FY-3 卫星积雪监测产品概述及在遥感服务中的应用

武胜利，刘 畅，陈 洁
（中国气象局 国家卫星气象中心，北京 100081）

摘 要：介绍了风云三号(FY-3)气象卫星主要成像传感器及其积雪监测产品情况，FY-3 卫星利用其 1 级数据能反演积雪覆盖、积雪深度、雪水当量等多种积雪监测参数和产品。卫星可见光-近红外传感器提供积雪覆盖监测信息，微波成像传感器提供积雪深度、雪水当量监测信息。针对防灾减灾以及应对气候变化分别给出积雪监测产品的遥感服务应用。结合国内外积雪遥感监测技术的发展趋势，提出利用 FY-3 卫星进行积雪监测的未来前景。FY-3 卫星积雪监测产品在防灾减灾和应对气候变化方面能为遥感部门提供客观、可靠、全面、及时的参考信息。

关键词：FY-3 气象卫星；遥感服务；积雪覆盖；积雪深度；雪水当量

中图分类号：V474.24；P414.4 **文献标志码**：A **DOI**：10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.02.007

Overview of FY-3 Snow Monitoring Products and Applications in Remote Sensing Service

WU Shengli, LIU Chang, CHEN Jie
(National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: In this paper, main imaging sensors of FY-3 and snow monitoring products are firstly introduced. FY-3 meteorological satellites have the ability of global snow monitoring. Snow parameters include snow cover, snow depth and snow water equivalent can be produced from FY-3 level-1 data. For the payloads of FY-3, visible and near-infrared sensor provides information of snow cover, and passive microwave sensor provides information of snow depth and snow water equivalent. Then, in terms of disaster prevention, disaster mitigation and climate change response, the applications of snow monitoring products in remote sensing service are respectively introduced. Finally, the prospects of snow monitoring by using FY-3 data are discussed based on the development of snow remote sensing monitoring technology at home and abroad. It is proved that snow monitoring products of FY-3 can provide objective, reliable, comprehensive and near-real-time reference information.

Keywords: FY-3 meteorological satellite; remote sensing service; snow cover; snow depth; snow water equivalent

0 引言

作为全球水循环中的重要参数，积雪覆盖、积雪深度、雪水当量等积雪参数是气象、气候、水文、农业等领域的研究者所关注的目标[1-6]。FY-3 卫星是我国新一代极轨气象卫星，目前已发射 3 颗。根据其过境时间不同，卫星分上午星与下午星，其中 FY-3A 星、FY-3C 星为上午星，FY-3B 星为下午星。目前，FY-3A，B，C 星形成了上下午组网观测，对我国大部分区域进行高时空分辨率对地扫描[7-10]，并对大范围积雪特征进行有效提取[11-12]。卫星积雪监测结果在防灾减灾、应对气候变化等方面发挥了重要作用[13]。在防灾减灾方面，卫星对雪灾发生时的积雪覆盖、积雪深度、雪水当量等参数进行准确提取，为防灾减灾提供客观、有效的参考数据。在应对气候变化方面，卫星对长时间序列、时空连续的积雪覆盖、雪水当量进行连续监测，所监测的数据为大范围或局地气候变化模型提供可靠的输入数据，从而为模型改进提供帮助[14-15]。

收稿日期：2017-12-15；**修回日期**：2018-01-06
基金项目：科技基础资源调查专项(2017FY100500)
作者简介：武胜利(1980—)，男，博士研究生，主要研究方向为微波遥感。

目前，国家卫星气象中心已在卫星积雪监测方面开展了大量的研究、业务化以及数据库建设工作，初步具备了对全国乃至全球积雪进行监测的能力，能为遥感服务提供稳定的积雪监测产品和服务材料。

1　积雪监测产品概述

1.1　FY-3 卫星积雪监测产品传感器

FY-3 卫星积雪监测产品传感器包括可见光-红外传感器和微波成像遥感传感器。其中：可见光-红外传感器为中分辨率光谱成像仪（MERSI）和多通道扫描辐射计（VIRR），微波成像遥感传感器为微波成像仪（MWRI）。

