

野外地物反射光谱的测试原理及其在农业上的应用

金 仲 辉

(北京农业大学, 北京 100094)

本文讨论了双向反射率分布函数、双向反射率、双向反射率因子等光谱反射率之间的关系, 并指出了在一定条件下, 遥感技术中野外测量地物反射光谱所得的双向反射率因子和物理学中惯用的半球反射率是一致的; 还讨论了野外动物反射光谱测试中的几个具体问题及其在农业上的一些应用例子。

一、镜面反射和漫反射

当一束平行光投射到两介质平的界面上时, 反射光具有确定的方向, 入射角 θ_1 等于反射角 θ_1' , 如图 1 所示; 反射光强度和两介质的折射率 n_1 和 n_2 及入射角 θ_1 有关。

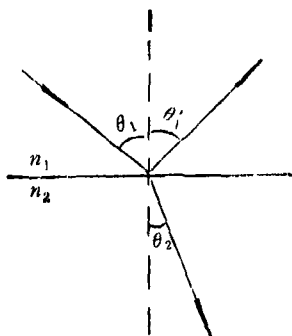


图 1 光的反射定律

当光投射到一粗糙界面上时, 反射光分布在各方向, 单位面积、单位立体角内反射光功率正比于 $\cos\theta$ (θ 为界面的法线与反射光方向间夹角, 如图 2 所示), 即

$$\frac{d\Phi}{dA d\omega} \propto \cos\theta.$$

这种现象称漫反射, 此粗糙界面称漫反射面(或朗伯反射面)。将上述规律写成的等式即为朗伯余弦定律的数学表示式:

$$\frac{d\Phi}{dA d\omega} = B \cos\theta, \quad (1)$$

其中常数 B 称漫反射面的反射辐射亮度, 单位
物理

为 $W/sr \cdot m^2$, 可将(1)式绘成图的形式, 如图 3 所示, 说明反射光功率呈球状空间分布。

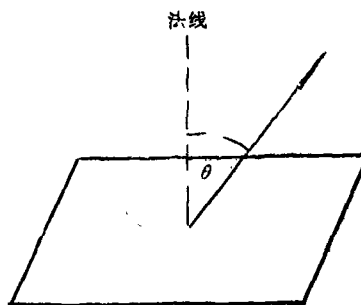


图 2 光在粗糙面上反射

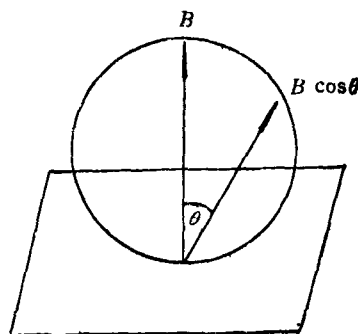


图 3 朗伯余弦定律

若将 M 定义为漫反射面单位面积上向上半球空间反射总的光功率, 则由(1)式得

$$\begin{aligned} M &= \iint \frac{d\Phi}{dA} = \iint B \cos\theta d\omega \\ &= B \int_0^{\pi/2} \cos\theta \sin\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi, \\ M &= \pi B. \end{aligned} \quad (2)$$

若入射至漫反射面上单位面积的光功率为 E

(即照度)并把 ρ 定义为半球反射率, 则显然有

$$M = \rho E. \quad (3)$$

由(2)式和(3)式, 得

$$B = \frac{E}{\pi} \rho. \quad (4)$$

(4)式告诉我们, 漫反射面的亮度 B 和半球反射率 ρ 之间存在着一个简单的关系。

二、实际界面反射

实际地物的表面既非镜面又非漫反射面, 因而反射光无确定的方向, 反射面的辐射亮度 B 也不是常数, 它往往与光源方向和接收反射光的仪器方位有关。这也就是在有关遥感的书刊中描述反射率定义^[4]常带有“双向”二字的缘故。

1. 双向反射率分布函数 $f(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$

它定义为在仪器的接收方向 (θ', φ') 上, 地物反射辐射亮度 $dB'(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$ 与光源在 (θ, φ) 方向上时的入射辐射照度 $dE(\theta, \varphi)$ 的比值, 即

$$f(\theta, \varphi; \theta', \varphi') = \frac{dB'(\theta, \varphi; \theta', \varphi')}{dE(\theta, \varphi)} \quad (5)$$

