

文章编号: 1007-4619 (2001) 03-0161-05

# 基于被动微波遥感的青藏高原雪深反演及其结果评价

柏延臣<sup>1</sup>, 冯学智<sup>2</sup>, 李 新<sup>3</sup>, 陈贤章<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 南京大学 城市与资源学系, 南京 210093;

3. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

**摘 要:** 采用修正的张氏雪深反演算法, 用 SSM/I 37GHz 和 19GHz 水平极化亮温值计算了青藏高原及其毗邻地区的积雪深度, 对其精度进行了评价, 并对误差来源进行了分析。结果显示, 此算法能够较好地反映研究区的雪深分布, 但局部地区误差较大, 总体上雪深被高估。其误差主要来源于冻土, 深霜层, 植被以及雪层中液态水含量, 雪粒的形状和粒径的变化带来的影响。SSM/I 数据较低的分辨率和研究区复杂的地形使反演的雪深与观测的雪深缺少可比性, 给精度的评价带来影响。

**关键词:** 积雪深度; 被动微波遥感; SSM/I 数据; 结果评价

**中图分类号:** TP79/TP721.1 **文献标识码:** A

## 1 引 言

积雪深度是积雪研究中最重要参数之一。在雪水当量估算, 流域水量平衡和融雪径流预报以及牧区雪灾遥感监测与评价模型中<sup>[1,2]</sup>, 都把积雪深度作为首选的主要参数。

影响地表积雪深度分布的因子主要有海拔高度、坡度、坡向、地表粗糙度、风速和风向等。因此, 局地的地表积雪深度的空间分布很复杂, 如何获取积雪深度分布信息是积雪研究的技术难点之一。早期的积雪深度数据主要依靠水文气象台的观测资料或流域积雪线路调查, 其局限性很大。60年代空间遥感技术迅速崛起, 各国冰雪科学工作者利用 NOAA 和陆地卫星等的多光谱遥感数据研究大范围积雪动态变化, 反演积雪深度等, 取得长足的进展<sup>[3,4]</sup>。但利用可见光和近红外波段遥感数据反演雪深一般是基于统计模型, 积雪深度与卫星影象灰度的关系复杂, 而且缺乏理论依据, 一般的统计模型难以大范围推广。

微波遥感以其较强的穿透能力和全天候特性为积雪深度的反演提供了广阔前景。但由于用被动微

波遥感数据获取雪深需要发展一定的算法, 因此被动微波遥感对雪深的观测不如可见光观测积雪范围那样直接。20世纪70年代末, A.T.C.Chang 等在辐射传输理论和米氏散射理论的基础上, 在假设雪密度为  $0.3\text{g/cm}^3$  且雪粒径为  $0.35\text{mm}$  的前提下, 结合地面观测雪深资料, 通过回归分析, 得出利用 SMMR 被动微波亮温数据反演雪深的算法, 成为利用 SMMR 和 SSM/I 数据反演雪深的基本算法<sup>[5]</sup>。后来科学家根据应用的具体条件对此算法进行了修正<sup>[6,7]</sup>。但比较研究表明, 并不存在适合于任何条件下的雪深反演算法<sup>[7]</sup>。

虽然 Chang 的微波雪深反演算法以及在其基础上修正的算法在世界各地, 特别是北半球的大范围雪深反演中得到广泛应用, 但对于青藏高原这样一个高海拔的特殊地区, 雪深的反演精度尚需验证。由于当前基于被动微波数据的雪深算法大都是在 Chang 算法基础上根据当地的具体条件下修正的算法, 在缺少本地区积雪和下垫面状态系统观测的条件下, 本文利用 SSM/I 被动微波亮温数据和曹梅盛等根据中国西部的具体状况修正的 Chang 的算法<sup>[6]</sup>反演青藏高原地区的雪深, 并对结果进行初步评价。

收稿日期: 2000-06-08; 修订日期: 2000-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目“青藏高原积雪和冻土的微波遥感监测研究”(49971060)和“我国积雪遥感综合定量分析系统研究(49471058)资助。

作者简介: 柏延臣(1972—), 男, 博士生。1996年毕业于兰州大学自然地理专业, 1999年在中国科学院兰州冰川冻土研究所获理学硕士学位。从事遥感, 地理信息系统, 空间数据分析和空间模型等方面的研究, 发表文章6篇。

