

基于实测光谱分析的 HJ-1B 数据浅层雪深反演

董廷旭^{1,2}, 蒋洪波^{1*}, 陈超¹, 秦其明¹

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

2. 绵阳师范学院资源环境工程学院, 四川 绵阳 621000

摘要 积雪的重要性是不言而喻的同时积雪所带来的危害也受到越来越多的重视。目前, 积雪深度遥感监测研究主要集中在微波遥感, 少量的利用光学遥感进行的积雪深度研究也主要是利用气象卫星数据以及 MODIS 数据等。我国自主发射的环境与灾害监测小卫星无论是在光谱分辨率还是在空间分辨率上, 都与气象卫星数据以及 MODIS 数据有较大区别, 对利用 HJ-1B 卫星数据进行积雪深度反演的研究较少。该文主要利用 HJ-1B 卫星数据, 研究常规降雪深度状况下的积雪深度遥感监测方法。利用野外不同下垫面及深度状况的积雪光谱, 在积雪覆盖信息提取的基础上, 通过分析积雪覆盖指数以及 HJ-1B 卫星不同波段(绿光波段、近红外波段、短波红外波段)反射率与积雪深度的相关关系, 建立了适用于 HJ-1B 星的积雪深度反演模型。模型验证结果表明, 该模型能够满足较浅降雪深度状况下的遥感实时监测要求。

关键词 遥感卫星; HJ-1B; 积雪; 深度反演

中图分类号: P237 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)10-2784-05

引言

积雪作为全球水平衡的一个重要因素, 影响着全球能量平衡以及全球水循环系统, 在淡水资源相对匮乏的今天, 季节性积雪、融雪是干旱、半干旱地区重要的淡水资源^[1-4]。比如在中国的新疆地区, 其农牧业生产与季节性积雪有着十分密切的关系, 该地区的土壤含水量以及春耕灌溉等也都高度依赖于积雪融水^[5]。另一方面, 受极端天气的影响, 过量的降雪也造成了难以估量的雪灾, 对人们的日常生活以及经济、社会产生严重影响。2010年12月开始, 欧洲多国持续遭受强降雪和低温天气困扰, 大雪造成了航路、公路严重受阻, 给居民出行带来诸多不便。2010年初初在新疆塔城、阿勒泰地区雪灾, 造成我国新疆维吾尔自治区上百万人受灾。传统的基于气象站点观测资料的积雪监测, 由于监测站点稀少, 分布不均匀等缺点, 从而很难真实地反映区域性积雪的诸多物理参量状况。

遥感卫星资料是分析研究大范围积雪的有效手段。遥感技术应用于积雪监测以来, 对积雪覆盖监测的研究较多, 但是针对积雪深度信息的遥感监测却相对较少, 而且主要集中在利用微波遥感数据监测积雪深度及其变化^[6-8]。少量的利

用光学遥感数据进行的积雪深度研究也主要是利用气象卫星数据以及 MODIS 数据等^[9-13]。我国自主发射的环境与灾害监测小卫星(HJ)无论是在光谱分辨率还是在空间分辨率上, 都与气象卫星数据以及 MODIS 数据有较大区别。基于此, 本工作要针对 HJ-1B 卫星数据, 以中国新疆地区为研究主要区, 利用野外不同下垫面及深度状况的积雪光谱, 在利用归一化差分积雪指数(NDSI)识别积雪覆盖以及积雪信息提取的基础上, 通过分析 NDSI 以及 HJ-1B 卫星不同波段反射率与积雪深度的相关关系, 研究适用于中国环境与灾害监测小卫星 B 星 CCD 遥感数据的积雪深度反演方法, 并建立了适用于 HJ-1B 星的积雪深度反演模型。模型验证结果表明, 该模型能够满足小于 10 cm 的常规降雪深度监测要求。

1 遥感卫星与实测数据介绍

1.1 HJ-1B 卫星数据介绍与选取

中国“环境与灾害监测小卫星”A 和 B(HJ-1A 和 HJ-1B) 星于 2008 年 9 月 6 日在太原卫星发射中心发射升空。HJ-1B 为近中午太阳同步轨道, 轨道高度约 650 km, 携带两台宽覆盖多光谱相机(wide cover multispectral camera CCD)和一台红外扫描仪(infrared sensor, IS), 重访周期约 96 h。CCD 相