单位为 $1/\text{sr}$; $\theta, \theta', \varphi'$ 和 φ 的定义如图 4 所示; $dE(\theta, \varphi)$ 实际上是扩展光源 (如太阳) 辐射出来的光功率中落在所研究的地物表面上的一部分, 简言之, 就是地物表面单位面积上所得到的

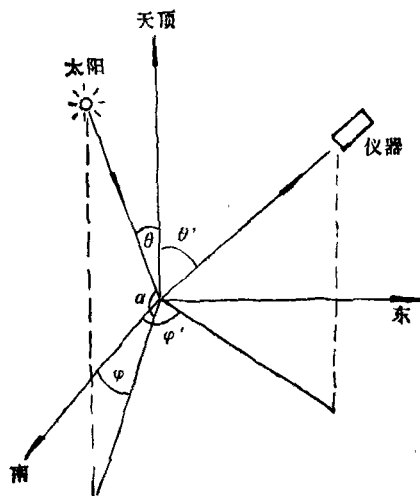


图 4 反射光谱测试

光功率。 $dE(\theta, \varphi)$ 可以写成

$$dE(\theta, \varphi) = B(\theta, \varphi) \cos \theta d\omega, \quad (6)$$

其中 $B(\theta, \varphi)$ 称为扩展光源的辐射亮度, 单位为 $\text{W}/\text{sr} \cdot \text{m}^2$ 。

由以上双向反射率分布函数的定义可看出, 它比较符合实际的情况, 即全面地描述了地物的反射方向特性。但是, 由于 $dE(\theta, \varphi)$ 值在实际测量中很难测量, 再加上实际测量工作量也极大, 所以在工作中难于直接使用它。

2. 双向反射率 $\rho(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$

ρ 的定义如下:

$$\begin{aligned} \rho(\theta, \varphi; \theta', \varphi') &= \frac{dB'(\theta, \varphi; \theta', \varphi') \cos \theta' d\omega'}{dE(\theta, \varphi)} \\ &= \frac{dB'(\theta, \varphi; \theta', \varphi') \cos \theta' d\omega'}{dB(\theta, \varphi) \cos \theta d\omega} \\ &= f(\theta, \varphi; \theta', \varphi') \cos \theta' d\omega'. \end{aligned} \quad (7)$$

由(7)式看来, $\rho(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$ 的定义似乎很容易被接受, 因为它具有某种形式上的“对称性”。但是, 正是这种对称性带来了麻烦, 因为 $\rho(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$ 还和光源、地物以及仪器之间的相对位置有关, 即和 $d\omega$ 和 $d\omega'$ 有关 (如仪器和地物之间距离的变化, 将引起 $d\omega'$ 的变化), 所以它不能直接反映地物的特征。正是由于上述原因, 不同条件下测得的双向反射率往往难于比较。

3. 双向反射率因子 $R(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$

R 定义为: 在一定的光照射和观测条件下, 目标 (地物) 的反射光功率与处于同一光照射和观测条件下的标准参考面的反射光功率之比, 即

$$\begin{aligned} R(\theta, \varphi; \theta', \varphi') &= \frac{dB_i(\theta, \varphi; \theta', \varphi') \cos \theta' d\omega'}{dB'_0(\theta, \varphi; \theta', \varphi') \cos \theta' d\omega'} \\ &= \frac{dB_i}{dB'_0}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中 dB_i 和 dB'_0 分别为目标和标准参考面的亮度。这里标准参考面指的是半球反射率 $\rho = 1$ 的漫反射面。根据(5)式, 有

$$dB_i = f_i dE, \quad dB'_0 = f_0 dE.$$

将上二式代入(8)式, 得

$$R(\theta, \varphi; \theta', \varphi') = f_t/f_p. \quad (9)$$

(9)式说明,双向反射率因子等于目标的双向反射率分布函数与标准参考面的双向反射率分布函数的比值。对于 $\rho = 1$ 的漫反射面,有

$$f_p = B/E = B/M = 1/\pi. \quad (10)$$

由(9)式和(10)式得

$$R(\theta, \varphi; \theta', \varphi') = \pi f_t(\theta, \varphi; \theta', \varphi'). \quad (11)$$

