

# 基于 SSM / I 被动微波数据的中国积雪深度遥感研究

延昊<sup>1</sup>, 张佳华<sup>2</sup>

(1. 中国气象局 国家气象中心, 北京 100081; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘要:** 通过对积雪和其他地物的被动微波辐射计 SSM / I 的微波亮温进行波谱分析, 提出了一个识别积雪的 SSM / I 微波检测方法, 与 MODIS 的 5 d 合成积雪范围数据进行了比较, 结果表明 SSM / I 的积雪范围与 MODIS 基本一致。对提出的 SSM / I 的微波积雪深度反演方法进行了验证, 与 2006 年冬季每日的中国地面积雪深度观测数据的相关系数  $R$  的平方为 0.46~0.54, 偏差为 -0.3~0.8 cm, 均方根误差  $rmse$  为 4.4~6.8 cm。

**关键词:** 积雪识别; 积雪深度; 被动微波辐射计 SSM / I; MODIS

**中图分类号:** P426.63

**文献标识码:** A

积雪是地表覆盖的重要部分, 积雪的反射率比土壤、植被的反射率高许多, 严重影响地表的辐射平衡和天气系统变化, 而且, 积雪融水也是干旱、半干旱区生态系统的重要水源<sup>[1]</sup>。积雪深度也是天气和水文数值模式运行的必要参数。积雪深度传统上是由地面气象站观测得到, 但气象站布点稀少, 难于提供当前中尺度模式所需的积雪深度分布数据, 而卫星遥感是获取大尺度积雪信息的有效方法。

由于 NOAA 系列气象卫星和 EOS 系列对地观测卫星每天覆盖全球两次 (白天、夜晚各一次), 提供了 1.1 km 空间分辨率的 AVHRR 和 250~1 km 空间分辨率的 MODIS 对地观测数据, 利用该资料在积雪识别、积雪深度、雪灾评估、积雪量等方面开展了大量的研究<sup>[2-5]</sup>。

在积雪监测方面, 可见光、红外方法的优点是在无云的情况下, 可以得到准确的积雪范围, 而被动微波方法的优点是被动微波信号可以穿透云, 进行全天候的积雪监测。在积雪深度估计方面, 被动微波方法比可见光、红外方法有较大优点, 被动微波方法可以进行超过 15 cm 的积雪深度估计, 而可见光方法不能估计厚雪<sup>[4]</sup>。

特别微波成像辐射计 SSM / I 主要用于地球物理参数的反演, 如海面风速、积雪面积、降雨、水气含量、土壤湿度、陆面温度、海面温度等, 使用的反演技术是基于通道亮温的均值和差值的统计反演方法<sup>[6]</sup>。Chang *et al.*<sup>[7]</sup> 首先提出了被广泛引用的 SSM / I 被动微波积雪深度反演方法, 曹梅盛等<sup>[8,9]</sup>、车涛等<sup>[10]</sup>和柏延臣等<sup>[11]</sup>根据中国西部和青藏高原的观测数据提出了修正的 SSM / I 微波积雪深度估计方法, 并开展了积雪密度和雪水当量的研究。

本文主要是提出了一个 SSM / I 的积雪识别和雪深反演的方法, 通过 MODIS 积雪识别结果对 SSM / I 的积雪识别方法进行了检验, 并对 SSM / I 雪深反演结果开展了地面检验。

## 1 数据和处理

专用微波成像辐射计 SSM / I 位于防卫气象卫星计划 (DMSP) 卫星上, 轨道高度为 830 km。SSM / I 作为星载被动微波传感器, 采用圆锥扫描方式, 扫描宽度为 1400 km, 有 7 个通道, 在 19.37、85 GHz 使用水平和垂直极化两种模式, 在 22 GHz 只使用垂直

收稿日期 (Received date): 2007-09-12; 改回日期 (Accepted): 2007-11-30.

