

风三微波亮温数据在北疆地区的雪深反演研究

李 杨¹, 张 璞², 刘 艳¹, 卢新玉³, 马丽云²

(1. 中国气象局 乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002;

2. 乌鲁木齐气象卫星地面站, 乌鲁木齐 830011; 3. 新疆气象台, 乌鲁木齐 830002)

摘 要:根据地理环境和气候差异将新疆北疆地区分为天山北坡、阿勒泰地区、塔额盆地、伊犁地区和古尔班通古特沙漠 5 个典型区域, 计算了 2010—2011 年冬春两季 FY-3B 微波成像仪(MWRI)L1 18.7 GHz 和 36.5 GHz 垂直/水平极化 4 通道降轨亮温数据, 采用 Neale 干湿雪判别标准去除湿雪像元, 同时结合 MOD10A1 日雪盖产品剔除无雪区, 得到各个分区积雪区域内的干雪像元亮温数据, 将其与对应气象站同期实测雪深进行回归拟合, 其中, 实测雪深满足日最高温 $\leq 6^{\circ}\text{C}$ 和雪深 $\geq 5\text{ cm}$ 两个条件, 最终建立了北疆地区 5 个典型分区的干雪雪深反演模型。结果显示, ① 天山北坡、阿勒泰地区气象站分布均匀且数量较多, 反演误差较小, 实测雪深 $\geq 15\text{ cm}$ 时, 误差百分比仅为 8% 和 11%; 古尔班通古特沙漠测站虽少, 但其模型反演误差最小, 由于该区域站点较少, 模型代表性不够; ② 北疆冬季气温较低, 易形成深霜层和冻土层, 这会对微波辐射形成较大的影响, 在冬季温度较低、积雪深度较大的阿勒泰地区和塔额盆地表现得尤为明显。

关键词:北疆地区; FY-3B 微波成像仪; 降轨; 亮温; 模型反演误差

中图分类号: TP722.6; P426.63⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)04-0166-06

Research on Snow Depth Retrieval from FY-3B Microwave Brightness Temperature in North Xinjiang

LI Yang¹, ZHANG Pu², LIU Yan¹, LU Xin-yu³, MA Li-yun²

(1. Institute of Desert Meteorology CMA, Urumqi 830002, China; 2. Urumqi Meteorological Satellite

Ground Station, Urumqi 830011, China; 3. Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, China)

Abstract: According to geographical environment and climatic differences, North Xinjiang was divided into five typical regions: the northern slope of Tianshan, Altai region, Tae basin, Yili Prefecture and Gurbantunggut Desert. Brightness temperature data at 18.7 GHz and 36.5 GHz vertical and horizontal polarization channel were calculated by L1 data of FY-3B microwave radiation imager (MWRI) at 2010—2011 winter and spring in the study area. Based on Neale's wet and dry snow criterion, wet snow pixels were removed. Non-snow zone was also excluded combining MOD10A1 day snow cover products. Brightness temperature data of dry snow pixel in sub-snow-regions were extracted. And then the measured snow depth of corresponding weather stations and the extracted brightness temperature data were fitted during the same period. The measured snow depth needed to meet two conditions, where the daily maximum temperature was less than 6°C and the snow depth was greater than or equal to 5 cm. Finally, the dry snow depth retrieval model was established respectively for the five above regions. The results showed that: (1) for the evenly distributed weather stations, the model inversion error was small in Tianshan Mountains and Altay region. When the measured snow depth was greater than or equal to 15 cm, the error percentage of the two regions was only 8% and 11%, respectively; (2) the model inversion error for the Gurbantunggut Desert station was the least among the five regions, while a small number of sites in the region was insufficient to represent the model; (3) low winter temperature in north Xinjiang, lead to forming a deep layer of frost and permafrost easily.

收稿日期: 2013-01-04

修回日期: 2013-02-04

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

作者简介: 李杨(1976—), 女, 新疆石河子人, 学士, 副研究员, 主要从事积雪遥感等方面的研究。E-mail: liyang@idm.cn

This might have a greater influence on microwave radiation. As their lower temperature and deeper snow depth in the winter, it was particularly obvious in Altay region and the Tae basin.