## 2 原理与方法

微波遥感由于其较强的穿透松散物的能力,为利用其亮温数据反演雪深提供了可能。

较早的用于雪深反演的微波数据是 Nimbus-7 的 SMMR(Scanning Multispectral Microwave Radiometer, 多光谱微波扫描辐射计)的 37GHz 和 18GHz 的水平极化亮温。1987 年后,改用 DMSP-SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager, 微波成像专用传感器)的 37GHz 和 19GHz 的水平极化亮温数据。

被动微波数据之所以被用于反演雪深是因为土壤的向上微波辐射被覆盖其上的积雪散射。一般积雪越深,其散射越强而到达传感器的辐射强度越弱,这个强度即表示为亮度温度( $T_B$ )。雪深的增加导致亮度温度的降低,这种反相关关系就是发展用被动微波亮温数据反演雪深算法的基础<sup>[5]</sup>。

Chang 等在辐射传输理论和米氏散射理论的基础上,在假设雪密度为  $0.3g/cm^3$  且雪粒径为  $0.35mm$  的前提下,结合地面观测雪深资料,通过回归方法,得出以下雪深反演公式<sup>[5]</sup>:

$$Sd = 1.59 \times (T_{18H} - T_{37H}) \quad (1)$$

式中,  $Sd$  为雪深,单位厘米(cm);  $T_{18H}$  和  $T_{37H}$  分别为 18GHz 和 37GHz 水平极化条件下的亮度温度。由于用这些通道的被动微波亮温数据只能探测到大于 2.5cm 的雪深,因此当  $Sd < 2.5$  时,做无雪处理。用 SSM/I 数据时,以 19GHz 代替公式中的 18GHz。

曹梅盛等在研究中国西部雪深时,根据具体条件,用统计的方法对式(1)进行了修正,得出以下公式<sup>[6]</sup>。本文即用此公式来反演青藏高原地区的雪深。

$$Sd = 1.59 \times (T_{18H} - T_{37H} - 8) \quad (2)$$

## 3 数据及处理

本研究所用的 SSM/I 亮温数据来自 NSIDC(National Snow & Ice Data Center)发布的 EASE-Grid CD-ROM 全球雪盖数据产品。EASE-Grid 即“等积 SSM/I 地球格网(Equal-Area SSM/I Earth Grid)”,它是 SSM/I 数据的存储格式。对于北半球的数据,它采用极地方位等积投影。处理时,将 EASE-Grid 格式的 37GHz 和 19GHz 水平极化亮温数据经投影转换,重采样后,按相应的公式计算出研究区所处的行列范围,并按此行列号挖出研究区。

为了有足够的地面气象观测站点以便验证反演结果,我们将研究区扩大到  $24.75^{\circ}N-40.25^{\circ}N$  和  $69.75^{\circ}E-110.25^{\circ}E$  的范围,包括青藏高原的大部分地区及其邻近地区,其中有 73 个气象观测站观测每日雪深。由于 EASE-GRID 格式的 SSM/I 数据为每 5 天覆盖一次,所以我们以气象站每 5 天的最大观测雪深值作为其对应的雪深值。

为保证足够的地面观测数据来验证反演结果,我们利用 1988-01-30—1988-03-20 共十个时段的研究区 SSM/I 的 37GHz 和 19GHz 水平极化亮温数据和相应的地面观测雪深进行研究对比。图 1 为经公式(2)计算的 1988-02-21—1988-02-25 的研究区雪深分布。从图中可以看出,研究区内大雪深值主要分布在兴都库什山、帕米尔高原、喜马拉雅山西部、念青唐古拉山、唐古拉山东坡、他念他翁山以及横断山西部等地区,其雪深可达 30—50cm 左右;藏北高原及

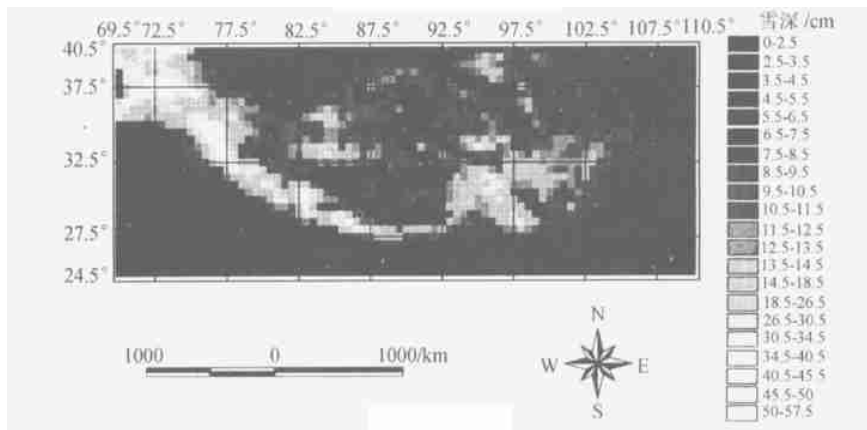


图 1 青藏高原及毗邻地区积雪深度分布图(1988-02-21—1988-02-25)