收稿日期: 2011-04-11, 修订日期: 2011-06-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2008AA121806)和国家自然科学基金项目(40771148)资助

作者简介: 董廷旭, 1965 年生, 北京大学访问学者(2010—2011) e-mail: dong3s@163.com

* 通讯联系人 e-mail: jhb810912@163.com

机幅宽 360 km，两台组合幅宽大于 700 km，波谱范围为 0.43~0.9 μm，分为四个波段，星下点分辨率 30 m(表 1)；红外扫描仪幅宽 720 km，光谱范围 0.75~12.5 μm，也分为四个波段，前三个波段(近红外、短波红外、中红外)星下点分辨率为 150 m，第四波段(热红外波段)星下点分辨率为 300 m(表 2)。HJ-1B 卫星的高空间、时间、高光谱分辨率、宽观测幅宽等特性，能为自然灾害、生态破坏、环境污染进行大范围、全天候、全天时的动态监测提供有力支持，对灾害和生态环境的发展变化趋势进行预测和科学评估。本研究主要选取了 2008 年 10 月 16 日 HJ-1B 星的 CCD 相机第 2 波段(绿光波段)、第 4 波段(近红外波段)数据以及红外相机第 2 波段(短波红外波段)数据。

Table 1 HJ-1B (CCD) band number (#), bandwidth in μm, spatial resolution in m

HJ-1B (CCD) band #	bandwidth	spatial resolution
1	0.43~0.52	30
2	0.52~0.60	30
3	0.63~0.69	30
4	0.76~0.90	30

Table 2 HJ-1B (IS) band number (#), bandwidth in μm, spatial resolution in m

HJ-1B (IS) band #	bandwidth	spatial resolution
1	0.75~1.10	150
2	1.55~1.75	150
3	3.50~3.90	150
4	10.5~12.5	300

1.2 野外实测光谱数据

受大气、地形、混合像元等因素的影响，卫星传感器接收到的电磁波信息与地物实际反射的电磁波信息间存在差异，实测积雪反射光谱更能真实反映积雪反射光谱特征。因此，本工作实测数据包括积雪反射光谱值以及地面雪深观测记录。积雪反射光谱测量采用全波段野外光谱仪完成，在每个点位进行 10 次反射光谱测量，其中 2 次为对光谱仪参考板的测量，8 次为积雪光谱测量，最后取 8 次测量平均值作为该点的光谱反射值。量测时间为 2008 年 11 月 22 日 12:00~14:00(太阳方位角较小时)进行，并同步测定雪深。所测量的光谱包括：下垫面为裸土时积雪深度约 10, 5, 4, 3 cm 以及小于 3 cm 的积雪反射光谱曲线；下垫面为水泥路面时积雪深度约为 5 cm 以及小于 3 cm 的反射光谱曲线。所有的积雪光谱都为积雪全覆盖状况下测量所得。不同深度的积

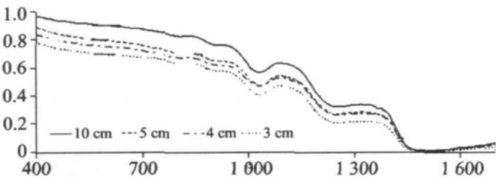


Fig 1 Spectral reflectance curves of different snow depths

雪光谱曲线如图 1 所示。从图 1 可以看出，从可见光到中红外波段(0.4~1.4 μm)随着积雪深度的降低，其反射率也明显随之降低；在短波红外波段，不同积雪深度的反射率差别并不是很大。

2 积雪覆盖信息提取

所采用的遥感影像数据经过大气纠正、几何纠正以及太阳天顶角订正处理后，运用归一化差分雪盖指数(NDSI)对积雪进行提取。NDSI 是利用积雪在可见光、近红外波段，为强反射体，而在短红外波段为强吸收体的特点，将像元辨别为积雪或非积雪^[14]

$$NDSI = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \tag{1}$$

式中，对于 HJ-1B 数据来说，ρ₁ 和 ρ₂ 分别对应 CCD 相机第二波段和红外相机第二波段反射率(表 1)。而对于 MODIS 数据来说，ρ₁ 和 ρ₂ 则分别对应第四波段和第六波段反射率。