Key words:North Xinjiang; FY-3B microwave radiation imager; descent orbit; brightness temperature; model inversion error

风云三号气象卫星(FY-3)是我国新一代极轨气象卫星,具有高灵敏度、高光谱分辨率、高精度、宽视场、定量遥感等特点^[1],并首次设计搭载了微波成像仪(MWRI),能够利用被动微波遥感技术获取雪深、雪水当量等重要的积雪参数,进而运用于大范围冰雪资源的动态监测和反演。

北疆是我国三大稳定季节积雪区之一^[2],也是新疆主要的畜牧业基地。由于冬、春季雪灾频繁,造成大批牲畜因雪灾而死亡,交通和通讯设备遭到破坏,严重影响了草地畜牧业的可持续发展^[3]。同时冰雪融水是北疆地区河流的主要补给来源^[4],大范围冰雪资源动态监测和反演对水资源的合理利用、农业生产和防灾减灾都具有重要的生产和科学意义。

各国冰雪科学工作者利用 NOAA、陆地卫星和 EOS 等多光谱遥感数据研究大范围积雪动态变化、积雪深度反演等方面取得了长足的进展^[5-9],其中微波遥感以其较强的穿透能力和全天候的优势在土壤水分^[10]、积雪参量的反演方面具有广阔的应用前景。近 10 a,科学家们在 Chang 算法^[11]的基础上开展了大量卓有成效的研究^[12-13],为微波遥感积雪参数反演的发展奠定了坚实的基础。但目前还未见针对北疆特殊地理环境下积雪参数的微波遥感研究,鉴于此,本文拟使用风云三号卫星微波成像仪(FY3/MWRI)数据结合北疆气象台站实测雪深,探索适用于北疆地区的微波遥感雪深反演算法。

1 研究区概况与数据处理

1.1 研究区概况

北疆位于天山以北,阿尔泰山以南,处于 42°—50°N,79°—92°E 之间,面积为 39 万 km²(图 1)。冬季降雪较多,主要以稳定的季节性积雪为主,每年 11 月至次年 3 月为积雪稳定期,平均雪深在 10 cm 以上,最深能达到 50 cm 以上^[14],该地区地势相对平坦,森林覆盖度较低,地表大型水体较少,较适宜开展大范围微波积雪深度的反演。

1.2 数据及处理方法

1.2.1 风云三号微波亮温数据 卫星数据为 FY-3BMWRIL1 数据,使用了 18.7 GHz、36.5 GHz 垂直和水平极化 4 个通道的降轨亮温数据(文中记为 19V,19H,37V,37H)。MWRI L1 产品是经过数据

预处理生成的包含了定标、定位信息,能够用于定量产品计算和其他科学应用、标准 HDF5 格式的科学数据^[15]。获取时间是 2010 年 11 月—2011 年 3 月,由于积雪中的液态水含量对微波信号的影响很大,为了避免白天由于融雪产生的影响,本研究只采用降轨卫星数据。FY-3B MWRI L1 数据处理流程如图 2 所示。

