

星载被动微波资料(SSM/I)在2008年 南方冰雪灾害监测中的应用试验

李小龙^{1,2} 谷松岩² 刘 健²

(1. 北京大学物理学院, 北京 100871; 2. 国家卫星气象中心)

提 要: 2008年1月中旬至2月初,我国南方出现了罕见的大范围低温雨雪冰冻天气灾害。南方地区地面积雪的覆盖范围等灾害信息对于气象公共服务、决策服务都有着十分重要的意义。目前国内外开展的被动微波积雪研究,多关注高纬度、极地地区或高原地区的干雪状况,薄雪、湿雪的判识问题较少有人触及。而我国冰冻灾害期间,南方地区由于处于较低纬度带,昼夜温度在0℃上下起伏,雨、雪、雨夹雪天气的轮替,地面积雪恰恰多为湿雪、薄雪。积雪雪层由于液态水的存在将大大改变观测辐射信号,雪内少量液态水就能导致微波亮温值急剧上升。利用南方地区积雪冻融变化时微波亮温昼夜之间的差异变化,使用被动微波数据(DMSP-SSM/I)建立了对低纬度南方地区积雪监测的一种补充方法,结合其他积雪产品,可以获得更加完整的低纬度地区积雪分布信息。

关键词: 低温雨雪冰冻灾害 被动微波遥感 湿雪

Probe into the Application of Monitoring Wet Snow in South China in Heavy Snowstorm and Frost Disasters 2008 with Satellite Passive Microwave Data (SSM/I)

Li Xiaolong^{1,2} Gu Songyan² Liu Jian²

(1. School of Physics, Peking University, Beijing 100871; 2. National Satellite Meteorological Center)

Abstract: During the January to the early February in 2008, the southern parts of China had suffered from a wide range of heavy snowstorms and frost disasters, which were featured by wide area, intense, long duration and disaster consequences. The disaster information of the covered area of the ground snow is very important for public meteorological service, and decision-making. Currently, the studies of passive microwave monitoring snow carried by

European and American countries as well as China, are concentrated on the dry snow conditions in the area at higher latitudes, or in the polar regions. While there are few research focus on the thin snow, wet snow identification. Because the south part is located in the lower latitude, with the day and night temperature which fluctuates around 0°C during the snow-storm and frost disasters, the mixture of rain, snow, and sleet make the snow fall on the ground always wet. The existence of the liquid water in the snow layer could greatly change the radiation signal, and a little liquid water in the snow could cause a sharp rising of the microwave bright temperature. Based on the bright temperature difference between the day and night when the changes of the snow in freeze-thaw in the South China, more snow distribution information in the lower latitude could be available by using the passive microwave data (DMSP-SSM/I) to build a compensate way of monitoring the snow in the South China combined with other snow products.

Key Words: heavy snowstorm and frost disasters passive microwave remote sensing wet snow

引 言

2008 年 1 月中旬至 2 月初,我国南方出现了 50 年一遇(部分地区百年一遇)的大范围低温雨雪冰冻灾害天气过程^[1]。这次灾害具有范围广、强度大、持续时间长、灾害影响严重的特点,突破多项同期我国历史极值。冷空气在低空以东北或偏北路径侵入我国华中地区,冷空气垫楔入长江中下游地区的暖湿气团下,形成强烈的大气逆温层结,雨、雪、冻雨、冰粒等冰冻天气连绵不断。雨雪冰冻灾害造成的损失极为严重,对交通运输、能源供应、电力传输、农业及人民群众生活造成了严重影响和损失,受灾人口过亿。

目前,国内外在业务上开展积雪监测的途径主要有地面常规观测和卫星遥感监测两种。

地面常规观测是积雪监测的一种最直接有效的途径,遍布世界各地的气象、水文观测站进行常规积雪观测。但地面观测站点的分布密度十分不均匀,特别是在格林兰岛、南极洲以及欧亚、北美高纬度的北极地区缺乏观测数据。我国多积雪地区大都是广袤的高

原、山脉、荒漠、戈壁或原始森林覆盖,多为无人区,地面观测站点稀少。

随着空间科学技术的进步与发展,卫星遥感监测手段逐渐成为一种有效的积雪监测手段。卫星遥感能以相对较高的时空密度对全球的雪盖进行观测,不仅能比陆地常规观测更及时有效地获得大范围的积雪覆盖信息,而且有能力对积雪在一天内进行多次监测。目前常用的卫星遥感方法是利用光学遥感、被动微波遥感以及主动微波遥感。

