

毕永恒, 何文英, 龙菲, 等. 2020. 阿尔山地区积雪深度微波遥感反演算法的改进与验证 [J]. 气候与环境研究, 25(4): 410–418. BI Yongheng, HE Wenying, LONG Fei, et al. 2020. Improvement of the Snow-Depth Retrieval Algorithm Using Passive Microwave Remote Sensing over the Arxan Region Inner Mongolia [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (4): 410–418. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19038

# 阿尔山地区积雪深度微波遥感反演算法的改进与验证

毕永恒<sup>1</sup> 何文英<sup>1,2</sup> 龙菲<sup>3</sup> 陈洪滨<sup>1</sup> 李长富<sup>4</sup>

1 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 成都锦江电子系统工程有限公司, 成都 610225

4 阿尔山市气象局, 内蒙古自治区阿尔山 137805

**摘要** 利用阿尔山地区多年实测雪深数据评估 3 种微波遥感雪深数据, 即星载微波成像仪 AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS) 和 AMSR-2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) 的积雪产品、国内学者建立的中国雪深数据集, 在该地区的适用状况, 并建立新的雪深反演算法。1981~2014 年的中国雪深数据集和阿尔山站点实测雪深统计的积雪日数和最大积雪深度具有较好的一致性, 尤其是在 2000 年以后。AMSR-E 和 AMSR2 雪深数据年变化与实测雪深变化趋势一致, 与实测雪深数据相关系数超过 0.60, 不过具体雪深数据变化幅度远高于实测数据, 致使两者之间的均方根误差高达 13.0 cm。中国雪深数据集在阿尔山地区与实测雪深相关系数超过 0.65, 两者之间均方根误差为 6.3 cm。结合星载微波观测亮温与实测雪深建立适合阿尔山地区的雪深反演算法, 验证分析显示反演结果与实测雪深相关系数为 0.77, 两者的均方根误差减小为 4.7 cm, 优于本文评估的 3 种微波遥感雪深数据。

**关键词** 雪深 微波遥感 反演 评估

文章编号 1006-9585(2020)04-0410-09

中图分类号 P407.7

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19038

## Improvement of the Snow-Depth Retrieval Algorithm Using Passive Microwave Remote Sensing over the Arxan Region Inner Mongolia

BI Yongheng<sup>1</sup>, HE Wenying<sup>1,2</sup>, LONG Fei<sup>3</sup>, CHEN Hongbin<sup>1</sup>, and LI Changfu<sup>4</sup>

1 Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Chengdu Jinjiang Electronic System Engineering Co. Ltd., Chengdu 610225

4 Arxan Meteorological Bureau, Arxan, Inner Mongolia Autonomous Region 137805

**Abstract** Long-term snow-depth observations at Arxan station are used to evaluate the application of snow-depth products retrieved from the AMSR-E and AMSR-2 microwave data and Chinese snow-depth dataset developed by

收稿日期 2019-03-18; 网络预出版日期 2019-12-04

作者简介 毕永恒, 男, 1985 年出生, 硕士, 主要从事大气探测及微波应用研究。E-mail: byh@mail.iap.ac.cn

通讯作者 何文英, E-mail: hwy@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41575033、41575065, 国家重点研发计划项目 2017YFC1501700

**Funded by** National Natural Science Foundation of China (Grants 41575033 and 41575065), National Key Research and Development Plan (Grant 2017YFC1501700)

Chinese researchers and to establish a new snow-depth retrieval algorithm. The statistical snow-cover days and maximum snow-depth records derived from the 35-year Chinese snow-depth dataset and station observations are consistent, particularly after 2000. The snow-depth variation trend estimated from the snow-depth products retrieved from the AMSR-E and AMSR-2 microwave data is consistent with that retrieved from the station observations, with the correlation coefficient greater than 0.6. However, the variation range of the snow-depth products is wider than that of the station observations. Thus, the root mean square error (RMSE) of both snow-depth datasets is high (i.e., approximately 13 cm). The Chinese snow-depth dataset at Arxan station shows a higher correlation coefficient of 0.65 and a lower RMSE of 6.3 cm than the station observations. To better estimate snow depth in the Arxan region, a new snow-depth retrieval method is developed using both space-borne passive microwave brightness temperature and observed snow-depth data at Arxan station. The validation shows that the snow-depth data retrieved using the new method has a higher correlation with the observations (i.e., approximately 0.77) and a lower RMSE (i.e., approximately 4.68 cm) than the snow-depth products retrieved from the AMSR-E and AMSR-2 microwave data and Chinese snow-depth dataset used in this study.

**Keywords** Snow-depth, Microwave remote sensing, Retrieval, Evaluation

## 1 引言

积雪是重要的淡水资源; 作为高反照率地表和重要的一类陆气交换的下垫面, 积雪也是影响全球气候变化的重要因子之一 (Groisman and Davies, 2001)。区域和全球积雪监测是融雪洪灾预报、积雪气候效应研究的基础。微波由于波长较长能够穿透一定下垫面, 所以被广泛地用于遥感探测积雪特性, 如雪盖面积、积雪深度和雪水当量等参量。在积雪深度探测方面, 随着卫星微波成像仪观测数据的丰富, 国内外发展了数个反演算法, 主要有统计反演和物理反演算法。