基金项目 (Foundation item): 国家气象中心“微波积雪深度遥感提取”项目资助 [Supported by the National Meteorological Center]

作者简介 (Biography): 延昊 (1973-), 男, 汉族, 副研究员, 2002 年在中国科学院遥感应用研究所获博士学位, 现在主要从事大气参数和生态系统的定量遥感研究。[Yan Hao (1973-), male, Han nationality, associate professor, now works on quantitative remote sensing of atmosphere and ecological system. Tel: 010-68409654, E-mail: yanhao@yahoo.com.cn]

极化模式, 85 GHz的空间分辨率最高, 为 13 km, 而 19 GHz的空间分辨率最低, 为 45 km。

所使用的 SSM / I- 15数据, 为 2005- 01- 01至 03- 01的升轨 (Ascending) 亮温 TB 数据, TB 代表微波亮温 (单位: K)。根据 SSM / I自带的经纬度数据, 应用双线性插值方法插值成  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  的等经纬度数据, 用于积雪范围和深度研究。

同时, 收集了 2005- 01- 01至 03- 01同期的中国气象局新疆、北京和广州 3个站接收的中分辨率成像光谱仪 Terra- MODIS数据, 插值成  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  的等经纬度数据, 用于验证 SSM / I的积雪范围。MODIS作为一个 36波段的中分辨率、多光谱、交叉扫描 (cross-track scanning) 的光谱辐射测量计, 具有对大气、陆地和海洋综合观测的能力。MODIS的 1、2波段空间分辨率为 250 m, 3~ 7的波段空间分辨率为 500 m, 8~ 36波段的空间分辨率为 1000 m, 扫描宽度为 2330 km, 比 SSM / I要宽 930 km。MODIS识别积雪的方法<sup>[12-14]</sup>主要是利用积雪在 1.6  $\mu\text{m}$  和 2.1  $\mu\text{m}$  的强吸收特性, 通过计算雪盖指数进行积雪识别, 依据该方法本文开展了中国区域的 Terra- MODIS积雪制图。

地面积雪深度观测数据来源于中国气象局的气象观测站, 时间为 2006- 01- 01至 03- 01的每日早 8点, 其中黑龙江的观测数据存在缺失现象。

## 2 SSM / I被动微波积雪识别方法

### 2.1 被动微波积雪识别方法

利用被动微波识别积雪的原理是<sup>[6,15]</sup>: 积雪具有较强的体散射效应, 使得低频的亮温 TB 大于高频的亮温 TB。因此, 如果  $TB_{19V} > TB_{37V}$  或  $TB_{22V} > TB_{85V}$ , 该区域被识别为积雪。但沙漠、降雨和冻土也存在散射作用, 会使低频的亮温大于高频的亮温。因此完整的积雪识别方法需要将沙漠、降雨、冻土区分。Grody and Basist<sup>[15]</sup>利用由一系列的阈值组成的复杂决策树区分沙漠、降雨、冻土和积雪。本文通过对中国区域冬季 3d的地物和降雨云的 SSM / I微波波谱进行采样, 每一类地物具有代表性的样本数为 20, 微波波谱取平均得到典型目标物的 SSM / I微波波谱 (图 1), 发现积雪的微波亮温还存在一个显著特征, 即  $TB_{37H} > TB_{85V}$ , 而其他地物和降雨云基本不满足该条件, 因此利用该特征可以建立一种简单的 SSM / I积雪识别方法。具体方法是同时满足 (1)

$TB_{22V} - TB_{85V} > 15 \text{ K}$  (2)  $TB_{37H} - TB_{85V} > 0 \text{ K}$  (3)  $TB_{85V} < 244 \text{ K}$  其中判据 (1) 和 (2) 的理论基础是积雪具有较强的体散射效应, 使得低频的亮温大于高频的亮温, 具体的阈值是对样本分析得到的。判据 (3) 的理论基础是陆地和沙漠的微波亮温大于积雪, 用于区分陆地和沙漠。

