

文章编号:1001-9014(2011)02-0115-05

新疆北疆地区雪水当量遥感定量研究

刘艳, 张璞, 李杨

(中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要:为了探讨光学遥感数据反演雪水当量可行性, 2009和2010年2月对新疆北疆地区雪密度等参数进行了野外观测. 运用连续统去除法对不同积雪光谱吸收特征进行分析得出1028nm、1252nm、1494nm和1940nm附近雪深对光谱吸收深度影响显著, 积雪深度越大, 光谱吸收深度越小. 以500m中分辨率成像光谱仪MODIS影像为光学遥感数据源, 建立包括MODIS通道5和6反射率、高程和雪压的统计样本, 回归拟合建立了雪压遥感算式. 模型评价结果为雪深小于30cm, 均方根误差0.075, 预测值与实测值相关系数0.72.

关键词:光学遥感; 光谱吸收; 雪压; MODIS

中图分类号:TP79 **文献标识码:**A

Quantitative analysis of snow water equivalent in the region of northern Xinjiang

LIU Yan, ZHANG Pu, LI Yang

(Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

Abstract: The purpose of the study was to approach the feasibility of the snow water equivalent retrieved with optical remote sensing data. Field measurement for separate layer snow density and other snow parameters was made in Feb 2009 and 2010. For different snow types, by using continuum removal method, spectral absorption characteristics of snow were analyzed. It comes to the conclusion that snow depth has a significant effect on its spectral absorption at near 1028nm, 1252nm, 1494nm and 1940nm. The deeper the depth, the smaller the absorption depth is. The image of moderate-resolution imaging spectroradiometer with spatial 500m resolution was used as the experimental optical remote sensing data in this study. Based on correlation analysis of the test sample, including reflectance of MODIS channel 5 and 6, elevation and snow pressure, the remote sensing model for the retrieval of snow pressure was built by statistical regression equations. The evaluation results of the model showed that its root mean square error is 0.075 and correlation coefficient between predicted and measured values is 0.72 when snow depth is less than 30cm.

Key words: optical remote sensing; spectral absorption; snow pressure; MODIS

PACS: 90.93.85Pq

引言

积雪参数测定准确、及时对气候学研究至关重要^[1]. 气象站积雪观测记录因空间分布不均难以满足研究需要. 遥感应应用使大范围积雪监测成为现实^[2]. 国内外积雪遥感研究主要为光学遥感雪盖监测^[3-11]和微波遥感雪深和雪水当量提取^[12-15]. 被动微波可全天候不受云层影响获取雪层信息和穿透雪层获取地表信息, 但其空间分辨率较低难以准确地获取积雪空间信息. MODIS等可见光-短波红外遥

感数据能较准确地获取晴空条件下较高空间分辨率的雪盖信息, 但应用其反演雪水当量甚少, 刘志辉等^[16]建立了MODIS雪密度监测统计模型. 以新疆北疆地区为研究区, 分析不同深度积雪光谱特征, 挖掘雪深响应波谱范围, 确定对应MODIS通道, 基于实测雪压建立MODIS雪压算式, 雪压除以水密度(1g/cm³)即可得雪水当量(水层深度, 单位:cm).

1 数据观测和处理

1.1 数据观测

收稿日期:2010-09-07, 修回日期:2010-12-27

Received date: 2010-09-07, revised date: 2010-12-27

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务项目(IDM200808);国家重点基础研究发展计划(2010CB951001)

作者简介:刘艳(1978-),女,河南扶沟人,研究生,主要从事遥感在积雪监测等方面的研究, E-mail: liuyan@idm.cn.

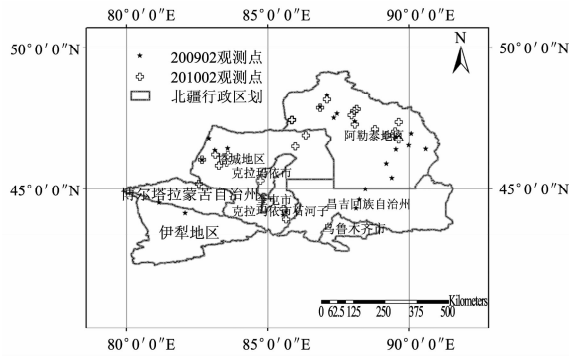


图1 2009年2月和2010年2月北疆实测样点位置示意图

Fig. 1 Geographical locations of measured samples in Feb. 2009 and 2010 in the region of northern Xinjiang

2009年2月12~22日和2010年1月31~2月9日对富蕴等地进行了积雪参数野外观测,见图1.