1970 年代末,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 $0.3\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 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^[2],雪深反演公式如下:

$$SD = 1.59(Tb_{18H} - Tb_{37H}) \quad (1)$$

式中, SD 为雪深 (cm), Tb_{18H} 和 Tb_{37H} 是 SMMR 的 18 和 37GHz 的水平极化亮度温度数据。当使用 SSM/I 数据时,用 19GHz 代替 18GHz。算法在具体应用时,影响积雪精度的因子很多,如雪的密度、粒径、雪水含量等,所以某些地区的反演结果与实际相差

较大,还没有一个雪深反演算法可以在全球范围内普遍适用^[3]。很多学者在实际应用中都根据实际情况对它进行了修正。

国内学者1980年代就开始了微波测雪的研究。徐希孺提出了一个应用微波辐射计测定南极洲雪累计率的方法^[4]。李培基、曹梅盛、柏严臣、高峰等先后应用被动微波数据对我国西部以及高原地区的积雪进行了细致的研究,并提出了各自的雪深计算公式^[5-8]。陈爱军使用NOAA-16的AMSU资料研究北疆地区的雪盖监测方法^[9]。延昊对青海地区的积雪用MODIS和AMSR-E进行雪盖制图比较^[10]。孙之文等使用2003年11—12月AMSR-E亮温数据结合MODIS积雪监测产品,建立了适用于中国西部的反演公式^[11]。李晓静等提出适用于中国的积雪决策树判别方法^[12]。

目前大多数反演雪深(或SWE雪水当量)的算法都是基于卫星的一个观测时次资料中两种或多种频率波段的亮温之差,即把积雪深度(或SWE)与亮温梯度之间的关系描述为线性关系,在Chang的算法基础上发展的半理论、半经验算法。Chang的微波雪深反演算法以及在其基础上修正的其他算法在世界各地,特别是北半球的大范围雪深反演中得到广泛应用^[13-15]。国内微波测雪的算法多注重于中高纬度地区、青藏高原干雪的监测,基本原理都是建立微波亮温差—雪深(雪水当量)之间的统计回归关系:

$$SWE = A \times \Delta T_b + B$$

$$\text{或} \quad SD = A \times \Delta T_b + B \quad (2)$$

其中 ΔT_b 是高频通道与低频通道之间的垂直极化或水平极化的亮温差(微波亮温梯度), A, B 是系数,通过卫星观测和地面实测确定,在不同的区域和不同的积雪条件选取不同的值,是对Chang的式(1)的修定和本地化。

Tait考察了有无湿雪、霜、森林覆盖、复杂地形4种因素的16类情况,使用SSM/I

夜间轨道的亮温数据,结合美国中西部SNOTEL(积雪自动站)实测资料以及俄罗斯境内积雪数据,分别给出了其中14类情况下的SWE计算公式,主要利用19~37、19~85GHz高低频之间的亮温差,计算效果最好的是无森林覆盖、无复杂地形、无融雪、无霜的情况,计算结果与实测数据的相关系数达0.754;无森林覆盖的复杂地形,有融雪及霜的情况,相关系数最低,仅为0.221;在有森林覆盖的复杂地形下,同时有融雪及霜的影响,没有找到合适的方法计算SWE。这也说明了相比地形、植被而言,融雪和霜对于SWE的计算有着重要且十分复杂的影响^[16]。

实际应用中被动微波反演结果仍存在很多问题,如在高纬度地区积雪范围估计过大、雪深过深等,微波探测器与光学探测器相比空间分辨率过粗,监测结果误差较大。由于小于5cm的积雪发出的微波信号微弱,微波传感器存在无法监测浅雪区信息等问题^[17]。

2008年冰雪灾害期间,我国南方地区气温在-5~5℃,降雪和雨夹雪、降雨天气过程交替出现,地面积雪多为湿雪或薄雪。本文收集分析了目前的积雪产品(包括美国IMS、MSPPS、AMER-E积雪SWE产品以及卫星中心光学积雪产品),在反映南方地区的积雪覆盖信息上各有优劣:由于南方持续阴雨,云层持续不散,光学产品在冰雪灾害即将结束的2月初,当地出现晴空后,才逐渐捕捉到了部分地面积雪分布信息;微波积雪产品也未能完整地对方南地区的湿雪做到全面的监测,与地面实测相比,微波SWE反映的积雪信息偏少、位置偏北。