统计反演方法是基于星载微波亮度温度 (亮温) 观测数据与雪深的统计关系建立的反演算法。最初利用 SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer, 扫描多通道微波辐射计) 18 GHz/37 GHz 水平极化亮温差数据, 通过线性回归方法, Chang et al. (1987) 建立了 SMMR 被动微波亮温反演雪深算法, 并与多种积雪产品进行交叉对比时发现, 雪盖面积差异最大区域在中亚和中国西部地区。Derksen et al. (2003) 利用 SMMR 和 SSM/I (Special Sensor Microwave/Image) 近二十年的冬季数据, 按照不同下垫面形成对应的积雪反演算法。Kelly et al. (2003) 在 Chang et al. (1987) 建立的静态估算积雪算法的基础上, 结合气象台站积雪观测数据发展了一种动态积雪反演算法。20 世纪 90 年代起, 积雪微波遥感研究在我国有了迅速的发展, 在积雪深度、积雪识别和积雪量等方面都有一些研究 (曹梅盛和李培基, 1994; 柏延臣等, 2001)。利用 SSM/I 亮温数据, 车涛和李新 (2004a, 2004b)

建立了一套关于青藏高原地区积雪深度和雪水当量的被动微波反演算法, 并在我国东西部地区发展了雪深业务系统反演方案。孙之文等 (2006) 利用 AMSR-E 亮温数据及其反演的雪盖数据对中国新疆北部地区进行了分析, 得到了适用于该地区的雪深和雪水当量算法。

物理反演算法主要基于积雪微波辐射传输模型来反演积雪参量, 如 Pulliainen et al. (1999) 曾利用 HUT 积雪辐射传输模型通过迭代法来反演雪水当量, 也有通过数据同化技术等建立了其他积雪算法 (Slater and Clark, 2006)。不过, 这些算法需要大量输入参数、先验数据库, 所以难以快速投入业务使用。此外, 已有算法的适用性需要本地原位观测资料的验证与不断改进。

总的来看, 目前积雪反演算法很多, 但主要的还是采用统计算法, 这主要是该方法思路简单, 参数较少, 能够实现对卫星数据实时快速计算。由于雪面特征的复杂性, 如植被、地形以及雪中粒子相态改变, 致使积雪地区微波辐射信号变化也较为复杂。已有研究表明雪深反演, 尤其全球性反演, 仅利用简单统一的微波反演统计关系难以获得较好的准确性。为减少微波反演雪地参量的困难, 最好结合局地雪面特征建立更为合理的反演算法 (Prigent et al., 2006)。

本文关注的研究区域为内蒙古阿尔山及周边地区 (46°N~48°N, 119°E~122°E), 其中阿尔山市位于大兴安岭中段西南山麓, 是我国纬度最高的城市之一。由于受西北冷空气的影响及蒙古高压的控制, 阿尔山地区冬季寒冷漫长, 基本从 9 月开始, 次年 5 月结束, 冬季雪量平均达 30 m, 积雪覆盖

期平均达 200 d, 号称“雪城”。目前阿尔山市已经成为中国滑雪协会指定的冰雪运动训练基地。正确认识该地区的积雪变化特征, 不仅对当地农牧业生产有非常重要的意义, 而且对我国冰雪运动的顺利开展提供一定帮助。

我们利用多年阿尔山站点的积雪资料和气象数据, 首先对阿尔山地区积雪气候态变化特征进行分析。在此基础上, 进一步结合阿尔山站点实测雪深资料, 分析目前常用的积雪算法和数据产品在该地区的适用性, 并且基于算法的比较分析, 建立适合于阿尔山地区的积雪深度微波遥感反演算法, 并加以验证分析。

## 2 数据和方法

为了认识目前常用的微波遥感反演积雪产品及其算法在阿尔山地区的适用性, 首先, 结合当地观测的雪深数据, 比较多种积雪产品的差异, 然后, 基于统计反演算法的研究思路, 建立更为适合阿尔山地区的积雪深度反演算法。所以, 本文研究所需数据有星载被动微波亮温数据、微波积雪产品数据和地面观测数据。

### 2.1 星载被动微波遥感数据

星载被动微波观测数据由 AMSR-E (2002~2011 年) 和 AMSR-2 (2012~2015 年) 观测亮温组成。微波成像仪 AMSR-E 是搭载在 2002 年 5 月美国发射的 AQUA 卫星上 (Kawanishi et al., 2003), 在 2012 年初停止工作, 为此后续的 AMSR-2 是搭载在日本 GCOM-W1 卫星上于 2012 年 5 月 18 日发射。本文选取 AMSR-E 和 AMSR-2 中心频率一致的 10 个通道, 即 10.65、18.7、23.8、36.5 和 89.0GHz 的水平 (H) 和垂直 (V) 极化 (Polarization) 通道, 并使用这 10 个通道的微波亮温数据。卫星在阿尔山站点过境时间大约为协调世界时 04:00 (升轨) 与 18:00 (降轨) 左右, 即北京时间中午 12:00 和凌晨 02:00。其中 AMSR-E/AMSR2 L1R 轨道亮温数据从美国国家冰雪数据中心 (NSIDC) / 日本航空研究中心 (JAXA) 下载获得。

### 2.2 微波积雪产品数据

本文比较分析的微波遥感积雪产品数据有 3 种: 包括 2002~2011 年 (9 月至次年 5 月) AMSR-E L2/SWE (Snow Water Equivalent) 产品进一步反演的 AMSR-E 雪深数据 (简记为 AMSR-E); 2012~