1.1.1 雪层密度和雪压测量

每个调查点选一个代表性剖面,在剖面上再选取两点使用雪密度分析仪 SnowFork 进行雪层密度测量,以剔除数据异常点.分层规则:雪深 < 20 cm,自雪面向下 2 cm 间隔测量;雪深 > 50 cm,5 cm 间隔测量.研究所用雪压数据是雪层密度和采样间隔乘积的累积量消除了密度分层采样间隔影响.同步在雪层密度采样点临近利用体积量雪器测量雪压.体积量雪器由一内截面积为 100 cm² 的金属筒、小铲、带盖金属容器和量杯组成,是测量雪压常用的一种仪器.取样时将圆筒(锯齿形的一端)向下垂直插入雪中直到地面.然后拨开圆筒一边的雪,把小铲插到圆筒底沿下面连同圆筒一起拿起,再将筒翻转,擦净粘在筒外的雪,把筒挂在秤钩上,移动秤锤,直到秤杆水平为止,读出秤锤准线对应于秤杆上的刻度数,取一位小数.

1.1.2 雪面反射光谱测量

选择粒径、结晶和松散程度相似样区利用全通道光谱仪测量雪面反射光谱,同步测定雪深.每个点位进行 10 次反射光谱测量取其均值作为该点雪面反射率.

1.2 雪压与雪层密度关系分析

应用式(1)对实测雪层密度进行转换,并将其与同步观测雪压拟合,见图2,两者高度线性相关.因此,对实测雪层密度进行式(1)转换,将转换所得雪压用于建模.

$$\text{Snow}_{ps} = h \times \sum_{i=1}^n \rho_i \quad (1)$$

式中, Snow_{ps} 为转换雪压, $h = 5\text{cm}$ 或 2cm , 密度分层

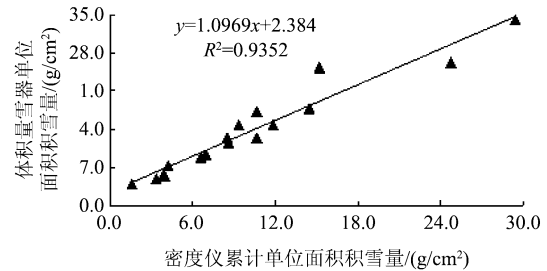


图2 体积量雪器同步实测雪压与雪层密度积分值相关分析

Fig. 2 Correlation analysis between snow pressure measured by Snow gage and integral quantity computed by snow density in each layer

观测间隔, ρ_i 为各层密度, i 为层数.

2 MODIS 近红外雪水当量计算理论依据

地物与光谱仪探头距离很近,约 30cm. 因此,探头接收电磁波与地物实际发射电磁波差异很小,分析不同地类和不同深度积雪实测反射光谱有助于积雪光谱吸收特征的挖掘.

2.1 光谱数据处理

2.1.1 平滑去噪

实测光谱包含系统误差、随机误差和水汽吸收带杂乱跳动三种误差,这些误差会影响光谱吸收特征提取^[17]. 频繁优化光谱仪可最大程度消除系统误差. 因此只需对实测光谱进行 Savitaky-Golay 平滑去噪消除随机误差

2.1.2 连续统去除

连续统是一个逐点直线连接光谱曲线上局部反射极值点的凸壳(Convex Hull),定义在一个特定吸收特征上有局部吸收起点和吸收终点^[18]. 连续统去除法将反射率归一化到 0~1,光谱吸收特征也归一化到一致光谱背景上,这有利于与其他地物光谱曲线进行特征比较从而提取特征通道以供分类识别.

