

# 怀来遥感综合试验站积雪冻融循环过程观测数据集

蒋玲梅<sup>1\*</sup>, 程久全<sup>1</sup>, 赵少杰<sup>2</sup>, 杨建卫<sup>1</sup>

1. 遥感科学国家重点实验室, 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875;

2. 北京师范大学地理科学学部资源学院, 北京 100875

**摘要:** 积雪冻融循环监测是陆表水文过程和积雪灾害监测研究的重要方面。该观测于 2012 年 11 月 7 日至 27 日, 利用车载多频率 (6.925、10.65、18.7、36.5 GHz) 微波辐射计 TMMR (Truck-Mounted Multi-frequency Radiometer) 开展了积雪冻融循环过程微波辐射观测实验。实验地点位于河北省张家口市怀来县的遥感试验站 (40°20'N, 115°47'E)。该数据集包括: 四个频率 6.925、10.65、18.7、36.5 GHz 下的多角度亮温、积雪深度、积雪配套参数以及环境照片。

**关键词:** 积雪; 冻融过程; 微波辐射观测; 亮温

**DOI:** 10.3974/geodp.2018.01.15

## 1 前言

积雪作为全球冰冻圈的重要组成部分, 在水文和气候研究中扮演重要角色。监测积雪的冻融循环对于全球气候变化、水资源管理、雪灾预防等研究都具有关键作用<sup>[1]</sup>。被动微波遥感具有全天时全天候的工作特点, 且时间分辨率高, 是监测大尺度积雪参数的有效手段之一。

被动微波遥感监测积雪特征的主要频率有 6.925、10.65、18.7、36.5、89 GHz 等。对于干雪而言, 在较低频率如 6.925、10.65、18.7 GHz 等, 由于波长较长, 亮温主要受下垫面的介电特性和粗糙度特性的影响; 而在更高频率如 36.5 GHz, 由于波长短, 微波辐射受到积雪颗粒的散射作用较强, 亮温对雪深和雪粒径更为敏感<sup>[2]</sup>。除此之外, 积雪覆盖地表的微波辐射亮温还受密度、温度、湿度以及下垫面土壤特征的共同影响。而积雪冻融循环过程中会伴随着积雪参数、土壤参数和大气参数的变化, 因此会影响积雪辐射亮温。例如当积雪开始融化时, 融化产生的液态水增强了积雪的吸收和再辐射, 从而使得积雪亮温显著增强<sup>[3]</sup>。当温度降低, 积雪发生再冻结, 液态水的减少和温度的降低使得亮温再次下降<sup>[3]</sup>。为了更准确地表达冻融循环, 本文中干雪也称为冻结雪, 湿雪也称为融化雪。本文采集的积雪冻融循环过程的微波辐射观测实验数据<sup>[4]</sup>, 有助于准确地表征积雪冻融循环过程中参数的变化, 提高积雪辐射模型的精度, 对卫星遥感反演积雪参数等方面研究具有重要意义。

收稿日期: 2018-01-16; 修订日期: 2018-03-16; 出版日期: 2018-03-25

基金项目: 国家自然科学基金 (41171260, 41671334)

\*通讯作者: 蒋玲梅 L-6099-2016, 北京师范大学, jiang@bnu.edu.cn

数据引用方式: [1] 蒋玲梅, 程久全, 赵少杰等. 怀来遥感综合试验站积雪冻融循环过程观测数据集[J]. 全球变化数据学报, 2018, 2(1): 91-98. DOI: 10.3974/geodp.2018.01.15.

[2] 蒋玲梅, 程久全, 赵少杰. 怀来遥感试验站积雪冻融过程验证数据集[DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2016. DOI: 10.3974/geodb.2016.02.11.V1.