柴达木盆地则雪深值很小或无雪。此结果与柯长青等的分析结果基本吻合<sup>[9]</sup>。

## 4 结果分析与评价

为了评价 SSM/I 37GHz 和 19GHz 水平极化亮温数据反演的积雪深度的精度, 将每个时段的计算雪深值与对应的观测雪深值进行比较。以计算值和观测值之差作为反演的误差, 则各级误差的分布如图 2 所示。对所有 730 对数据的误差分析结果为:

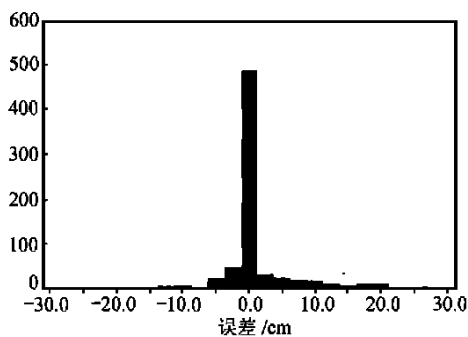


图 2 反演雪深误差分布的直方图

Fig. 2 The Histogram of Retrieved Snow Depth Errors

①所有 730 对数据的平均绝对误差为 1.25cm; 其中 149 对为负误差, 平均值为 -3.8cm, 最大达 -29cm; 165 对为正误差, 平均值为 9.0cm, 最大达 30.1cm。416 对数据的反演和观测结果都为无雪。这表明反演结果总体上高估了本地区的雪深值。

②对误差绝对值的分析表明: 所有 730 对数据中, 482 (66%) 对的绝对误差在 0.5cm 以内; 542 (74%) 对的绝对误差在 2.5cm 以内; 610 (83.6%) 对的绝对误差在 5.0cm 以内; 658 (90%) 对的绝对误差在 10.0cm 以内; 716 (98.1%) 对的绝对误差在 20.0cm 以内。

可以看出, 由 SSM/I 数据反演的雪深能基本上反映青藏高原雪深分布趋势, 但在局部地区误差较大, 反演雪深值总体上较实际观测值偏大。

根据对研究区的反演雪深值的分析以及前人的研究成果, 对反演误差的可能来源及特点做了如下分析:

(1) 积雪状况不满足算法的假设。Chang 等的算法是在假设雪密度为  $0.3\text{g}/\text{cm}^3$  且雪粒径为  $0.35\text{mm}$  的前提下得出的。但在青藏高原这样大的区域, 不同时相和位置上雪的密度和雪粒径会存在很大差异, 对于旧雪上覆盖新雪的情况就更复杂。

要校正这种误差需要详尽的野外同步观测数据。

(2) 没有考虑湿雪与干雪的差异。由于雪层中水分含量的差异, 不但影响雪粒的形状、粒径, 而且显著地影响雪层的介电常数, 而这些参数对雪层的微波辐射都有显著影响。因此, 在计算雪深前进行干雪和湿雪的区分, 在此基础上对不同类的积雪给以不同的反演算法参数是必要的。

(3) 冻土的存在是误差的重要来源之一。冻土在 37GHz 的微波辐射信号和积雪的微波辐射非常相似<sup>[10]</sup>。Norman·C 等在利用 SSM/I 亮温数据进行全球雪盖测量时也注意到在冻土存在的地区, 计算的雪盖范围常常大于实际的雪盖范围, 并用不同通道和极化的数据来区分冻土和积雪<sup>[11]</sup>。但对于冻土下覆于雪盖的情况下, 如何将冻土的影响消除, 则需要做进一步的研究。

