

doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0005

Lu Xinyu, Wang Xiuqin, Cui Caixia, *et al.* Snow depth retrieval based on AMSR-E data in Northern Xinjiang region, China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 40-47. [卢新玉, 王秀琴, 崔彩霞, 等. 基于 AMSR-E 的北疆地区积雪深度反演[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 40-47.]

基于 AMSR-E 的北疆地区积雪深度反演

卢新玉¹, 王秀琴³, 崔彩霞¹, 谢国辉²

(1. 新疆气象台, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2. 新疆气象局, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 昌吉州气象局, 新疆 昌吉 831100)

摘 要: 利用北疆地区 2007/2008—2009/2010 年度积雪季(12 月至次年 2 月)的 AMSR-E 降轨 19 GHz 与 37 GHz 波段的水平极化亮温数据, 结合北疆地区 45 个气象台站的实测雪深数据, 建立了北疆地区基于 AMSR-E 亮度温度数据的雪深反演模型, 并对模型的精度进行评价。结果显示: 雪深在 3~10 cm 时, 模型反演的雪深值负向平均误差为 -5.1 cm, RMSE 值为 6.1 cm; 雪深在 11~30 cm 时, 模型反演雪深值的平均误差仅为 2.6 cm, RMSE、正向平均误差、绝对平均误差均较小; 雪深大于 30 cm 时, 模型反演的各项误差较大。用合成方法反演北疆地区 2006/2007—2010/2011 年度 5 个积雪季的平均雪深分布和最大雪深分布, 结果显示北疆地区积雪主要分布于北部阿尔泰山和南部天山一带, 其中阿勒泰地区所占比重最大, 中部的准噶尔盆地腹地、克拉玛依地区雪层较浅。

关键词: 被动微波遥感; AMSR-E; 积雪深度; 雪深反演; 北疆地区; 验证

中图分类号: P426.63⁺5 **文献标识码:** A

0 引言

积雪是气象学和水文学中一个非常重要的参数, 积雪的多寡不仅是影响气候变化的重要因子, 也是影响干旱和半干旱地区农牧业发展的重要因素^[1]。积雪之所以对气候自然环境产生巨大的影响, 是因为其辐射特性和导热性质与水体、岩土体等有着非常显著的差别, 而积雪的这两种物理性质及其对环境的影响程度与积雪的平均厚度和持续时间相关。因此, 积雪的平均深度和持续时间是表征积雪气候环境特征与水资源条件的指标, 是全面研究积雪分布不可缺少的主要因子^[2]。

随着积雪反演算法的进一步改进以及更高空间分辨率的 AMSR-E 和我国风云三号卫星的微波成像仪(MWRI)数据的应用, 被动微波遥感必将成为积雪遥感业务监测的重要手段, 为气象、气候模型与水文模型提供关键的输入参数^[3-10]。随着 Nimbus 卫星系列和美国国防气象卫星计划(DMSP)上搭载的一系列被动微波传感器的升空, 积雪的被动

微波遥感取得了迅速进展, 国外学者发展了多种积雪被动微波遥感模型以及反演雪深和雪水当量的算法, 而我国则是在 20 世纪 90 年代初期开始进行积雪被动微波遥感方面的研究^[11]。Chang 等^[12]以辐射传输和米氏散射为理论基础, 假定积雪密度和颗粒大小为常数, 雪密度为 $0.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 雪粒径为 0.35 mm, 利用实测雪深数据和 SMMR 的亮温数据, 通过统计回归方法, 建立了雪深与 19 GHz 和 37 GHz 水平极化的亮温梯度之间的关系, 得出利用 SMMR 被动微波亮温数据反演雪深的算法, 发展了 SMMR 半经验的反演雪深的算法。近 10 a 来, 在 Chang 算法的基础上开展了大量卓有成效的研究^[13-16]。我国积雪微波遥感研究起步于 20 世纪 90 年代初期, 在积雪识别、积雪深度、积雪量等方面研究人员开展了大量的研究^[17-22]。

以上研究为微波遥感积雪参数反演的发展奠定了坚实的基础, 但多是在大区域尺度上研究积雪的变化情况, 而有针对性的对作为我国三大稳定季节

收稿日期: 2012-08-08; 修订日期: 2012-11-15

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106007); 国家科技支撑项目(2012BAC23B01); 国家自然科学基金项目(41271098)资助

作者简介: 卢新玉(1979—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 2011 年在新疆师范大学获硕士学位, 现主要从事天气预报技术开发方面的研究。
E-mail: luxy31810964@sina.com

积雪区之一——北疆地区的积雪参数微波遥感研究却较少。本文使用 AMSR-E 卫星微波数据, 结合北疆气象台站实测的雪深等资料, 探索适用于北疆地区的微波遥感雪深反演算法, 分析北疆地区积雪深度的时空变化特征, 为建立北疆地区雪灾监测与预警基础数据库, 准确监测北疆地区积雪时空动态变化状况、评价雪灾受灾程度、快速提供救援对策和减少灾区经济损失提供重要支持和保障。