2 数据集元数据简介

怀来遥感试验站积雪冻融过程验证数据集<sup>[4]</sup>名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 怀来遥感试验站积雪冻融过程验证数据集元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	怀来遥感试验站积雪冻融过程验证数据集
数据集短名	MicrowaveSnowValidationDataHuailai2012
作者信息	蒋玲梅 L-6099-2016, 北京师范大学, jiang@bnu.edu.cn 程久全 L-5763-2016, 北京师范大学, 462692369@qq.com 赵少杰 D-8048-2013, 北京师范大学, shaojie.zhao@bnu.edu.cn 杨建卫 E-8426-2018, 北京师范大学, stu_yangjianwei@163.com
地理区域	河北省张家口市怀来县的遥感试验站 (40°20'N, 115°47'E)
数据年代	2012 年 11 月 7 日-11 月 27 日
数据格式	.xls, .jpg
数据量	4.1 MB
数据集组成	包括四个频率 6.925、10.65、18.7、36.5 GHz 下的多角度亮温, 积雪深度和积雪配套参数数据。数据集含一个 Excel 表格, 共 4.1 MB
基金项目	国家自然科学基金 (41171260, 41671334)
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a>
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据(中英文)、实体数据(中英文)和通过《全球变化数据学报》(中英文)发表的数据论文。其共享政策如下: (1)“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放, 用户免费浏览、免费下载; (2)最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源; (3)增值服务用户或以任何形式散发和传播(包括通过计算机服务器)“数据”的用户需要与《全球变化数据学报》(中英文)编辑部签署书面协议, 获得许可; (4)摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10%引用原则, 即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%, 同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 <sup>[5]</sup>

3 数据采集过程和处理方法

3.1 试验地点

于 2012 年 11 月 7 日至 27 日, 利用车载多频率微波辐射计 TMMR 开展了积雪冻融过程微波辐射观测实验。实验地点位于河北省张家口市怀来县的遥感试验站 (40°20'N, 115°47'E)。该站隶属于科学院特殊环境网络, 所属区域具有华北平原和华北平原向蒙古高原过渡的双重生态地理特征。试验站周边 10 公里范围内, 地表类型丰富, 有农田、水域、山地、草场和湿地滩涂。试验观测点下垫面是被积雪覆盖的农田, 存在东西向的垄结构。

3.2 试验仪器

(1) 微波辐射计观测系统

车载多频率微波辐射计 TMMR (Truck-Mounted Multi-frequency Radiometer) 是由德国 RPG (Radiometer Physics GmbH) 公司研制 (图 1), 于 2007 年底投入使用, 具备多频率

双极化多角度的观测能力（表 2）。实验中所采用的微波辐射计系统由 4 部分组成：4 频段双极化微波辐射计，液压升降平台，载运车辆和供电系统。辐射计 4 个频段天线中心频率分别是 6.925、10.65、18.7、36.5 GHz，带宽均为 400 MHz，半功率波束宽度分别为 6.85°、6.11°、10.25°、10.25°。经过校准，亮度温度的绝对精度在 1 K 以内<sup>[6]</sup>。辐射计 4 套天线并排置于云台顶端的支架上，云台底端固定于液压升降平台顶部，升降平台底座固定在卡车车厢底部。平台升降和天线旋转、俯仰以及数据采集由遥控和计算机控制。借助旋转和俯仰，辐射计能进行 0–360°方位角和–90°–90°入射角的观测。

表 2 车载微波辐射计参数

频率（GHz）	极化方式	半波束宽度	带宽	定标精度	入射角	方位角
6.925	H、V	6.85°	400 MHz	1 K	–90°–90°	0°–360°
10.65	H、V	6.11°				
18.7	H、V	10.25°				
36.5	H、V	10.25°				

（2）雪特性分析仪

雪特性分析仪通过电磁法测量积雪的共振频率、衰减度和 3 dB 带宽，从而精确地计算积雪的介电常数，并通过半经验公式计算雪密度和雪湿度。共振频率的测量范围是 500–900 MHz。介电常数的测量范围是 1–2.9；介电损耗的测量范围是 0–0.15；雪密度的测量范围是 0–0.6 g/cm<sup>3</sup>；雪湿度的测量范围是 0–10%。