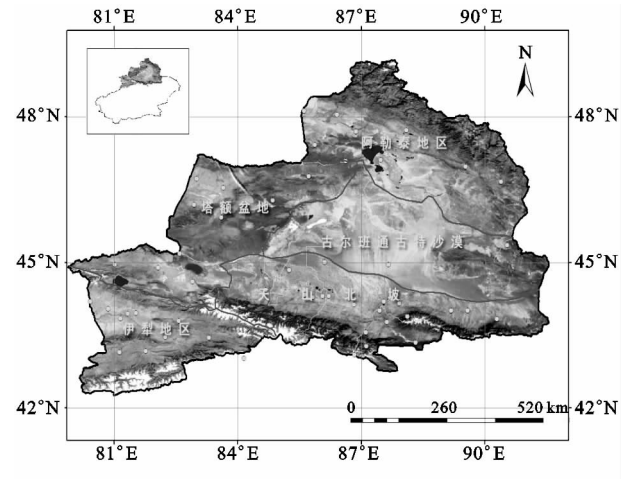


图 1 北疆地区气象站示意图

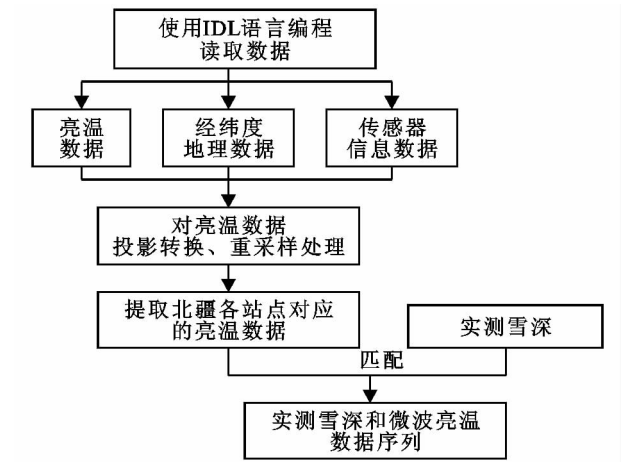


图 2 FY-3B MWRI L1 数据处理流程

1.2.2 MODIS 雪盖数据 MODIS 雪盖数据来源于 NASA 国家雪冰中心(NSIDC)的数据发布中心(DAAC),为 Terra/MOD10A1 每日积雪合成产品,本研究使用覆盖北疆地区的 2010 年 11 月 1 日—2011 年 3 月 31 日的 MOD10A1 数字图像 302 景。

利用 MODIS 重投影工具(MRT)、Arcview 及 ENVI 软件对 MODIS 雪盖数据进行合并、重采样、裁剪等多种处理工作,最后得到北疆各气象站点对应

的像元数据,用于模型建立时剔除非雪像元。

1.2.3 气象站实测积雪深度数据和其他辅助数据
积雪资料为 2010 年 11 月—2011 年 3 月北疆 48 个气象站冬春两季的逐日积雪深度数据。气象站海拔范围从 280 m 到 3 500 m,覆盖了北疆不同的地表类型,图 1 上标注了北疆实测雪深气象站的分布。其他辅助数据还包括研究区高程和土地利用数据。

2 积雪深度反演

2.1 原理

卫星传感器上获得的微波亮温来自大气、雪盖和地表的能量辐射,雪颗粒是强散射体,土壤的向上微波辐射会被覆盖其上的积雪散射。积雪越深,其散射越强,则到达卫星传感器的辐射强度越弱。因而这种散射作用可用于探测积雪的存在和厚度^[16]。积雪的散射主要受到雪层的深度、雪密度、雪粒大小以及雪表面粗糙度的影响^[17]。

20 世纪 70 年代末,Chang 等基于辐射传输理论和米氏散射理论,在假设雪密度为 0.3 g/cm³ 且雪粒径为 0.35 mm 的前提下,得到利用 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^[5]。

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

式中:SD——雪深(cm); T_{18H} 、 T_{37H} ——SMMR 的 18 GHz 和 37 GHz 的水平极化亮度温度数据。

当前基于被动微波数据的雪深算法大都是在 Chang 算法的基础上根据当地的具体条件进行修正。

2.2 北疆积雪深度反演算法的建立

2.2.1 数据筛选 通过对 MODIS 雪盖产品的计算处理,得到与风云三号微波数据相同时段的北疆积雪

覆盖数据,首先剔除非雪像元,以保证在有积雪覆盖地表的像元上进行雪深反演。

使用被动微波数据进行雪深反演主要受到湿雪、水域、森林及微波混合像元等问题的影响,因此在建立反演模型时需要剔除一些不合理的观测数据。通过研究各台站雪深观测值和各波段亮温数据之间的相关性,采用如下方法对观测数据进行进一步筛选:

(1) 剔除无图像和处于裂隙中无有效数值的样本。

(2) 18.7 GHz 和 36.5 GHz 通道的被动微波亮温数据只能探测到>2.5 cm 的雪深,实际中对风三微波亮温数据和实测雪深的对比分析发现,5 cm 以下的雪深判识误差非常大,因此剔除了台站雪深<5 cm 的观测样本。

(3) 北疆地区当日最高温 $\geq 6^{\circ}\text{C}$ 时,融雪现象较为严重,因此剔除了日最高温 $\geq 6^{\circ}\text{C}$ 的观测样本。

(4) 雪中含水量的影响。湿雪中的含水量会影响雪层的介电常数,导致微波辐射不能精确监测积雪深度,采用 Neale 等^[18]区分干雪和湿雪的判别标准去除湿雪像元,只对干雪像元进行雪深反演。

(5) 深霜层的影响。当月平均气温 $<-10^{\circ}\text{C}$,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。深霜层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。因此也剔除了受深霜层影响的部分观测样本。

(6) 通过辅助数据进一步去除了受水体、森林影响较大及处于城镇地区的站点。

经过上述筛选方法得到 1 603 对有效样本(表 1),对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 FY-3B 微波亮温数据的雪深反演模型。