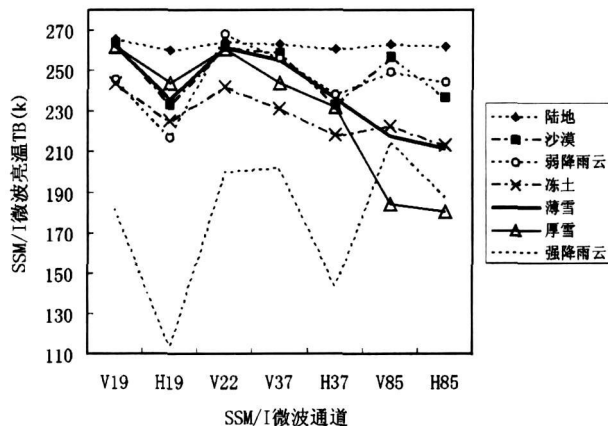


图 1 典型目标物的 SSM / I微波波谱

Fig 1 SSM / I spectral of typical objects

### 2.2 SSM / I和 MODIS 积雪制图的比较

Terra- MODIS由于受云的影响, 难以提供每日的地面积雪范围图。本文首先提取 2005- 01- 01至 03- 01逐日的 Terra- MODIS积雪范围, 将每 5 d 的 Terra- MODIS地面积雪范围图进行合成, 以减少云覆盖引起的地面积雪观测缺失的情况<sup>[5,16]</sup>, 从而形成 5 d最大积雪范围图, 用于检验 SSM / I的积雪识别效果。

SSM / I是搭载在极轨卫星上的传感器, 其每日轨道并不能完全覆盖地球表面, 其扫描宽度比 Terra- MODIS的要窄 930 km, 本文将 SSM / I的每日积雪监测图进行 5 d合成提取最大积雪范围。选取了 2006年的 3次合成数据进行比较 (图 2), 可以看到中国的积雪主要分布在东北、内蒙古东部、新疆北部和青藏高原地区, 积雪分布比较稳定, 持续时间较长。图 2 a显示的 1月的 5 d积雪范围最大, 内蒙古几乎全被积雪覆盖, 同时安徽和河南也都出现了积雪, 特别值得注意的是新疆南部塔克拉玛干沙漠中的积雪得到了良好反映。图 2 b显示出 MODIS监测到山东出现了大雪, 这与实况一致, 但 SSM / I没有监测到。图 2 c显示的 3月的 5 d积雪范围最小, 东北、内蒙古东部和新疆的积雪范围明显减小, 但青藏高原东部的积雪得到了良好反映。需要说明的是

在新疆北部 3 月的 MODIS 积雪范围较小的原因是 5 d 内的 MODIS 数据存在缺失情况。这 3 次的合成数据显示 SSM / I 和 MODIS 的积雪范围基本一致, 但 MODIS 监测的积雪边界比较清晰, 而 SSM / I 由于分

辨率较粗, SSM / I 的积雪边界比较粗。这与其他研究一致, Basist<sup>[16]</sup>对 NOAA 的可见光和 SSM / I 的微波积雪产品进行了长时间序列比较, 发现两者在全球范围上非常吻合, 但在区域上存在较大误差。