2015 年 (9 月至次年 5 月) AMSR2 L2/SD (Snow Depth) 雪深产品 (简记为 AMSR2); 1978~2015 年的中国雪深长时间数据集 (源自中国西部环境与生态科学数据中心, Environmental and Ecological Science Data Center for West China, 简记为 WESTDC)。其中, AMSR-E SWE 和 AMSR2 SD 数据从日本航空研究中心 (JAXA) 下载得到, WESTDC 数据由中国西部环境与生态科学数据中心提供。具体数据信息及其反演算法如下。

(1) AMSR-E L2/SWE 数据集包含经纬度信息, 雪水当量 (SWE) 数据和质量可信度等信息。AMSR-E 雪水当量 SWE 产品的算法为

$$S_{WE} = \frac{4.8 \times (T_{b19H} - T_{b89H})}{1 - f}, \quad (1)$$

其中,  $S_{WE}$  为雪水当量,  $T_b$  是观测亮温 (Brightness Temperature), 下标 19H、89H 分别表示 18.7 GHz 和 89.0 GHz 的水平极化通道,  $f$  为森林覆盖率因子。利用雪水当量与雪密度数据, 计算每个采样点雪深, 转换公式如下:

$$S_D = \frac{S_{WE} \times \rho_{water}}{10 \times \rho_{water}}, \quad (2)$$

其中,  $\rho_{water}$  为密度, 单位:  $g/cm^3$ ;  $S_D$  为雪深, 单位: cm。

(2) AMSR2 L2/SD 数据集包含经纬度信息, 雪深、雪水当量和质量可信度信息。AMSR-2 雪深产品算法为

$$S_D = f(S_{Df}) + (1 - f) \times S_{D0}, \quad (3)$$

$$S_{Df} = 1 / \log_{10}(p_{0136}) \times (T_{b19V} - T_{b36V}) / (1 - f_d \times 0.6), \quad (4)$$

$$S_{D0} = [1 / \log_{10}(p_{0136}) \times (T_{b10V} - T_{b36V}) + [1 / \log_{10}(p_{0119}) \times (T_{b10V} - T_{b19V})]], \quad (5)$$

其中,  $S_D$  为总样本的积雪深度,  $S_{Df}$  为瞬时视场森林成分积雪深度,  $S_{D0}$  为瞬时视场非森林成分积雪深度,  $f$  是森林覆盖率,  $f_d$  是高空间分辨率 (500 m) 的森林密度,  $p_{0136}$ 、 $p_{0119}$  为极化因子:  $p_{0136} = T_{b36V} - T_{b36H}$ ,  $p_{0119} = T_{b19V} - T_{b19H}$ ,  $T_b$  为亮温, 下标 H、V 分别表示水平、垂直极化, 下标 10、19、36 分别表示对应通道中心频率 10.65、18.7、36.5 GHz。

(3) 中国雪深长时间数据集 (WESTDC) 是车涛 (2006) 利用美国国家冰雪数据中心 (NSIDC) 处理的 SMMR (1978~1987 年), SSM/I (1987~2008 年) 以及 AMSR-E (2002~2010 年) 的微波亮温数据反演得到, 其空间分辨率为 25 km, 经度

为 60°E~140°E, 纬度为 15°N~55°N。该反演算法以 Chang et al. (1987) 建立的全球积雪深度反演算法 (公式 6, 简称 Chang 算法) 为基础, 结合我国地面台站实测雪深数据, 对星载微波成像仪的 19 GHz、37 GHz 观测亮温差进行回归分析, 并且考虑森林覆盖对雪深变化的影响, 建立的雪深反演算法, 如公式 (7) 所示。

$$S_D = 1.59 \times (T_{b18H} - T_{b36H}), \quad (6)$$

$$S_D = 0.78 \times (T_{b19H} - T_{b36H}) / (1 - f), \quad (7)$$

其中,  $f$  为森林覆盖率, 没有森林的地方  $f$  为 0。结合 SSMR、SSM/I 和 AMSR-E 亮温数据, 反演得到长时间序列积雪数据集, 可以用作分析大尺度长时间序列气候、水文模拟以及水资源管理等研究与应用。

### 2.3 地面观测数据

地面观测数据由阿尔山市气象观测站点提供 1981~2014 年的实测数据, 实测数据记录了该气象站点多年逐日的平均气温和地表温度、日照时数、积雪深度等信息。本文主要使用该站点每日 08:00 (北京时间) 实测的当地积雪深度数据用于验证多种积雪产品数据精度和反演算法建立。

### 2.4 数据匹配方法

为了与地面站点观测数据比较, 需要对星载微波观测亮温以及 3 种微波反演积雪产品数据进行匹配。由于这 3 种积雪产品都是基于卫星轨道扫描观

测亮温反演的二级产品, 时空范围与观测亮温基本一致, 因此匹配方法一样。鉴于阿尔山站点雪深观测每日 08:00 (北京时间) 记录, 而星载微波辐射计 AMSR-E/AMSR2 卫星观测在阿尔山站点过境时间大约为协调世界时 04:00 (升轨) 与 18:00 (降轨) 左右, 即北京时间中午 12:00 和凌晨 02:00。为此, 本文对卫星升轨和降轨的微波亮温数据都与观测站点进行匹配, 形成白天和夜晚两组与站点雪深对应的卫星数据, 匹配的空间距离选取距离阿尔山站点 (47.17°N, 119.95°E) 最为接近的卫星数据作为与地面观测相匹配的结果。