表 1 建模样本和验证样本数量

						对
分区	天山北坡	阿勒泰地区	塔额盆地	伊犁地区	古尔班通古特沙漠	合 计
建模样本数	523	403	319	270	88	1603
验证样本数	196	162	129	120	46	653

2.2.2 北疆积雪深度反演算法的建立 北疆地域辽阔,各地区之间地形、气候、下垫面等地理环境差异较大,气象站点稀少且分布不均,因此,本研究中将北疆地区分为天山北坡、阿勒泰地区、塔额盆地、伊犁地区、古尔班通古特沙漠等 5 个典型区,对有效样本的亮温差值和实测雪深按照各分区进行回归分析,得到北疆各分区的积雪深度算法。

阿勒泰地区积雪深度反演算法:

$$SD=-0.016\times(T_{19H}-T_{37H})^2+1.2549\times(T_{19H}-T_{37H})+10.391\quad(2)$$

天山北坡积雪深度反演算法:

$$SD=-0.025\times(T_{19H}-T_{37H})^2+1.316\times(T_{19H}-T_{37H})+5.675\quad(3)$$

塔额盆地积雪深度反演算法:

$$SD=-0.066\times(T_{19H}-T_{37H})^2+3.125\times(T_{19H}-T_{37H})+2.463\quad(4)$$

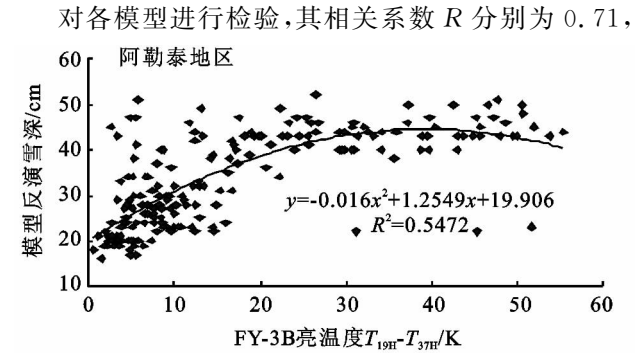
伊犁地区积雪深度反演算法:

$$SD=-0.014\times(T_{19H}-T_{37H})^2+0.819\times(T_{19H}-T_{37H})+9.642\quad(5)$$

古尔班通古特沙漠积雪深度反演算法:

$$SD = -0.012 \times (T_{19H} - T_{37H})^2 + 0.565 \times (T_{19H} - T_{37H}) + 11.580 \quad (6)$$

式中: SD——雪深, cm; T_{19H} , T_{37H} ——18.7 GHz 和 36.5 GHz 的水平极化亮温值。



0.70, 0.65, 0.42, 0.61, 经 F 检验, 均通过了 0.001 的显著性水平。因此建立的反演模型具有显著的统计学意义, 拟合模型是合理的。图 3 为阿勒泰地区和天山北坡两个典型区域有效样本高温差值与实测雪深的散点图。

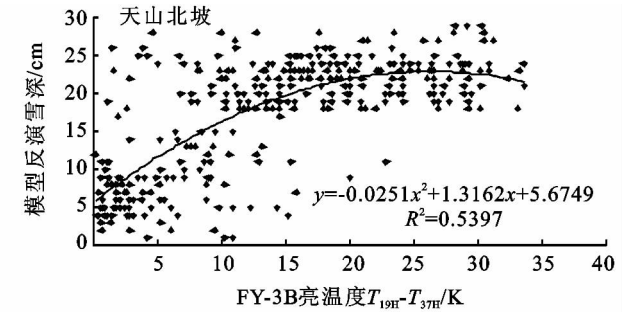


图 3 北疆典型区域 FY-3B 亮温差实测雪深散点图

3 反演结果评价

3.1 反演算法订正结果与误差

利用反演算法(2)—(6)式对北疆积雪深度进行计算, 并与实测值进行对比, 结果表明, 天山北坡、阿勒泰地区、塔额盆地、伊犁地区、古尔班通古特沙漠 5 个典型区估计雪深的标准差分别为 5.6, 11.2, 11.5,

6.7, 2.7 cm, 误差百分比分别为 29.9%, 36.9%, 35.7%, 42.2%, 17.0%。公式(2)—(6)拟合误差分布的直方图(图 4)。

由图 4 可以看出, 在天山北坡、阿勒泰地区和伊犁地区, 绝对误差分布在 10 cm 以内的达到 80%, 其中天山北坡模型反演雪深的误差最小, 而塔额盆地模型反演雪深的误差较大。