由(11)式可看出,在使用标准参考面的情况下,把实际测量中较容易测定的 $R(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$ 和能反映地物特征恰又难于测定的 $f_t(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$ 联系起来,这就使 $R(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$ 成为重要的物理量。

由(7)式和(11)式得

$$\rho(\theta, \varphi; \theta', \varphi') = f(\theta, \varphi; \theta', \varphi') \cos \theta' d\omega' \\ = \frac{\cos \theta' d\omega'}{\pi} R(\theta, \varphi; \theta', \varphi'), \quad (12)$$

(12)式将双向反射率和双向反射率因子联系起来。

由以上讨论可清楚地看出, $f(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$ 、 $\rho(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$ 和 $R(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$ 三者并不是相互独立的,而存在着紧密的联系,在三者中易于实际测量而又能反映地物反射光谱特征的是双向反射率因子 $R(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$ 。

4. $R(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$ 的测量

需要指出的是,上述双向反射率因子定义中的标准参考面是一个全反射的漫反射面,但考虑到实用的参考板(漫反射面)的光谱反射率 ρ_s ,则目标的双向反射率因子可写为

$$R(\theta, \varphi; \theta', \varphi') = \rho_s R'(\theta, \varphi; \theta', \varphi'), \quad (13)$$

其中 $R'(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$ 为使用标准参考面时目标的双向反射率因子。在以下推导中要用到(13)式所表明的概念。

在野外测量 $R(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$ 时,所用的模式如图4所示。地物经反射进入接收仪器的光功率为

$$\phi_t = \tau_t B_t \omega A \Delta \lambda, \quad (14)$$

参考板经反射进入仪器的光功率为

$$\phi_s = \tau_s B_s \omega A \Delta \lambda, \quad (15)$$

其中 τ_t 和 τ_s 分别为地物和参考板至仪器的太阳辐射透过率,可认为 $\tau_t = \tau_s$; B_t 和 B_s 分别为

物理

地物和参考板的反射辐射亮度; ω , A 和 $\Delta \lambda$ 分别为接收仪器的视场立体角、有效接收面积和接收光谱的通道。

由于接收仪器输出电流 I 正比于入射光功率,设其比例系数为 κ , 故有

$$\phi_t = \kappa I_t, \quad \phi_s = \kappa I_s. \quad (16)$$

由(14)、(15)和(16)三式,得

$$I_t/I_s = \phi_t/\phi_s = B_t/B_s. \quad (17)$$

由(2)式和(3)式得

$$B_t = M_t/\pi = \rho_s \frac{E}{\pi} = \rho_s B_p. \quad (18)$$

(17)式中的 B_s 为 $\rho = 1$ 的标准参考面在照度 E 作用下产生的辐射亮度。由双向反射率因子的定义和(18)式得

$$R(\theta, \varphi; \theta', \varphi') = B_t(\theta, \varphi; \theta', \varphi')/B_p \\ = \rho_s I_t/I_s. \quad (19)$$

(19)式告诉我们,只要知道参考板的光谱反射率 ρ_s 以及测量出光电流 I_t 及 I_s , 就可求得地物的双向反射率因子。

讨论:

(1) 若地物是一个漫反射面,这时有

$$B_t = M/\pi = \rho_s E/\pi = \rho_s B_p,$$

所以

$$R(\theta, \varphi; \theta', \varphi') = B_t/B_p = \rho_s. \quad (20)$$

(20)式告诉我们,在地物和参考板都是漫反射面情况下,测得的双向反射率因子就等于地物的半球反射率,而且它与光源和仪器的方位无关。这个结论很重要,因为只有半球反射率才真正反映了光和物质相互作用的总效果,并使测量大为简化而易于实行。

(2) 若地物不是漫反射面,那就没有 $R = \rho_s$ 的结论,此时测得

$$R(\theta, \varphi; \theta', \varphi') = B_t(\theta, \varphi; \theta', \varphi')/B_p, \quad (21)$$