## 3 雪深产品的比较

为了认识 AMSR-E、AMSR2、WESTDC 3 种积雪产品的精度, 首先针对阿尔山站点观测雪深数据与 AMSR-E 和 AMSR2 的雪深数据 [包括升轨 (白天) 和降轨 (黑夜), 分别记为 AMSR (白天) 和 AMSR (晚上)]、WESTDC 产品数据的匹配数据进行分析。

图 1 显示 WESTDC (2002~2015 年)、AMSR-E (2002~2011 年) 与 AMSR2 (2012~2015 年) 9 月至次年 5 月积雪产品与实测雪深的时间序列变化图。从图中可以看出 3 种雪深数据与实测雪深变化趋势一致, 存在显著的季节性变化, 如 10 月到次年 2 月为积雪累积时期, 最大积雪深度主要出现

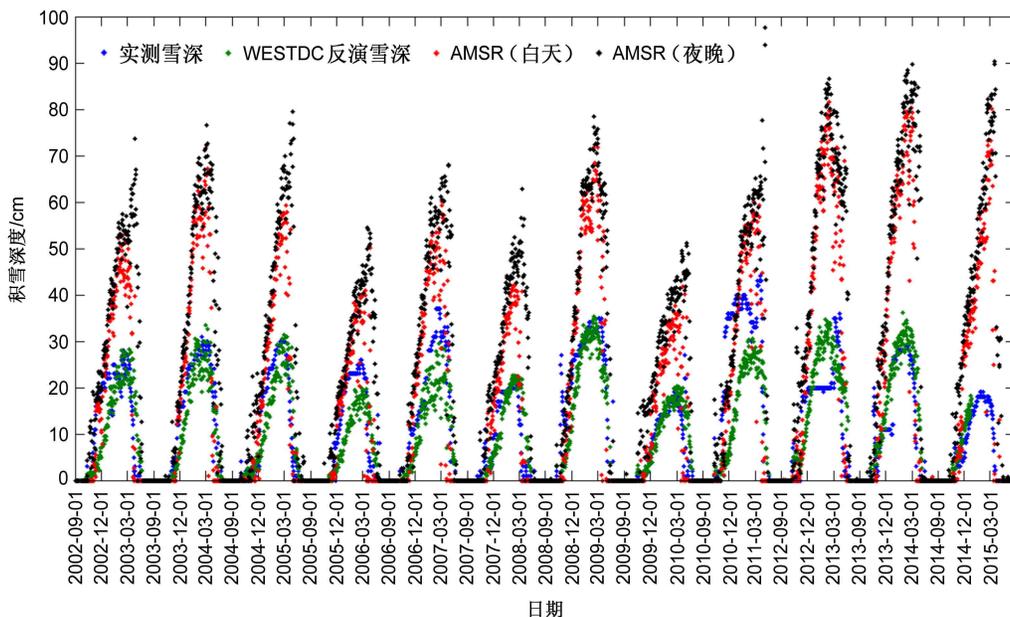


图 1 2002~2015 年多种积雪产品和实测积雪深度的时间序列变化

Fig. 1 Time series of snow depth derived from multiple snow-depth products and station observations during 2002~2015

在 2 月, 3~4 月为积雪融化时期, 到 5 月积雪全部融化。具体看来, WESTDC 雪深在 2002~2005 年、2008~2010 年以及 2012~2015 年与实测雪深变化幅度基本一致, 在 2006 年、2007 年和 2010 年的反演雪深略小于实测雪深。AMSR-E 和 AMSR2 雪深数据虽然与实测雪深变化趋势一致, 但在变化幅度上明显大于实测雪深, 如实测雪深变化范围在 0~45 cm, 而 AMSR (白天或晚上) 雪深变化范围在 0~100 cm, 并且夜晚产品数据略大于白天产品数据, 可能是由于夜晚微波亮温随着气温降低变化, 造成反演雪深增大。

由于 AMSR-E 和 AMSR2 观测时间较短, 而 WESTDC 数据与站点观测数据在 1981~2015 年有重合, 所以这里只对地面实测雪深与 WESTDC 反演雪深的积雪日数和年最大积雪深度进行了对比研

究。图 2 可以看出积雪日数和最大积雪深度在年尺度上的波动变化, WESTDC 反演雪深与地面实测雪深具有较好的一致性, 尤其是在 2000 年以后, 虽然 WESTDC 反演积雪日数在尺度上略高于站点观测但其变化趋势一致性好。而最大积雪深度上, 1995 年以前相差较大, 达到 10 cm; 而 1995 年以后最大积雪深度变化一致, 两者相差缩小到 5 cm 范围内。

进一步基于雪深数据, 分析 2002~2015 年冬季 AMSR-E 和 AMSR2 (白天和夜晚)、WESTDC 雪深与实测雪深数据的相关性。因为 AMSR-E 与 AMSR2 产品反演算法不一样, 所以将两者分开分析。图 3 给出 AMSR-E 雪深与实测雪深、WESTDC 雪深之间差异程度。其中实测雪深与 WESTDC 雪深匹配样本为 1917 个, 两者相关系数达 0.69, 均

