

文章编号: 1000-0240(2009)02-0247-07

Hyperion 高光谱影像的分析与处理

梁 继^{1, 2}, 王 建¹

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: EO-1 Hyperion 是新型地球观测卫星, 也是一颗实验性的高光谱星载卫星. Hyperion 影像具有高光谱分辨率的特点, 同时该传感器在波段的辐射定标参数、影像的坏线和条带、以及光谱的 Smile 效应等处理方面有待改进. 针对黑河上游祁连山区的 Hyperion 影像, 进行了 DN 值分析、DN 值转换辐亮度值、影像条带去除和坏线替换、光谱 Smile 效应校正、以及经 MODTRAN 辐射传输的大气订正等处理, 获得了高光谱分辨率的雪反射率的反演图像, 为研究区积雪面积的提取、雪粒径和雪反照率的反演等后续工作提供了基础图像.

关键词: Hyperion; 最小噪声分形; Smile 效应; MODTRAN

中图分类号: TP753 **文献标识码:** A

0 引言

所谓高光谱, 指的是高光谱分辨率的成像光谱仪, 可有几十至上百个波段, 波段数越多, 越能充分利用地物在不同波段光谱响应特征的差别. 波段取样间隔可达 5~10 nm, 可以显示每个像元的光谱曲线, 以便直接针对地物特征峰值波长微小差异来识别物质^[1]. 随着微电子探测技术、精密光学仪器、计算机技术等的发展, 成像光谱仪应运而生. 高光谱遥感技术的发展为遥感信息定量应用开辟了新的前景, 目前主要的高光谱遥感数据源有 Hyperion、CHRIS 等. 本文主要针对黑河流域上游冰沟地区 2008 年 3 月 17 日的 EO-1 Hyperion 高光谱影像, 做了图像处理和雪反射率的反演工作. 本研究采用的是 2008 年 3 月 17 日 11:47:50 过境的 L1 产品, 幅宽 7.7 km, 长 42 km, 太阳天顶角 45.50°, 太阳方位角 143.85°, Julian 日的日地距离比值为 0.9904.

1 Hyperion 的简单介绍

EO-1(Earth Observing-1)是美国 NASA 面向

21 世纪为接替 Landsat 7 而研制的新型地球观测卫星, 于 2000 年 11 月 21 日发射升空. EO-1 卫星轨道与 Landsat 7 基本相同(图 1, 2), 为太阳同步轨道, 轨道高度为 705 km, 倾角 98.7°, 比 Landsat 7 差 1 min 过赤道. EO-1 上搭载了 3 种传感器, 即: 高级陆地成像仪 ALI (Advanced Land Imager)、大气校正仪 AC (Atmospheric Corrector)和高光谱成像光谱仪 Hyperion. Hyperion 传感器是第一台星载高光谱图谱测量仪, 该高光谱数据共有 242 个波段, 光谱范围为 400~2 500 nm, 光谱分辨率达到 10 nm, 地面分辨率为 30 m^[2-6]. Hyperion 具体的特征如表 1 介绍.

表 1 Hyperion 具体的特征介绍[2]
Table 1 Characteristics of the Hyperion Image^[2]

项目	参数	项目	参数
波长范围	356~2577 nm	VNIR	1~70
波 段	242	SWIR	71~242
像元大小	30 m	像元格式	BIL
影像大小	256×6460	字节顺序	Network(IEEE)
数据格式	16bit 符号整型	文件大小	800 M

收稿日期: 2009-01-01; 修订日期: 2009-03-09
基金项目: 中国科学院西部行动计划(二期)项目“黑河流域遥感-地面观测同步试验与综合模拟平台建设”子课题“黑河流域上游寒区水文遥感-地面同步观测试验”(KZCX2-XB2-09-01); 国家自然科学基金项目(40671040); 欧盟第七框架项目 CEOP-AEGIS (FP7-ENV-2007-1 Grant nr. 212921)资助
作者简介: 梁继(1976—), 女, 湖南岳阳人, 2004 年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获硕士学位, 现为博士研究生, 主要从事定量遥感研究. E-mail: leung@lzb.ac.cn