(21)式的 R 是 $(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$ 的函数,而且由于地物不是漫反射面(可能有较强的镜面反射效果),在某些方向上它的反射辐射亮度 B_t 值有可能大于标准参考面的辐射亮度 B_p 值。在这种情况下测得的 $R(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$ 值就可能大于1。显然,采用大于1的反射率值来表征地

物反射光谱的特征是不可取的。

三、测量中的几个具体问题

我们始终要明了(20)式是测量的出发点。这包含二方面的意思：其一是入射光在确定的方向，其二是参考板和地物都是漫反射面。另外，在野外的测量中，为了便于与卫星测量结果对比，常使光谱仪的光轴与天顶方向（见图4）一致，即 $\theta' = 0$ ， $\varphi' = 0$ 。

1. 天空光和云的影响

野外测量时，除了太阳光还有大气散射阳光产生的天空光和云，这两个因素对测量结果有否影响？

如果假定天空光是一个余弦辐射体，经理论分析和模拟测量得出在 $0.5-2.3 \mu\text{m}$ 波长范围内，可见度为 8km 情况下，即使考虑天空光，最多也只带来3%的系统误差，所以在测量中常不考虑天空光的影响。至于云，尤其在太阳近旁的云对测量结果的影响很大，且没有一定的规律，所以在测量时一定要选择晴朗无云的天气。

2. 参考板的影响

实际的参考板往往不是理想的漫反射面，它的反射光强度偏离图3所示的余弦分布规律，而且入射光的方向不同，反射光的强度分布也不同。图5示出了入射光垂直入射下，反射光强度分布呈椭球面分布。图6示出了入射光斜入射时的反射光强度分布，它的特点是在入射光方向上的反射强度小，而在与镜面反射所对应的出射方向强度大。由此可看出，实用的参考板严格说来不是漫反射面，那么在什么条件下它可以被认为是一个近似漫反射面呢？这可以用“漫射角”的概念来解释。所谓漫射角是当照度一定的条件下，入射角 θ 在某一个范围内，法线上的反射辐射亮度 B 不变（或在一定的误差要求下），此角称为参考板的漫射角。由以上分析可知，在测量之前应对参考板的物理性能及有关参数有所了解。

3. 测量时要使地物表面尽可能是漫反射面

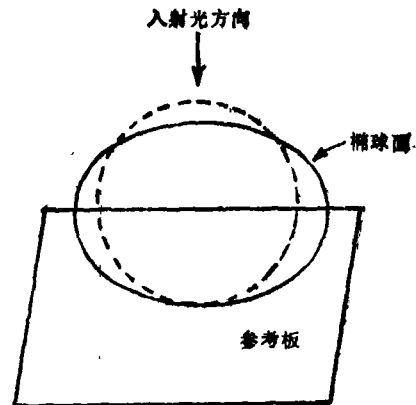


图 5

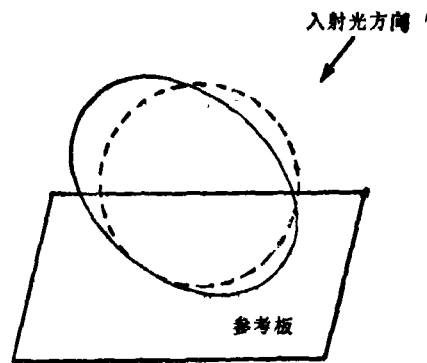


图 6

(1) 测量高度的选择^[2]

测量高度选择随地物种类不同而不同。但是，考虑的原则是相同的，那就是测量时应有一定的高度，使有足够大的视场以保证地物表面的起伏度较之于视场要小，即保证地物表面近似是一个漫反射面，这样测得的数据有较好的重复性。吕斯骅和笔者等曾测量正在灌浆的水稻的反射光谱，取了高山水稻顶部 1.5m 、 3m 、 6m 和 12m 四个不同的高度（仪器视场角 3.4° ），发现测量结果无显著差异，但高度越高，方差越小， 12m 高度下的方差要比 1.5m 的小 $2-2.5$ 倍。一般说来，在野外测量条件允许情况下，高度高些是有利的。

(2) 测量时间的选择^[3]