针对式(1)，为排除水体的干扰，红光波段的反射率值大于 0.11。同时，像元 NDSI 阈值为 0.4^[9]。也就是说，如果某像元 NDSI 值大于 0.4，且红光通道像元值反射率大于 0.11，则认为该像元为积雪覆盖像元^[14]。

在本研究中，有云区域被预先剔除在雪盖处理过程之前，所有影像都采用 UTM 投影到 WGS84 坐标系统，并在辐射校正和几何纠正的基础上对同一天的 HJ-1B CCD 影像以及短波红外影像进行了严格配准，其配准精度在一个像元内。因为不同影像上相同的 DN 值有可能反映不同的地物反射率，并且 HJ-1B 的红外扫描仪的量化等级为 10 字节，而 CCD 相机的量化等级为 8 字节，所以所有影像的像元值都由 DN 值转换为大气表观辐射率，所用公式如下^[14]

$$\rho = (\pi L_{\lambda} d^2) / (ESUN_{\lambda} \cos \theta_s) \tag{2}$$

其中：ρ 为大气表观辐射率；L_λ 为传感器入瞳处的光谱辐射强度；d 为日地平均距离；ESUN_λ 为大气顶层太阳辐照度；θ_s 为太阳天顶角。

在此基础上，利用式(1)作像元计算 NDSI 值，以提取积雪像元。积雪覆盖信息提取结果如图 2 所示。

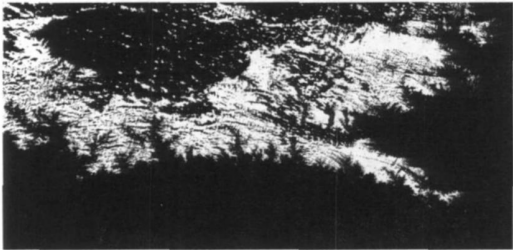


Fig 2 The results of snow cover

3 积雪深度反演

在积雪覆盖识别的基础上，利用实测光谱数据分别与 HJ-1B 卫星遥感数据 CCD 传感器绿光波段、近红外波段、红外传感器的短波红外波段的反射值以及 NDSI 值进行单相关分析，分析结果如图 3、图 4 所示。从图 3 可以看出，在 CCD

传感器第 2 波段(绿光波段)以及第 4 波段(近红外波段),积雪深度与反射光谱值的相关关系曲线趋势大体一致,反射率与雪深有一定的正相关性,即随积雪深度的降低,积雪反射光谱逐渐降低;在短波热红外波段,如图 4(a)所示,积雪光谱在该波段的反射率与雪深呈负相关关系,即随积雪深度的降低,反射率逐渐增加;同时,积雪深度与积雪像元的 NDSI 值相关关系曲线的趋势也呈正相关关系,如图 4(b)所示,即随积雪深度的降低,积雪像元 NDSI 值逐渐降低。

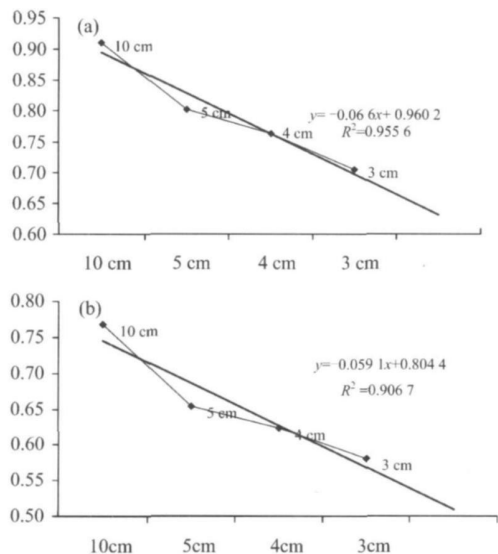


Fig. 3 The difference of different snow depths in band 2 (green) and band 4 (near-infrared) of CCD sensor
(a): Band 2; (b): Band 4

