

# 短波红外光谱土壤反射率的测量<sup>\*</sup>

张玉香 黄意玢 张广顺

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

## 提 要

利用 DG-2 短波红外光谱辐射计, 得到了短波红外波段不同含水量下的土壤反射率. 分析了土壤短波红外区的光谱特性, 表明  $1.6\mu\text{m}$  附近有较好的光谱响应, 以及该波段反射率与含水量有较好的负相关性的特点. 所得结论为气象卫星短波红外区域的通道选择提供了可行性的依据. 该实验为卫星遥感数据的处理、分析和判读积累了部分实测资料.

**关键词:**短波红外; 反射率; 土壤含水量.

## 1 引 言

自然表面的反射光谱特性, 在卫星遥感工作中起着相当重要的作用. 监测土壤中水分含量用以预报旱涝, 是卫星遥感的一个重要课题. 选择适当的通道, 是卫星遥感的一个重要环节. 美国 1995 年准备在 NOAA-K 上增加  $1.58\sim 1.64\mu\text{m}$  通道, 用于遥感植物中的水分含量和雪、云的分界. 我国 FY-1(02 批)和 FY-3 也准备采用此通道来实现上述目的, 同时也想利用该通道遥感土壤中的水分. 该通道对后者能否可行, 需要大量的地面测量结果作依据. 据了解, 国内从可见光到近红外波段地物波谱测量工作做得较多, 而在短波红外区域则做得较少. 为此, 我们继 1990 年进行土壤反射率观测以后<sup>\*\*</sup>, 1992 年又利用中科院安徽光机所研制的 DG-2 短波红外光谱辐射计对不同含水量的壤土、黄土和沙土分别进行了测量, 取得了一些反射率数据.

## 2 实验装置和结果分析

### 2.1 实验装置和规范

DG-2 短波红外光谱辐射计由光学头部、电子控制箱和便携式计算机三部分组成. 光学头部由三角架支撑, 高 1m 左右, 倾角为  $90^\circ$ , 即垂直于地面, 并且可以水平移动. 仪器的波段范围为  $1.3\sim 2.5\mu\text{m}$ , 分辨率为 10nm, 控制箱内装有提供仪器操作的直流电源, 以及放大、通讯电路等. 便携机内装有驱动仪器操作和计算机软件以实现数据的采集、发送和反

1993-06-12 收到, 1993-09-04 收到修改稿.

• 卫星气象中心的“ $1.6\mu\text{m}$  土壤含水量遥感可行性实验”课题资助.

•• 张玉香等, 利用  $1.6\mu\text{m}$  通道测量土壤水分的实验报告, 1991 年.

射率的计算. 仪器的扫描周期为 5min. 当仪器测量时, 每条扫描线每隔 20nm 取一个数据, 共可得到 60 个数据. 为了消除部分太阳高度角和其它因素干扰的影响, 本实验采用相对测量和计算方法<sup>[1]</sup>, 即在相同的太阳辐照度和观测条件下, 分别测量来自土壤和标准参考板的反射辐射能量(相对单位). 然后用下式计算出被测物体的反射率:

$$R_{\lambda} = (F_{\lambda}/F_{0\lambda}) \times \rho_{\lambda}$$

式中:  $R_{\lambda}$  是被测土壤反射率.  $F_{\lambda}$  和  $F_{0\lambda}$  分别是被测量土壤和标准参考板波长为  $\lambda$  时的反射光谱能量.  $\rho_{\lambda}$  是标准参考板的反射系数.  $\lambda$  是波长.