测量时间的选择主要取决于太阳高度角 α （见图4）。云南腾冲的遥感试验资料表明，仅

表 1

地方时	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
α	26.5°	37.6°	47.4°	54.5°	57.2°	54.5°	47.4°	37.6°	26.5°

在太阳高度小于 35° 的时候，测得的光谱反射率数据略有增高，那就是说，在太阳高度角大于 35° 情况下，测量数据是稳定的，可以认为地物表面是一个近似漫反射面；美国的 Purdue 大学遥感试验资料表明，他们测量时太阳高度角处于 65—35° 范围内。由于地球的运动，太阳高度角是随时、随地变化的，这就是为什么在遥感书刊中提及的测量时间往往是各不相同的原因。

某地某时太阳高度角 α 值由下式决定

$$\sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t, \quad (22)$$

其中 φ 为地理纬度， δ 为太阳赤纬， t 为太阳时角。赤纬是指太阳光与地球赤道平面的夹角，一年内赤纬在 $\pm 23^\circ 27'$ 之间变动； δ 值可查有关的表得知。太阳时角的定义是：以地方时 12 点的时角 t 为零，6 点 t 为 $-\pi/2$ ，18 点 t 为 $\pi/2$ 。

例如，9 月 10 日在陕西省米脂县进行测量， $\varphi = 37^\circ 46'$ ， $\delta = 5^\circ$ ，米脂县地方时和太阳高度角列于表 1。由以上计算可知，若要在大于 45° 的太阳高度角下测量，测量时间宜在（米脂县）地方时 10:00 至 14:00 范围。考虑到北京时间是以东经 120° 定义的，而米脂县位于东经 110°，所以米脂县地方时 10:00 对应北京时间为 10:40，再考虑到 9 月 10 日我国执行北京夏令时，所以米脂县地方时 10:00 对应北京夏令时为 11:40。

四、农业上应用例子

1. 农业地物的分类^[4]