（3）智能数据记录仪

智能数据记录仪有三个温度测量通道和一个土壤湿度测量通道，能设定时间间隔自动记录温度和湿度的测量值。温度和水份传感器已经过定标，能够保证测量精度。

3.3 数据采集

数据集包括积雪微波辐射亮温和积雪配套参数等<sup>[6]</sup>。

（1）积雪冻融过程微波辐射亮温

实验前选择积雪较厚的一块区域作为辐射计的观测视场。辐射计升高至离地面 4.7 m 的高度，以固定入射角 50°对积雪进行观测（图 1）。整个实验从 11 月 7 日持续到 27 日。实验中，辐射计定期进行天空观测，获取大气的下行辐射亮温。



图 1 辐射计观测积雪场景及仪器示意图

(2) 积雪配套参数采集

辐射计观测的同时,在视场周围选择与视场内的积雪状况相似的地区进行地面参数的同步测量。测量的地面参数包括:剖面雪深、雪粒径、湿度和温度等。除了上面的积雪和土壤参数,还记录相关的积雪垂直分层特征和下垫面条件等信息。利用 JM624u 铂金电阻温度计(精度为 0.1 ℃)测量雪表面的空气温度和剖面不同位置的雪温度。使用直尺测量剖面雪深。人工观察并记录剖面的分层和地面条件。利用手持显微镜观测剖面不同位置的雪粒径,实验中没有观测冰层的粒径。雪密度和雪湿度剖面由雪分析仪测量。在采样区域,组合使用多个智能数据记录仪测量雪温度剖面和下垫面土壤湿度。

表 3 采集参数及方法

参数	方法	精度
雪深	直尺	1 mm
温度	JM624u 铂金电阻温度计 智能数据记录仪	0.1 ℃
雪粒径	手持显微镜	0.1 mm
雪密度	Snowfork 雪特性分析仪	0.01 g/cm <sup>3</sup>
雪湿度		0.01%

3.4 数据处理

首先对亮温数据异常值进行剔除(大于 280 K,小于 150 K),其次由于微波辐射计的积分时间为毫秒级,可通过 Matlab 程序对采集的亮温数据进行平均,间隔为 5 min。由于雨雪和大风天气原因,某些时间段内没有进行亮温观测,因此,亮温数据有间断。多频段亮温数据最终以 Excel 格式存储。

雪深数据通过人工用直尺测量,每天采集多个数据,然后取平均值,最终以 Excel 格式存储,以天为单位。

雪密度和湿度通过雪特性分析仪电磁法测量积雪的共振频率、衰减度和 3 dB 带宽,从而精确地计算积雪的介电常数,并通过半经验公式计算雪密度和雪湿度。每天测量多组数据取平均值,并以 Excel 格式存储,以天为单位。

雪温、气温和土壤温度以智能数据记录仪为标准,然后对应辐射计亮温采集时间取平均值,时间间隔为 5 min 并最终 Excel 格式存储。

3.5 数据集生成技术路线

积雪冻融循环验证数据集研发流程如图 2 所示:(1)首先对积雪辐射亮温数据和配套参数(雪深、雪粒径、密度、温度、湿度)等进行质量控制和筛选;(2)然后对 HUT 模型和数据集进行交叉验证;(3)最后针对合格数据进行存储,生成验证数据集。