我们从 1992 年 4 月到 11 月, 在国家卫星气象中心楼顶进行了室外实验观测. 测量前首先对仪器性能和波长进行测定和定位, 以保证仪器的稳定性和波长所对应位置的准确度. 标准参考板的反射系数预先由中国计量科学院标定, 然后把它们装入便携机内, 用以计算反射率. 把土壤过筛, 装入容器、整平, 使其近似为朗伯反射面. 往土上加一定量的水使其保持一定湿度. 选择晴朗、大气比较稳定、风力小于 4 级的天气<sup>[1]</sup>, 在太阳高度角超过  $30^{\circ}$ <sup>[2]</sup> 以后开始测量, 一般在上午 10:30 至下午 2:30 期间进行. 测量时首先让土壤表面完全充满仪器视场, 在 10min 内分别扫描土壤和参考板各一次, 同时把测量数据存入微型磁带, 再对测量过的土壤取样(每组土壤取两个土样), 即完成一次测量. 这样周而复始, 分别对壤土、黄土和沙土进行测量, 最后记录下当时的环境参数(温、湿、压等).

在室内, 对测量数据进行计算、绘图. 利用“称重法”<sup>[3]</sup>对所取土样的含水量进行测定. 把两个土样含水量的平均值作为该土壤的含水量.

## 2.2 测量数据描述

经过几个月的实验观测, 3 种土壤共取样本 36 个, 其中壤土 14 个, 含水量为 3.2%~48.9%; 黄土 10 个, 含水量为 3.7%~41.4%; 沙土 12 个, 含水量为 0.5%~19.7%. 每个样本连续测量两个周期, 这样共得到 72 组光谱数据. 图 1 给出单次测量的壤土、沙土在 4 种含水量下所测反射光谱的若干个例. 图中曲线 1 是 1992 年 10 月 19 日观测, 太阳高度角为  $34.82^{\circ}$ , 含水量 38.0% 时壤土的反射光谱曲线; 曲线 2 是 1992 年 4 月 24 日观测, 太阳高度角为  $60.05^{\circ}$ , 含水量 27.7% 时壤土的反射光谱曲线; 曲线 3 是 1992 年 4 月 18 日观测, 太阳高度角为  $52.20^{\circ}$ , 含水量 3.2% 时壤土的反射光谱曲线; 曲线 4 是 1992 年 11 月 3 日观测, 太阳高度角为  $24.40^{\circ}$ , 含水量 0.5% 时沙土的反射光谱曲线.

图 2 给出单次测量的壤土、沙土和风干样品在 5 种含水量下, 波长范围从  $1.44\sim 1.8\mu\text{m}$  所得到的反射率曲线. 图中曲线 1~4 的观测时间、太阳高度角和含水量均与图 1