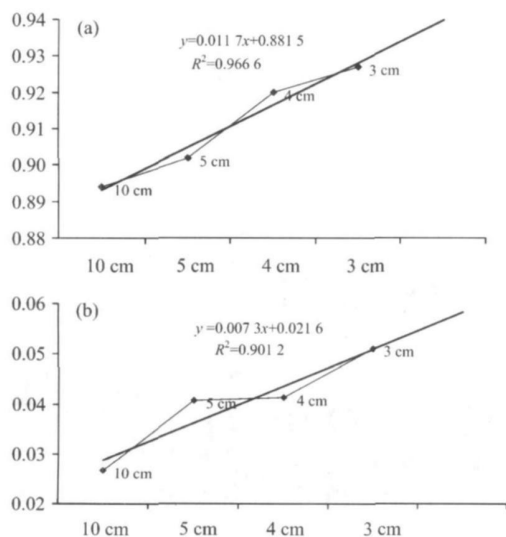


Fig. 4 The correlation of different snow depth in band 2 (short wave infrared) and NDSI
(a): Band 2; (b): Band 4

现有的利用光学遥感数据进行积雪深度反演的研究中,主要是通过分析传感器不同波段光谱信息与实际光谱信息的相关关系,建立反演模型来达到积雪深度反演的目的^[5,9,15]。

针对 MODIS 数据来说,因为其传感波段较多,而且针对积雪的监测波段也较多,波段间的相对独立性较好。但是针对 HJ-1B 卫星数据来说,因为其波段数据较少(表 1 和表 2),波段间的相关性也相对较高。所以本文的积雪深度反演方法是在积雪覆盖信息提取的基础上进行。上面的分析表明,近红外波段积雪的反射率值与雪深呈较好的正相关关系,同时,NDSI 值与雪深呈负相关关系。为有效利用积雪覆盖信息,突出雪深反演模型与反射率之间的相关关系,本文选取 NDSI 值与近红外波段的反射率建立模型进行雪深反演

$$SD = a_1 \times \text{NDSI} + a_2 \times \rho_{\text{NIR}} + a_0 \quad (3)$$

其中, SD 为积雪深度; a_0 , a_1 和 a_2 为回归系数, ρ_{NIR} 为 HJ-1B 星近红外通过反射率。

利用样本观测值 SD , NDSI , ρ_{NIR} 等经回归分析后,求得回归系数 a_0 , a_1 和 a_2 , 建立的积雪深度反演方程为

$$SD = 33.5726 \times \text{NDSI} + 43.1565 \times \rho_{\text{NIR}} - 33.2334 \quad (4)$$

为确定回归方程的可靠程度,必须进行回归方程总体显著性、参数估计值显著性、方程拟合效果等的检验。检验结果表明,判定系数(R^2)为 0.99716, F 观察值为 175.8, df 为 1, 表明在自变量与积雪深度之间存在很大的相关性。通过 F 统计可以确定具有如此高的 R^2 值的结果偶然发生的可能性较小, 方程计算所得雪深具有可靠性。

4 结果与验证

利用式(4)的积雪深度反演模型,对所提取的积雪覆盖区域(图 2)进行了积雪深度反演,反演结果如图 5 所示。在图 5 中,将积雪深度划分为 5 个积雪深度区间,包括小于 3 cm 的积雪、3~5 cm 的积雪、5~10 cm 的积雪以及大于 10 cm 的积雪,图 5(a)为反演的积雪深度结果,图 5(b)为局部区域放大结果。从反演结果可以看出,研究区积雪深度主要分布在 3~10 cm, 其小于 3 cm 的积雪以及大于 10 cm 的积雪也有少量分布。对图 5 所示的积雪反演结果在另外的点位,本工作通过进行 GPS 野外定位和实际测量雪深之后,对所建立的雪深反演模型进行了验证。验证数据包括公路路面积雪,约 3 cm 厚;裸土积雪,约 5 cm 厚以及小于 2 cm 厚的积雪。结果表明:路面积雪以及裸土积雪平均绝对误差均在 0.8 cm 之内,相对误差的平均值为 15.4%;而当雪深小于 2 cm 时,反演模型的误差较大,最大相对误差甚至超过 50%。造成雪深小于 2 cm 时反演误差较大的原因主要是由于积雪深度较浅,积雪下垫面的光谱反射影响较大,因此误差较大。另外,雪深测量方法也会带来一定误差,从而影响了反演精度。