1 被动微波监测湿雪的原理

1.1 湿雪的微波特性

湿雪、干雪、再冻结雪在不同频率和极化方式下的微波辐射变化情况具有显著的差

异。在微波低频波段,干雪盖的发射主要受雪盖下面地表特性的影响。而在高频波段,由于雪颗粒的体散射起着重要作用,积雪辐射对雪水当量和雪颗粒大小很敏感。

当积雪开始融化时,由于冰和液态水在微波波段的介电常数差异很大,而观测信号主要来自近雪层表面,因而雪层发射信号将显著增强。积雪雪层由于液态水的存在将大大改变观测辐射信号。雪内百分之几的液态水就能导致亮温值急剧上升。这是由于积雪的液态水辐射改变了干雪辐射。湿雪的辐射特征与无雪地表相似:所有频率(1~100GHz)下的发射率超过 0.8。由于积雪融化,存在的液态水大大减弱了微波的穿透能力。因此,湿雪的辐射特征类似黑体,尤其是 V 极化。Schanna 等得到的平均亮温光谱表明,随频率增加干雪和再冻结雪的亮温减小,而春季湿雪的亮温值随频率增加而增加。湿雪的光谱特征随频率增加而略有增加,是由于频率增加地表粗糙度效应^[18]。

1.2 湿雪的存在对目前业务微波 SWE 产品的影响

本文在分析所收集的微波 SWE 资料时,发现同一地点 SWE 数据在短时间内有很大的起伏变化,白天和夜间的轨道反演出的积雪数据有很大差异。

图 1(见彩页)是 2 月 6—7 日 NOAA-18 气象卫星 AMSU 微波资料的积雪产品。两天内 NOAA-18 共 4 次过境中国东部地区,图中在中高纬度地区(俄罗斯、蒙古以及我国东北地区)SWE 信息基本一致。而河套地区晚上的 SWE 明显大于白天,其中陕西中北部、宁夏、内蒙古南部等地夜间 SWE 超过 50mm(图中黄色区域),白天该地区的 SWE 明显减小;安徽、江苏南部、浙江北部的积雪则出现了“无积雪”→“出现积雪”→“溶化消失”→“再积雪”的异常现象。而当天的地面

没有降雪天气现象发生。

经分析,“消失”→“再出现”的情形是由于湿雪造成的。当昼夜温度在 0℃ 上下,地面积雪出现白天溶化、夜间再冻结的现象。在微波监测的角度上,湿雪更接近黑体,积雪中少量水分的存在大大改变了雪微波辐射特性,更多的微波能量被吸收,微波亮温升高;夜间湿雪再次冻结时,微波亮温急剧降低。避免湿雪在冻融状态下对于反演的影响,大多数算法只选择夜间轨道做反演研究,目前微波反演的算法没有考虑白天和夜间的轨道差异,把夜间轨道推导出的相关算法、参数应用到白天时,无法反演融雪状况。

Derkson 研究了卫星过境时间对于微波遥感雪盖参数的影响,他使用冬季 5 天平均的 SWE 数据(1992 年 12 月至 1993 年 2 月、1994 年 12 月至 1995 年 2 月),分析北美草原地区严冬季节积雪早晚变化情况,得到与本文相近的分析结果:早晚轨道对于积雪监测的差异变化是由于融雪现象的出现造成^[19]。

2 被动微波数据监测南方积雪的试验

关于用业务监测湿雪或融雪的研究国外的文献不多,更多的研究关注于极地地区冰雪盖融化时间和范围的提取,以及极地冰雪融化时间的年际变化。Walker 利用 1990—1991 年、1991—1992 年冬季的 SSM/I 亮温数据,研究了加拿大西部草原地区的湿雪在 37GHz 垂直、水平极化上的差异,当 37GHz 垂直、水平极化亮温差超过 10K 定义为湿雪信息^[20]。

Waleed 等在研究格林兰岛冰雪变化时,提出融化指标^[21-22]:

$$XPGR = (Tb_{19H} - Tb_{37V}) / (Tb_{19H} + Tb_{37V}) \quad (3)$$

其中 Tb_{19H} , Tb_{37V} 是微波亮温, $XPGR = -0.025$ 作为冰雪冻融的阈值。

Ramage 等在研究阿拉斯加地区冰川年际变化时,提出监测冰雪融化指标 DAV(Diurnal Amplitude Variations)^[23]:

$$DAV = Tb_{升轨} - Tb_{降轨},$$

$$|DAV| > 10K \text{ 且 } Tb > 246K \quad (4)$$

其中 Tb 是 37GHz 垂直极化亮温,满足式(4)条件是判识为冰雪融化的信号。

Takala 等提出 CDA 作为森林地区雪融化开始的指标^[24]:

$$Tb_{37V} - Tb_{17V} > -21K,$$

$$\text{且 } Tb_{37H} - Tb_{17V} < -10K,$$

$$\text{且 } 268K < T_{sur} < 278K \quad (5)$$

其中 Tb_{37V} , Tb_{17V} , Tb_{37H} 是 17、37GHz 垂直或水平极化亮温(亮温值是一天内 2 次卫星观测的平均值), T_{sur} 为地面气温,满足式(5)条件是判识为冰雪开始融化的信号。