2.2 光谱吸收特征

光谱仪采集光谱曲线因波段间隔非常小(350~1000nm 波段采样间隔为 1.4nm,光谱分辨率为 3nm;1000~2500nm 波段采样间隔为 2nm,光谱分辨率为 10nm)可近似看作是一条连续变化曲线. 从图3~5可以看出(1)可见光范围内(350~766nm)连续统去除后光谱吸收深度不随积雪类型和雪深变化而变化;(2)近红外范围内积雪光谱在 1028nm、1252nm、1494nm 和 1940nm 附近雪越深光谱吸收深度越小,1640nm 附近吸收深度随雪深增加也一定程度减小.

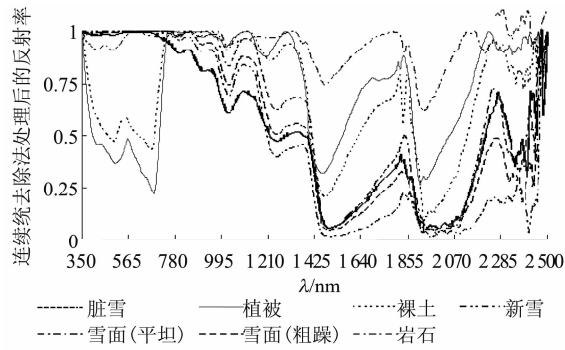


图3 典型地物连续统去除后反射光谱
Fig.3 Reflectance spectrum after continuum removal of typical objects

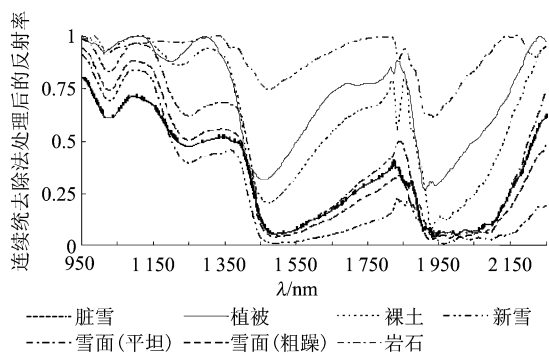


图4 放大的典型地物连续统去除后反射光谱
Fig.4 Enlarged reflectance spectrum after continuum removal of typical objects

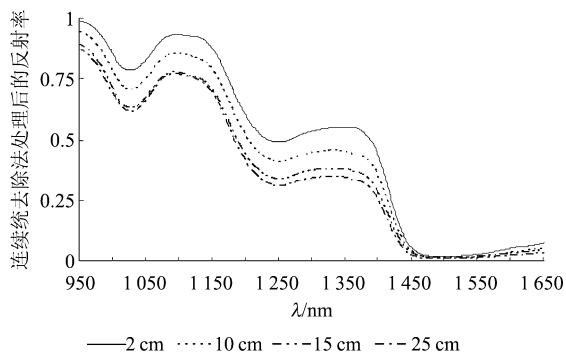


图5 不同雪深连续统去除后反射光谱
Fig.5 Reflectance spectrum after continuum removal of different snow depth

3 MODIS 近红外雪压模型建立

1028nm、1252nm、1640nm 附近雪越深光谱吸收深度越小. 积雪稳定期雪层密度具有随雪深增加而变大的趋势. 因此,1028nm、1252nm、1640nm 附近反射光谱可应用于雪压反演,对应 MODIS 5(1230 ~ 1250nm) 和 6(1628 ~ 1652nm) 通道.

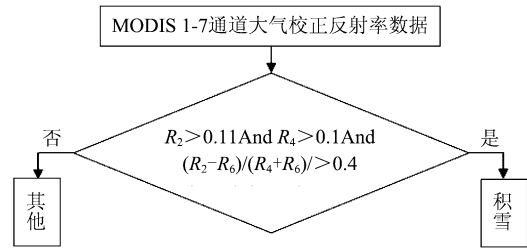


图6 积雪识别决策树的构建
Fig.6 Construction of decision tree for snow identification

3.1 MODIS 1B 数据处理

对 MODIS 1B 数据进行几何校正、辐射校正和大气校正得 1~7 通道地表反射率.

3.2 地表积雪识别

依据决策树(见图 7)获取北疆地区 MODIS 雪盖范围以剔除非积雪区实测样点.

其中 R_2 、 R_4 和 R_6 分别为 MODIS 通道 2、4 和 6 地表反射率.