5 结论与讨论

本研究主要是针对我国环境与灾害小卫星数据进行,在积雪覆盖识别的基础上,通过实测光谱数据,建立了适用于 HJ-1B 星的积雪深度反演模型,并验证了反演结果。与传统的光学遥感数据反演积雪深度不同,针对环境减灾星波段较少这一现实,本工作建立的模型应用了归一化差分积雪指数

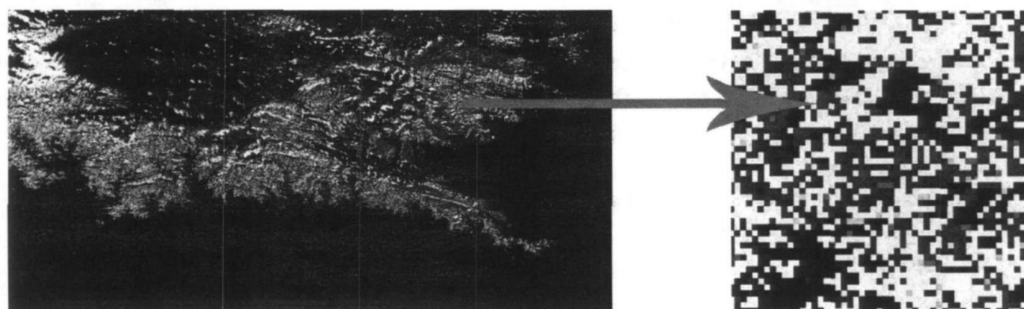


Fig 5 The results of snow depth retrieval

与积雪深度的相关性这一特点, 不仅应用 NDSI 识别积雪覆盖区域, 而且将 NDSI 应用到积雪深度反演之中, 既可以减少作业强调, 同时也可以最大化的利用卫星遥感所获得的信息。但是我们也必须注意到, 仅仅利用可见光、近红外以及短红外波段反演积雪深度, 因为积雪性质以及电磁波光谱本身的原因, 会受到一定的限制。首先, 由于可见光、近红外电磁波波段波长相对较短, 遥感器只能探测来自积雪表面的和较浅深度的电磁反射辐射, 因而有限的反演出较浅范围内的积雪深度。另外, 在复杂地形区域, 由于混合光谱导致混

合像元的影响, 卫星接收到的反射辐射信息受到地形以及其他地物的影响较大, 从而给积雪深度反演带来较大的误差。因此, 本工作所提出的积雪深度反演方法更适用于平坦的非林区积雪覆盖区。当然, 模型本身还存在着较多的问题, 譬如使用 NDSI 进行积雪分类时, 因为积雪识别阈值的区域性差异, 积雪分类精度还有待进一步提高, 野外实测数据并不是很充分等, 使得本研究工作有待进一步深入的开展, 以提供更准确的积雪深度反演模型和方法。

References

- [1] Euskirchen E S, McGuire A D, Chapin F S. *Global Change Biology*, 2007, 13: 2425.
- [2] Rawlins M A, Willmott C J, Shiklomanov A, et al. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L07403.
- [3] Griffith, Alden B, Loik, et al. *Oecologia*, 2010, 164(3): 821.
- [4] Peng S S, Piao S L, Ciais P, et al. *Global Change Biology*, 2010, 16(11): 3004.
- [5] FU Hua, LI San-mei, HU ANG Zhen, et al(傅 华, 李三妹, 黄 镇, 等). *Arid Land Geography(干旱区地理)*, 2007, 30(6): 907.
- [6] Butt M. J. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 2009, 105: 181.
- [7] Cao Y G, Yang X C, Zhu X H. *Chinese Geographical Science*, 2008, 18(4): 356.
- [8] Tedesco M, Pulliainen J, Takala M, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(1): 76.
- [9] LI San-mei, FU Hua, HU ANG Zhen, et al(李三妹, 傅 华, 黄 镇, 等). *Arid Land Geography(干旱区地理)*, 2006, 29(5): 110.
- [10] Che T, Li X, Gao F. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(3): 363.
- [11] Wang J, Chen Z D, Li W J, et al. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(2): 165.
- [12] WEI Wen-shou, QIN Da-he, LIU Ming-zhe(魏文寿, 秦大河, 刘明哲). *Arid Land Geography(干旱区地理)*, 2001, 24(4): 310.
- [13] Gao Y, Xie H J, Yao T D, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114: 1662.
- [14] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 54: 127.
- [15] LIU Yan, ZHANG Pu, LI Yang, et al(刘 艳, 张 璞, 李 杨, 等). *Geography and Geo-Information Science(地理与地理信息科学)*, 2005, 21(6): 41.