本文在使用 Walker^[20] 的判据鉴定湿雪信息时,发现这一指标在我国并不适用。冷的戈壁、沙漠以及水体极化差也都超过了 10K(图 2,见彩页),特别是长江中下游地区河流、湖泊密布,江淮地区、湖北东部、洞庭湖、鄱阳湖一带 37GHz 微波亮温极化差一直在 10K 以上。微波分辨率低,导致可能存在的湿雪信号也无法与水体信息区分。

此外,为了分析微波亮温、气温、天气现象、积雪厚度、降水量的关系,本文整理了冰雪灾害期间中国中东部地区有观测积雪雪深的站点常规气象数据,以及站点所在位置 SSM/I 19GHz、37GHz、85GHz 水平极化、垂直极化亮温值。F-14、F-13、F-15 三颗卫星经过我国上空的时间窗口大致为上午 4:00—7:30,晚上 7:00—10:30(北京时)。F-14 首先过境,然后是 F-13,接着是 F-15。由于三颗卫星过境时间十分紧凑,前后不超过 3 小时,其观测可以相互补充,保证了地球上同一地点(特别是低纬度地区)的覆盖率。三颗卫星依次顺序观测相同的地点,数据由于几乎是在同时观测记录,并且保证每天同一地点几乎都有大于 2 次观测,这对研究中低纬度提供了支持。也使研究同一地点卫星亮温数

据高时空分辨率的变化成为可能。

以武汉为例,该市紧邻长江,湖泊水网密布。由图 3(见彩页)可以看到,由于大量水体的影响,地面在有无积雪覆盖的情况下,37GHz 极化亮温差基本都在 10K 以上,以此为判据不能有效区分我国南方地区的湿雪信息。37GHz 极化亮温差气象要素合成图说明:图中上半部分彩色圆点是卫星观测的微波亮温值,不同的卫星以及过境时间都做了区分(DMSP 国防卫星 F-13、F-14、F-15, am:清晨, pm:傍晚);图像下半部分中黑色直方图代表当日降水量(单位:mm);灰色直方图代表地面实测雪深(单位:cm);紫色曲线是 3 小时一次的地面气温;黄色“×”表示天气现象,把每 3 小时一次地面观测得到的天气现象归类为五种,从液态到固态依次为:雨、冻雨、雨夹雪、冰粒、雪(标值依次为 8、10、12、14、16)。

图 4(见彩页)是江淮、江南地区的 4 个站点的 37GHz 亮温、气象要素合成图,1 月中下旬持续的雨雪天气影响了微波对地面积雪的探测,厚重的云层、雨雪天气影响了微波仪器对于地面积雪的探测。当降水天气间隙或天气好转后,地面昼夜气温逐渐回升并在 0℃徘徊,此时 37GHz 垂直极化亮温的昼夜亮温差超过 10K,有时甚至超过 25K,地面积雪在融化消失后,昼夜亮温差一般在 5K 左右。地面温度昼夜变化较大时,如图 4d 中 2 月 12 日后郴州气温差超过 15℃,导致微波亮度温度日变化也超过了 10K。而北方地区的站点则很少存在这样现象(图略)。

从前面的讨论可以看到:江南地区处于中低纬度地区,地面气温在 0℃左右,这一地区的积雪处于反复冻融的状态,昼夜温度在 0℃上下振荡,地面积雪白天溶化,夜间再冻结。在微波监测的角度上,湿雪更接近黑体,积雪中少量水分的存在就大大改变了雪微波辐射特性,更多的微波能量被吸收,该地区的微波亮温升高;但夜间湿雪再次冻结时,微波亮温急剧降低。0℃左右温度的小幅变化,就

会导致积雪地区微波亮温巨大差异。利用南方积雪反复冻融现象导致的微波亮温一天内的大幅振荡,是可以提取南方地区积雪信号的。

参考 Ramage 等^[23]的冰雪融化指标,本文提出对于我国南方地区积雪的一个判识指标:

$$\Delta Tb = Tb_{37V\text{夜间}} - Tb_{37V\text{昼}}, \Delta Tb < -10\text{K}, \\ \text{且 } T < 2^{\circ}\text{C}, \Delta T < 10^{\circ}\text{C} \quad (16)$$

