayette , 1980
- [ 17 ] 朱永豪 , 邓仁达 , 卢亚非 , 等 . 不同湿度条件下黄棕壤光谱反射率的变化特征及其遥感意义 . 土壤学报 , 1984 , 21(2) : 194 ~ 202
- [ 18 ] 田国良 . 土壤水分的遥感监测方法 . 环境遥感 , 1991 , 6(2) : 89 ~ 98
- [ 19 ] Cloutis E A . Hyperspectral geological remote sensing : evaluation of analytical techniques . Int . J . Remote Sensing , 1996 , 17(12) : 2 215 ~ 2 242
- [ 20 ] Rock B N , Williams D L , Moss D M , *et al.* High-spectral resolution field and laboratory optical reflectance measurements of red spruce and eastern hemlock needles and branches . Remote Sensing of Environment , 1994 , 47 : 176 ~ 189
- [ 21 ] 郑兰芬 , 王晋年 . 成像光谱遥感技术及其图像光谱信息提取分析研究 . 环境遥感 , 1992 , 7(1) : 49 ~ 58
- [ 22 ] 浦瑞良 , 宫鹏 . 高光谱遥感及其应用 . 北京 : 高等教育出版社 , 2000