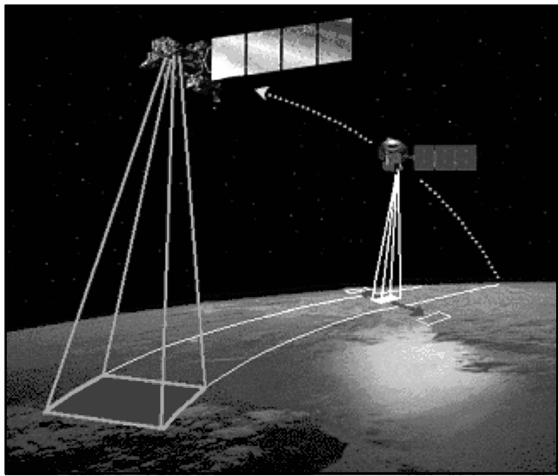


图 1 EO-1 卫星与 Landsat7 卫星飞行轨道图

Fig. 1 Flight orbit of the EO-1 and Landsat 7

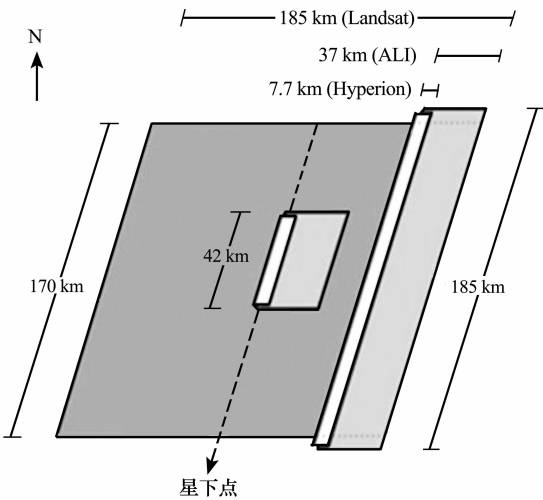


图 2 EO-1 卫星与 Landsat7 卫星轨迹平面图

Fig. 2 Orbit plane of the EO-1 and Landsat 7

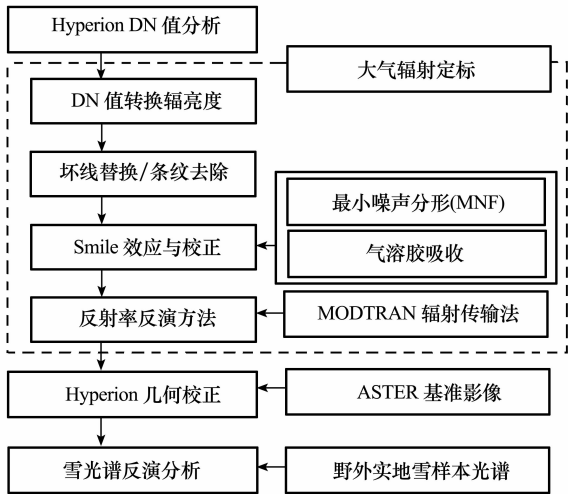


图 3 Hyperion 影像处理流程

Fig. 3 Flowchart of the Hyperion image processing

L1 产品有 242 个波段, 1~70 (356~1 058 nm) 为可见光—近红外波段(VNIR), 71~242 (852~2 577 nm) 为短波红外波段(SWIR). 其中, 198 个波段经过辐射定标处理, 定标的波段分别为 VNIR 8~57, SWIR 77~224. 由于 VNIR 56~57 与 SWIR 77~78 的重叠, 实际上只有 196 个独立的波段. 没有定标的波段置为 0 值^[2]. 根据 Hyperion 影像推扫式成像方式和高光谱的特性, 结合野外与卫星过境同步采集的地物光谱数据, 设计 Hyperion 影像的处理流程如图 3.