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

数据集包括表格文件(.xls)和图

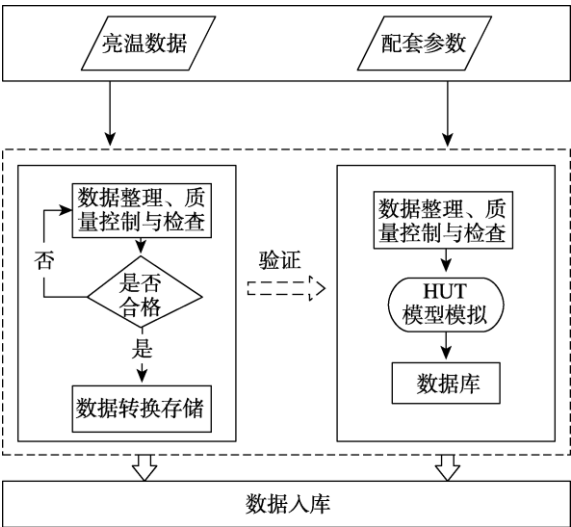


图 2 数据集生成技术路线图

片文件 (.jpg)。表格文件包括时间序列的亮温、雪深、雪粒径、温度和湿度等；图片文件包括场景、仪器和数据展示等。

4.2 数据结果及分析

4.2.1 辐射计亮温数据及变化分析

本研究以亮温达到一次最大值和一次最小值为一个冻融循环。图 3 显示了与积雪地面参数观测时间对应的 6.925、10.65、18.7、36.5 GHz 的 V 极化亮温。辐射计观测的亮温呈现一定的波动，这与积雪温度和雪深存在一定的关系。一般来说，频率越高，积雪越深，则亮温越低。

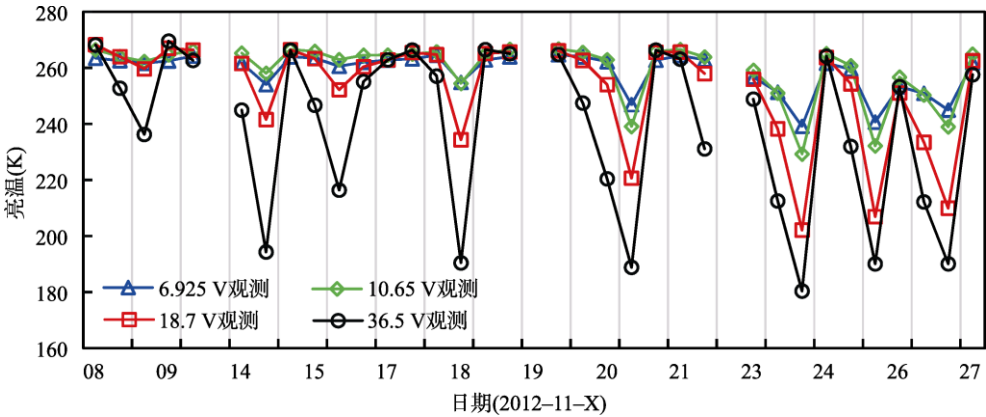


图 3 11 月 7-27 日积雪参数观测对应时刻 6.925、10.65、18.7、36.5 GHz 的 V 极化亮温

4.2.2 积雪参数变化与亮温的关系

图 4 描述了铂电阻温度计测量的平均雪层温度和智能数据记录仪测量的雪面温度变化。除了 11 月 8 日 22:00 和 11 月 27 日 17:45 雪面温度比平均雪层温度先达到最低值外，两者的变化趋势相同，前者的变化剧烈而后者的变化平缓。当积雪融化时，平均雪层温度为 0℃ 左右，当积雪冻结时平均雪层温度在 0℃ 以下，平均值最低 -10.9℃。