MERSI 是一个 20 通道的可见光-红外光谱仪，最高空间分辨率为 250 m；VIRR 是一个 10 通道的可见光-红外光谱仪，空间分辨率为 1 km；MWRI 是一个 10 通道的被动微波遥感辐射计，具有成像功能，网格化后的亮温空间分辨率为 25 km。

1.2　FY-3 卫星积雪监测产品

1）可见光-近红外积雪监测产品

FY-3 卫星利用可见光-红外遥感数据对积雪覆盖进行判识，获取积雪覆盖产品。该产品主要原理为：雪在可见光波段反射率高，在近红外波段反射率随雪粒尺寸增大而降低。卫星采用标准化差分积雪指数（NDSI），配合不同波段的反射率特征，通过阈值法区分云、水、雪等[16]。利用 MERSI、VIRR 区分积雪覆盖区域和云盖、无雪覆盖区域，从而获取积雪覆盖产品。FY-3 卫星可见光-红外遥感数据所获取的积雪覆盖产品空间分辨率为 1 km。

目前，国家卫星气象中心针对积雪事件可以提供每日积雪覆盖产品，每周积雪覆盖合成产品，并根据气候变化提供每个雪季的全国积雪覆盖产品。

2）微波遥感积雪监测产品

FY-3 卫星利用微波遥感数据能获取积雪深度、雪水当量等积雪定量信息。该产品主要原理为：在积雪覆盖地表，积雪层的冰粒子对不同频率的微波辐射具有不同辐射和散射作用。对于低频波段，积雪覆盖地表的积雪散射作用较弱，传感器能获取积雪覆盖下垫面的辐射信息。对于高频波段，积雪覆盖地表的积雪散射作用相对较强，而下垫面辐射信息在积雪雪层中受到大量衰减，大部分辐射能量无法向上辐射至传感器。因此，随着积雪深度或雪水当量的增加，不同频率通道的亮温值差异将会随之变化。根据这种差异，卫星能获取积雪深度或雪水当量信息[17]。

3）可见光-红外积雪监测产品与微波遥感积雪监测产品的对比

可见光-红外积雪监测产品与微波遥感积雪监测产品各有利弊。可见光-红外积雪监测产品的优点有 2 点：一是具有较高空间分辨率，能获取细节更清晰的积雪覆盖信息；二是监测产品较直观，利用多通道合成图可识别积雪覆盖区域。缺点有 3 点：一是易受到云盖影响，无法获取云盖下积雪覆盖信息；二是无法在夜间进行积雪覆盖观测；三是只能获取积雪覆盖信息，无法从机理上获取积雪深度信息。微波遥感积雪监测产品的优点有 3 点：一是不受云盖影响，在大部分情况下，利用微波遥感手段可直接获取云盖下积雪信息；二是由于微波遥感获取的是亮温辐射能量，因此不受昼夜影响，夜间也可获取积雪信息；三是能对探测深度在 1 m 以上的干燥积雪进行积雪深度、雪水当量的观测。缺点有 3 点：一是空间分辨率低，网格化后的各通道空间分辨率仅为 25 km；二是微波成像仪数据反映不同通道能量分布，无法直接进行地物判读；三是由于湿雪表层或内部水分会大幅增加其介电常数，从而阻止微波能量穿透，因此无法监测湿雪深度和雪水当量。可见光-红外遥感积雪监测产品与微波遥感积雪监测产品对比见表 1。

2　FY-3 卫星积雪监测产品在遥感服务中的应用

2.1　雪灾遥感服务

近年来，国家卫星气象中心利用 FY-3 卫星可见光-红外传感器、微波遥感传感器对多次雪灾的发生、发展进行了监测评估，提供了雪灾遥感服务。

1）积雪监测产品在西藏南部大范围降雪过程中的应用

2013 年 10 月 14 日，西藏西南部受孟加拉湾超级气旋风暴“费林”与冷空气的共同影响，雨雪天气加强，局地出现了暴雪。日喀则南部地区（包括珠穆朗玛峰所在的定日县）出现暴雪天气，珠穆朗玛峰大本营附近积雪深度达70～80 cm。10 月 15日后，