2 Hyperion 影像处理

2.1 DN 值分析与转换

Hyperion 影像的数据存储格式为 16bit 符号整型, DN 值范围有别于常见的 Landsat 等传感器. 图 4 是研究区范围 DN 值的统计图, 该图在 SWIR 部分有负的 DN 值存在.

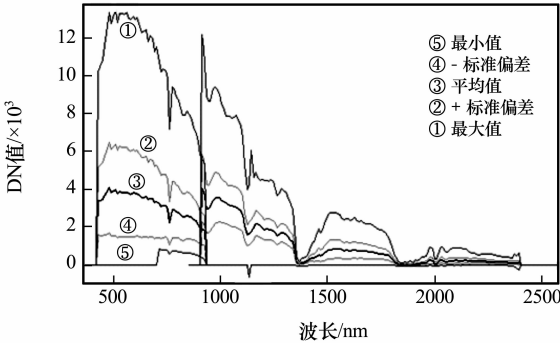


图 4 Hyperion 242 波段的 DN 统计

Fig. 4 DN changing with wavelength of the 242 bands

由两部分光谱仪获取数据, 其中可见光—近红外(VNIR)波长范围 400~1 000 nm, 其辐射定标比值为 $40 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \text{sr} \mu\text{m})^{-1}$; 短波红外(SWIR)波长范围 900~2 500 nm, 辐射定标值为 $80 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \text{sr} \mu\text{m})^{-1}$, 即: $\text{VNIR Radiance} = \text{DN}/40$,

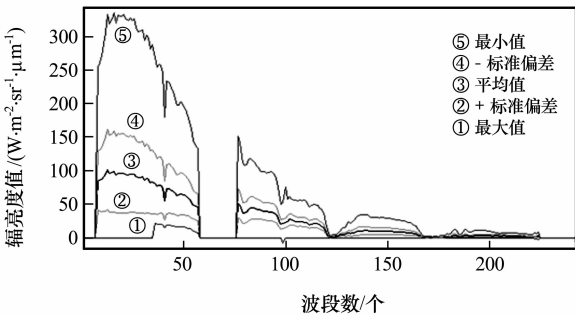


图 5 Hyperion 242 波段的 Radiance 统计

Fig. 5 Radiance changing with the 242 bands

SWIR Radiance = DN/80^[2]. 经 DN 值转换的 Hyperion Radiance 值统计如图 5 所示.

2.2 波段选择

Hyperion 影像上非正常像元大致分为 5 类^[3]: 1)像元值为零的波段,称未定标波段; 2)一行或一列像元 DN 值为零或非常小的,称为坏线; 3)像元 DN 值较小但不为零的、与周围有明显差异的带状现象,称条纹; 4)由于光谱定标而产生的光谱差异,称为“Smile”效应; 5)水汽影响严重,噪声大的波段,称水汽影响波段.

Hyperion 影像的 242 波段中^[2, 5-6], 辐射定标的波段为 VNIR 8~57, SWIR 77~224, 没有定标的波段 DN 值全部为 0 值,它们是波段 1~7、58~76、225~242. 与 VNIR 波段相比, SWIR 波段噪声大、信噪比(SNR)小,与 VNIR 重叠的波段 77~78 应剔除. 此时, Hyperion 实际保留 196 个独立的波段.

高光谱遥感数据中, 光谱范围 1 356~1 447 nm、1 800~1 982 nm 和>2 375 nm 的波段受水汽等气溶胶影响大^[7], 在这些波段中, 包含地面信息较少, SNR 小. 因此, 也需将它们剔除. 对 Hyperion 数据, 受水汽影响的波段为: 121~130、165~184 和 222~224, 共 33 个波段. 剔除受水汽影响的波段后, 剩下 163 个波段, 即: 8~57 (426~925 nm)、79~120(932~1 346 nm)、131~164(1 457~1 790 nm)、185~221(2 002~2 365 nm)^[8].