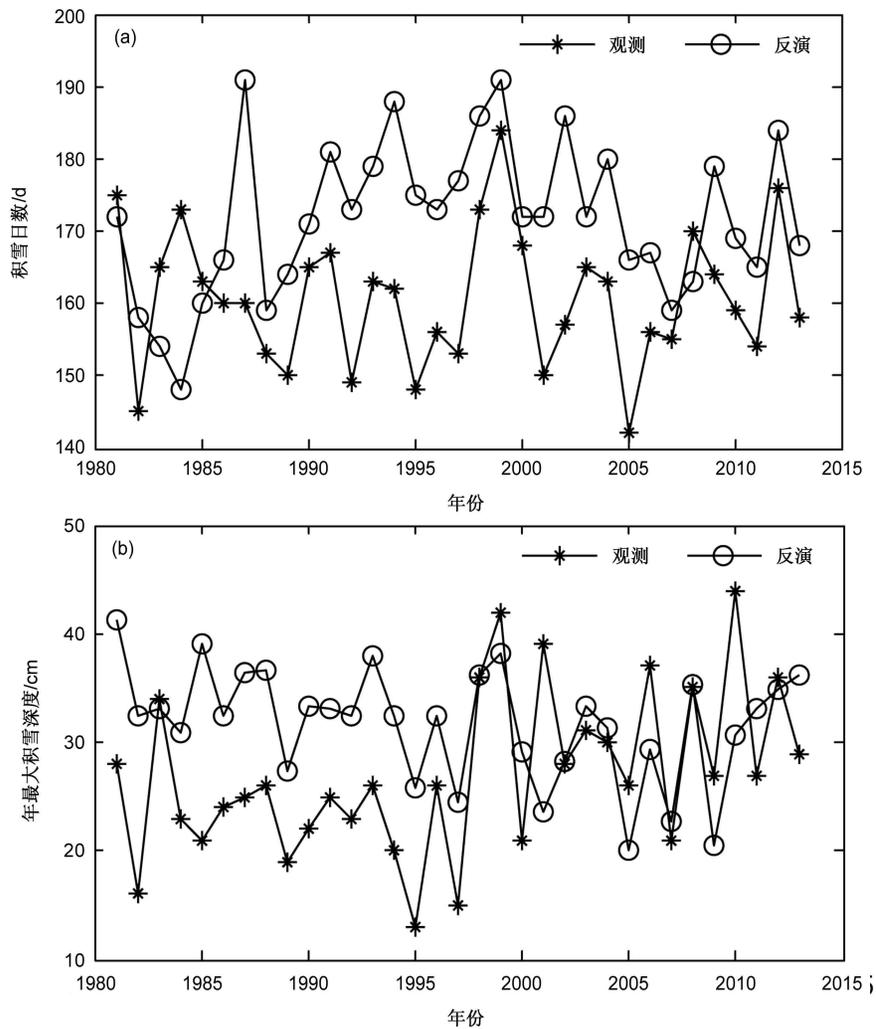


图 2 1981~2015 年 WESTDC 反演雪深与实测雪深 (a) 积雪日数和 (b) 最大积雪深度变化

Fig. 2 Comparisons of (a) snow-cover days and (b) maximum snow-depth records obtained from the WESTDC (Environmental and Ecological Science Data Center for West China) snow-depth dataset and station observations during 1981–2015

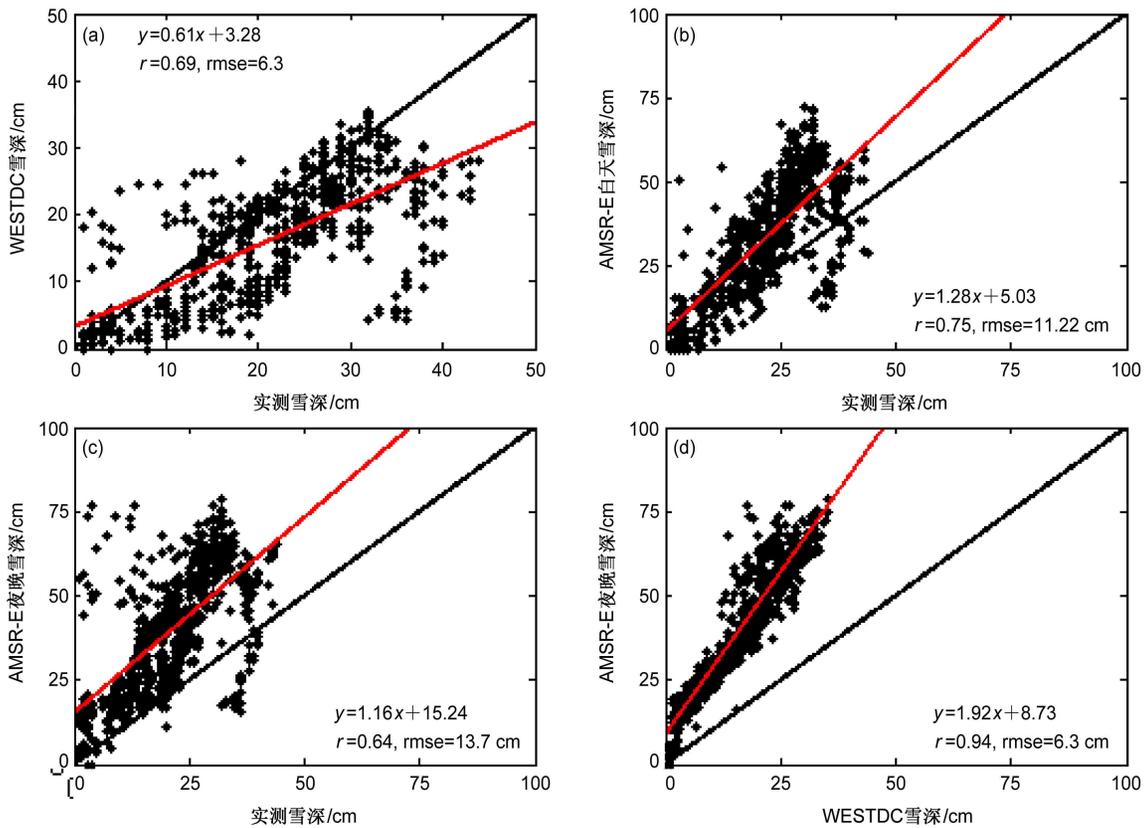


图3 (a) WESTDC 雪深、(b) AMSR-E (白天) 雪深、(c) AMSR-E (夜晚) 雪深与实测雪深散点分布以及 (d) AMSR-E (夜晚) 雪深与 WESTDC 雪深散点分布