(4) 深霜层的影响。当月平均气温小于  $-10^\circ\text{C}$ , 且雪盖较浅 ( $<0.5-0.1\text{m}$ ) 时, 一般会在雪盖和地表之间形成深霜层<sup>[12]</sup>。理论和试验研究表明, 微波亮温随着深霜层的增加而减小<sup>[13,14]</sup>。深霜层的这种与积雪相似的微波辐射特性对积雪深度的反演有显著影响。在美国科罗拉多州的研究表明, 在有深霜层存在的雪盖区, 微波亮温明显小于邻近地区的无深霜层的雪盖区。由于本研究区部分站点大部分年份 12 月至次年 2 月的月平均气温低于  $-10^\circ\text{C}$ , 因此, 对青藏高原地区, 深霜层的存在对雪深反演精度的影响是可能的。

(5) 没有考虑植被的影响。茂密的植被覆盖也会对微波亮温产生影响。植被在 19GHz 和 37GHz 辐射亮温的变化主要来自水的吸收的差别<sup>[10]</sup>。当这种差别很大时, 需要对这种差别进行校正。对青藏高原这样一个植被覆盖以灌丛草甸、草甸、高寒草甸、草甸草原、高寒草原、高寒荒漠草原等为主的区域, 植被的影响有多大尚需进一步研究。

同时, 地面观测站点的雪深观测值缺乏大范围区域的代表性, 使反演的雪深值和站点的观测值缺少可比性。由于本研究区位于青藏高原, 地形比较复杂, 在一个象元所对应的地表范围内雪深分布并不均匀。而 SSM/I 亮温数据反应的是一个象元范围 ( $25\text{km} \times 25\text{km}$ ) 内的平均辐射值, 这就给精确评价反演的精度带来了困难。如何更好地验证反演算法的精度也是需要研究的问题。

## 5 结论与讨论

本文以青藏高原及其毗邻地区为试验区, 利用

1988年1至3月十个时段的SSM/I 37GHz和19GHz通道的水平极化亮温数据,采用曹梅盛等修正了的Chang的算法反演青藏高原的雪深,用同期的73个气象站的观测雪深来评价反演的精度,并对可能的误差来源进行了分析。结果表明,用修正的Chang的算法反演的雪深基本上能反映青藏高原及毗邻地区雪深的分布趋势,但总体上略有高估,局部地区误差较大。误差来源主要于:(1)积雪状况不满足算法假定的雪密度为 $0.3\text{g}/\text{cm}^3$ 且雪粒径为 $0.35\text{mm}$ 的前提;(2)算法没有考虑干雪与湿雪的差别;(3)冻土层的存在;(4)深霜层的影响;(5)植被覆盖层的影响。同时,由于SSM/I数据的低空间分辨率和研究区地形的复杂性,使各气象观测站的观测雪深缺少大范围的代表性,因此也缺少与其位置所在的象元的计算雪深的可比性,给反演精度的评价带来困难。

鉴于此,对于青藏高原这样地形复杂的一个高寒区域,要获取较高精度的雪深分布信息,需要结合多个通道不同极化的数据,对需盖进行干雪和湿雪的区分,并在野外积雪特性(主要为雪密度和粒径)观测的基础上,综合考虑冻土层,深霜层和植被覆盖的影响,发展新的雪深反演算法。同时应考虑气象站雪深观测值的定标方法,使观测数据具有较大范围的代表性,以便于反演雪深算法的验证。

## 参 考 文 献 (References)

- [1] Zheng Qunzhu, Yong Shipeng, et al. Evaluation on the Risk Potential of Snow [C]. Wang Jinfeng et al. Methodology for Assessing natural Disaster Risk of China. Chinese Science and Technology Press, 1993. [曾群柱,雍世鹏等.中国雪灾的分类分级和危险度评价方法研究[C].王劲峰等著.中国自然灾害影响评价方法研究,中国科学技术出版社,1993.]
- [2] Feng Xuezi, Zeng Qunzhu. Study on Snow Disaster Monitoring Using Remote Sensing in Naqu Area of Xizang [C]. Memories of Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences (No.8) 1995, 14-22. [冯学智,曾群柱等.西藏那曲雪灾的遥感监测研究[C].中国科学院兰州冰川冻土研究所

集刊(第八号),科学出版社,1995.]