2.3 坏线替换、条纹去除

推扫式扫描(Push-Broom Scanning)系统, 又称“像面”(Along-Track)扫描系统^[1]. 用广角光学系统在整个视场内成像,它所记录的多(高)光谱图像数据是沿着飞行方向的条幅. 也就是说,它通过飞行器与探测器成正交方向的移动获得目标的二维信息^[1]. 若探测器按线性阵列排列,则可以同时获得整行数据,若面阵式排列,则同时获得整幅图像. 一般线性阵列由许多 CCD 电荷耦合器件组成, CCD 为一种固态光电转换元件^[1], 每个探测器元件感应相应“扫描”行上唯一的地面分辨单元的能量. 图像上每行数据是由沿线性阵列的每个探测器元件采样得到的,探测器的大小决定了每个地面分辨单元的大小^[1], 每个光谱波段或通道均有自己的线性阵列. 一般阵列位于遥感器的焦平面上,以确保所有阵列同时观测所有的“扫描”线^[1]. 推扫式扫描系统也有它固有的问题,如大量探测器之间灵敏度的差异,往往会产生带状噪声,需要进行校

准^[1].

由于传感器的辐射标定还需进一步改善,在 Hyperion 的 L1 级产品中,仍然存在不正常的条带数据. 通常将无数据或数据值异常的行或列称为坏线^[8],而条纹是由于传感器的固有系统噪声造成的规律性条带. 对原 242 个波段的 Hyperion 图像进行逐波段检查,记录有坏线和条带的波段和对应的列号,检查结果如表 2. 本文坏线修复采用其相邻两列的平均值替换,坏线修复前后的图像比较以第 99 波段为例见图 6.

表 2 原 242 波段坏线检查记录

Table 2 Record of bad lines in the 242 wave bands

波段号	坏线、条带(影像的列号)
94	165
99	166、172
100	172
116	120
119	18
120	18、112、138、140、147、169、217
121—130	H ₂ O 吸收带, 信噪比 SNR 小
165—184	1356~1447, 1810~1931nm
190	145、155
200	250
203	143
222—224	信噪比 SNR 小

2.4 Smile 检测

由于 Hyperion 传感器推扫式扫描系统, CCD 阵列获取数据除了产生带状噪声,还有个主要问题是光谱的 Smile 效应(smile effect). Smile 效应,又叫皱眉曲线(frown curve),它是推扫式扫描传感器中典型的光谱扭曲失真问题,是指光谱在波长上的偏移^[5-6, 8]. 光谱 Smile 效应改变像元上的光谱从而减少地物的分类精度. 根据 Hyperion 发射前的辐射量定标,在可见光—近红外(VNIR)波段的光谱偏移量可达 2.6~3.6 nm,而短波红外(SWIR)波段的光谱偏移量一般<1 nm. 由于每个波段的 Smile 效应并不明显,对 Smile 效应的指示方法常见有 3 种:

第 1 种, Green 等^[3, 8]认为, Smile 效应可以利用影像的最小噪声分形(MNF: Minimum Noise Fraction)空间的第一波段特征值图像来指示判别. 当影像的光谱遭受 Smile 效应影响时,第一波段特