A Snow Depth Inversion Method for the HJ-1B Satellite Data

DONG Ting-xu^{1,2}, JIANG Hong-bo^{1*}, CHEN Chao¹, QIN Qi-ming¹

1. School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China

2. School of Resources and Environment Engineering, Mianyang Normal University, Mianyang 621000, China

Abstract The importance of the snow is self-evident, while the harms caused by the snow have also received more and more attention. At present, the retrieval of snow depth mainly focused on the use of microwave remote sensing data or a small amount of optical remote sensing data, such as the meteorological data or the MODIS data. The small satellites for environment and disaster monitoring of China are quite different from the meteorological data and MODIS data, both in the spectral resolution or spa-

tial resolution. In this paper, aimed at the HJ-1B data, snow spectral of different underlying surfaces and depths were surveyed. The correlation between snow cover index and snow depth was also analyzed to establish the model for the snow depth retrieval using the HJ-1B data. The validation results showed that it can meet the requirements of real-time monitoring the snow depth on the condition of conventional snow depth.

Keywords Satellite remote sensing; HJ-1B; Snow; Depth inversion

* Corresponding author

(Received Mar. 29, 2011; accepted Jun. 28, 2011)

(上接 2762 页)

2 论坛主题报告: 本次会议将选择光谱技术的热点应用领域, 开设多个专题论坛, 邀请在该领域的知名专家作论坛主题报告。

3 论坛邀请报告: 邀请专家学者围绕论坛主题进行学术交流。

4 墙报展示: 作为本次会议的主要交流和展示形式之一, 会议将统一安排墙报的讲解时间, 希望作者能按时到位。

重要时间

论文截稿日期: 2012 年 4 月 30 日

第二轮会议通知: 2012 年 8 月上旬

第三轮会议通知: 2012 年 9 月下旬

会议召开期: 2012 年 10 月 19—22 日

请您经常浏览我们的主页, 了解会议筹备情况和会议具体安排! 网址: <http://www.sinospectroscopy.org.cn>

产品展示

会议热忱邀请国内外仪器厂商前来展示红外、近红外、拉曼、荧光光谱仪以及质谱、核磁等其它各种仪器设备。我们将在本次会议的网站和会议现场提供展出场所, 希望各厂商充分利用这次机会展示自己的最新产品。

联系方式

大家若有对召开本次会议的建议和想法, 可以随时与组委会联系, 若您决定参加会议, 请填写回执寄回(联系方式见回执表格), 或以电子邮件传到组委会电子邮箱 gphy2012@126.com, 请在 2012 年 4 月 30 日前回复我们, 以便我们为您提供更多的有关会议的信息。

中国化学会

中国光学学会

韶关学院 韶关市化学化工学会

第十七届全国分子光谱学学术会议

(2012 年 10 月 19—22 日)

回 执

姓 名		性别		职务(职称)		
单位名称					固定电话	
					移动电话	
通讯地址	省 市 区 街 号				邮 编	
E-mail					传 真	
论文题目						
参会方式 (请以√选择)	口头报告[] 墙 报[]	报告人				

注: 此回执, 请在 2012 年 4 月 30 日前邮寄给:

512005 广东省韶关市浚江区大塘路九公里韶关学院化学系 黄冬兰 收

或电子邮件给: gphy2012@126.com