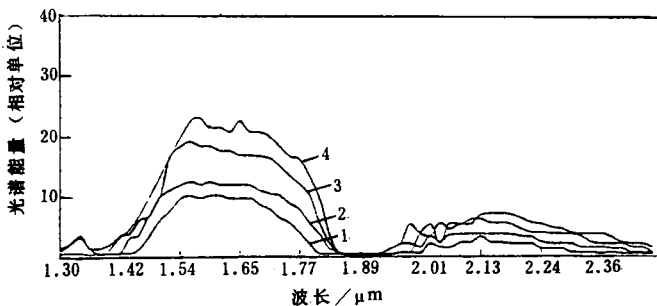


图 1 土壤反射光谱曲线

相对应;曲线 5 是根据张玉香等\*的曲线绘制,该样本为黄棕壤,1983 年 5 月 16 日在室内测量,植被覆盖度 50%,是风干样品。

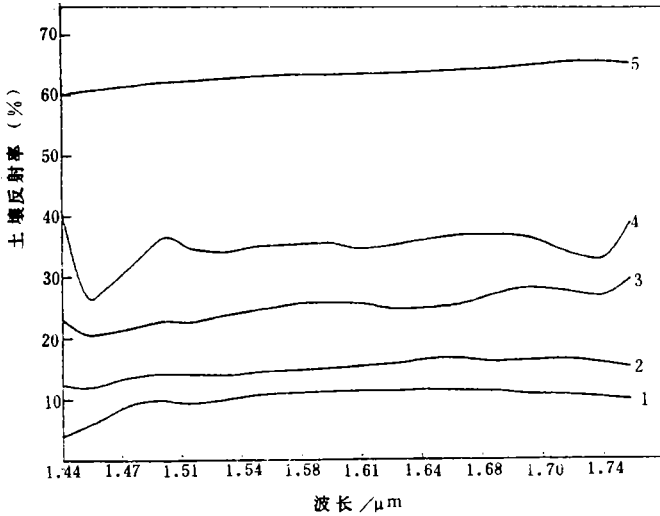


图 2 土壤反射率曲线

表 1 列出了壤土和沙土不同含水量下不同时间单次测量的反射光谱能量和反射率数据。表中含水量是两个样本平均值;波长从 1.42~1.84 $\mu\text{m}$ ;反射率数据为计算平滑后的结果。

表 1 土壤反射光谱和反射率随波长的变化

| 波长<br>( $\mu\text{m}$ ) | 壤 土   |            |  |            |   |            | 沙 土   |            |
|-------------------------|---|------------|--|------------|---|------------|---|------------|
|                         | 1992 年 4 月 18 日<br>太阳高度角 52.20°<br>土壤含水量 3.2% |            | 1992 年 4 月 24 日<br>太阳高度角 60.05°<br>土壤含水量 27.7% |            | 1992 年 10 月 19 日<br>太阳高度角 34.82°<br>土壤含水量 38.0% |            | 1992 年 11 月 3 日<br>太阳高度角 24.40°<br>土壤含水量 0.5% |            |
|                         | 光谱能量<br>(相对单位)                                | 反射率<br>(%) | 光谱能量<br>(相对单位)                                 | 反射率<br>(%) | 光谱能量<br>(相对单位)                                  | 反射率<br>(%) | 光谱能量<br>(相对单位)                                | 反射率<br>(%) |
| 1.42                    | 3.30  | 22.42      | 3.60   | 14.07      | 0.70  | 8.54       | 0.70  | 27.50      |
| 1.44                    | 4.70  | 20.95      | 3.90   | 13.34      | 0.70  | 4.96       | 3.20  | 32.35      |
| 1.46                    | 7.10  | 21.78      | 6.10   | 12.09      | 1.50  | 5.97       | 3.90  | 32.44      |
| 1.48                    | 10.10   | 21.47      | 6.90   | 13.45      | 3.60  | 8.96       | 7.10  | 31.14      |
| 1.50                    | 13.30   | 22.69      | 10.00  | 14.11      | 6.10  | 9.83       | 10.00   | 36.05      |
| 1.52                    | 16.70   | 22.67      | 11.10  | 14.01      | 7.70  | 9.33       | 16.50   | 34.37      |
| 1.54                    | 18.30   | 23.80      | 11.90  | 13.88      | 9.60  | 9.93       | 19.70   | 33.97      |
| 1.56                    | 19.10   | 24.63      | 12.50  | 14.36      | 10.10   | 10.67      | 22.40   | 34.94      |
| 1.58                    | 18.30   | 25.46      | 11.90  | 14.60      | 9.70  | 10.92      | 22.90   | 35.22      |
| 1.60                    | 18.30   | 25.59      | 12.40  | 14.88      | 10.10   | 11.11      | 21.30   | 35.38      |
| 1.62                    | 17.50   | 25.44      | 11.90  | 15.25      | 10.10   | 11.23      | 21.30   | 34.47      |
| 1.64                    | 17.50   | 24.57      | 11.90  | 15.59      | 9.60  | 11.17      | 20.50   | 34.99      |
| 1.66                    | 16.70   | 24.73      | 11.90  | 16.29      | 9.60  | 11.34      | 22.40   | 35.84      |
| 1.68                    | 16.70   | 25.29      | 11.70  | 16.45      | 9.60  | 11.23      | 20.50   | 36.47      |
| 1.70                    | 16.50   | 26.78      | 10.90  | 15.91      | 8.50  | 11.13      | 20.50   | 36.47      |
| 1.72                    | 16.10   | 27.74      | 10.30  | 16.05      | 7.70  | 10.63      | 19.70   | 35.99      |
| 1.74                    | 14.90   | 27.28      | 10.00  | 16.23      | 6.30  | 10.49      | 18.10   | 33.84      |
| 1.76                    | 13.30   | 26.79      | 8.70   | 15.73      | 5.50  | 9.95       | 16.50   | 34.30      |
| 1.78                    | 11.90   | 30.61      | 7.70   | 14.55      | 3.90  | 9.87       | 16.00   | 36.43      |
| 1.80                    | 10.10   | 33.44      | 5.50   | 16.07      | 2.10  | 10.47      | 13.30   | 35.98      |
| 1.82                    | 5.50  | 28.42      | 3.70   | 17.55      | 0.50  | 14.35      | 9.60  | 27.43      |
| 1.84                    | 2.30  | 21.47      | 1.30   | 15.32      | 0.50  | 16.59      | 3.70  | 20.43      |