3.3 样本建立

GPS 记录经纬度与 MODIS 几何校正数据都存在误差. 因此,样点影像匹配时会出现一定偏差. 为减小这种误差,以 2×2 像元窗口对 MODIS、高程数据进行领域分析后提取对应样点 5、6 通道反射率和高程. MODIS 雪盖监测样点匹配影像时均在雪区,最终建立 46 个样本.

3.4 回归方程建立

对 Ref_{m5} 、 Ref_{m6} 、高程和雪压进行回归拟合,进行“拟合程度检验”和“偏回归系数显著性检验”. F 统计量值为 19.4281217,由 $P\{F > F_\alpha\} = \alpha$ 确定的 F_α ($\alpha = 0.05$),其值为 2.8270487. $F > F_\alpha$,故对显著水平 $\alpha = 0.05$,拒绝原假设,认为回归方程具有可接受的拟合程度. 由 $P\{|T| > t_{1-\alpha/2}\} = \alpha$ 确定的 $t_{1-\alpha/2}$ ($\alpha = 0.05$),其值为 2.0180817. $|tStat_{海拔}| = 5.56494 > 2.0243$,故对显著性水平 $\alpha = 0.05$,变量高程是显著. $|tStat_{Ref_{m5}}| = 0.56340 < 2.0243$,故对显著性水平 $\alpha = 0.05$,变量 Ref_{m5} 不显著. $|tStat_{Ref_{m6}}| = -2.64058 > 2.0243$,故对显著性水平 $\alpha = 0.05$,变量 Ref_{m6} 显著. 因此,剔除变量 Ref_{m5} 后对 Ref_{m6} 、高程和雪压重新进行回归分析,得如下回归方程

$$Snow_p = 3.8572 - 26.9577 \times Ref_{m6} + 3.7059 \times Elevation$$

式(2)中, $Snow_p$ 为雪压, Ref_{m6} 为 MODIS 第六通道反射率, $Elevation$ 为高程(km).

3.7 评价结果

采用均方根误差(RMSE)和预测值与实测值相

关系数(R)对模型预测能力进行评价,计算公式如下,

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i - P_i)^2}{n - 1}} \quad (3)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha})(p_i - \bar{p})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2}} \quad (4)$$

式中, α_i 为样点雪压计算值, p_i 为样点雪压实测值, n 为样点数, $\bar{\alpha}$ 、 \bar{p} 分别为样点雪压计算值均值和实测值均值. 应用实测雪压对模型评价:雪深 < 30cm, $RMSE = 0.075$, $R = 0.72$.

4 模型应用

北疆地区冬季云日较多,对 2009 年 2 月和 2010 1、2 月 MODIS 进行最大值合成去云处理,决策树分类法监测雪盖后在雪区运用式(2)制作雪压空间分布图,见图 8. 2010 年 2 月雪压均值($6.875g/cm^2$)比 2009 年同期($6.557g/cm^2$)偏大;塔叉口附近($3.52g/cm^2$)、托里县($4.33g/cm^2$)和石河子达子庙($3.44g/cm^2$)雪压相对较低;冲乎乡($4.27g/cm^2$)相对较高;2010 年 1~2 月雪压随时间演变出现一定程度增加,与实测相符.

5 结论

对全波段光谱仪采集不同类型积雪、植被、岩石反射光谱数据进行了光谱曲线光滑和连续统去除处理,积雪反射光谱吸收特征受雪深影响明显,在近红外波谱范围内具有独特的吸收特性,1028nm、1252nm、1494nm 和 1940nm 附近反射光谱对雪深具有一定指示作用,雪深越大光谱吸收深度越小. 积雪这种独特的光谱吸收特征为 MODIS 雪水当量反演提供了很好的理论基础. 因光学传感器影响 MODIS