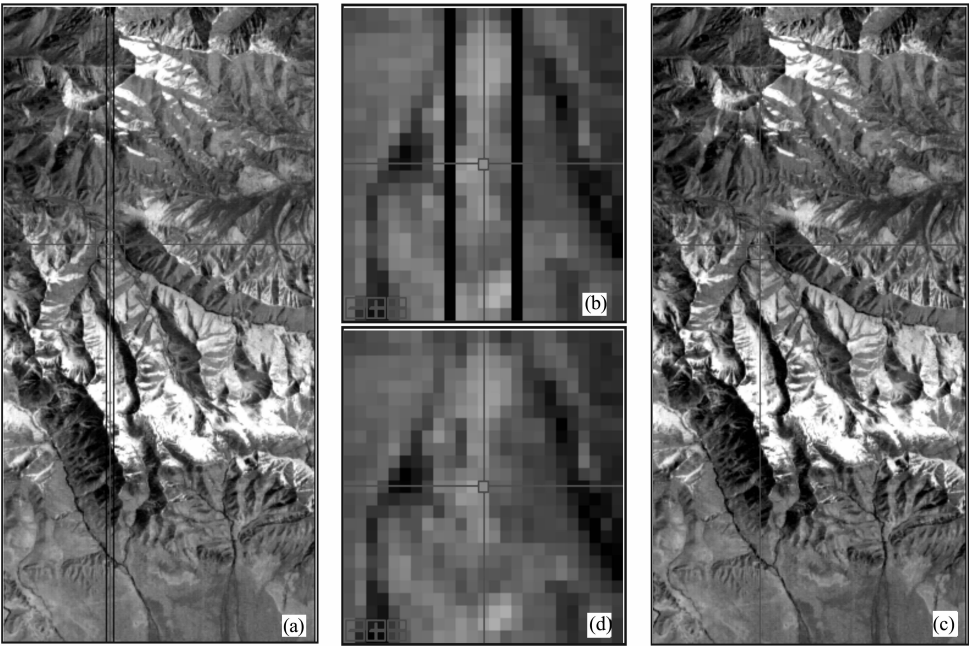


图 6 Hyperion 影像坏线条带去除前后对比
a、b. 为坏线条带去除前；c、d 为坏线条带去除后

Fig. 6 Comparison of Hyperion images before (a and b) and after
(c and d) replacing bad lines

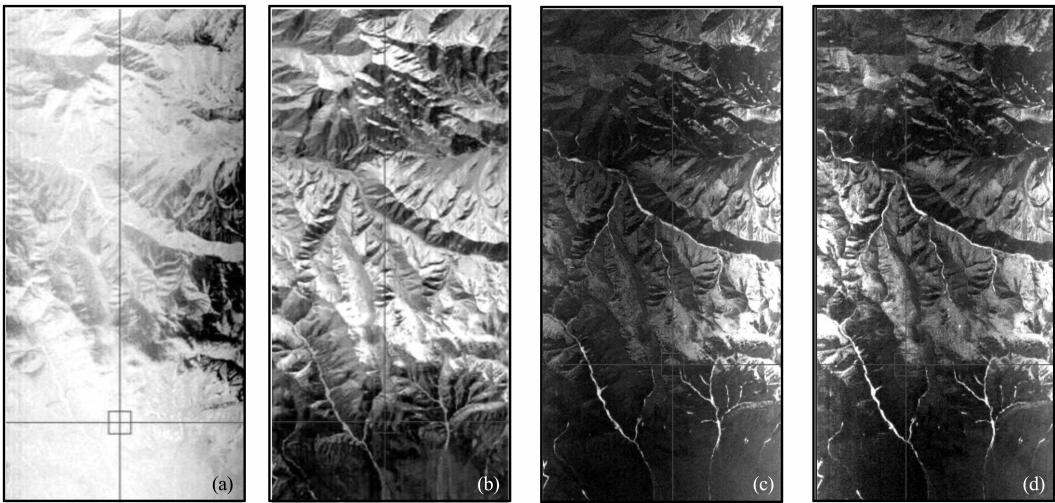


图 7 Hyperion Smile 效应指示与校正图

a、b 为 VNIR、SWIR MNF Smile 效应判别图；c 为氧 A 带差值判别图；d 为 Smile 校正后的氧 A 带差值图

Fig. 7 Discriminating maps (a,b,c) and corrected map (d) of Smile effect

征值图像会表现出显著的亮度梯度。本文对保留的 163 波段分别对 VNIR 和 SWIR 波段做 MNF 变换的空间旋转，分别根据其 MNF 空间中的第一特征向量图的亮度梯度来判别 Smile 效应的影响(见图 7

中的 a 和 b)。从图 7(a)和图 7(b)上可以看出，Smile 效应在 VNIR 波段上有个明显的亮度梯度，而在 SWIR 波段因亮度梯度不明显几乎可以忽略。

第 2 种，Jupp 等^[3,8]认为，由于氧 A 带在波段

762 nm 处有强的吸收(图 8), 762 nm 左右附近两波段的差值图像可指示 Smile 效应. 当影像 762 nm 左右附近两波段差值图像表现出显著的亮度梯度时, 指示该影像遭受 Smile 效应影响显著, 影像像元光谱扭曲失真. 图 7(c)为 Smile 效应在 762 nm 氧 A 带左右附近差值指示图.

