

积雪的若干光谱反射特征

曹梅盛 冯学智 金德洪

(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

本世纪初,融雪径流研究推动了积雪反射特性的测量工作。但直至1947年才开始400—900nm范围内的光谱反射特性测量^[1]。近年来,因资源卫星监测积雪动态研究的需要,1975年Harold等^[2]用户外取雪样在实验室测定了600—2500nm范围内的雪光谱反射曲线。1980年6—7月,我们在新疆乌鲁木齐河上游天山冰川试验站(海拔3820m)测量了不同状态下积雪在380—1180nm范围内的光谱反射曲线,并据此分析积雪的若干反射光谱特征。

测量仪器为SRM-1200型野外光谱辐射计,其波长范围380—1200nm,分辨力10nm。参考板为BaSO₄型,室内标定其反射率及余弦特性。通常在垂直太阳方位角面内,垂直向下施测。比较雪与参考板测量值,经计算得380—1200nm范围内的积雪反射比。施测时除记录测量几何参数外,同时测量雪容量,观测雪晶大小及融化状态,记录雪面温度与天气状况等。据数字打印输出,最末位数字有“1”的偏差及参考板标定可能带来误差。本次测量资料含误差小于0.03,考虑在低能量时仪器暗电流的影响,实际分析范围为380—1180nm。文内数据大部分系三次测量的平均值。

图1为典型雪光谱反射曲线,各类雪光谱反射曲线的形状和趋势基本类同,只是各部分数值大小随积雪状态及测量环境而变。在380—700nm间雪的反射比变化很小,一般不超过0.06。湿雪和水湿雪在380—450nm段略有上升趋势,700nm后开始下降,900nm后明显下降,约在1020—1030nm处形成波谷后上升,1080—1090nm处形成波峰后再次递降,整个曲线形状与倒置的冰吸收系数相似。在可见光谱段实测最大新雪的反射比达0.99,近红外区则下降至0.75左右。

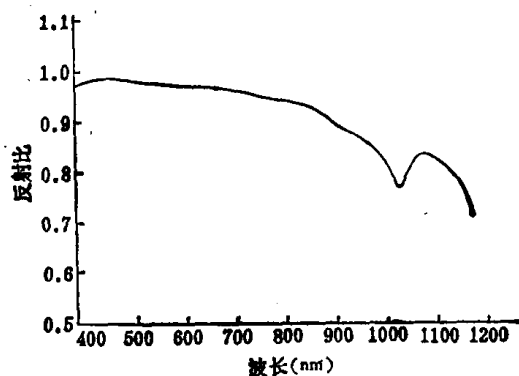


图1 典型雪光谱反射曲线

在一场积雪不同部位处测得的光谱反射曲线变化极小,但随时间的变化却很显著。分析雪的

老化、粒径、融化状态和再冻结作用等对积雪光谱反射曲线影响的结果表明,这些因素都能促使光谱反射比下降,尤以融化作用的影响最甚。这样,一场积雪在380—1180nm范围内的反射比随时间的变化单调下降。

因雪的老化和融化等作用均促使雪不断密实,所以可寻找雪容重与光谱反射比之间的关系,我们据实测资料求光谱反射比及波段平均光谱反射比与雪容重之间的回归方程。前者为避免光谱反射比因偶然波动带来的误差,我们取用两紧邻波长处的平均光谱反射比,后者为

本文1982年1月29日收到。

与美国资源卫星 I, II, III 号 MSS-4, 5, 6, 7 波段配合, 选用 500—600, 600—700, 700—800, 800—1100nm 的平均反射比。先用线性函数及对数函数求回归方程, 再计算相关系数 R , 剩余标准差 S , 拟合优度 g^2 以及回归值与实测值间的最大相对误差 $\Delta\rho_{\max}(\%)$ 。统计所用光谱反射曲线计 22 条。计算结果表明, 线性回归方程 $\rho = B_0 + B_1 r_j$ 较好, ρ 为雪密度, r_j 为光谱反射比, j 为 380……1180nm 波长点, B_0, B_1 为回归常数及系数。整个 380—1180nm 范围内所有波长点的光谱反射比与容重的相关系数 R 均超过 0.83, 其中 1020—1030nm 的特征波谷处 R 达 0.96。波段平均反射比与雪容重相关性最佳者为 800—1100nm 即 MSS-7 波段, 有关统计参数如表 1。

表 1

波长或波段	回归方程	R	S	g^2	$\Delta\rho_{\max}(\%)$
1020—1030nm	$\rho = 0.650 - 0.672r$	0.960	0.028	0.942	43.7
800—1100nm	$\rho = 0.770 - 0.727r$	0.946	0.040	0.895	60.6

我们还试作区分新雪, 细中粒雪和粗粒雪三种不同粒径积雪类型的最佳波段选择, 即同类型积雪各个体间反射光谱特性离散性小, 而不同类型积雪间光谱反射特性离散性大的波段, 以便在遥感监测积雪时供选用空间传感器工作波段时参考。所用方法和步骤以统计检验为基础, 再结合光谱反射能量大小选定最佳波段, 统计检验采用 t 检验, 它是对来自正态分布的样本, 其方差未知时评价两类样本均值差异显著性的统计检验法。两类积雪光谱反射比均值的差异越显著, 它们就越易区分。区分三类积雪需依次分别计算每两类间在不同波长点的统计量 t_j , 这样共得三组 t_j 值, t_j 的计算式如下:

$$t_j = \frac{\bar{X}_{1j} - \bar{X}_{2j}}{S_{x_{1j}-x_{2j}}},$$

式中 $\bar{X}_{1j}, \bar{X}_{2j}$ ——分别为两类积雪 j 处光谱反射比的均值;

$$S_{x_{1j}-x_{2j}} = \sqrt{\frac{S_{1j}^2}{n_1} + \frac{S_{2j}^2}{n_2}} \text{——} j \text{ 处两类积雪间的综合标准差。}$$