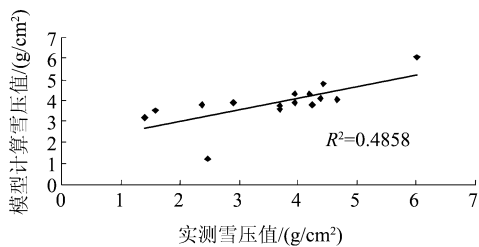
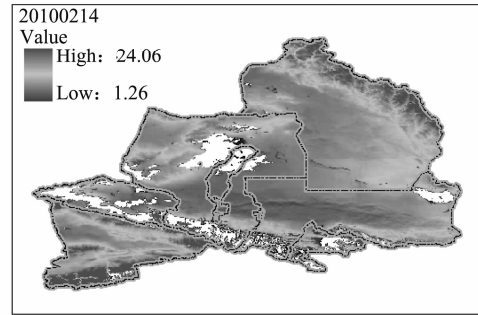
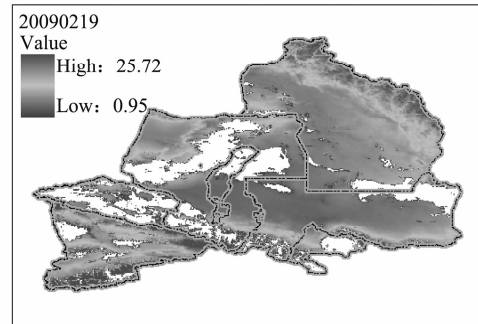


图7 实测值与模拟值散点图
Fig.7 Scatter plot of field-measured data and computed values

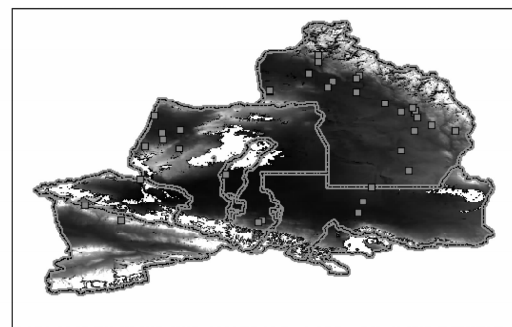


(a)

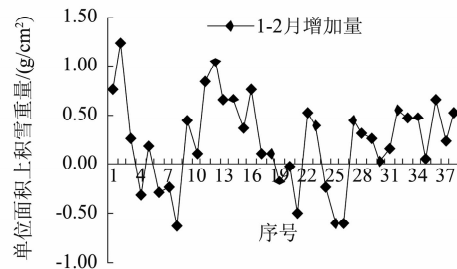


(b)

图8 雪压空间分布图 (a)2010-02-14 (b)2009-02-19
Fig.8 Spatial distribution of snow pressure (a)14 Feb. 2010 (b)9 Feb. 2009



(a)



(b)

图9 (a)雪压比较样点(b)2010年1-2月雪压增加量
Fig.9 (a) Sampling points for comparison of snow pressure (b) increment of snow pressure calculated by the model from Jan. to Feb. in 2010