北京农业大学遥感研究所于 1987 年 6 月和 9 月在米脂县黄土高原不同地点测量 30 个农业地物（例如玉米、小米、白薯、花生、苜蓿、荒

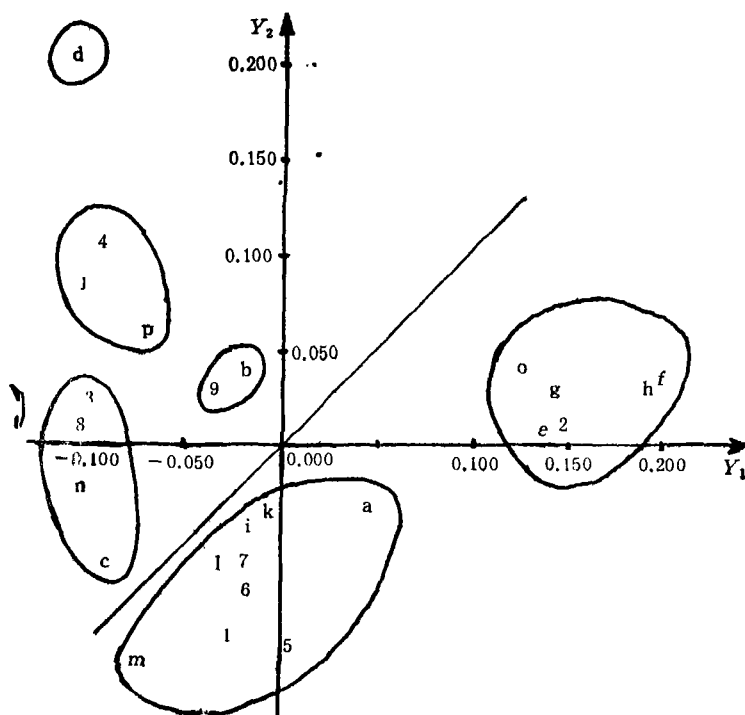


图 7 6 月农业地物分类图

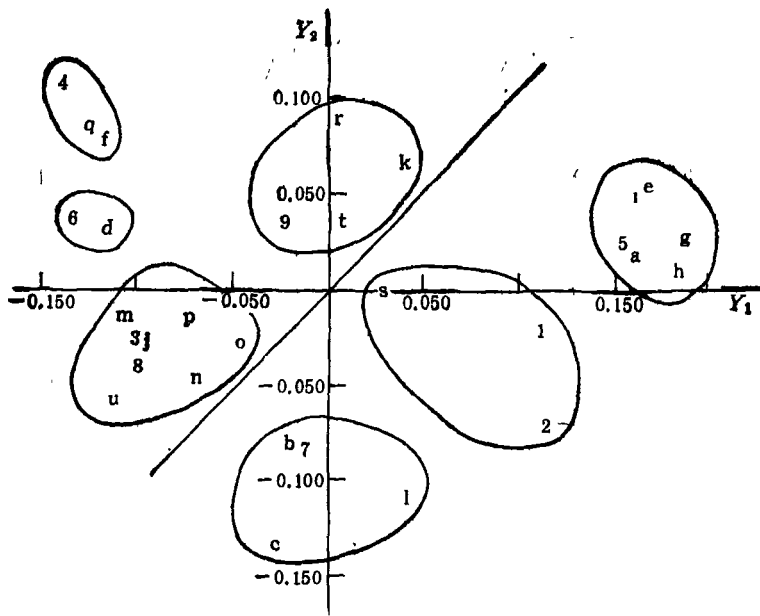


图8 9月农业地物分类图

地、裸土壤等)的野外反射光谱。光谱测量用了TM1(0.45—0.52 μm)、TM2(0.52—0.60 μm)、TM3(0.63—0.69 μm)和TM4(0.76—0.90 μm)共四个波段。数据处理采用主成分分析。它是一种多元统计方法,主要是将一组相关的多变量数据变换成由这组变量的线性组合所构成的互不相关(即正交)的一组新变量,这组新变量称为主成分。在本例中,通过主成分分析,表示每个地物的TM1至TM4四个波段的光谱数据变换成二个正交的主成分(Y_1 和 Y_2),这样我们可用直角坐标中的一个点来代表一个地物。图7和图8分别标出了1987年6月和9月测量的农业地物,图中的每个数字和字母各自代表一个地物。由图7和图8可以看出,所测的农业地物可分别分为六大类和七大类。例如图8中的“6”(大豆)和“d”(苜蓿)归入同一类,但在图7中“6”和“d”不属于同一类。这说明我们采用二个时相的地物分类图可将“6”和“d”区分开来。总之,采用多时相地物分类图可将地物一一区分开来。

野外地物光谱测试属于遥感应用的基础研究工作,上述地物分类图是遥感图像的解译和判读的重要依据。

2. 作物估产^[5]

农作物生长状况不同,反射光谱也不同,最终的产量也就不同。通过野外的实验,可以找出作物不同波段的光谱数值(或比值)和作物产量的相关关系式,用来对作物估计产量。

北京农业大学遥感研究所曾在校内试验区,通县和河北省曲周县三处12个样区29个样点上,在冬小麦的起身期、拔节期、抽穗期和面团期野外测试它们的反射光谱。光谱测量用了MSS4(0.50—0.60 μm)、MSS5(0.60—0.70 μm)、MSS6(0.70—0.80 μm)和MSS7(0.80—1.1 μm)共四个波段。为了表达冬小麦不同生育阶段光谱特性对产量反映的不同贡献,数据处理采用积分回归的方法。最后得到冬小麦产量光谱模式为

$$Y = 192 + 1.39X_1 - 4.99X_2 - 2.27X_3 - 1.70X_4,$$

$$R = 0.825,$$

其中 Y 为产量(斤/亩); R 为相关系数; $X_1 = \frac{1}{2}(\rho_5 + \rho_7)$ 起身期; $X_2 = (\rho_7 - \rho_4)$ 拔节期; $X_3 = \frac{(\rho_6 + \rho_7)}{(\rho_4 + \rho_7)}$ 抽穗期; $X_4 = (\rho_4)$ 面团期; ρ_4, ρ_5, ρ_6 和 ρ_7 分