Fig. 3 Scatter plots of (a) WESTDC snow-depth dataset, (b) AMSR-E (day) snow-depth dataset, (c) AMSR-E (night) snow-depth dataset and station observations, and (d) AMSR-E (night) and WESTDC snow-depth datasets

方根误差 (RMSE) 为 6.30 cm。从散点分布图中可以明显看出：实测雪深小于 5 cm 时，WESTDC 雪深高于实测雪深；实测雪深大于 30 cm 时，WESTDC 雪深小于实测雪深；就总体趋势来看，WESTDC 雪深小于实测雪深。实测雪深与 AMSR-E 雪深 (白天/晚上，匹配样本数分别为 1356/1416) 的相关系数为 0.75/0.64，均方根误差分别为 11.22 cm/13.70 cm，并且无论白天或夜晚，AMSR-E 雪深高达 90 cm，明显高于实测雪深。WESTDC 雪深与 AMSR-E 雪深产品 (夜晚，样本数为 1406) 的相关系数达 0.94，均方根误差为 6.30 cm，相关性如此高的原因是 WESTDC 雪深主要是通过 AMSR-E 的 18 GHz, 37 GHz 观测亮温反演得到。同样的比较也应用于 AMSR2 雪深产品，得到类似的差异分布 (图略)，即 AMSR2 产品雪深明显高于实际雪深，并且也明显高于 WESTDC 雪深，并且由于与观测匹配的样本更少，分布更加离散，对应的标准偏差也更为显著。

总的来说，积雪的季节性特征以及年际变化，

基于卫星微波观测数据反演的 AMSR-E/AMSR2、WESTDC 雪深数据产品与实测雪深均有较好一致性，但对逐日细节特征刻画上存在一定差异。由于卫星观测反演的雪深数据代表一个像元内，如 25 km × 25 km，的雪深平均值，阿尔山市周边有山，地形高度不一，而地面观测台站选择的是地势较平坦处，站点实测数据只代表观测场视野范围一半以上的积雪状况，所以两种数据结果也会存在一定误差。

#### 4 反演算法建立和验证

为了利用卫星观测微波亮温来反演雪深，首先我们分析与阿尔山站点观测雪深相匹配的 AMSR-E/AMSR2 升轨和降轨微波亮温与实测雪深的相关性。这里我们只选取积雪深度大于 1 cm 的积雪日数，剔除个别观测亮温与雪深变化异常点，得到实测雪深与观测亮温匹配数据 1860 组。从表 1 中可以看出不管是白天还是夜晚水平极化与实测雪深相关性都大于垂直极化，相关系数随着频率增大而增

表 1 升轨与降轨各通道亮温数据与实测雪深相关性

Table 1 Correlation coefficients between observed brightness temperature at the AMSR-E channels for the ascending and descending orbits and observed snow depths

	亮温与实测雪深相关系数									
	10H	10V	19H	19V	23H	23V	37H	37V	89H	89V
白天 (升轨)	-0.56	-0.36	-0.68	-0.61	-0.72	-0.69	-0.73	-0.72	-0.55	-0.51
夜晚 (降轨)	-0.51	-0.28	-0.61	-0.54	-0.63	-0.60	-0.66	-0.64	-0.48	-0.45

注: H表示水平极化, V表示垂直极化, H、V前面数字10、19、23、37、89分别对应通道中心频率10.65、18.7、23.8、36.5和89.0 GHz。

大, 在 36.5 GHz 达到最大, 白天、夜晚分别为 -0.73、-0.66, 而 89 GHz 受雪颗粒散射强度影响大相关性较差。总体看来, 升轨的各通道观测亮温与实测雪深相关性普遍优于降轨数据, 这可能是过境阿尔山站点的升轨时间大约协调世界时 04:00 左右 (即北京时间 12:00), 与实测雪深测量时间 (北京时间 08:00) 较为接近, 相关性更好, 所以本文将采用升轨亮温数据进行算法研究。

不同微波频率受积雪影响各不同: 低频 10.65 GHz 具有较强穿透能力, 因此主要受雪层下垫面地表特征影响; 高频 89 GHz 容易受干雪层内冰相粒子散射影响; 随着雪中含水量增加, 36.5 GHz 亮温值呈下降趋势, 而 18.7 GHz 亮温基本保持不变。因此在以往研究中多用 18.7 GHz 和 36.5 GHz 亮温组合进行雪深反演。但当雪深达到或超过一个阈值后, 也有研究表明可以利用穿透雪层更深的微波低频, 如 10.65 GHz 亮温来反演雪深。由于不同微波频率对于积雪深度的响应程度有差异, 常采用不同微波通道观测亮温的梯度变化反演雪深。本文针对阿尔山站点的 2002~2015 年 AMSR-E/AMSR2 升轨亮温数据, 分析不同微波通道组合的亮温梯度信息与实测积雪深度的相关性, 从而了解不同亮温梯度的敏感性及其与积雪深度的关系。统计分析发现相关性较高的有 D19V23H、D10V37H、D23V37H、D19V37H、D10V23V (D 代表前者—后者的差值, 数值代表频率, V/H 代表垂直/水平极化), 并且与实际雪深的相关系数都达到 0.7 以上, 尤其 D19V23H 达到 0.724。