反演雪水当量,雪深大于 30cm 具有局限性。后续研究中,将综合空间分辨较高的光学遥感数据和穿透雪层获取雪特性的微波遥感数据进行雪水当量遥感定量研究。

REFERENCES

- [1] LI Xiao-Jing, LIU Yu-Jie, ZHU Xiao-Xiang, *et al.* Snow cover identification with SSM/I data in China[J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (李晓静,刘玉洁,朱小祥,等.利用 SSM/I 数据判识我国及周边地区雪盖. *应用气象学报*),2007,**18**(1):12—20.
- [2] ZHANG Jia-Hua, WU Yang, YAO Feng-Mei, *et al.* Analyses of recent Xinjiang snow cover feature utilizing satellite remote sensing and surface observation data[J]. *Plateau Meteorology*(张佳华,吴杨,姚凤梅,等.利用卫星遥感和地面实测积雪资料分析近年新疆积雪特征. *高原气象*),2008,**27**(3):551—556.
- [3] SHI Pei-Jun, CHEN Jin. Study on monitoring of snow disaster in large area supported by GIS and RS[J]. *Acta Geographica Sinica*(史培军,陈晋. RS 与 GIS 支持下的草地雪灾监测试验研究. *地理学报*),1996,**51**(4):296—305.
- [4] WANG Shi-Jie. Exploring the estimation of snowpack volume with NOAA/AVHRR satellite data[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*(王世杰.利用 NOAA/AVHRR 影像资料估算积雪量的方法探讨. *冰川冻土*),1998,**20**(1):68—71.
- [5] ZHOU Yong-Mei, JIA Sheng-Mei, LIU Ping. The method of snowcover parameters estimation using NOAA-AVHRR data[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*(周咏梅,贾生海,刘萍.利用 NOAA-AVHRR 资料估算积雪参量. *气象科学*),2001,**21**(1):117—121.
- [6] YAN Hao. Detecting snow and estimating snowpack parameters from NOAA16-AVHRR data[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*(延昊. NOAA16 卫星积雪识别和参数提取. *冰川冻土*),2004,**26**(3):369—371.
- [7] LIANG Tian-Gang, WU Cai-Xia, CHEN Quan-Gong, *et al.* Snow classification and monitoring models in the pastoral areas of the northern Xinjiang[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*(梁天刚,吴彩霞,陈全功,等.北疆牧区积雪图像分类与雪深反演模型的研究. *冰川冻土*),2004,**26**(2):160—165.
- [8] Kaufman Y J, Kleidman R G, Hall D K, *et al.* Remote sensing of subpixel snow cover using 0.66 and 2.1 μ m channels[J]. *Geophysical Research Letters*,2002,**29**(16-20):28—1.
- [9] WANG Jian, CHEN Zi-Dan, LI Wen-Jun, *et al.* Preliminary analysis of snow reflection characteristics with moderate resolution imaging spectrometer images[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*(王健,陈子丹,李文君,等.中分辨率成像光谱仪图像积雪反射特性的初步分析研究. *冰川冻土*),2000,**22**(2):165—169.
- [10] Hall D, Riggs G, Salomonson V V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectrometer data[J]. *Remote Sensing of Environment*,1995,**54**(2):127—140.
- [11] Chang A T C, Foster J L, Hall D K. Nimbus-7S MMR derived global snow cover parameters[J]. *Annals of Glaciology*,1987,**9**:39—44.
- [12] CHE Tao, LI Xin, GAO Feng. Estimation of snow water equivalent in the Tibetan Plateau using passive microwave remote sensing data (SSM/I)[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*(车涛,李新,高峰.青藏高原雪深和雪水当量的被动微波遥感反演. *冰川冻土*),2004,**26**(3):363—368.
- [13] SUN Zhi-Wen, SHI Jian-Cheng, JIANG Ling-Mei, *et al.* Development of snow depth and snow water equivalent algorithm in Western China using passive microwave remote sensing data[J]. *Advances In Earth Science*(孙之文,施建成,蒋玲梅,等.微波遥感反演中国西部地区雪深、雨水当量算法初步研究. *地球科学进展*),2006,**21**(12):1363—1369.
- [14] LI Xin, CHE Tao. A review on passive microwave remote sensing of snow cover[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*(李新,车涛.积雪被动微波遥感研究进展. *冰川冻土*),2007,**29**(3):487—469.
- [15] HUANG Wei-Jun, HUANG Zhen, CUI Cai-Xia, *et al.* A study on temporal and spatial distribution of snow density in Xinjiang Uigur Autonomous Region[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*(黄慰军,黄镇,崔彩霞,等.新疆雪密度分布研究. *中国农业气象*),2007,**28**(4):383—385.
- [16] LU Zhi, LIU Zhi-Hui, FANG Shi-Feng. Analysis of snow density by using MODIS remote sensing data[J]. *Technology of Soil and Water Conservation*(陆智,刘志辉,房世峰. MODIS 数据的积雪密度遥感监测分析. *水土保持应用技术*),2007,(3):29—530.
- [17] CHEN Wen-Xia, CHEN An-Sheng, CAI Zhi-Hua. Research on hyperspectral absorption feature parameters based classification[J]. *Computer Engineering and Applications*(陈文霞,陈安升,蔡之华.基于高光谱吸收特征参数的分类研究. *计算机工程与应用*),2008,**44**(28):230—233.
- [18] YANG Ke-Ming, GUO Da-Zhi, CHEN Yun-Hao. Analysis of vegetation spectral features based on Hyperspectral imaging data[J]. *Computer Engineering and Applications*(杨可明,郭达志,陈云浩.高光谱植被遥感数据光谱特征分析. *计算机工程与应用*),2006,**42**(31):213—216.