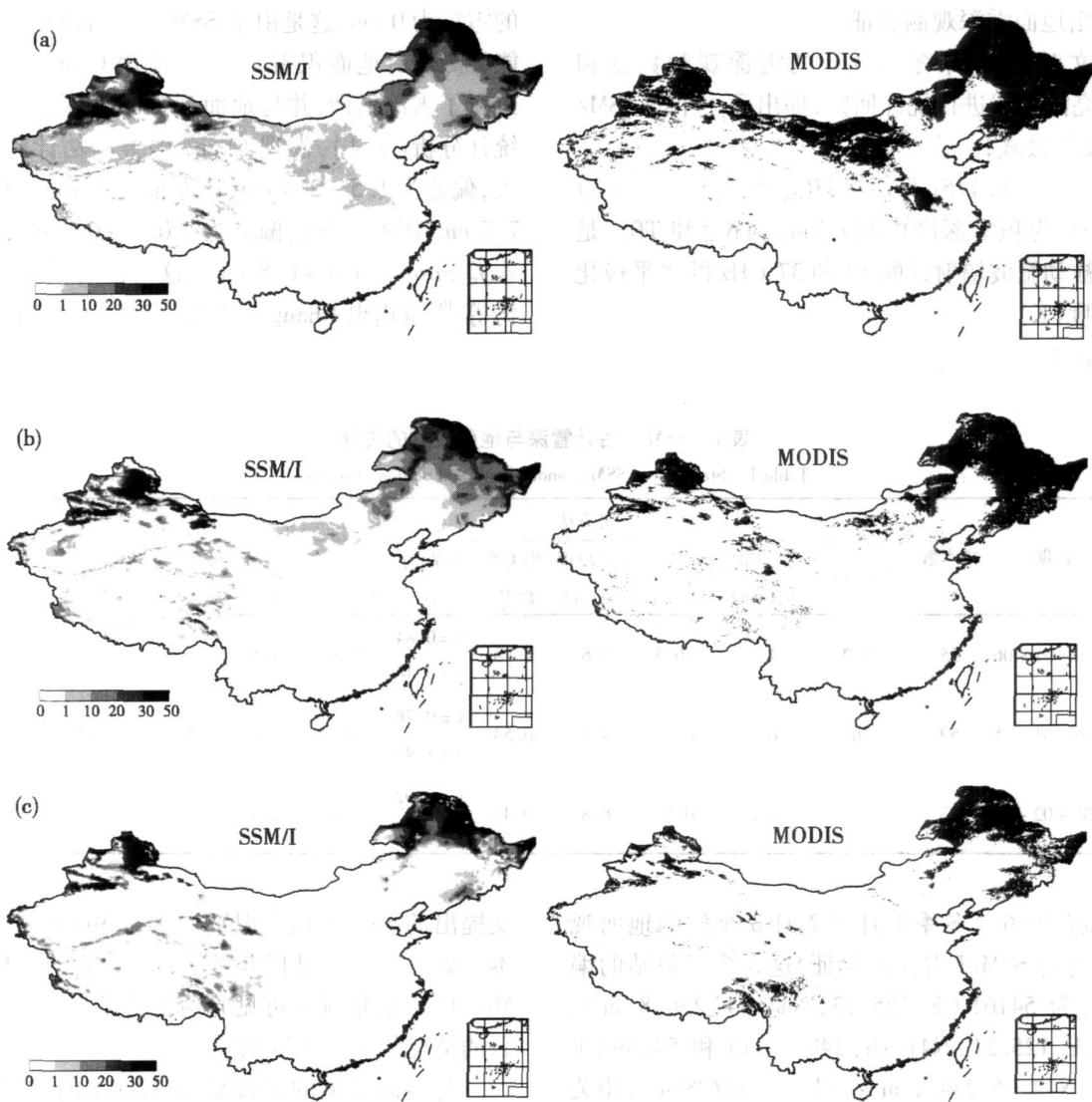


图 2 SSM / I 和 MODIS 的 5 d 积雪识别图 ( a 2006 - 01 - 21 ~ 25; b 2006 - 02 - 10 ~ 14; c 2006 - 03 - 07 ~ 11 )

Fig. 2 SSM / I and MODIS snow map of 5 days ( a from Jan 21 to Jan 25, 2006; b from Feb 10 to Feb 14, 2006; c from Mar 7 to Mar 11, 2006 )