别为 MSS4, MSS5, MSS6 和 MSS7 波段的反射率。

我们对上述产量光谱模式曾进行抽样检验,例如某取样点冬小麦的估产为 498 升/亩,而该样点的实产为 514 斤/亩,可以看出估产的精度是相当高的。

国内外利用野外地物反射光谱,对小麦、水稻等作物估产方面的工作做得是不少的,提出的产量光谱模式也不尽相同,但都取得较好的效果。

3. 植物病害的监测

受病虫害侵袭的植物,在初期往往并不表现出明显的征状,例如植物叶子可见的绿色没有什么变化,但它在红外波段的反射能力与健康植物已有很大的差异。例如图 9 绘出了北京农业大学遥感研究所测得的正常小麦和受蚜虫害小麦的 MSS4 至 MSS7 四个波段的光谱反射率。上述这种反射光谱差异可用来对植物病害进行早期探测。总之,利用健康植物与受病虫害侵袭的植物在可见和红外波段的反射光谱有较大的差异,可用来对植物的病毒病害、细菌性病害、真菌性病害、昆虫性病害等进行监测。有关植物病害的遥感监测研究工作,我国尚处

于初始阶段,有待于深入、发展。

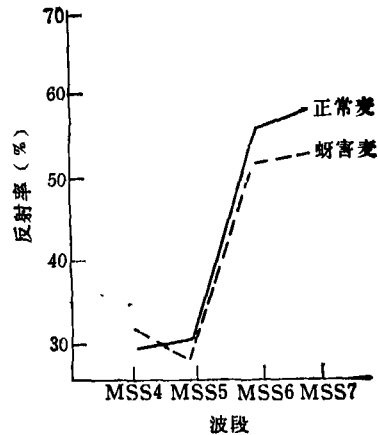


图 9 正常小麦与受蚜虫害小麦反射光谱特性

- [1] P. H. Swain., S. M. Davis., Remote Sensing: The Quantitative Approach. McGraw-Hill Inc., (1978), 42.
- [2] 吕斯骅等, 遥感技术研究与应用资料汇编, 科学技术文献出版社, (1984), 35.
- [3] 吕斯骅, 遥感物理基础, 商务印书馆, (1981), 226.
- [4] 林 培主编, 黄土高原专题研究论文集, 北京大学出版社, (1990), 74.
- [5] 张宏名、王家圣, 农作物遥感监测与估产, 北京农业大学出版社, (1989), 134.

华东六省一市物理学会第六届学术联合年会在江西庐山举行

两年一次的华东六省一市(江苏、浙江、安徽、山东、福建、江西、上海)物理学界的学术交流盛会,于 1991 年 9 月 22 日至 28 日在江西庐山举行。年会收到论文 254 篇,其中 214 篇论文在分组会上作了交流,150 篇论文编入了论文集并正式出版。这次年会征集到的论文,内容十分广泛,涉及到凝聚态物理、力学、声学、热学、电磁学、光学、原子与分子物理、核物理、统计物理、天体物理、理论物理等领域,充分反映了华东地区在物理学的理论和应用研究以及大、中学校的教学研究方面所取得的丰硕成果。

中国物理学会和中国物理学会理事长冯端教授分别给年会发来了贺信,对年会的召开表示热烈的祝贺,对华东各省、市物理学会十几年来坚持不懈地开展地区性的学术交流活动的作法给予了肯定和赞扬。信中还勉励物理学工作者要深入学习、宣传、贯彻“科学技术是第一生产力”的马克思主义的观点和江泽民总书

记在中国科协“四大”开幕式上的重要讲话精神,为增强科技意识,解放科技生产力,提高我国的物理学研究和教学水平,促进学术交流作出新的贡献。

年会邀请了复旦大学蒋平教授、南京大学徐龙道教授、浙江大学张其瑞教授、厦门大学余扬政教授、江西师范大学冯郁教授等分别作了题为《介观物理与量子器件》、《单复连通和多复连通超导体的磁通量子化性质》、《高 T_c 超导研究的进展》、《Gouss-Bonnet 流和拓扑激发》和《光纤孤子通信》五篇专题报告,受到与会者的高度评价。

这次年会学术气氛浓厚,内容丰富,会议开得很成功。与会代表对本次会议承办单位——江西省物理学会为开好年会所做的工作表示满意。会议决定第七届联合学术年会将于 1993 年在福建厦门举行。

(潘传康)