结合阿尔山站点观测雪深数据与对应的亮温梯度数据, 随机选取 3/4 的匹配样本进行逐步线性回归拟合, 建立阿尔山站点雪深反演模型, 其回归方程如下:

$$S_D = 1.69(T_{b_{19V}} - T_{b_{23H}}) - 2.72(T_{b_{19V}} - T_{b_{23V}}) + 0.56(T_{b_{10V}} - T_{b_{37H}}) - 6.24. \quad (8)$$

为了评估雪深反演模型的精度, 我们进一步采用余下 1/4 的匹配样本用于验证比较新算法 (公式 8) 与 Chang 算法 (公式 6), 计算比较两种算法反演的雪深与实测雪深在不同积雪深度下的平均误差 ( $P_a$ )、正向平均误差 ( $P_b$ )、负向平均误差 ( $P_c$ )、绝对平均误差 ( $P_d$ ) 和均方根误差 ( $R_{MSE}$ ), 各个比较参量的具体定义如下:

$$P_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \bar{x}_i, \quad (9)$$

$$P_b = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^r (x_k - \hat{x}_k), (x_k > \hat{x}_k), \quad (10)$$

$$P_c = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (x_j - \hat{x}_j), (x_j < \hat{x}_j), \quad (11)$$

$$P_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|x_i - \hat{x}_i|), \quad (12)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{ai} - Z_{ei})^2}{n}}, \quad (13)$$

其中,  $x_i$ 、 $x_j$ 、 $x_k$  和  $\hat{x}_i$ 、 $\hat{x}_j$ 、 $\hat{x}_k$  分别表示实测雪深与对应的反演雪深,  $n$ 、 $m$ 、 $r$  分别表示样本数、实测值小于估测值样本数以及实测值大于估测值样本数, 其中公式 13 中  $Z_{ai}$  和  $Z_{ei}$  分别表示第  $i$  个样本的实测值和估计值。

两种算法比较结果如表 2 所示。可以看到, 当雪深小于 10 m 时, 虽然新算法反演的雪深平均误差略大于 Chang 算法, 但其他参数误差均小于 Chang 算法, 尤其均方根误差减小了 2.59 cm。当雪深为 11~20 m 和 21~30 m 时, 新算法的几个误差参数均显著小于 Chang 算法, 尤其是负向平均误差和均方根误差明显减少 10 m 以上, 这也说明 Chang 算法明显高估阿尔山地区积雪深度。当雪深大于 30 cm 时, 除了平均误差, 新算法的其他误差参数均小于 Chang 算法, 尤其在负向平均误差上有显著改进, 也使得均方根误差比 Chang 算法减小了 4.3 cm。进一步计算反演雪深与实测雪深的相

表 2 不同雪深范围雪深反演模型的精度分析

Table 2 Precision analysis of two snow-depth retrieval algorithms for different snow-depth ranges

雪深范围/cm	平均误差/cm		正向平均误差/cm		负向平均误差/cm		绝对平均误差/cm		均方根误差/cm	
	新算法	Chang算法	新算法	Chang算法	新算法	Chang算法	新算法	Chang算法	新算法	Chang算法
≤10	-4.08	-3.12	2.12	2.74	-5.32	-6.72	4.96	5.24	5.72	8.31
11~20	-2.36	-11.11	3.55	4.13	-4.56	-16.19	4.33	13.40	5.14	16.44
21~30	1.06	-13.81	3.34	4.33	-2.35	-15.56	2.84	14.72	3.84	16.63
>30	8.51	-5.41	9.83	12.19	-1.96	-13.10	8.93	12.57	10.54	14.83

关性和均方根误差, 发现 Chang 算法与实测雪深相关性为 0.69, 均方根误差为 6.87 m; 新算法与实测雪深的相关性为 0.77, RMSE 减小为 4.68 m, 也明显优于前面实测与 WESTDC、AMSR-E、AMSR2 雪深产品的 RMSE, 尤其后两者的 RMSE 高于 10 m。

总的看来, 基于阿尔山地区实测雪深建立的雪深反演模型能显著减弱 Chang 算法在该地区明显高估的偏差, 无论相关性还是均方根误差, 都比 Chang 算法有显著改进, 也优于本文比较评估的 AMSR-E、AMSR2 和 WESTDC 遥感反演雪深数据, 表明本文建立的反演模型更加适合当地积雪深度的估算, 能更加准确监测阿尔山站点积雪变化情况。

## 5 小结

针对我国冬季降雪覆盖时间长的阿尔山地区, 本文利用 AMSR-E (2002~2011 年)、AMSR2 (2012~2015 年) 轨道亮温与积雪产品、WESTDC 雪深数据集和阿尔山站点实测雪深资料, 对积雪产品精度进行评估并建立雪深反演算法, 主要结论如下:

(1) 2002~2015 年, AMSR-E 和 AMSR2 积雪产品数据与实测雪深数据变化趋势一致, 与实测雪深数据相关系数都超过 0.5, 不过积雪产品数据变化幅度远高于实测数据, 致使两者之间的均方根误差高达 13 cm。