1 数据和方法

1.1 遥感数据

AMSR-E 是高级微波扫描辐射计 (Advanced Microwave Scanning Radiometer - EOS) 的缩写, 是搭载在 Aqua 卫星上的被动微波辐射计。AMSR-E 于 2002 年 5 月搭载在 Aqua 卫星上发射, 用于观测陆地、海洋和大气的水和能量循环变化, 它有 12 个通道, 分别探测 6.9 GHz、10.7 GHz、18.7 GHz、23.8 GHz、36.5 GHz 和 89.0 GHz 6 个不同频率的水平和垂直极化的地面亮温。空间分辨率为 5.4 km (89 GHz) 到 56 km (6.9 GHz) 不等。AMSR-E 相对 SMMR、SSM/I 等其他微波数据来说, 具有通道多、频率范围宽、分辨率高等优势。

本文使用的微波数据是通过美国国家冰雪中心 (NSIDC) 网站下载的 L2A 级亮温数据产品, 其数据名称为 AMSR-E/Aqua L2A Global Swath Spatially-Resampled Brightness Temperatures (Tb) V002。数据时间选为 2006—2010 年每年的 12 月 1 日至次年 3 月 1 日, 5 个年份共 668 幅每日亮温产品数据。该数据以 HDF-EOS 格式存储, 空间分辨率为 25 km。通过 IDL 编程读取亮温数据, 建立反演模型来反演北疆地区积雪深度。AMSR-E 微波数据每天有升轨和降轨 2 个时间数字图像。由于升轨数据在新疆的过境时间为白天中午, 考虑到太阳光照射和温度升高而使雪面温度上升, 影响地面亮温的散射, 将导致反演精度降低, 因此, 选用夜间 04:00 左右过境的降轨数据。

1.2 气象台站观测资料

选取北疆地区 45 个地面气象观测站测量的 2006—2010 年 5 个积雪季 (12 月至次年 2 月) 积雪深度, 分别用于发展算法和验证反演结果。

1.3 辅助数据

地形起伏, 地表大型水体, 森林覆盖和湿雪等强烈地影响被动微波反演雪深、雪水当量的精度。为尽可能地挑选出可信的样本建立算法, 剔除不可

信样本和提高反演精度, 需要使用辅助数据, 主要包括北疆地区地、州、市和县级行政区划、地表分类等数据资料。其中, 地表分类数据为中国西部 2000 年的 1:100 000 土地利用图, 来源于国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心” (<http://westdc.westgis.ac.cn>)。

1.4 数据筛选

由于被动微波数据受许多因素的影响, 在建立 AMSR-E 亮温数据和实测雪深之间的反演模型时, 需要剔除一些不合理的观测数据。采用以下方法对观测数据进行筛选:

(1) 剔除气象站点观测的雪深小于 3 cm 的样本。由于 19 GHz 和 37 GHz 通道的被动微波亮温数据只能探测到大于 2.5 cm 的雪深, 因此剔除雪深小于 3 cm 的样本^[11]。

(2) 剔除受深霜层影响的部分观测样本。当月平均气温小于 -10°C , 且雪盖较浅 (0.5~10.0 cm) 时, 一般在雪盖和地表之间会形成深霜层^[23]。当雪盖较深时, 雪盖层之间、雪盖与地面之间会形成多层深霜层。深霜层与积雪相似的微波辐射特性对积雪深度的反演会造成显著影响^[24]。

(3) 删除 AMSR-E 升轨数据。为避免下午融雪对反演雪深的影响, 本研究只采用卫星夜间过境 (即降轨) 的数据。

(4) 地表水域的影响。当陆地表面有湖泊时, 使得 AMSR-E 像元内的吸收特征增强, 散射特征减弱, 导致无法反演雪深, 需利用地理信息数据剔除这些像元。

对采用上述筛选方法得到的有效样本的亮温差值与实测雪深进行回归分析, 建立北疆地区基于 AMSR-E 亮度温度数据的雪深反演模型。

2 雪深反演方法

采用 NASA 算法模型进行北疆地区的雪深反演, 根据 AMSR-E 亮温数据各个波段水平极化差与气象台站观测的雪深数据进行拟合。

由于下垫面不同会对下垫面的微波辐射有不同的影响, 本文对北疆 45 个气象站点按不同地表类型进行了分组, 分布图如图 1 所示。

按以上地表类型的不同, 利用北疆地区 AMSR-E 资料以及 2007/2008 至 2009/2010 年度 3 个积雪季 (当年 12 月至次年 2 月) 的积雪深度实测资料, 建立一组 19GHz 与 37GHz 水平极化亮温差与积雪深度实测值相匹配的样本表。由于考虑了不同