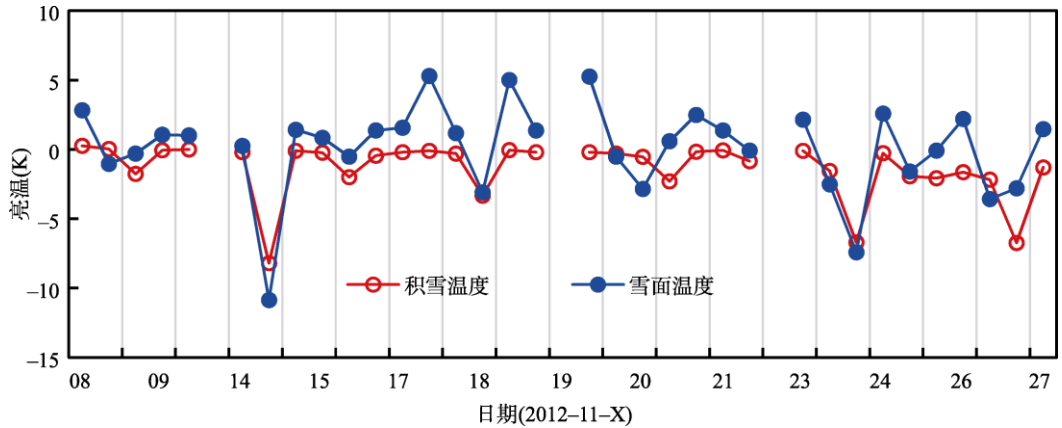


图 4 11 月 7-27 日平均雪层温度和雪面温度的变化

图 5 中描述了时间序列雪深变化，随着积雪不断的冻结和融化，雪深整体呈现下降的趋势。4 个频率 V 极化亮温在积雪融化时的最高值稍低于 260 K，其余在积雪融化时的最高值均超过 260 K。与其他频率相比，36.5 GHz 亮温在积雪开始融化时最先达到最大值，接着是 18.7 GHz；同时在积雪开始冻结时 36.5 GHz 亮温值最先开始下降，18.7 GHz 随后。36.5、18.7 GHz 频率下的亮温对积雪冻融循环很敏感，在 V 极化下亮温的变化分别可达 80 K 和 60 K。通过以上分析，发现亮温变化趋势与温度、雪深变化存在合理的解释。

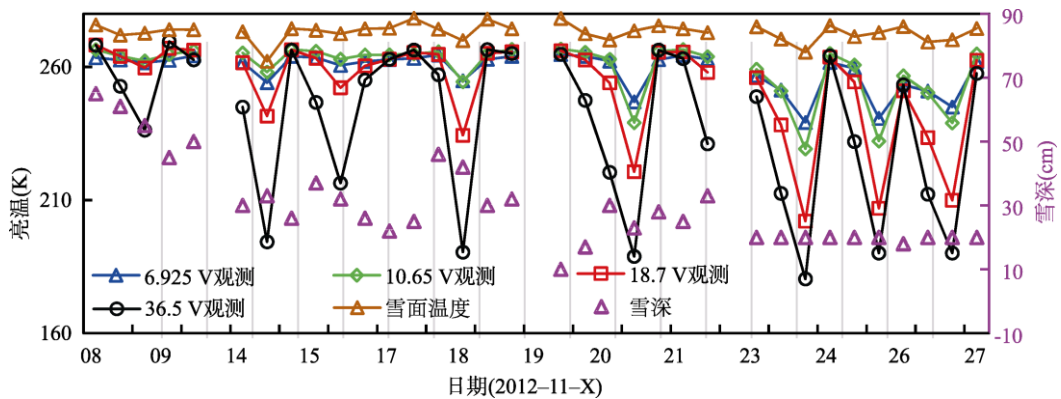


图 5 11 月 7-27 日 6.925、10.65、18.7、36.5 GHz 的 V 极化亮温、雪面温度和雪深时间序列变化

图 6 显示雪特性分析仪测量的雪湿度剖面平均值的时间变化。从图中看出，由于早晨 7:00-10:00 雪层温度最低，积雪处于冻结最大状态，雪湿度最低。雪湿度在 11:00-16:00 之间最高，平均值最高超过 6%。若将积雪按湿度分为表层冻结雪和底层融化雪，由于底层是融化的，所以平均雪湿度仍然大于零。但是由于上层冻结雪的体散射，36.5 GHz 亮温也会逐渐降低，如 11 月 20 日 17:00、19:00 和 21 日 18:10。