(2) 35 年 WESTDC 雪深数据集和阿尔山站点实测雪深统计的积雪日数和最大积雪深度具有较好的一致性, 与实测雪深相关系数达 0.66, 两者之间均方根误差为 6.3 cm。

(3) 结合星载微波观测亮温数据与实测雪深建立适合阿尔山地区的雪深反演算法, 并且验证表明反演结果与实测雪深相关系数为 0.77, 两者的均方根误差减小为 4.68 cm, 明显优于 AMSR-E、AMSR2 和 WESTDC 雪深数据。

本文工作主要以阿尔山站点雪深为参考依据, 比对分析微波反演积雪产品数据。其实, 这两种数据时空探测范围有所不同, 势必使得两者之间存在一些差异。此外, 降雪过程中雪层内部复杂变化也使得积雪辐射信息发生变化, 而雪深只是一个宏观体现, 还需要进一步结合其他积雪参量, 如雪水当量, 来更好研究微波辐射信号在积雪区的时空变化特征, 进而更为准确的监测大范围积雪的动态变化。

致谢 感谢阿尔山市气象局提供站点雪深观测资料; 感谢美国 NASA/NSIDC 提供 AMSR-E 和 AMSR-2 观测亮温数据; 感谢日本 JAXA/EOC 提供 AMSR-E SWE 和 AMSR2 SD 数据; 感谢中国西部环境与生态科学数据中心 (WESTDC) 提供中国雪深长时间序列数据集。

## 参考文献 (References)

柏延臣, 冯学智, 李新, 等. 2001. 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*, 5(3): 161-165. Bo Yanchen, Feng Xuezh, Li Xin, et al. 2001. 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 (in Chinese)*, 5(3): 161-165. doi:10.3321/j.issn:1007-4619.2001.03.001

曹梅盛, 李培基. 1994. 中国西部积雪微波遥感监测 [J]. *山地研究*, 12(4): 230-234. Cao Meisheng, Li Peiji. 1994. Microwave remote sensing monitoring of snow cover in western China [J]. *Mountain Research (in Chinese)*, 12(4): 230-234. doi:10.16089/j.cnki.1008-2786.1994.04.007

Chang A T C, Foster J L, Hall D K. 1987. Nimbus-7 SMMR derived global snow cover parameters [J]. *Annals of Glaciology*, 9: 39-44. doi:10.3189/S0260305500200736

车涛, 李新. 2004. 利用被动微波遥感数据反演我国积雪深度及其精度评价 [J]. *遥感技术与应用*, 19(5): 301-306. Che Tao, Li Xin. 2004. Retrieval of snow depth in China by passive microwave remote sensing data and its accuracy assessment [J]. *Remote Sensing Technology and Application (in Chinese)*, 19(5): 301-306. doi:10.3969/j.issn.1004-0323.2004.05.002

车涛, 李新, 高峰. 2004. 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*, 26(3): 363-368. Che Tao, Li Xin, Gao

- Feng. 2004. Estimation of snow water equivalent in the Tibetan plateau using passive microwave remote sensing Data (SSM/I) [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese)*, 26(3): 363–368. doi:10.3969/j.issn.1000-0240.2004.03.019
- 车涛. 2006. 积雪被动微波遥感反演与积雪数据同化方法研究 [D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所. Che Tao. 2006. Snow passive microwave remote sensing retrieval and snow data assimilation method [D]. Lanzhou: Institute of cold and arid region environment and engineering, Chinese Academy of Sciences.
- Derksen C, Walker A, Goodison B. 2003. A comparison of 18 winter seasons of in situ and passive microwave-derived snow water equivalent estimates in Western Canada [J]. *Remote Sensing of Environment*, 88(3): 271–282. doi:10.1016/j.rse.2003.07.003
- Groisman P Y, Davies T D. 2001. Snow cover and the climate system [M]//Jones H G, Pomeroy J W, Walker D A, et al. *Snow Ecology: An Interdisciplinary Examination of Snow-Covered Ecosystems*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1–44.
- Kawanishi T, Sezai T, Ito Y, et al. 2003. The Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth observing system (AMSR-E), NASDA's contribution to the EOS for global energy and water cycle studies [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 41(2): 184–194. doi:10.1109/TGRS.2002.808331
- Kelly R E, Chang A T, Tsang L, et al. 2003. A prototype AMSR-E global snow area and snow depth algorithm [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 41(2): 230–242. doi:10.1109/TGRS.2003.809118
- Prigent C, Aires F, Rossow W B. 2006. Land surface microwave emissivities over the globe for a decade [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 87(11): 1573–1584. doi:10.1175/BAMS-87-11-1573
- Pulliaminen J T, Grandell J, Hallikainen M T. 1999. HUT snow emission model and its applicability to snow water equivalent retrieval [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 37(3): 1378–1390. doi:10.1109/36.763302
- Slater A G, Clark M P. 2006. Snow data assimilation via an ensemble Kalman filter [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 7(3): 478–493. doi:10.1175/JHM505.1
- 孙之文, 施建成, 蒋玲梅, 等. 2006. 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 [J]. *地球科学进展*, 21(12): 1363–1369. Sun Zhiwen, Shi Jiancheng, Jiang Lingmei, et al. 2006. Development of snow depth and snow water equivalent algorithm in western china using passive microwave remote sensing data [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 21(12): 1363–1369. doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2006.12.018