### 3 SSM / I 被动微波积雪深度反演

#### 3.1 SSM / I 被动微波积雪深度反演方法

已有的被广泛引用的被动微波积雪深度反演方法是 Chang *et al.*<sup>[7]</sup> 的方法, 他根据辐射传输理论和米氏散射理论, 假设雪密度为  $0.3\text{ g/cm}^3$ 、雪粒径为  $0.35\text{ mm}$ 、雪厚  $< 1\text{ m}$  的前提下, 获得了一个半经验半物理模型的雪深反演公式:

$$SD = 1.59(TB_{18h} - TB_{37h}) \tag{1}$$

式中  $SD$  为积雪深度 (  $\text{cm}$  ),  $TB_{18h}$  和  $TB_{37h}$  是 SMMR 被动微波辐射计的  $18$  和  $37\text{ GHz}$  的水平极化亮度温度 (  $K$  )。

该方法在全球积雪深度估计方面得到广泛的应用<sup>[17]</sup>。但该方法在中国西部和青藏高原上的应用效果不好, 他提出了一个修正的积雪深度估计方法<sup>[17]</sup>

$$SD = 2.0(TB_{18h} - TB_{37h}) - 8.0 \tag{2}$$

曹梅盛等<sup>[8,9]</sup>根据中国西部的地貌单元提出了相应的微波积雪深度估计方法。车涛等<sup>[10]</sup>提出了一个应用于青藏高原的SSM/I微波积雪深度估计方法,经地面验证取得了较好的结果,并应用Chang et al<sup>[7]</sup>的方法开展了中国东部积雪深度估计<sup>[10]</sup>,但没有给出地面雪深观测验证。

本文对2006年冬季3 d的雪深观测数据和SSM/I亮温数据进行统计回归,提出了一个的SSM/I雪深反演公式,

$$SD = 0.145(TB_{19h} - TB_{37h})^{1.7463} \tag{3}$$

式中SD为积雪深度(单位:cm),TB<sub>19h</sub>和TB<sub>37h</sub>是SSM/I被动微波辐射计的19和37 GHz的水平极化亮度温度(K)。

3.2 验证

选择2006年冬季3 d的全国地面观测数据进行SSM/I雪深的验证,结果显示(图3),SSM/I雪深与观测基本一致,相关系数R的平方为0.46~0.54,斜率为0.76~0.92。散点图(图3)也显示,存在少量漏报现象,即地面观测有雪,而SSM/I估计的雪深为0 cm,这是由于SSM/I阈值检测方法并不能检测所有地面积雪。同时,应用Chang的方法也进行了雪深估计,并与地面观测的雪深进行了相关统计分析(表1),发现Chang的方法估计的雪深偏大,偏差为1.5~2.4 cm,均方根误差mse为6.6~7.7 cm,而本文方法偏差为-0.3~0.8 cm,均方根误差mse为4.4~6.8 cm。这与已有研究一致,车涛等<sup>[10]</sup>也指出Chang的方法估计的雪深偏大。

表 1 SSM/I估计雪深与地面观测的统计  
Table 1 Statistics of SSM/I snow depth and station observation

日期	样本数	观测均值 (cm)	本文方法					Chang方法				
			估计均值 (cm)	偏差 (cm)	均方根误差 (cm)	相关系数 R <sup>2</sup>	回归方程	估计均值 (cm)	偏差 (cm)	均方根误差 (cm)	相关系数 R <sup>2</sup>	回归方程
2006-01-06	55	5.2	4.9	-0.3	4.6	0.48	y=0.84 x+0.48	7.7	1.5	6.6	0.52	y=1.23 x+1.18
2006-01-25	59	6	6.5	0.5	4.4	0.54	y=0.76 x+1.93	10	4	7.1	0.52	y=1.02 x+3.87
2006-02-09	73	6	6.8	0.8	6.8	0.46	y=0.92 x+1.02	8.4	2.4	7.7	0.49	y=1.07 x+1.66