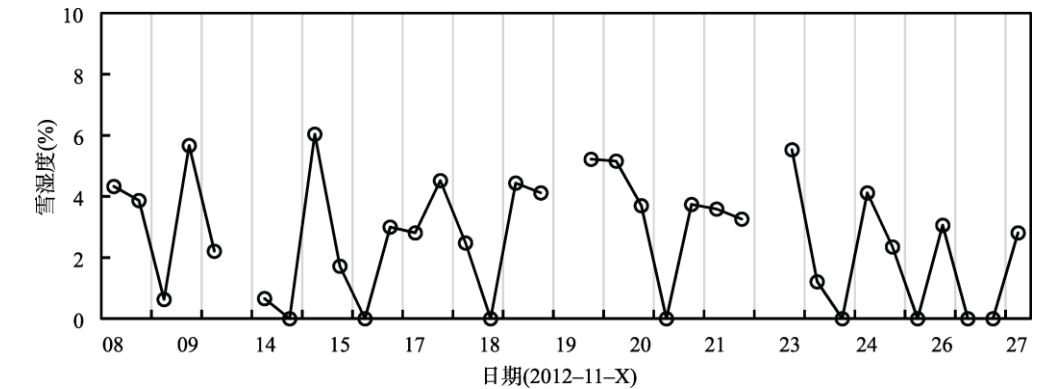


图 6 11 月 7-27 日平均雪湿度的变化

4.3 针对 HUT 模型的验证

图 7(a)和(b)分别展示了 18.7 GHz 和 36.5 GHz 两个频率下的 V 极化观测的亮温和 HUT 模型<sup>[7-8]</sup>模拟亮温的时间序列图。通过模型模拟前后的亮温相关系数和均方根误差如表 3，表明：V 极化的效果优于 H 极化；多层模型模拟的效果更好，18.7、36.5 GHz 在 V 极化的

相关系数均为 0.97，RMSE 分别为 7 K 和 12.4 K（表 4）。

表 4 HUT 单层和多层模型模拟的积雪亮温与观测亮温比较

HUT 模型	评价指标	18.7 V	18.7 H	36.5 V	36.5 H
单层模型	$R$ (相关系数)	0.8	0.74	0.81	0.81
	RMSE (K)	16.7	19.6	28.1	26.7
双层模型	$R$ (相关系数)	0.97	0.88	0.97	0.91
	RMSE (K)	7	11.3	12.4	15