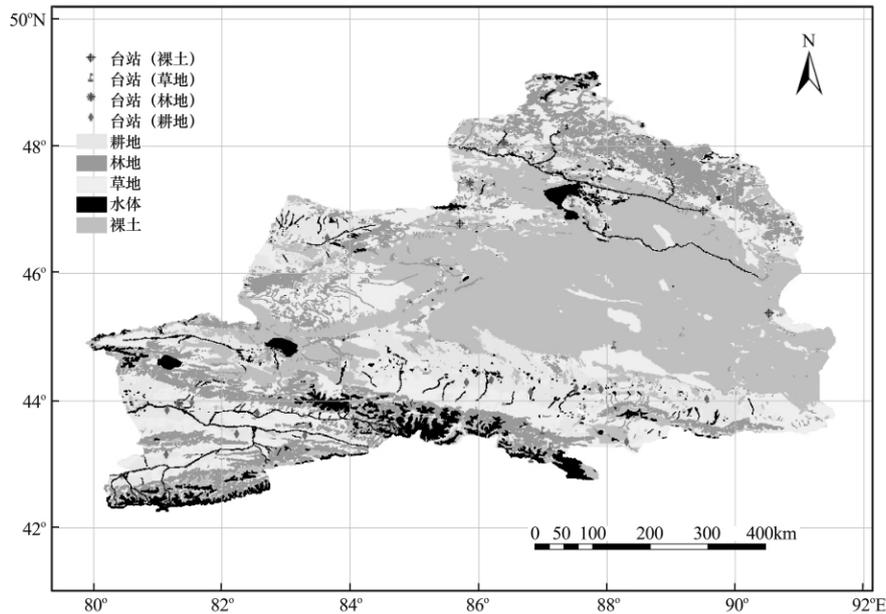


图 1 北疆地区地表类型及站点分布

Fig. 1 Map showing the land surface types and locations of meteorological stations in Northern Xinjiang Region

表 1 拟合反演算法统计

Table 1 A summary of the fitting algorithm

公式	R	R^2	调整 R^2	标准估计误差	显著性
(1)	0.672	0.452	0.452	7.780	0.000
(2)	0.661	0.437	0.435	6.685	0.000
(3)	0.738	0.545	0.545	6.945	0.000
(4)	0.687	0.472	0.471	12.902	0.000

下垫面的影响,反演模型反演的雪深值和实测雪深值的相关性较好,利用样本表进行回归计算,生成不同地表类型的积雪深度回归方程:

下垫面为耕地的雪深反演公式:

$$SD = (T_{b19H} - T_{b37H}) \times 0.654 + 3.942, \\ R^2 = 0.452 \quad (1)$$

下垫面为林地的雪深反演公式:

$$SD = (T_{b19H} - T_{b37H}) \times 0.848 + 4.181, \\ R^2 = 0.437 \quad (2)$$

下垫面为草地的雪深反演公式:

$$SD = (T_{b19H} - T_{b37H}) \times 1.077 + 2.448, \\ R^2 = 0.545 \quad (3)$$

下垫面为裸土的雪深反演公式:

$$SD = (T_{b19H} - T_{b37H}) \times 1.408 - 9.452, \\ R^2 = 0.471 \quad (4)$$

式中: SD 为雪深 (cm); T_{b19H} 与 T_{b37H} 分别为 19 GHz 和 37 GHz 的水平极化亮温值。

对以上回归方程用 SPSS 软件对模型进行检验,决定系数 R^2 分别为 0.452、0.437、0.545、

0.471, R^2 值越大表示拟合优度越好。经检验(表 1 所示),通过了 0.01 的显著性水平,表明拟合模型是合理的。其散点图如图 2 所示。

3 结果与分析

3.1 模型选择

由不同波段两两组合分别与实测雪深值进行相关分析,由计算结果得出 19 GHz 与 37 GHz 的水平极化亮温差相关性最好(图 3)。

3.2 雪深反演模型精度评价

利用气象台站观测的每日雪深数据,计算雪深反演模型模拟的雪深与实测值在不同积雪水平下的平均误差、负向平均误差、正向平均误差、绝对平均误差、均方根误差(RMSE),用以分析反演模型的雪深估测精度。另外,将雪深反演模型同 Chang 算法进行对比分析。

将式(1)~(4)分别代入对应的地表类型区域进行雪深反演,利用北疆地区 2010 年 12 月至 2011 年 2 月共挑选出的 1 975 对有效数据,对所建立的