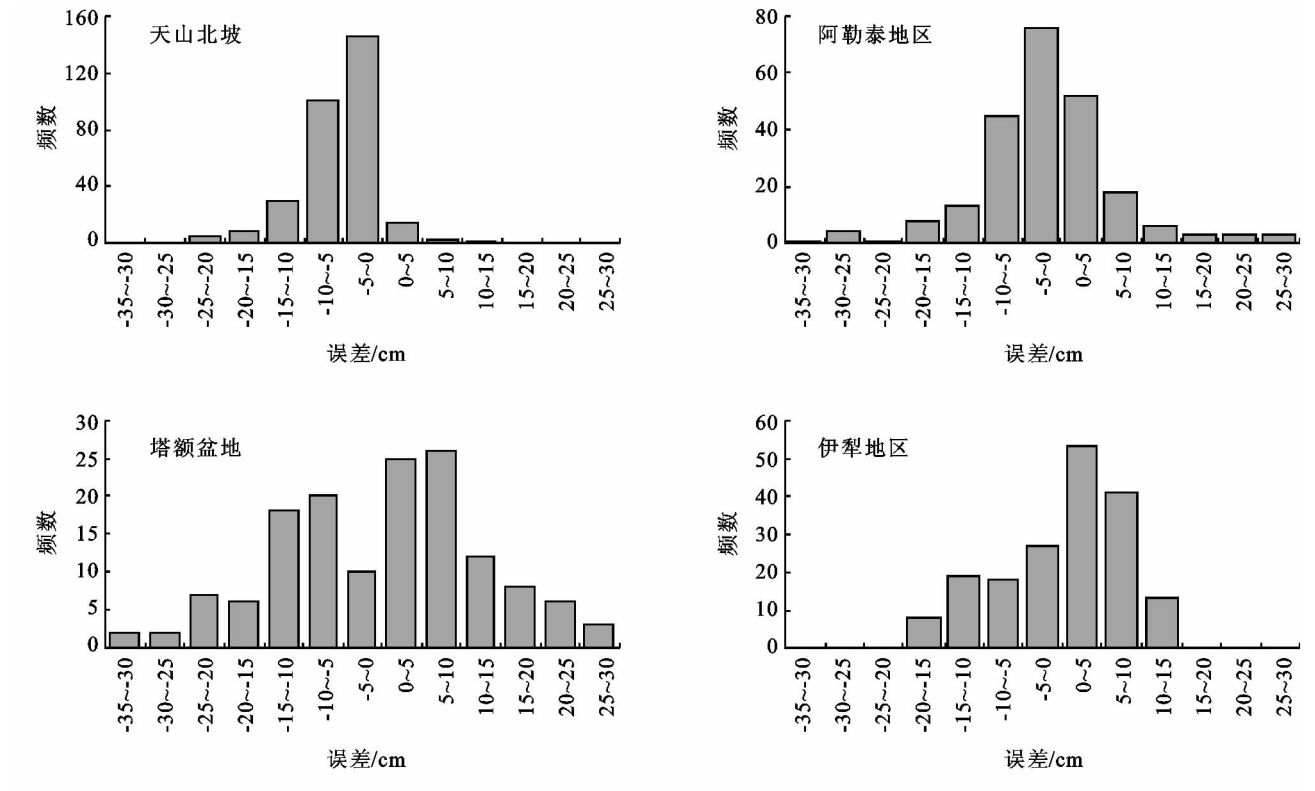


图 4 北疆典型区域模型反演雪深误差分布直方图

3.2 积雪深度反演算法的验证

用所建模型(式 2—6)反演了 2011 年 12 月—2012 年 2 月北疆地区的积雪深度, 并使用各台站实测雪深值对模型进行了验证, 验证样本数见表 1。

表 2 为北疆各分区在不同雪深范围的平均反演相对误差, 由表 2 可以看出, 当实测雪深在 15 cm 以上时, 北疆各分区的负向平均误差均大于正向平均误

差,误差平均值为负值,说明模型反演的雪深总体低估了实际雪深;而当实测雪深在 15 cm 以下时,正向平均误差均大于负向平均误差,说明模型反演的雪深总体高估了实际雪深。