选择2006年冬季1月至2月3个站的地面观测雪深进行SSM/I雪深的验证,这3个气象站的编号依次为54161(E 125.13 N 43.54 236.8 m)、54365(E 125.21 N 41.16 240.3 m)和54259(E 124.55 N 42.06 234.1 m)。结果显示(图4),相关系数R的平方为0.20~0.49,斜率为0.73~1.42。SSM/I由于不能每天覆盖中国区域,因此在每个站上得到的SSM/I雪深数据比实际天数少。在地面存在稳定积雪时,地面观测的雪深变化很小,但SSM/I雪深变化有时却很大,这可能与积雪粒径的变化或积雪表面融化等引起的散射特性改变有关。

4 结论与讨论

与MODIS的5 d合成积雪面积的比较显示,本

文提出的SSM/I积雪识别方法与MODIS的结果基本一致。SSM/I可以识别有云和夜晚的积雪,而MODIS方法依赖于可见光通道信息,只能在白天无云的情况状况下进行积雪监测。

与地面实测的比较显示,Chang的微波估计方法存在薄雪(<10 cm)时估计过高的问题。本文提出的方法可以改善微波积雪深度估计的精度,相关系数R的平方为0.46~0.54,偏差为-0.3~0.8 cm,均方根误差mse为4.4~6.8 cm,而Chang的偏差为1.5~2.4 cm,均方根误差mse为6.6~7.7 cm。由于雪深、雪密度、雪水含量都会影响SSM/I的微波信号,积雪参数的微波遥感反演是一个多变量的反演问题,雪深的反演是在一定假设基础上进行的统计反演。

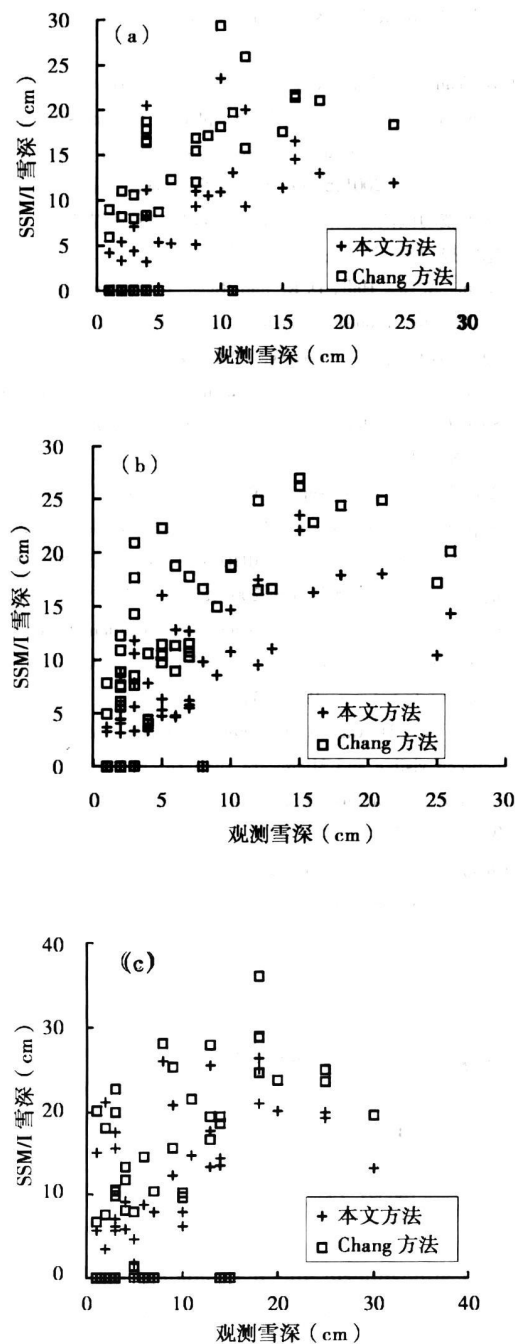


图 3 SSM/I 积雪深度与地面观测雪深的日散点图

(a:2006-01-06;b:2006-01-25;c:2006-02-09)