其中, $Tb_{37V\text{夜间}}$, $Tb_{37V\text{昼}}$ 分别是陆地 37GHz 夜间和白天的垂直极化亮度温度(K), T 为地面平均气温($^{\circ}\text{C}$), ΔT 为气温日较差($^{\circ}\text{C}$)。

下面列出使用该判识指标监测的有反复冻融状态的南方积雪覆盖图,所监测的积雪范围可以成为目前其他积雪产品的有效补充信息,能改善对于南方雪灾地区积雪的监测。

图 5(见彩页)从监测积雪的冻融变化角度,给出了灾害期间我国南方地区的积雪覆盖信息。图 5a、5b 监测到了 1 月 14 日、24 日黄淮地区的积雪情况,江南地区由于持续雨雪天气,微波无法穿透,直到 1 月底天气转好之后,地面积雪信息逐渐被卫星监测到。图 5c 中可以看到湖南南部的郴州地区有积雪覆盖,而湖南中北部至长江下游地区由于高空槽云系的覆盖,云层密实、并伴有较强的雨雪天气,只监测到郴州地区的积雪范围。1 月 19 日地面有冻融变化的积雪覆盖在湖南中北部、湖北东部、河南东南部一带(图 5d)。2 月 2 日微波监测到的积雪冻融区主要在河南东南部至湖北东部以及贵州、湖南西部地区(图 5e),随着天气转好,地面积雪发生冻融变化的地区开始增加,2 月 3、4 日可以看到湖南全境、贵州东部以及江淮等地区有大范围的积雪信号被监测到(图 5f、5g)。2 月 12 日江南大部白天最高气温逐渐回升到 5~7 $^{\circ}\text{C}$,南方地区的积雪迅速消失,卫星监测显示当日仅在湖南南部局部山区、安徽中部有小范围的积雪区(图 5h)。

3 结论

目前应用到实际业务的积雪产品被动微波判识、反演算法,都是基于同一时次轨道的微波通道亮温差异进行计算,参数选择多取自中高纬度站点实测干雪雪深和微波量梯度的统计回归试验。由于雪层中水分含量的差异,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,对不同类的积雪给以不同的反演方法是必要的。

中低纬度湿雪的监测十分困难和复杂。当积雪开始融化时,由于干雪和液态水在微波波段的介电常数差异很大,观测信号主要来自近雪层表面,造成雪层发射信号显著增强。积雪雪层由于液态水的存在大大改变观测辐射信号。雪内百分之几的液态水就能导致亮温值急剧上升。由于积雪的液态水辐射改变了干雪辐射。湿雪的辐射特征与无雪地表相似:所有频率(1~100GHz)下的发射率超过 0.8。由于积雪融化,存在的液态水大大减弱了微波的穿透能力。因此,湿雪的辐射特征类似黑体,随频率增加干雪和再冻结雪的亮温减小。本文利用南方积雪昼夜反复冻融的特点,根据积雪随时间的微波辐射变化信号提取积雪范围。这成为对其他积雪产品十分有效的参考补充,使得地面积雪信息的判识更加贴近于真实。