注:测量地点是国家卫星气象中心 10 楼楼顶阳台;样本共 36 组,每组两次测量,表中仅列出其中的 4 组,其值是一次测量结果;含水量值是两次测量的平均;

\* 利用 1.6 $\mu\text{m}$  通道测量土壤水分的实验报告,1991 年。

为了更直观地了解土壤的反射率与含水量的关系,表2列出了壤土、黄土和沙土在不同含水量和4个波长条件下的反射率.并根据反射率和含水量的关系,进行一元线性回归方程计算,得到1.44~1.8 $\mu\text{m}$ 波长范围内反射率和含水量的相关系数和标准偏差,也在表2中列出.

表2 不同波长条件下的土壤反射率随含水量的变化及其相关性

|       | 含水量 (%) | 反射率(%)            |                   |                   |                   |                   |       |
|-------|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|
|       |         | 1.4 $\mu\text{m}$ | 1.5 $\mu\text{m}$ | 1.6 $\mu\text{m}$ | 1.7 $\mu\text{m}$ | 1.8 $\mu\text{m}$ |       |
| 壤土    | 3.20    | 21.41             | 22.69             | 25.58             | 24.68             | 27.67             |       |
|       | 5.10    | 20.17             | 22.34             | 18.16             | 16.76             | 16.00             |       |
|       | 7.30    | 19.88             | 21.17             | 19.43             | 19.89             | 19.96             |       |
|       | 11.70   | 5.08              | 18.33             | 20.24             | 20.31             | 23.67             |       |
|       | 18.00   | 17.97             | 27.41             | 17.63             | 17.22             | 15.03             |       |
|       | 27.70   | 14.38             | 14.11             | 14.88             | 15.91             | 16.07             |       |
|       | 32.80   | 21.27             | 16.01             | 13.41             | 13.26             | 10.53             |       |
|       | 38.00   | 15.28             | 9.83              | 11.11             | 11.13             | 10.47             |       |
|       | 48.90   | 10.78             | 11.37             | 10.98             | 12.09             | 11.10             |       |
|       | 相关系数    | 0.37              | 0.82              | 0.91              | 0.87              | 0.80              |       |
| 标准差   | 5.19    | 3.47              | 1.84              | 2.05              | 3.43              |                   |       |
| 黄土    | 3.70    | 19.38             | 19.14             | 19.41             | 19.08             | 19.46             |       |
|       | 4.20    | 24.39             | 19.55             | 21.19             | 21.50             | 21.43             |       |
|       | 3.50    | 13.86             | 15.21             | 16.23             | 14.47             | 14.51             |       |
|       | 27.40   | 21.85             | 21.41             | 13.75             | 14.15             | 11.79             |       |
|       | 32.40   | 0.00              | 10.55             | 13.47             | 14.47             | 8.05              |       |
|       | 41.40   | 8.17              | 10.45             | 11.95             | 12.21             | 12.65             |       |
|       | 相关系数    | 0.68              | 0.66              | 0.96              | 0.87              | 0.85              |       |
|       | 标准差     | 6.16              | 3.22              | 0.93              | 1.57              | 2.43              |       |
|       | 沙土      | 0.50              | 21.03             | 31.51             | 34.77             | 35.96             | 39.56 |
|       |         | 0.60              | 37.14             | 45.79             | 33.50             | 32.97             | 32.21 |
| 0.90  |         | 35.45             | 38.78             | 36.76             | 39.66             | 43.68             |       |
| 3.90  |         | 19.88             | 23.69             | 23.74             | 26.87             | 28.11             |       |
| 5.70  |         | 19.68             | 19.91             | 22.50             | 23.85             | 26.68             |       |
| 7.70  |         | 0.00              | 20.24             | 24.04             | 24.13             | 23.67             |       |
| 8.10  |         | 17.93             | 19.60             | 21.87             | 22.35             | 20.50             |       |
| 9.80  |         | 19.14             | 16.73             | 21.30             | 21.96             | 24.02             |       |
| 19.70 |         | 9.63              | 10.53             | 13.45             | 15.12             | 14.25             |       |
| 相关系数  |         | 0.64              | 0.84              | 0.91              | 0.90              | 0.87              |       |
| 标准差   | 8.24    | 5.78              | 3.01              | 3.20              | 4.23              |                   |       |