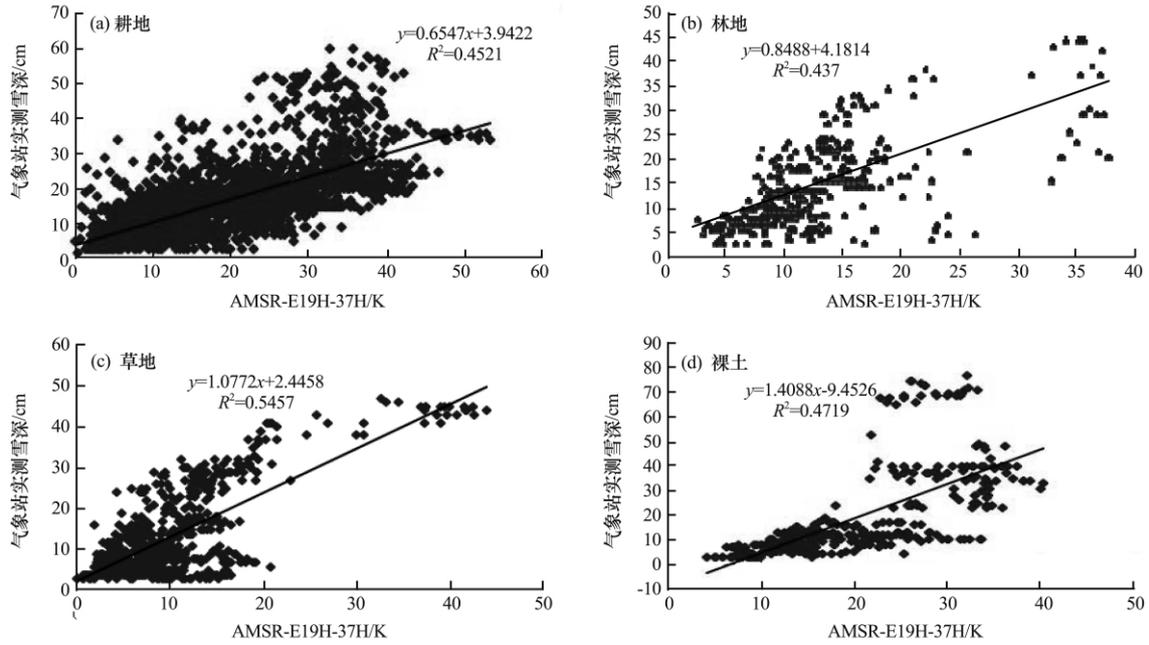


图 2 AMSR-E 19 GHz 和 37 GHz 水平极化亮温差与实测雪深的散点图

Fig. 2 The scatter charts between measured snow depth and AMSR-E 19 GHz and 37 GHz horizontally polarized brightness temperature difference

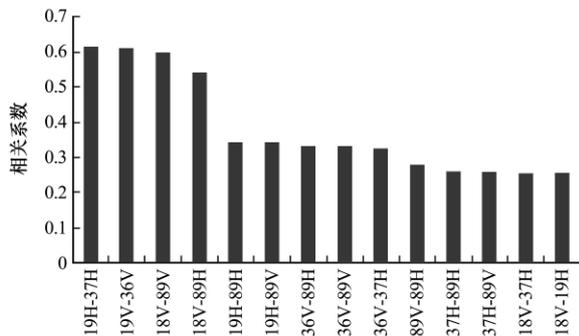


图 3 不同波段组合与实测雪深的相关系数

Fig. 3 The correlation coefficients of different wave band combination and measured snow depth

雪深模型进行精度评价(表 2)。结果表明,当雪深为 3~10 cm 时,反演模型和 Chang 算法反演值的均方根误差分别为 6.1 cm 和 12.7 cm。当雪深为 11~30 cm 时,反演模型反演的雪深值的平均误差仅为 2.6 cm,而 Chang 算法的平均误差为 -15.8 cm;反演模型的负向、正向平均误差分别

为 -4.9 cm 和 7.5 cm, Chang 算法分别为 -20.6 和 5.3 cm;反演模型绝对平均误差为 6.2 cm,而 Chang 算法达 17.8 cm; Chang 算法的 RMSE 值为 17 cm,而反演模型为 7.2 cm。当雪深大于 30 cm 时,反演模型平均误差为 10.4 cm, Chang 算法为 -4.4 cm;绝对平均误差分别为 13.4 cm 和 19.3 cm, RMSE 值分别为 10.8 cm 和 23 cm。从以上的分析比较可以得出,反演模型在北疆地区较 Chang 算法有很大的改进,能比较准确地监测北疆地区的积雪变化情况。且当雪深在 11~30 cm 时,反演模型精度较高。北疆地区的冬季雪深大多分布在 10~25 cm,所以模型反演的雪深值基本上能反映北疆地区雪深的实际分布状况。但在局部地区,尤其是雪深大于 30 cm 的地区反演误差较大,在雪深小于 10 cm 时高估了雪深值,在雪深大于 30 cm 时低估了雪深值,反演精度还有待于进一步提高。