Fig. 3 Daily scatter plot of SSM/I Snow depth and station observation

(a:Jan 6 2006; b: Jan 25 2006; c: Feb 9 2006)

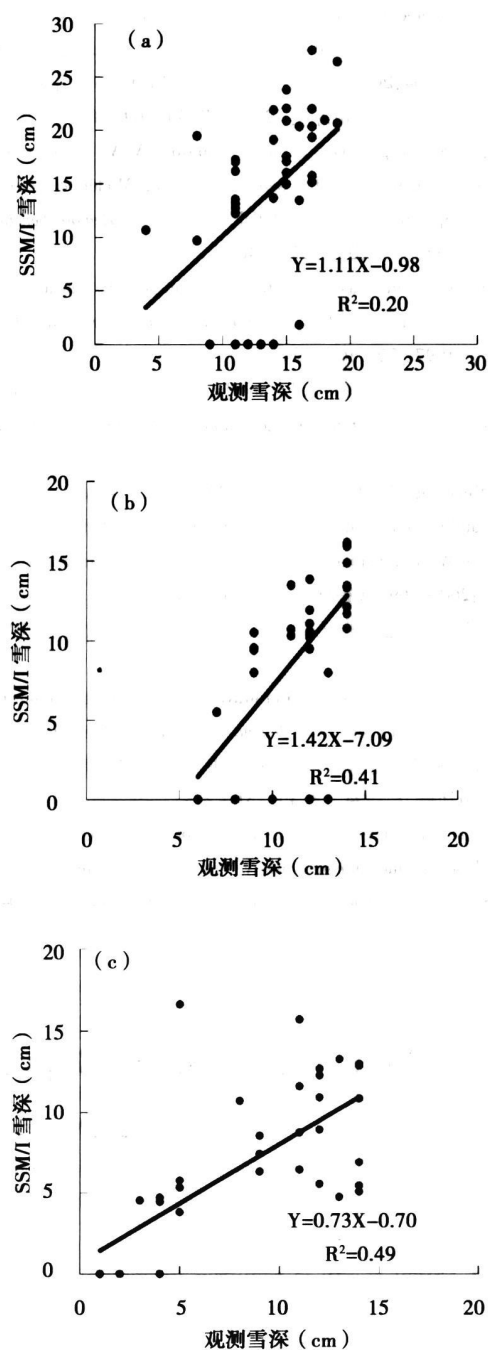


图 4 3 个站的 SSM/I 积雪深度与地面观测雪深的散点图

(a: 54259;b:54365;c:54161)

Fig. 4 Scatter plot of SSM/I Snow depth and station observation for

three stations (a: 54259;b:54365;c:54161)

## 参考文献 (References)

- [1] Li Peiji Snowpack resource change in northwest China from 1951 ~ 1997 [J]. *Science China*, 1999, 29 (Dsl): 63~ 69 [李培基. 1951 ~ 1997 年中国西北地区积雪水资源的变化 (J). *中国科学*, 1999, 29 (Dsl): 63~ 69]
- [2] Ling Taingang Wu Caixia Chen Quangong *et al.* Snow classification and monitoring models in the pastoral areas of the nothem Xin-

- jiang [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(2): 160 ~ 165 [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 [J]. *冰川冻土*, 2004, 26(2): 160~ 165]
- [3] Yan Haq Zhang Guoping Ummixing method applied to snow boundary estimation [J]. *Journal of Mountain Research*, 2004, 22(1): 110~ 115 [延昊, 张国平. 像元分解法提取积雪边界线 [J]. *山地学报*, 2004, 22(1): 110~ 115]