在收集分析几类积雪产品之后,发现这些产品在反映南方地区雪灾的能力各有优缺点,只有综合光学、微波等监测手段的优点,才能得到南方低纬度地区较为完整的积雪分布信息。

致谢:感谢中国科学院大气物理研究所吕达仁老师提供了冰雪灾害期间的 Mspps、SSM/I 轨道数据,并对研究给予宝贵的建议。

参考文献

- [1] 郑国光. 我国正在经历一场历史罕见低温雨雪冰冻灾害[N]. 人民日报, 2008-02-04(8).
- [2] Chang A T C, Foster J L, Hall D K. Nimbus-7 SMMR derived global snow cover parameters[J]. *Annals of Glaciology*, 1987, 9: 39-44.
- [3] Foster J L, Chang A T C, Hall D K. 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.
- [4] 徐希孺. 微波遥感测定南极洲雪积累率[J]. *地理学报*, 1984, 39(2): 194-205.
- [5] 李培基, 曹梅盛, Chang A T, 等. 中国西部 SMMR 积雪图的修正[J]. *冰川冻土*, 1992, 14(4): 366-374.
- [6] 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): 230-234.
- [7] 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.
- [8] 高峰, 李新, Armstrong R L, 等. 被动微波遥感在青藏高原积雪业务监测中的初步应用[J]. *遥感技术与应用*, 2003, 18(6): 360-363.
- [9] 陈爱军, 刘玉洁, 杜秉玉. AMSU 资料监测新疆雪盖范围的初步应用[J]. *南京气象学院学报*, 2003, 26(6): 759-767.
- [10] 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.
- [11] 孙之文, 施建成, 蒋玲梅, 等. 被动微波遥感反演中国西部地区雪深、雪水当量算法初步研究(英文)[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(12): 1363-1369.
- [12] 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[J]. *应用气象学报*, 2007, 18(1): 12-20.
- [13] Kelly, Richard E J, Chang A T C, et al. A prototype AMSR-E global snow area and snow depth algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(2): 230-242.
- [14] Lora S. Koenig, Richard R. Forster. Evaluation of passive microwave snow water equivalent algorithms in the depth hoar-dominated snowpack of the Kuparuk River Watershed, Alaska, USA[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93: 511-527.
- [15] Sylvain Biancamaria, Nelly M. Mognard, Aaron Boone, et al. A satellite snow depth multi-year average derived from SSM/I for the high latitude regions[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 2257-2568.
- [16] Tait A B. Estimate of snow water equivalent using passive microwave radiation data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 64: 286-291.
- [17] Chang A T C et al. Satellite sensor estimates of north hemisphere snow volume. *Int. J. Remote Sensing*, 1990, 11(1): 167-171.
- [18] Schanna E, C Matzler and Kunzi K. Microwave remote sensing of snow cover[J]. *Int. J Remote Sensing*, 1983, 4: 149-158.
- [19] Derksen C, LeDrew E, Walker A, et al. Influence of sensor overpass time on passive microwave-derived snow cover parameters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 71: 297-308.
- [20] Walker A E, Goodison B E. Discrimination of a wet snow cover using passive microwave satellite data[J]. *Annals of Glaciology*, 1993, 17: 307-311.
- [21] Waleed Abdalafi, Konrad Steffen. Passive microwave-derived snow melt regions on the Greenland ice sheet[J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(7): 787-790.
- [22] Waleed Abdalafi, Konrad Steffen. Snowmelt on the Greenland ice sheet as derived from passive microwave satellite data[J]. *Journal of Climate*, 1997, 10: 165-175.
- [23] Ramage J M and Isacks B L. Interannual variations of snowmelt and refreeze timing in Southeast Alaskan ice-shields[J]. *USA. Journal of Glaciology*, 2003, 49: 102-116.
- [24] Takla M, Pulliainen J, Huttunen M, et al. Estimation of the beginning of snow melt period using SSM/I data. In *Proceedings of IEEE 2003 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, (IGARSS'03)*, 21-25 July 2003, Toulouse, France.