为了进一步验证反演模型精度,利用 Chang 的半经验、半理论算法($SD=1.59(T_{b18} - T_{b37})$)反演

表 2 不同雪深反演模型精度分析结果

Table 2 Retrieval model accuracy analysis results for different snow depths

台站雪深/cm	样本数	误差平均值/cm	负向平均误差/cm	正向平均误差/cm	绝对平均误差/cm	RMSE/cm
3~10	616	-5.1	-6.2	1.9	5.7	6.1
11~30	1018	2.6	-4.9	7.5	6.2	7.2
>30	341	10.4	-12.4	13.5	13.4	10.8

表 3 不同雪深 Chang 算法精度分析结果

Table 3 The Chang algorithm accuracy analysis results for different snow depths

台站雪深/cm	样本数	误差平均值/cm	负向平均误差/cm	正向平均误差/cm	绝对平均误差/cm	RMSE/cm
3~10	616	-13.2	-14.3	2.8	13.6	12.7
11~30	1018	-15.8	-20.6	5.3	17.8	17
>30	341	-4.4	-23.1	15.3	19.3	23

北疆地区雪深状况, 并对反演结果做精度分析(表 3)。比较式(1)~(4)和 Chang 的算法, 式(1)~(4)反演的雪深值在整个雪深范围内, 在平均误差、负

向平均误差、绝对平均误差、RMSE 等各项指标上均小于 Chang 算法的反演值。从以上的分析比较可以得出, 反演模型在北疆地区较 Chang 算法有很

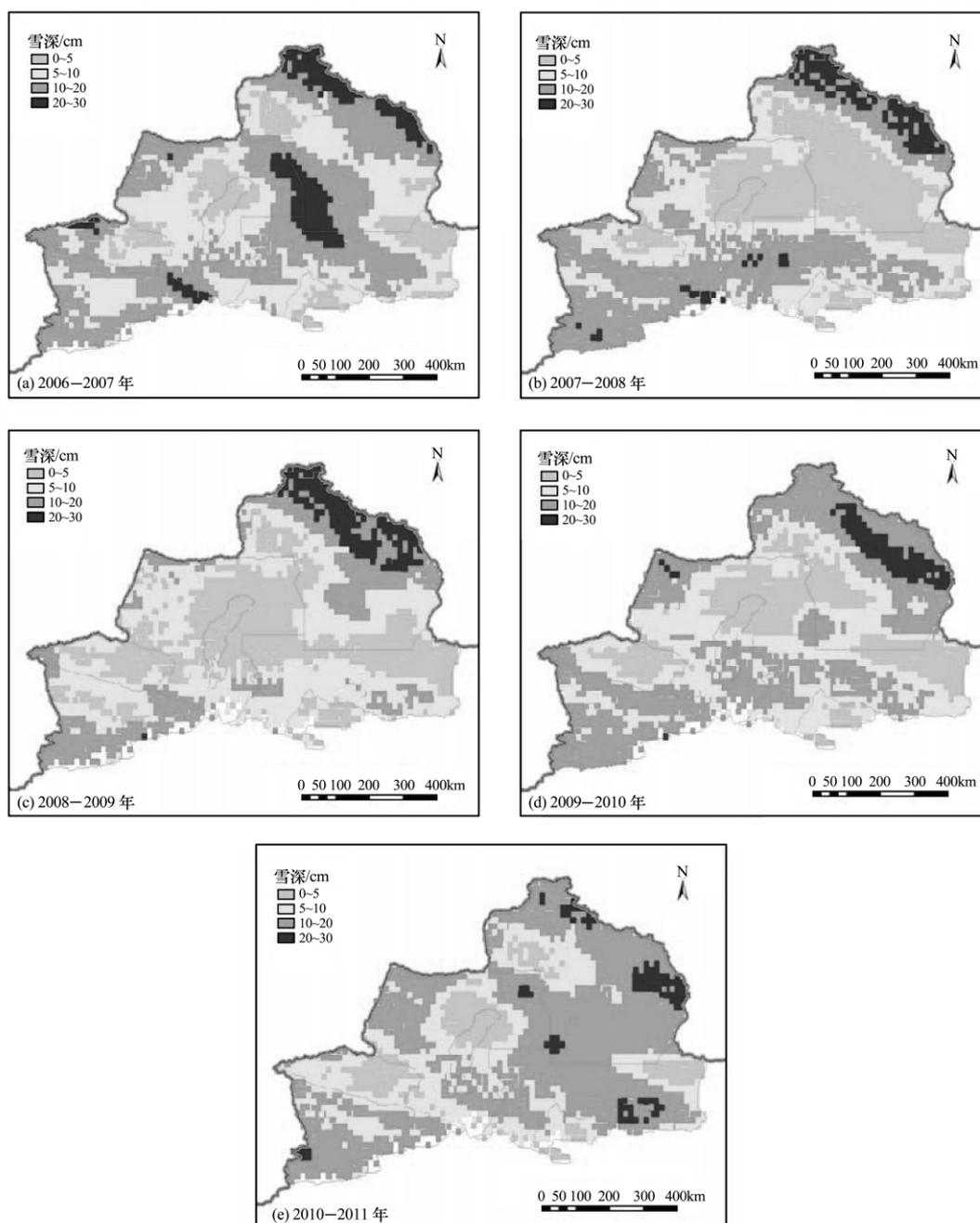


图 4 2006—2011 年 5 个积雪季北疆地区平均积雪深度分布

Fig. 4 Average snow depth maps in North Xinjiang Region of five winters from 2006 to 2011