- [3] R. M. Lucas, A. R. Harrison. Snow Observation by Satellite: A Review [J]. *Remote Sensing Review*, 1990, 4(2): 285-348.
- [4] Bo Yanchen, Feng Xuezi. The Recent Progress of Snow Remote Sensing and its perspective [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1997, 12(2): 59-65. [柏延臣,冯学智.积雪遥感动态研究的现状及展望[J].遥感技术与应用,1997,12(2): 59-65.]
- [5] A. T. C. Chang, J. L. Foster, D. K. Hall. Nimbus-7 SMMR Derived Global Snow Cover Parameters [J]. *Annals of Glaciology*, 1987, 9:39-44.
- [6] Cao Meisheng, Li Peiji. Microwave Remote Sensing Monitoring of Snow in West China [J]. *Journal of Mountain Research*, 1994, 12: 230-234. [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: 230-234.]
- [7] J. L. Foster, A. T. C. Chang, D. K. Hall. Comparison of Snow Mass Estimates from a Prototype Passive Microwave Snow Algorithm, a Revised Algorithm and a Snow Depth Climatology [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62: 132-142.
- [8] D. K. Hall, M. Sturm. Passive Microwave Remote and In situ Measurements of Arctic and Subarctic Snow Cover in Alaska [J]. *Remote Sensing Environment*, 1991, 38: 161-172.
- [9] Ke Changqing, Li Peiji. Spatial and Temporal Characteristics of Snow Cover over the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53(3): 209-215. [柯长青,李培基.青藏高原积雪分布与变化特征[J].地理学报,1998,53(3): 209-215.]
- [10] A. T. C. Chang, A. Rango. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the AMSRE Snow Water Equivalent Algorithm [R]. NASA Internal Report, Version 3.0, 1999. (<http://wwwghcc.msfs.nasa.gov/AMSR/Snow-ATBD.html>).
- [11] Norman C. Grody, Alan N. Basist. Global Identification of Snow-cover Using SSM/I Measurements [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(1):237-249.
- [12] R. Armstrong, A. Rango. Snow Depth and Grain Size Relationships with Relevance for Passive Microwave Studies [J]. *Annals of Glaciology*, 1993, 17: 171-176.
- [13] A. T. C. Chang. Microwave Emission from Snow and Glacier Ice [J]. *Journal of Glaciology*, 1976, 16(24): 23-37.
- [14] D. K. Hall, A. T. C. Chang, J. L. Foster. Detection of the Depthhoar Layer in the Snow-pack of the Arctic Coastal Plain of Alaska, U.S.A. Using Satellite Data [J]. *Journal of Glaciology*, 1986, 32(110): 87-94.

## The Retrieval of Snow Depth in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau from Passive Microwave Remote Sensing Data and Its Results Assessment

BO Yan-chen<sup>1</sup>, FENG Xue-zhi<sup>2</sup>, LI Xin<sup>3</sup>, CHEN Xian-zhang<sup>3</sup>

(1. *Institute of Geographic Science and Resources, CAS, Beijing 100101, China*; 2. *Urban and Resources Department, Nanjing University, Nanjing 210093, China*; 3. *Cold & Arid Region Environmental and Engineering Research Institute Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

**Abstract:** Snow cover extension and snow depth information may be useful indicators of regional and global climate change and of basin-scale water storage in mountainous areas as well as snow disaster monitoring, forecasting and the loss assessment in pastoral areas. Thus, it is important to ensure that they are accurate and as free as possible of any known biases.

Though it is practical to get snow extension from the visible and infrared remotely sensed data such as NOAA-AVHRR, TM and the like, it is nearly impossible to get snow depth information from such data set. Passive microwave remotely sensed data such as SMMR and SSM/I make it possible to derive snow depth in a large-scale area. Some algorithms have been developed to retrieve the snow depth from SMMR and SSM/I data, but those algorithms didn't perform well in many studies.

In this paper, using a revised Chang's algorithm and SSM/I 37GHz and 19GHz horizontally polarized brightness temperature, we retrieved the snow depth distribution in Qinghai-Xizang (Tibet) plateau, assessed the results' accuracy, and analyzed their error sources. It showed that the revised Chang's algorithm described the general trend of snow depth of this area, in spite of overestimation in whole and large errors in local areas. The errors are mainly from the effects of the existence of frozen ground, depth-hoar, vegetation cover and the lacking of considering the effects of the liquid water content of snow and the changing of shape and grain size of snow. The coarse spatial resolution of SSM/I remotely sensed data makes the retrieved snow depth hard to compare with the ones from ground observation, thus, makes it difficult to evaluate the accuracy. Some suggestions for further investigation were put forward at last.

**Key words:** snow depth; passive microwave remote sensing; SSM/I data; results assessment