李小龙等：星载被动微波资料(SSM/I)在2008年南方 冰雪灾害监测中的应用试验

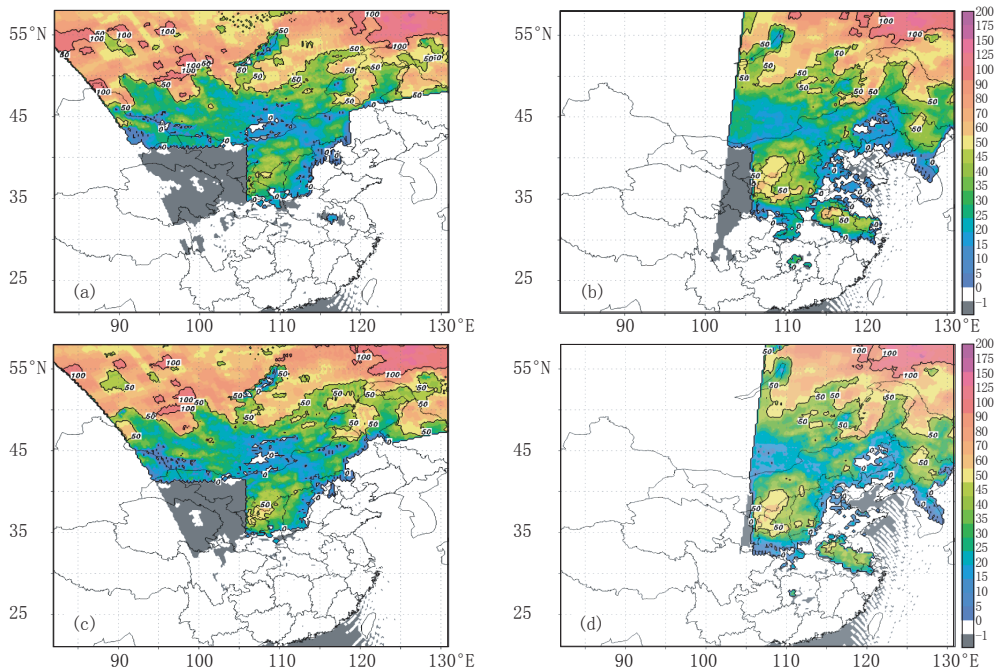


图 1 2008年2月6日、7日NOAA-18雪水当量图

(a) 2月6日午间; (b) 2月6日夜间; (c) 2月7日午间; (d) 2月7日夜间 (单位: mm)

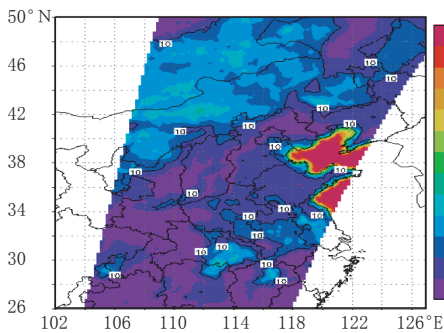


图 2 2008年1月31日5:30(北京时间, DMSP/F-14卫星)
37GHz微波亮温极化差(Tb37V-T637H, 单位: K)

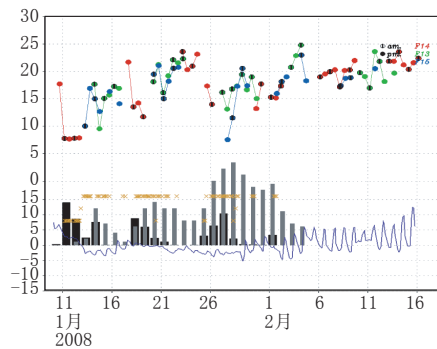


图 3 武汉37GHz微波亮温极化差气象要素合成图

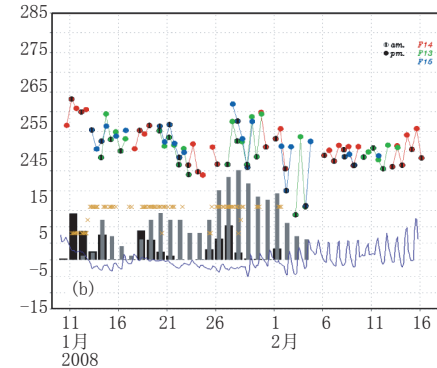
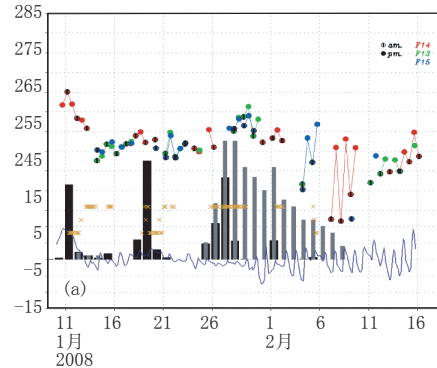