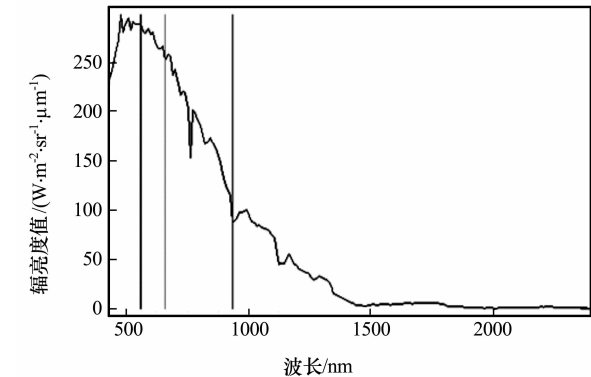


图 8 波段 762 nm 处氧 A 带的强吸收
Fig. 8 Radiance changing with wavelength,
showing a sharp absorption of Oxygen-A
feature at 762 nm

第 3 种, 红边效应指示法^[3, 8]. 植被光谱的“红边”, 即红光波段的叶绿素吸收谷与近红外波段的高反射肩之间的陡升部分, 约 670~780 nm 附近, 是植被的敏感特征光谱段. 它的移动反映了叶绿素含量、物候期、健康状况及类别等多种信息. 一般高浓度的植被叶绿素会导致其光谱红边向红移动(向长波方向偏移), 而低浓度的叶绿素导致红边向蓝移动(向短波方向偏移)^[1]. 但由于红边受影像大气吸收(如 762 nm 氧 A 带的强吸收)和大气校正的影响, 利用红边效应来指示光谱的 Smile 效应有潜在的弱点.

由于 Hyperion 影像的波段普遍存在 Smile 效应, Smile 校正也成为 Hyperion 影像的图像处理中必不可少的步骤. Goodenough^[8]提出了 3 种 Smile 效应纠正方法, 即: 1) 线性拟合内插(Moving Linear Fitting and Interpolation); 2) 辐亮度空间平均值调节方法(Mean Adjusted in Radiance Space); 3) MNF 空间列均值调节方法(Column Mean Adjusted in MNF Space). 本文采用第 3 类方法. 图 9 是 Hyperion 影像 163 个波段经 MNF 变换后的特征值图, 取其前 15 个特征值波段为信号波段, 之后的为冗余的噪声波段. 经 MNF 逆变换校正过的 163 个波段, 在去除影像噪声、去除大气影响的同

时, Smile 效应也得到有效校正. 图 7(d)是 762 nm 左右附近波长差值图, 该图与图 7(c)相比, 图上没有明显的亮度梯度, 说明经 MNF 变换后的 Hyperion 影像的 Smile 效应有很好的改善.

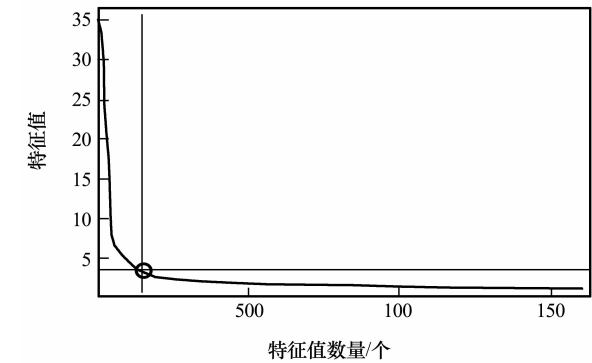


图 9 MNF 变换的特征值
Fig. 9 Eigenvalues of Hyperion image
after MNF transformation

3 Hyperion 影像几何校正

遥感影像的几何校正是遥感图像处理的重要部分. 几何校正过程不仅消除影像中的几何形变, 也赋予影像地图坐标系. 本文中 Hyperion 主要是利用 15 m 分辨率的 ASTER 影像作基准影像做几何校正, 地图坐标参数分别是 Gauss-Krüger 投影, 中央经线 99° E, 东偏 500 000 m.