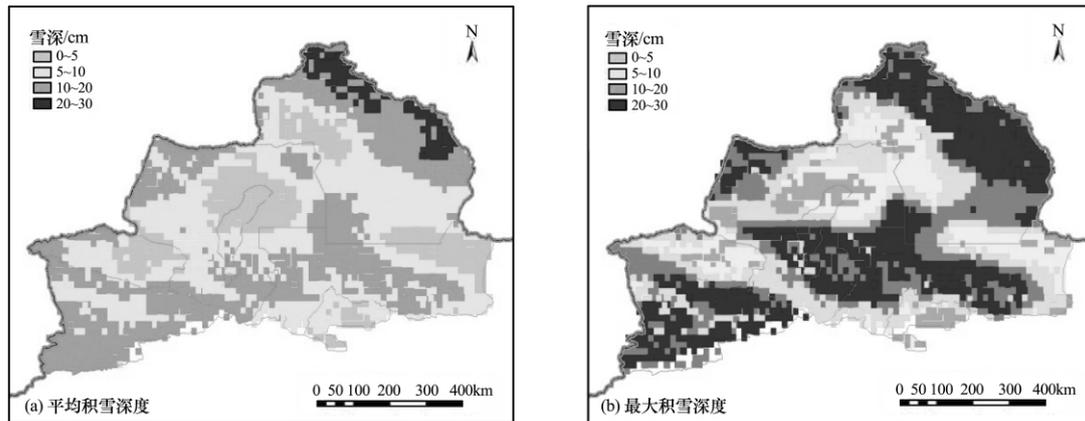


图 5 2006/2007—2010/2011 年度合成积雪深度

Fig. 5 The synthesized average snow depth map (a) and synthesized max snow depth map (b) in North Xinjiang Region, 2006—2011

大的改进, 能比较准确地监测北疆地区的积雪变化情况。

3.3 北疆地区积雪深度时空变化分析

平均积雪深度显示积雪的空间总体分布状态, 最大积雪深度显示积雪的空间最大分布状态, 由于一幅影像常常无法覆盖整个新疆区域, 因此通过合成可以得到一个积雪季完整的雪深分布图。利用北疆地区雪深反演模型(式(1)~(4)), 采用均值和最大值合成法反演出北疆地区 2006/2007—2010/2011 年度 5 个积雪季平均积雪深度分布及最大积雪深度分布图像(图 4 和图 5)。平均积雪深度图显示北疆地区积雪主要分布于北部阿尔泰山一带, 最大积雪深度图显示北疆地区积雪主要分布于北部阿尔泰山一带和南部天山一带、伊犁河谷地区, 其中阿尔泰山地区所占比重最大, 而在中部的准噶尔盆地、克拉玛依地区雪层较浅。

4 结论与讨论

(1) 利用北疆地区 2007/2008—2009/2010 年度积雪季(12 月至翌年 2 月)的降轨 AMSR-E 和 19 GHz、37 GHz 波段的水平极化亮温数据, 结合北疆地区 45 个气象台的实测雪深等气象数据, 建立北疆地区雪深反演回归模型。结果表明: 雪深在 3~10 cm 时, 反演模型反演的雪深值的负向平均误差为 -5.1 cm, RMSE 值为 6.1 cm; 雪深在 11~30 cm 时, 反演模型雪深反演值的平均误差仅为 2.6 cm, RMSE、正向平均误差、绝对平均误差均较小; 雪深大于 30 cm 时, 反演雪深值各项误差均较大; 与 Chang 算法比较发现, 反演模型在北疆地区明显优于 Chang 算法, 能够反映北疆地区积雪深

度变化特征。

(2) 用合成方法反演北疆地区 2006/2007—2010/2011 年度 5 个积雪季的平均雪深分布和最大雪深分布, 结果显示北疆地区积雪主要分布于北部阿尔泰山和南部天山一带, 其中, 阿尔泰山地区所占比重最大, 而在中部的准噶尔盆地腹地、克拉玛依地区雪层较浅。