注:该表从36组样本72次测量中筛选出24次,是一次测量结果.

表3 大气透过率

| 波长 ( $\mu\text{m}$ ) | 总透过率   | 水汽带    | CO <sub>2</sub> <sup>+</sup> | 臭氧     | 水汽连续   | 气溶胶    |
|----------------------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|--------|
| 1.387                | 0.0055 | 0.0191 | 1.0000                       | 1.0000 | 0.3144 | 0.9200 |
| 1.418                | 0.0945 | 0.1310 | 1.0000                       | 1.0000 | 0.7828 | 0.9233 |
| 1.451                | 0.2468 | 0.2976 | 0.9916                       | 1.0000 | 0.9042 | 0.9267 |
| 1.486                | 0.5858 | 0.6610 | 0.9994                       | 1.0000 | 0.9549 | 0.9303 |
| 1.522                | 0.9088 | 0.9839 | 0.9999                       | 1.0000 | 0.9905 | 0.9342 |
| 1.560                | 0.9274 | 1.0000 | 1.0000                       | 1.0000 | 0.9912 | 0.9370 |
| 1.600                | 0.8823 | 1.0000 | 0.9492                       | 1.0000 | 0.9911 | 0.9392 |
| 1.642                | 0.9224 | 0.9993 | 0.9905                       | 1.0000 | 0.9909 | 0.9415 |
| 1.686                | 0.9201 | 0.9851 | 1.0000                       | 1.0000 | 0.9906 | 0.9440 |
| 1.733                | 0.8609 | 0.9208 | 1.0000                       | 1.0000 | 0.9887 | 0.9466 |
| 1.783                | 0.6414 | 0.7004 | 1.0000                       | 1.0000 | 0.9656 | 0.9493 |
| 1.835                | 0.0018 | 0.0080 | 1.0000                       | 1.0000 | 0.2374 | 0.9523 |

注:CO<sub>2</sub><sup>+</sup>表示二氧化碳、沼气和氧化亚氮等.

为了分析短波红外光谱区的大气消光特性,表 3 列出了利用 LOWTRAN-6 软件计算的波长  $1.387\sim 1.835\mu\text{m}$  的整层大气透过率。

### 2.3 数据分析

在实验观测中,由于使用的 DG-2 光谱辐射计是光栅式的扫描光谱仪,故测量周期长.为了减少测量中太阳高度角和环境因素变化对反射率的影响,因此对每组样本两次测量的数据没有进行平均,在结果分析中均取单次测量的数据作依据。