使用 HUT 单层和多层模型整体上都能模拟出积雪冻融循环微波辐射亮温的变化趋势。单层模型虽然易于反演，但不如多层模型更好地模拟冻融循环的过程。

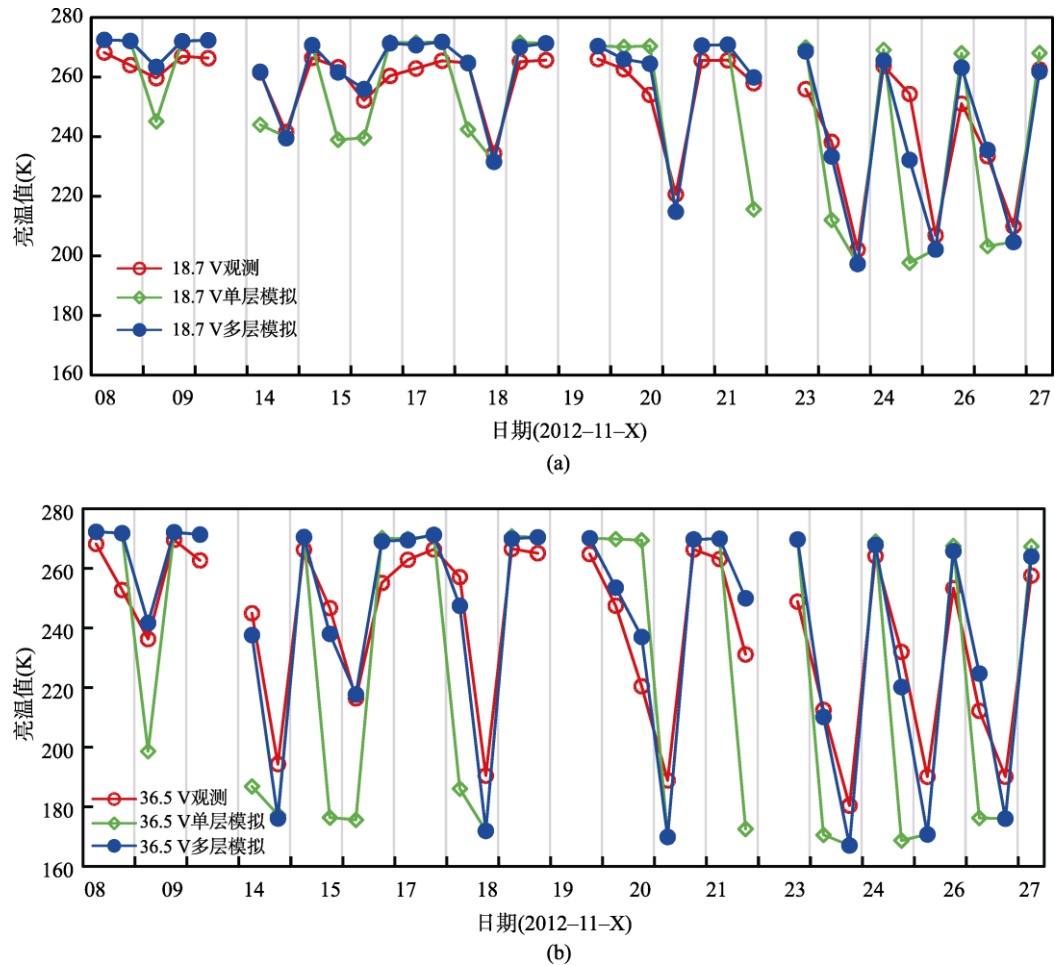


图 7 冻融时(a) 18.7 GHz 和(b) 36.5 GHz V 极化的观测亮温与模型模拟亮温的时间序列图

5 结论

通过利用车载多频率微波辐射计 TMMR，针对位于河北省怀来县的中国科学院遥感综合试验站的积雪覆盖，通过长达 20 天的连续观测，获得了时间序列积雪亮温以及雪深、雪

湿度、雪密度和温度等配套参数,形成了包括四个频率 6.925、10.65、18.7、36.5 GHz 下的多角度亮温、积雪深度、积雪配套参数和环境照片。其中配套参数包括平均雪层温度、雪面温度、积雪湿度以及土壤温湿度参数等。车载微波辐射计 TMMR 系统可靠,测量规范,经过数据分析也符合理论,因此本次实验获得了丰富的实测数据,为积雪辐射、散射模型提供了数据支持。

**作者分工:** 蒋玲梅对数据集的开发做了总体设计;程久全和赵少杰采集和处理了积雪参数数据;蒋玲梅和杨建卫撰写了数据论文。

**致谢:** 感谢中国科学院怀来遥感综合试验站对本次实验观测与数据采集给予的大力支持。

## 参考文献

- [1] Macelloni, G., Paloscia, S., Pampaloni, P., *et al.* Monitoring of melting refreezing cycles of snow with microwave radiometers: The Microwave Alpine Snow Melting Experiment (MASME<sub>x</sub> 2002–2003) [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(11): 2431–2442.
- [2] Hofer, R., Mätzler, C. Investigations on snow parameters by radiometry in the 3 to 60 mm wavelength region [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1980, 85(C1): 453–460.
- [3] Foster, J. L., Sun, C., Walker, J. P., *et al.* Quantifying the uncertainty in passive microwave snow water equivalent observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94(2): 187–203.
- [4] 蒋玲梅, 程久全, 赵少杰. 怀来遥感试验站积雪冻融过程验证数据集[DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2016. DOI: 10.3974/geodb.2016.02.11.V1.
- [5] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. DOI: 10.3974/dp.policy.2014.05 (2017 年更新).
- [6] Rose, T., Czekala, H. Operational Manual of RPG-8CH-DP 4 Frequency, Dual Polarized Radiometer, Version 5.5 [Z]. 2006.
- [7] Lemmetyinen, J., Pulliainen, J., Rees, A., *et al.* Multiple-Layer Adaptation of HUT Snow Emission Model: Comparison With Experimental Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(7): 2781–2794.
- [8] Pulliainen, J., Tigerstedt, K., Wang, H. N., *et al.* Retrieval of geophysical parameters with integrated modeling of land surfaces and atmosphere (models/inversion algorithms) [R]. Final Report, ESA/ESTEC, Noordwijk, Netherlands, Contract No. 11706/95/NL/NB(SC)), 1998.