其中 S_{1j}^2, S_{2j}^2 ——分别为两类积雪 j 处光谱反射比的方差;

n_1, n_2 ——分别为两类积雪统计所用样本容量;

j ——380, 390, ……1180nm 波长点。

由于 n_1, n_2 不一定相同, 所以分别用 S_{1j}^2, S_{2j}^2 估计每类样本积雪光谱反射比的方差。为获得较精确的 t 检验结果, 自由度计算亦需相应换算^[3]。我们选用 22 条实测光谱反射曲线进行统

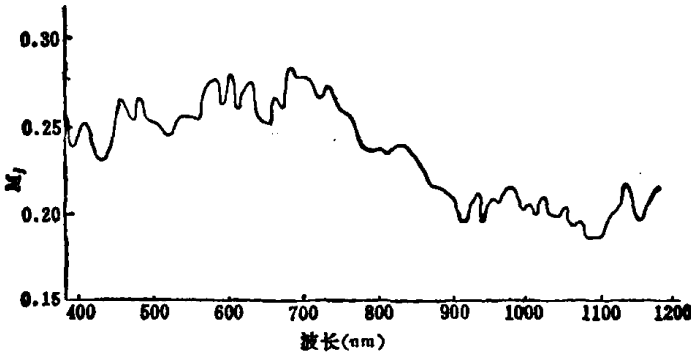


图 2 M_j 随波长分布

计。5条新雪,12条细中粒雪,5条粗粒雪。据自由度值及选用的显著性水平0.1,0.05,0.01,0.001确定每两类积雪光谱反射比均值所达差异显著性程度。同时还计算反映不同波长点处类内离散性与类间离散性的比值 M_j (图2)。

$$M_j = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{k=i+1}^{n_1} (x_{ij} - x_{kj})^2}{n_1(n_1 - 1)}} + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_2} \sum_{k=i+1}^{n_2} (y_{ij} - y_{kj})^2}{n_2(n_2 - 1)}} + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_3} \sum_{k=i+1}^{n_3} (z_{ij} - z_{kj})^2}{n_3(n_3 - 1)}}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{k=1}^{n_1} (x_{ij} - y_{kj})^2}{n_1 n_2}} + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{k=1}^{n_1} (x_{ij} - z_{kj})^2}{n_1 n_3}} + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_2} (y_{ij} - z_{kj})^2}{n_2 n_3}}},$$

式中 j ——380, 390, ……1180nm 波长点;

x, y, z ,——三类积雪的光谱反射比;

n_1, n_2, n_3 ,——三类积雪各自测量的次数。

显然, M_j 越小, j 点处类内离散性小而类间离散性大,利于识别积雪类型。检验表明,整个380—1180nm范围内每两类积雪光谱反射比的均值差异显著性水平均超过0.01级,实际上700nm后均达0.001级。图2上 M_j 的近似中值0.24,系一比较合适的分界线。因此如不仅选用显著性水平高于0.01而且考虑 M_j 小于0.24的波段,则宜选用420—450nm,800—1180nm。考虑传感器信噪比相同时,接受能量越大则探测精度越高。此能量与光源能量谱分布及地物光谱反射特性有关。太阳在可见光外其能量显著下降,且约在820,930,1130nm处有强水汽吸收带^[4],再加其他大气成份的吸收作用,使地面实际光谱照度曲线有一些明显低光谱照度区^[5],雪光谱反射比约在900nm后迅速下降。综合上述因素,我们认为420—450,840—910,950—1110nm宜作按粒径区分积雪类型的最佳波段,相应地宜选MSS-7影像判读积雪类型。

取与MSS-4,5,6,7波段相应的波段平均反射比,点绘各种组合的两维集群图,这些图大都能把新雪,细中粒雪和粗粒雪会聚一起,尽管粗粒雪与细中粒雪会聚略有交叉,其中以4,7波段组合的两维集群图最好(图3),即宜用MSS-4,7波段影像组合去判读积雪类型。实测中我们把细粒雪与中粒雪混成一类,但图中细中粒雪群似分出两个子群。

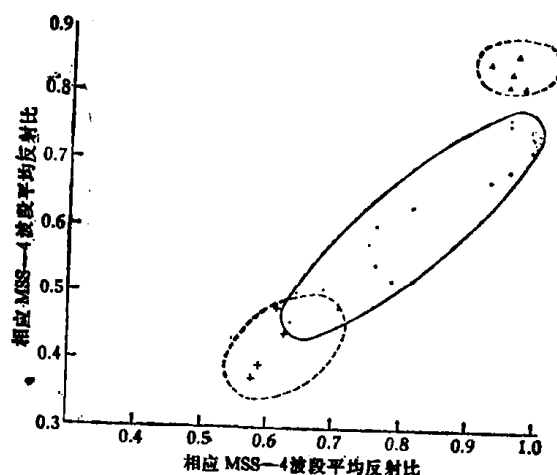


图3 相应MSS-4,7波段平均反射比组合的两维集群图

△——新雪;○——细中粒雪;×——粗粒雪

参 考 文 献

- [1] Кринов И. Л., *Спектральная отражательная способность природных образований*, Изд-во АН СССР, 1947, 259—262.
- [2] Harold, W. O'Brien et al., AD-A007 732, 1975, 5—6.
- [3] 戴昌达,遥感文选,科学出版社,1981,315—323.
- [4] 康德拉捷夫,太阳辐射能,科学出版社,1962,124—126.
- [5] 美国无线电公司编,电光学手册,国防工业出版社,1978,43.