4 Hyperion 影像反射率反演

遥感影像的大气订正主要包括两方面的内容: 大气参数的估计和地表反射率的反演. 本文利用 MODTRAN 辐射传输模型对黑河上游 Hyperion 影像进行大气订正. 考虑黑河上游积雪山区地表散射辐射的各向异性, 在辐射计算中假设地表为二向反射分布函数 BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function)模型. BRDF 描述了反射率与观测角和太阳天顶角的关系. 根据野外雪场同步实测的雪反射率和雪反照率, 在 BRDF 选项中选择 Walthall 经验型 BRDF 模式. 大气散射相函数选择 MIE 函数和离散纵坐标 DISORT (Discrete Ordinate Method)法的 4 流近似方法来计算多次散射. 同时, Hyperion 针对自己高光谱特性的外层大气太阳辐照度文件^[9]需要从 NASA 网站上下载. 经辐射传输模型大气订正后, 反演的雪反射率结果如图 10 所示.

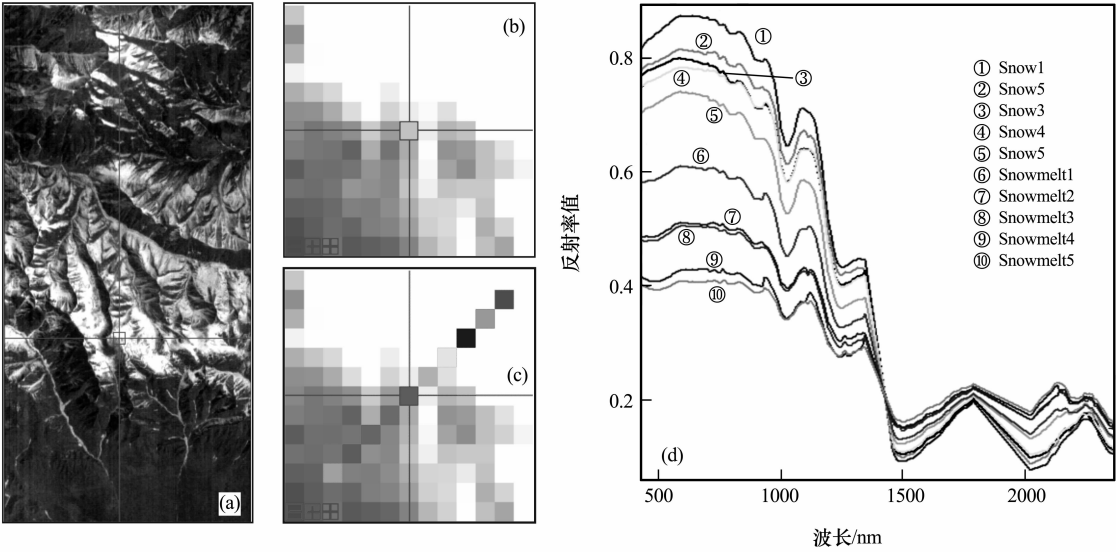


图 10 Hyperion 影像雪反射率反演结果
Fig. 10 The retrieval snow reflectance from Hyperion image

5 结论

EO-1 Hyperion 是为接替 Landsat 7 而研制的新型地球观测卫星，也是一颗实验性的高光谱星载卫星。因此，Hyperion 影像在波段的辐射定标参数、影像的条带和坏线、以及光谱的 Smile 效应等方面还有待改进，这些问题也成为 Hyperion 影像在图像处理过程中的重点。尽管 Hyperion 影像由于传感器固有原因导致图像处理的复杂性，但 Hyperion 的高光谱特性使其应用前景越来越广泛。本文针对 Hyperion 影像进行了 DN 值分析、DN 值转换 Radiance 值、影像条带去除、坏线替换、光谱的 Smile 效应校正、以及经 MODTRAN 辐射传输的大气订正，获得了雪反射率反演图像，为雪盖面积的提取、雪粒径和雪反照率的反演等后续工作提供了基础图像。