表 2 北疆各分区在不同雪深范围的平均反演相对误差

台站雪深	实测雪深/cm	误差平均值/%	负向平均误差/%	正向平均误差/%	绝对平均误差/%
天山北坡	>15	-8	-17	12	15
	≤15	31	-19	49	41
阿勒泰地区	>15	-11	-20	19	20
	≤15	83	-17	87	84
塔额盆地	>15	-14	-34	22	30
	≤15	99	-31	143	114
伊犁地区	>15	-22	-33	13	30
	≤15	54	-12	63	57
古尔班通古特沙漠	>15	-3	-11	6	9
	≤15	4	-12	12	12

图 5 为阿勒泰地区反演误差百分比随雪深的变化。图 5 说明实测雪深在 15 cm 以上时,模型反演雪深与实测误差明显较小,而实测雪深在 15 cm 以下时误差很大。特别是在温度较低、积雪较深的阿勒泰地区和塔额盆地,这种差别尤为明显。这可能是由于北疆地区冬季气温较低,更易形成深霜层和冻土层^[19],从而对微波辐射产生较大的影响。

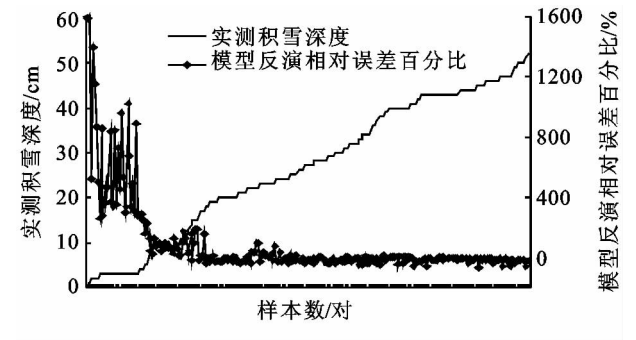


图 5 阿勒泰地区模型反演雪深随实测雪深的误差变化

从不同分区来看,天山北坡、阿勒泰地区的反演误差较小,实测雪深在 15 cm 以上时的误差百分比仅为 8%和 11%(表 2)。天山北坡和阿勒泰地区测站较多,代表性相对较好,这是造成其反演误差较小的主要原因。古尔班通古特沙漠虽然反演误差最小,但是测站很少,其代表性还待进一步考证。

4 结论与讨论

根据地理环境和气候差异将新疆北疆地区分为天山北坡、阿勒泰地区、塔额盆地、伊犁地区和古尔班通古特沙漠 5 个典型区域,计算了 2010—2011 年冬春两季 FY-3B 微波成像仪(MWRI)L1 18.7 GHz 和 36.5 GHz 垂直/水平极化 4 通道降轨亮温数据,采用 Neale 干湿雪判别标准去除湿雪像元,同时结合 MOD10A1 日雪盖产品剔除无雪区,得到各个分区积

雪区域内的干雪像元亮温数据,将其与对应气象站同期实测雪深进行回归拟合,其中,实测雪深满足日最高温<6℃和雪深≥5 两个条件,最终建立了北疆地区 5 个典型分区的干雪雪深反演模型。结果显示:

(1) 天山北坡、阿勒泰地区气象站分布均匀且数量较多,反演误差较小,实测雪深≥15 cm 时,误差百分比仅为 8%和 11%,且模型反演的雪深低估了实际雪深;古尔班通古特沙漠测站虽少,但其模型反演误差最小,由于该区域站点较少,模型代表性不够;

(2) 北疆冬季气温较低,易形成深霜层和冻土层,这会对微波辐射形成较大的影响,在冬季温度较低、积雪深度较大的阿勒泰地区和塔额盆地,表现得尤为明显。

从总体上看,被动微波数据由于受到空间分辨率的限制,反演产品在监测积雪面积方面精度不如可见光,但它在估算雪深和雪水当量方面具有不可替代的作用。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。

参考文献:

[1] 杨虎,施建成. FY-3 微波成像仪地表参数反演研究[J]. 遥感技术与应用,2005,20(1):194-200.

[2] 秦大河,陈宜瑜. 中国气候与环境演变[M]. 北京:科学出版社,2005.

[3] 许鹏,阿里木江,王博,等. 新疆草地资源及其利用[M]. 乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社,1993.

[4] 宋文娟,熊黑钢. 新疆开垦河流域径流变化特征分析[J]. 水土保持研究,2008,15(4):224-227.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 麻旭辉,刘志辉,肖继东. NOAA/AVHRR 与 EOS/MODIS 的积雪监测模式对比[J]. 水土保持研究, 2008,15(3):220-225.