- [4] Yan Hao. Detection of snow and estimation of snow pack parameters using NOAA 16-AVHRR data [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(3): 369~373 [延昊. NOAA 16卫星积雪识别和参数提取 [J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 369~373]
- [5] Hall D.K., Riggs G.A. and Salomonson V.V. Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 54: 127~140
- [6] Grody N.C. and Basist A. Interpretation of SSM/I measurements over Greenland [J]. *IEEE Transaction of Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35: 360~366
- [7] Chang A.T.C., Foster J.L. and Hall D.K. Nimbus-7 derived global snow cover parameters [J]. *Annals of Glaciology*, 1987, 9: 39~44
- [8] Cao Meisheng, Li Peiji, Robinson DA, et al. Evaluation and primary application of microwave remote sensing SMMR derived snow cover in Western China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 8(3): 260~269 [曹梅盛, 李培基, Robinson DA 等. 中国西部积雪 SSMR 微波遥感的评价与初步应用 [J]. 环境遥感, 1993, 8(3): 260~269]
- [9] Cao Meisheng, Li Peiji. Microwave remote sensing monitoring of snow in Western China [J]. *Journal of Mountain Research*, 1994, 12(4): 231~233 [曹梅盛, 李培基. 中国西部积雪微波遥感监测 [J]. 山地研究, 1994, 12(4): 231~233]
- [10] 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*, 2004, 26(3): 363~368 [车涛, 李新, 高峰. 青藏高原积雪深度和雪水当量的被动微波遥感反演 [J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 363~368]
- [11] Bo Yanchen, Feng Xuezhong, Li Xin, et al. The retrieval of snow depth in Qinghai-Xizang (Tibet) plateau from passive microwave remote sensing data and its results assessment [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2001, 5(3): 161~165 [柏延臣, 冯学智, 李新, 等. 基于被动微波遥感的青藏高原雪深反演及其结果评价 [J]. 遥感学报, 2001, 5(3): 161~165]
- [12] Klein A.G., Hall D.K. and Riggs G.A. Improving snow-cover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model [J]. *Hydrological Processes*, 1998, 12: 1723~1744
- [13] Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V., et al. MODIS Snow-Cover Products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83: 181~194
- [14] Yan Hao. A comparison of MODIS and passive microwave snow mapping [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(4): 515~519 [延昊, 利用 MODIS 和 AMSR-E 进行积雪制图的分析 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(4): 515~519]
- [15] Grody N.C. and Basist A. Global identification of snow cover using SSM/I measurements [J]. *IEEE Transaction of Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34: 237~249
- [16] Basist A., D. Garrett R., Ferraro R.R., et al. A comparison between visible and microwave snow cover products derived from satellite observations [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1996, 35: 163~177
- [17] Chang A.T.C., Foster J.L., Hall D.K., et al. The use of microwave radiometer data for characterizing snow storage in western China [J]. *Annals of Glaciology*, 1992, 16: 215~219

## Retrieval of Snow Depth in China by Using SSM/I Data

YAN Hao<sup>1</sup>, ZHANG Jiahua<sup>2</sup>

(1. National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract** Snow depth is required in evaluation of snow disaster and atmospheric and hydrological model. As snow detection is the first step of snow depth retrieval, this paper presents a method for snow detection based on the analysis of SSM/I passive microwave signals for snow and other land objects. It consists of three thresholds of microwave brightness temperature (TB) for snow detection. Further, SSM/I composite snow mapping of five days is further compared with Terra-MODIS snow mapping for the same period, and this validation shows that this SSM/I method is in agreement with the MODIS method for snow detection.

In addition, this paper presents a statistical retrieval method of snow depth for SSM/I data. A power equation is applied to SSM/I snow depth retrieval in China in winter of 2006. The result is further compared with daily snow depth observed by meteorological station. The correlation coefficient  $R^2$ , bias and root mean square error are 0.46~0.54, -0.3~0.8 and 4.4~6.8 respectively. Further analysis shows that this method reduces the obvious overestimation of snow depth derived from the Chang method for snow depth retrieval.

This SSM/I method for snow depth retrieval offers an operational method for snow depth mapping in China.

**Key words** snow detection; snow depth; Passive microwave radiometer; SSM/I; MODIS