参考文献 (References):

[1] Zhao Yingshi. Principles and Methods of Remote Sensing Application and Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2003:1—478. [赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003:1—478.]
[2] Beck R. EO-1 User Guide Version 2.3[R/OL]. July 15,

2003. <http://eo1.usgs.gov>.
[3] Tan Binxiang., Li Zengyuan, Chen Erxue, *et al.* EO-1 Hyperion hyperspectral data pre-processing[J]. Remote Sensing Information, 2005(6):36—41. [谭炳香, 李增元, 陈尔学, 等. EO-1 Hyperion 高光谱数据的预处理[J]. 遥感信息, 2005(6): 36—41.]
[4] Zhao Xiang, Liang Shunlin, Liu Suhong, *et al.* Hyperspectral remote sensing data to correct the goal of dark atmospheric correction method[J]. Science in China(Series D), 2007, **37** (12):1653—1659. [赵祥, 梁顺林, 刘素红, 等. 高光谱遥感数据的改正暗目标大气校正方法研究[J]. 中国科学(D 辑): 地球科学, 2007, **37**(12): 1653—1659.]
[5] Kruse FA, Boardman JW, Huntington JF, *et al.* Comparison of airborne hyperspectral data and EO-1 Hyperion for mineral mapping [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (TGARS), 2003, **41**(6):1388—1400.
[6] Kruse FA. Improved multispectral mapping by spectral modeling with hyperspectral signatures [C]// Proceedings, SPIE Symposium on Defense & Security, 9—13 April 2007, Orlando, FL, SPIE, V. 6565, 2007.
[7] Liou KN. An Introduction to Atmospheric Radiation (Second Edition) [M]. New York: Academic Press, 2002.
[8] Goodenough DG, Dyk A, Niemann KO, *et al.* Processing Hyperion and ALI for forest classification[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (TGARS), 2003, **41**(6): 1321—1331.
[9] USGS. Hyperion solar exoatmospheric spectral irradiance [E/OL]. http://eo1.usgs.gov/documents/hyp_irradiance.txt

Hyperion Hyperspectral Image: Analysis and Process

LIANG Ji^{1, 2}, WANG Jian¹

(1. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China*; 2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: EO-1 Hyperion is a new earth observation satellite developed to relay Landsat 7, and it is also an experimental hyperspectral satellite. Hyperion image has hyperspectral resolution characteristics. That is to say, it has 242 bands. And the average of the FWHM (Full Width at Half Maximum) wavelength is up to 10 nm. And hundreds of effective bands can fully show the spectrum curve for each pixel, then one can discriminate among the surface features according to the spectral difference, owing to surface features has different spectral response characteristics in different bands. The methods and technologies of image processing have yet to be improved on account of the effect from Hyperion sensor carried out the push-broom scanning systems, which including radiation calibration, bad lines, strips, and spectral smile effect, and so on. In this article, the Hyperion image processing and snow reflectivity inversion is

applied at the upper regions of the Heihe River Basin (Binggou watershed) on March 17, 2008. From the Hyperion hyper-spectral imaging, the followings can be done: 1) analyzing DN value on the all bands, 2) conversing DN value into radiance value on the TOA (Top of the Atmosphere) based on the radiometric calibration parameters, 3) choosing the effective bands which have been affected little by atmospheric absorption such as H₂O, CO₂ and aerosol on the atmospheric condition, 4) removing the strip and replacing the bad lines, 5) correcting spectrum smile effect which is the property of hyper-spectral image, and 6) making atmospheric correction using radiative transfer model of Modtran. The retrieval snow reflectance image might become the base image for the further work, such as extracting the area of snow cover, snow grain size, snow surface albedo.

Key words: Hyperion; minimum noise fraction; smile effect; MODTRAN