(3) 由于 AMSR-E 被动微波遥感资料的空间分辨率很小(约 25 km), 所以其反演的积雪深度是整个大约 625 km² 面积内的积雪总体信息; 而在格网地图中, 每个 grid 的格网单元都含有一个确定的值, 一个格网的亮温值是该格网所对应的地表范围的亮温, 然而混合像元现象的普遍存在, 对反演结果的精度造成影响。因此, 由被动微波遥感数据进行积雪参数的反演更适合于大尺度研究, 对于小区域的积雪研究并不理想。如何利用高分辨率的光学遥感影像与微波遥感数据融合来进一步分析积雪的空间分布状况, 从而更准确地反演积雪参数, 将是下一步进行研究的内容。

(4) 气象站点数据误差。由于气象站一般设在城镇, 近年来由于城镇化的快速发展, 使气象站的探测环境受到了很大影响, 仅在一些偏远的小县城, 很多气象站都因为探测环境受到破坏而不得不将气象站迁出城市。基于这些考虑, 有些气象站点就不能代表 AMSR-E 一个像元 25 km×25 km 如此大范围地区的积雪情况。混合像元的普遍存在严重影响了雪深反演效果, 因此, 在反演之前应剔除那些不能代表所在区域 25 km 范围的雪深情况的站点。对站点剔除的量化标准是下一步需要研究解决的内容。

(5) 从总体上看, 被动微波监测积雪面积的精度不如可见光^[11], 但它在估算雪深和雪水当量方面的作用不可替代。然而, 雪深和雪水当量的反演算法还存在很多的不确定性。因此, 发展更为可靠的算法以减少误差, 以及发展利用 89GHz 等高频波段监测浅雪的方法, 都是重要的研究方向。

参考文献 (References):

- [1] Liang Tiangang, Wu Caixia, Chen Quangong, *et al.* Snow classification and monitoring models in the pastoral areas of the Northern Xinjiang[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.]
- [2] Chen Qian, Chen Tianyu. Climatological analysis of seasonal snow resources in Qilian Mt. [J]. *Geographical Research*, 1991, **10**(1): 24-38. [陈乾, 陈添宇. 祁连山区季节性积雪资源的气候分析[J]. *地理研究*, 1991, **10**(1): 24-38.]
- [3] Yan Hao. A comparison of MODIS and passive microwave snow mappings[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, **27**(4): 515-519. [延昊. 利用 MODIS 和 AMSR-E 进行积雪制图比较分析[J]. *冰川冻土*, 2005, **27**(4): 515-519.]
- [4] Huang Xiaodong, Zhang Xuotong, Li Xia, *et al.* Analysis for MODIS snow products of MOD10A1 and MOD10A2 in Northern Xinjiang area[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, **29**(5): 722-729. [黄晓东, 张学通, 李霞, 等. 北疆牧区 MODIS 积雪产品 MOD10A1 和 MOD10A2 的精度分析与评价[J]. *冰川冻土*, 2007, **29**(5): 722-729.]
- [5] Feng Qisheng, Zhang Xuotong, Liang Tiangang. Dynamic monitoring of snow cover based on MOD10A1 and AMSR-E in the north of Xinjiang Province, China[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, **18**(1): 125-133. [冯琦胜, 张学通, 梁天刚. 基于 MOD10A1 和 AMSR-E 的北疆牧区积雪动态监测研究[J]. *草业学报*, 2009, **18**(1): 125-133.]
- [6] Zhang Xuotong, Huang Xiaodong, Liang Tiangang, *et al.* Accuracy analysis for MODIS snow data of MOD10A1 in a pastoral area in Northern Xinjiang [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2008, **17**(2): 111-117. [张学通, 黄晓东, 梁天刚, 等. 新疆北部地区 MODIS 积雪遥感数据 MOD10A1 的精度分析[J]. *草业学报*, 2008, **17**(2): 110-117.]
- [7] Wang Zhiwei, Zhang Xuotong, Zhou Zhaoye, *et al.* Research progress of satellite data utilization for snow monitoring in pastoral areas[J]. *Pratacultural Science*, 2009, **26**(1): 32-39. [王志伟, 张学通, 周兆叶, 等. 牧区积雪监测中卫星资料应用的研究现状[J]. *草业科学*, 2009, **26**(1): 32-39.]
- [8] Li Xiaolan, Zhang Feimin, Wang Chenghai. Comparison and analysis of snow depth over China, observed and derived from remote sensing[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(4): 755-764. [李小兰, 张飞民, 王澄海. 中国地区地面观测积雪深度和遥感雪深资料的对比分析[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(4): 755-764.]
- [9] He Liye, Li Dongliang. Classification of snow cover days and comparing with satellite remote sensing data in West China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(2): 237-245. [何丽烨, 李栋梁. 中国西部积雪日数类型划分及与卫星遥感结果的比较[J]. *冰川冻土*, 2011, **33**(2): 237-245.]
- [10] Dai Shengpei, Zhang Bo, Cheng Feng, *et al.* The spatio-temporal variations of snow cover in China from the snow depth time series dataset based on passive microwave remote sensing[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32**(6): 1066-1073. [戴声佩, 张勃, 程峰, 等. 基于被动微波遥感反演雪深的时间序列分析我国积雪时空变化特征[J]. *冰川冻土*, 2010, **32**(6): 1066-1073.]
- [11] Che Tao, Li Xin. Retrieval of snow depth in China by passive microwave remote sensing data and its accuracy assessment [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2004, **19**(5): 301-306. [车涛, 李新. 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*, 2004, **19**(5): 301-306.]
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Tait A B. Estimation of snow water equivalent using passive microwave radiation data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, **64**(3): 286-291.
- [15] Kelly R E, Chang A T, Tsang L, *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.
- [16] 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**(2): 132-142.
- [17] Gao Rong, Wei Zhigang, Dong Wenjie. Analysis of the cause of the differentia in interannual variation between snow cover and seasonal frozen soil in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, **26**(2): 153-159. [高荣, 韦志刚, 董文杰. 青藏高原冬春积雪和季节冻土年际变化差异的成因分析[J]. *冰川冻土*, 2004, **26**(2): 153-159.]
- [18] Cao Meisheng, Li Peiji, Robinson D A, *et al.* Evaluation and primary application of microwave remote sensing SMMR-derived snow cover in Western China[J]. *Remote Sensing of Environment China*, 1993, **8**(4): 260-269. [曹梅盛, 李培基, Robinson D A, 等. 中国西部积雪 SMMR 微波遥感的评价与初步应用[J]. *环境遥感*, 1993, **8**(4): 260-269.]
- [19] Cao Meisheng, Li Peiji. Microwave remote sensing monitoring of snow cover in Western China[J]. *Mountain Research*, 1994, **12**(4): 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**(4): 230-234.]
- [20] Bo Yanchen, Feng Xuezi, 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, 冯雪智, 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.]
- [21] Gao Feng, Li Xin, Armstrong R L, *et al.* Preliminary appli-