图 4 南京(a)、武汉(b)37GHz亮温、气象要素合成图

李小龙等：星载被动微波资料(SSM/I)在2008年南方 冰雪灾害监测中的应用试验

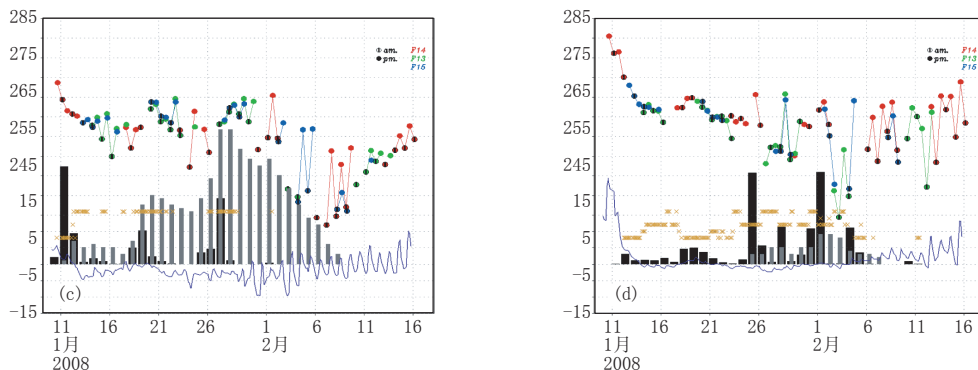


图 4 固始(c)、郴州(d) 37GHz亮温、气象要素合成图

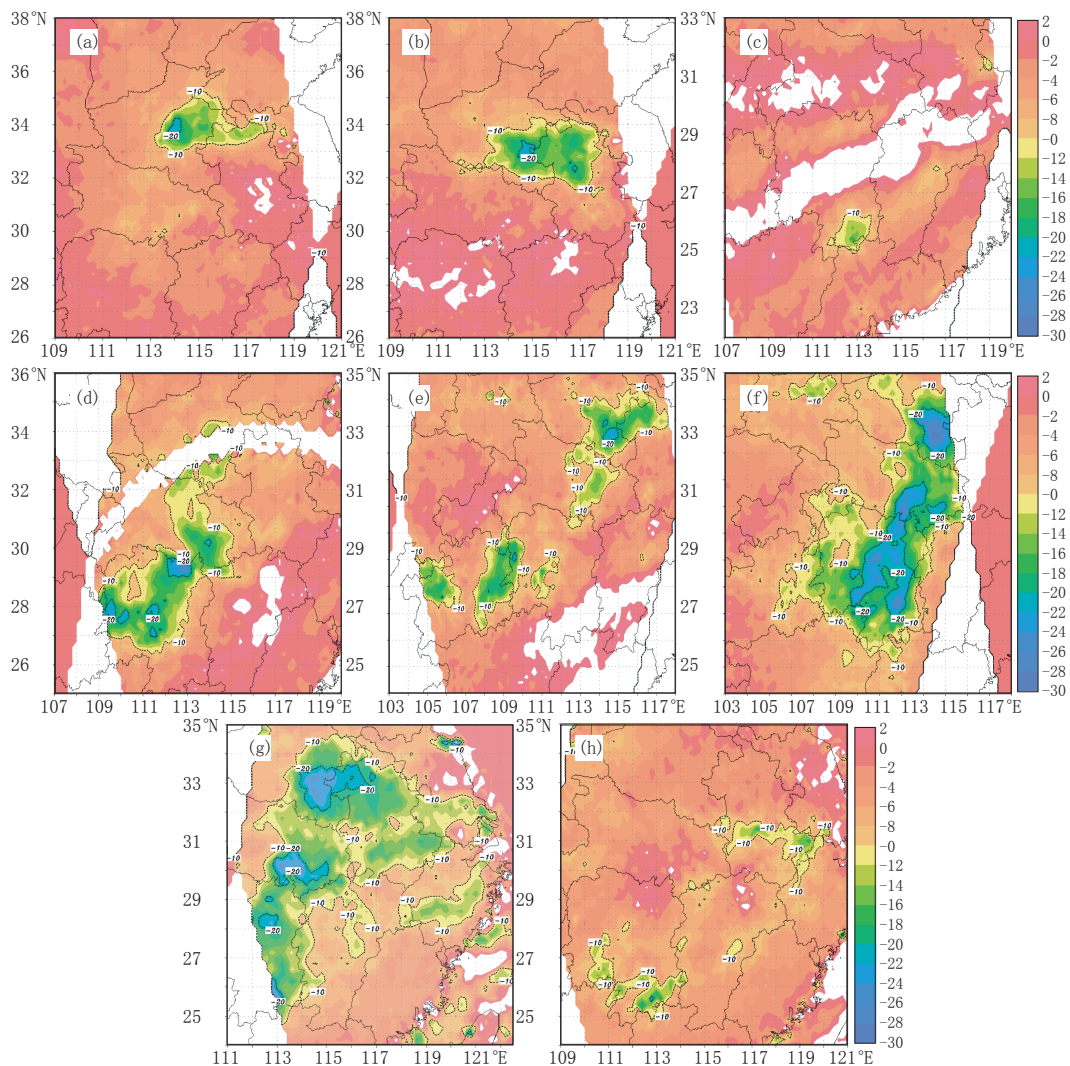


图 5 2008年1月14日至2月12日南方地区积雪监测图

(a) 1月14日DMSP/F-13; (b) 1月24日DMSP/F-14; (c) 1月28日DMSP/F-13;

(d) 1月29日DMSP/F-13; (e) 2月2日DMSP/F-15; (f) 2月3日DMSP/F-13;

(g) 2月4日DMSP/F-15; (h) 2月12日DMSP/F-13 (低于-10 K 范围为湿雪信息, 不含海岸线、水体)