从以上图表分析得出:(1)在图 1~2 和表 1 中看出土壤的反射光谱和反射率在不同的光谱区是有选择性的,波长范围为  $1.55\sim 1.75\mu\text{m}$ ,其反射光谱能量较强,反射率曲线呈缓慢上升趋势,并且反射光谱和反射率数据出现最大和较大值,而在  $1.4\mu\text{m}$  和  $1.9\mu\text{m}$  波段出现强吸收峰;(2)在图 1~2 和表 1~2 也明显看出,土壤的含水量对其反射光谱能量和反射率都有很大影响<sup>[2]</sup>,总的趋势是成反比关系,即土壤的反射光谱能量和反射率随含水量的增大而减小.其中,沙土的变化较壤土更为明显.这与文献[4]所论述的观点是一致的;(3)由表 2 知道,无论壤土、黄土还是沙土,反射率与含水量的相关系数绝对值(负相关)在  $1.6\mu\text{m}$  处出现最大值,都在 0.9 以上,而在该波段处的标准差出现最小值.这说明了在  $1.6\mu\text{m}$  波长附近,土壤的反射率与含水量具有较好的相关性;(4)由表 3 的大气透过率得知,范围从  $1.560\sim 1.642\mu\text{m}$  波段,总透过率最大,并且水汽带和水汽连续吸收几乎没有,也就是说该波段大气中水汽的影响可以忽略.而在该波段主要是均匀混合气体(包括二氧化碳、沼气和氧化亚氮等)和气溶胶的影响。

综合以上分析可以看出  $1.6\mu\text{m}$  波长附近确实是一个较理想的短波红外窗区通道,如果选择该通道来遥测土壤的含水量是可行的。

### 3 可能的误差来源

(1)在吸收带有影响的波长附近,反射光谱响应较弱,加上仪器的信噪比较低,使得在此处得到的反射率数据不可靠,象表 2 列出的  $1.4\mu\text{m}$  波长处反射率数据误差就较大;(2)每次测量土壤和参考板各一次至少需要 10min,这期间太阳高度角有变化,即入射辐射强度有变化,因此造成了反射率的计算误差;(3)被测土壤表面粗糙度及天气因素干扰均能引起测量误差。

### 4 结 语

经过一段时间的观测,积累了许多实测数据,进一步确认了选用  $1.6\mu\text{m}$  通道的可行性,这些数据的积累,为准备处理 NOAA-K 资料提供了依据.此项工作也为下一步的中国遥感卫星辐射校正和真实性检验工作进行了一点尝试.今后需要进一步开展地物波谱实验,对各种不同的自然表面特性以及地物光谱的双向反射率进行观测研究。

### 参 考 文 献

- 1 中国科学院空间科学技术中心. 中国地球资源光谱信息资料汇编. 北京: 能源出版社, 1987. 1039.
- 2 康德拉捷夫 K R. 太阳辐射能. 李怀谨等译. 北京: 科学出版社, 1962. 461~500.
- 3 裴步祥. 蒸发和蒸散的测定与计算. 北京: 气象出版社, 1989. 68~70.
- 4 童庆禧等. 中国典型地物波谱及其特征分析. 北京: 科学出版社, 1990. 611~618.

## THE SOIL REFLECTANCE MEASUREMENT WITH SHORT WAVE INFRARED SPECTRUM

Zhang Yuxiang Huang Yibin Zhang Guangshun

(National Satellite Meteorology Center, Beijing 100081)

### Abstract

Using DG-2 short wave infrared spectroscopic radiometer the soil reflectances for the short wave infrared window area with various soil moistures are measured. The spectroscopic characteristics are investigated. The results show that the spectroscopic response in about  $1.6\mu\text{m}$  is obvious, and the anticorrelation between the reflectance of soil and the moisture content with that wavelength is clean.

The measuring results provide feasibility basis for the choice of short wave infrared channels of remote sensing instruments of meteorological satellite, and this experiment is also useful for processing, analysis and identification of meteorological satellite remote sensing information.

**Key words:** Short wave infrared (SWIR); Reflectance; Soil moisture.