- cation of passive microwave data to operational snow monitoring in Tibetan Plateau[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2003, **18**(6): 360–363, 456. [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, 456.]
- [22] 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.]
- [23] Armstrong R L, Chang A, Rango A, *et al.* Snow depth and grain-size relationships with relevance for passive microwave studies[J]. *Annals of Glaciology*, 1993, **17**: 171–176.
- [24] Hong Wen, Wei Wenshou, Liu Mingzhe, *et al.* Depth hoar development under different shading conditions in seasonal snow cover[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, **32**(8): 979–985. [洪雯, 魏文寿, 刘明哲, 等. 季节性积雪区不同遮挡条件下深霜发育比较[J]. *地理科学*, 2012, **32**(8): 979–985.]

Snow Depth Retrieval Based on AMSR-E Data in Northern Xinjiang Region, China

LU Xin-yu¹, WANG Xiu-qin³, CUI Cai-xia¹, XIE Guo-hui²

(1. *Xinjiang Meteorological Observatory, Ürümqi Xinjiang 830002, China*; 2. *Xinjiang Meteorological Bureau, Ürümqi Xinjiang 830002, China*; 3. *Changji Meteorological Bureau, Changji Xinjiang 831100, China*)

Abstract: Combining brightness temperature data at 19 GHz and 37 GHz vertical and horizontal polarization channel of AMSR-E data and measured snow depth data from 45 meteorological stations in Northern Xinjiang Region in 2007–2009 snow season (December–February), a snow depth retrieval model was established based on AMSR-E brightness temperature data. The accuracy of the model was evaluated. The result shows the negative average error of retrieval snow depth is -5.1 cm and RMSE is only 6.1 cm for snow depth ranging from 3 to 10 cm. When snow depth is between 11 and 30 cm, the average error of retrieval snow depth is 2.6 cm only, and its RMSE, positive average error and absolute average error are all less. When snow depth is larger than 30 cm, the errors of retrieval snow depth are larger. Comparing the retrieval snow depth with the observed data, it is found that

the simulations show a great agreement with the observations at meteorological stations in Northern Xinjiang Region. This basically reflects the snow depth distribution in Northern Xinjiang Region. Comparing Chang algorithm with the retrieval model in this study reveals that the latter is superior to the former and can describe snow depth variation characteristics well in Northern Xinjiang Region. Meanwhile, an average snow depth distribution map and a most heavy snow depth map are drawn by using synthetic method from five snow seasons (2006–2010). The maps show that snow cover is mainly distributed in the Altay Mountains in the north and the Tianshan Mountains in the south, with a maximum in the Altay Mountains. The snow cover is thin in the hinterland of Junggar basin and Karamay area.

Key words: passive microwave remote sensing; AMSR-E; snow depth; snow depth retrieval; Northern Xinjiang Region; validation