[8] 刘艳,张璞. 基于遥感的径流丰枯与高山区积雪关系分析[J]. 水土保持研究, 2010,17(3):44-48.

[9] 刘艳,李杨,张璞. 玛纳斯河流域融雪径流与积雪—气象因子分析[J]. 水土保持研究, 2010,17(2):145-149.

[10] 刘明辉,王飞,李锐,等. 土石山林区和黄土塬农区不同覆盖类型土壤水分差异性分析[J]. 水土保持研究, 2011,18(3):187-190.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 崔彩霞,杨青,王胜利. 1960—2003 年新疆山区与平原积雪长期变化的对比分析[J]. 冰川冻土, 2005,27(4):486-490.

[15] 杨军,董超华等. 新一代风云极轨气象卫星业务产品及应用[M]. 北京:科学出版社, 2011.

[16] Hall D K, Strurm M. Passive microwave remote and in situ measurements of arctic and subarctic snow cover in Alaska[J]. Remote Sensing Environment, 1991,38(3):161-172.

[17] Thomas H P, Jeff Dozier, Dar A R, et al. Retrieval of Sub-pixel snow-covered area and grain size from imaging spectrometer data[J]. Remote Sensing of Environment, 2003,85:64-77.

[18] Neale C, McFarland M L, Chang K. Land surface type classification using microwave brightness temperatures from the special sensor microwave/imager[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1990,28(5):829-837.

[19] 马虹,胡汝骥. 积雪对冻土热状况的影响[J]. 干旱区地理, 1995,18(4):23-27.

~~~~~

(上接第 165 页)

[12] 刘雅妮,辛晓洲,柳钦火,等. 基于多尺度遥感数据估算地表通量的方法及其验证分析[J]. 地球科学进展, 2010,25(11):1261-1272.

[13] 李远,孙睿,刘绍民,等. 大孔径闪烁仪观测数据在陆面模式验证中的应用初探[J]. 地球科学进展, 2010,25(11):1237-1247.

[14] 卢俐,刘绍民,徐自为,等. 大孔径闪烁仪和涡动相关仪观测显热通量之间的尺度关系[J]. 地球科学进展, 2010,25(11):1273-1282.

[15] 黄妙芬,刘绍民,朱启疆. LAS 测定显热通量的影响因子分析[J]. 干旱区资源与环境, 2004(4):133-138.

[16] 白洁,刘绍民,丁晓萍. 海河流域不同下垫面上大孔径闪烁仪观测显热通量的时空特征分析[J]. 地球科学进展, 2010,25(11):1187-1198.

[17] 王维真,徐自为,刘绍民,等. 黑河流域不同下垫面水热通量特征分析[J]. 地球科学进展, 2009(7):714-723.

[18] 施生锦,黄彬香,刘绍民,等. 大尺度水热通量观测系统的研制[J]. 地球科学进展, 2010,25(11):1128-1138.

[19] Clifford S F, Ochs G R, Lawrence R S. Saturation of optical scintillation by strong turbulence[J]. Journal of Optical Society of America, 1974,64:148-154.

[20] Green A E, McAneney K J, Astill M S. Surface-layer scintillation measurement of day time sensible and momentum fluxes[J]. Boundary Layer Meteorology, 1994, 68(4):357-373.

[21] Wang T, Ochs G R, Clifford S F, et al. A saturation-resistant optical scintillometer to measure  $C_n^2$  [J]. Journal of Optical Society of America, 1978, 68(3):334-338.

[22] 马志林,陈丽华,韩鹏,等. 鹫峰国家森林公园风景林健康评价研究[J]. 水土保持研究, 2010,17(6):207-211.

[23] 白洁,刘绍民,丁晓萍,等. 大孔径闪烁仪观测数据的处理方法研究[J]. 地球科学进展, 2010,25(11):1148-1165.

[24] 隋娟,龚时宏,王建东,等. 滴灌灌水频率对土壤水热分布和夏玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2008,22(4):148-152.

[25] 王维真,徐自为,李新,等. 大孔径闪烁仪在黑河流域的应用分析研究[J]. 地球科学进展, 2010,25(11):1208-1215.

[26] 胡丽琴,吴荣璋,方宗义. 大口径闪烁仪及其在地表能量平衡监测中的应用[J]. 应用气象学报, 2003,14(2):197-205.