表 1 可见光-红外遥感积雪监测产品与微波遥感积雪监测产品对比

Tab.1 Comparison between visible-infrared remote sensing snow monitoring products and microwave remote sensing snow monitoring products

类别	优点	缺点
可见光-红外遥感产品	空间分辨率高	受到云盖影响
	监测产品比较直观	夜间无法观测
		难以获取积雪深度信息
微波遥感产品	基本不受云盖影响	空间分辨率低
	能进行夜间观测	无法直接进行图像判读
	能获取积雪深度、雪水当量	无法获取湿雪雪深、雪水当量

随着日喀则南部降水减弱，定日县天气好转，国家卫星气象中心抓住 10 月 16 日当地晴空时机，对 FY-3C/VIRR，MERSI 资料进行了处理，形成了 FY-3C/VIRR 西藏自治区日喀则市积雪监测多通道合成图（如图 1 所示）、积雪监测专题图、FY-3C/MERSI 积雪监测多通道合成图，并估算了聂拉木、定日、定结等县的积雪覆盖面积，及时向西藏自治区气象局遥感中心等部门提供西藏日喀则市积雪监测报告等服务。

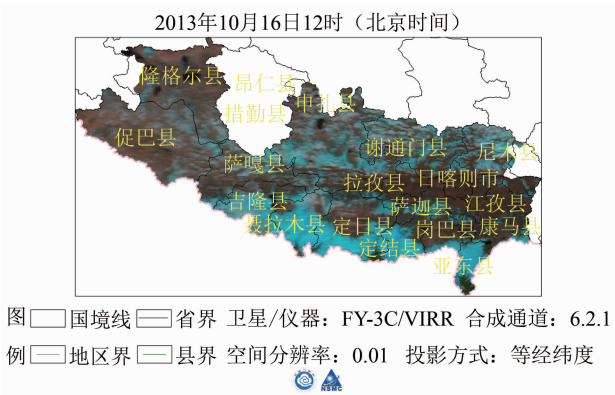

图 1 FY-3C/VIRR 西藏自治区日喀则市积雪监测多通道合成图

Fig.1 Multi-channel composite map of snow monitoring of Shigatse, Tibet autonomous region, using FY-3C/VIRR

2）积雪监测产品在我国东北、内蒙古地区大范围雪灾中的应用

2012 年 11 月上旬，我国北方连续出现大范围积雪天气，造成内蒙古大部分地区出现持续的大范围积雪覆盖。国家卫星气象中心即时利用 FY-3 卫星微波成像仪对我国东北、内蒙古地区的积雪深度进行监测，制作的积雪深度图如图 2 所示。从图 2 可见：11 月上旬起，内蒙古中东部积雪覆盖面积逐渐增大，影响范围主要在锡林郭勒、赤峰市、通辽市、乌兰察布盟等地区。11 月下旬，呼伦贝尔市、兴安盟等地区也出现了大范围深度 5 cm 以上的积雪覆盖，内蒙古中东部的绝大部分地区都被积雪深度 5 cm以上的积雪覆盖，部分地区积雪深度在 10 cm 以上。12 月后，随着新一轮降雪天气过境，内蒙古中东部地区的积雪量持续增加，积雪深度明显增大，其中锡林郭勒盟、呼伦贝尔市、赤峰市、通辽市、乌兰察布盟的部分地区积雪深度在 15 cm 以上。FY-3 卫星微波遥感为相关部门提供持续、可靠的积雪深度变化信息，为防灾减灾提供直接支撑。

2.2 气候变化遥感服务

近年来，国家卫星气象中心利用 FY-3 卫星对积雪覆盖、积雪深度、雪水当量等信息进行长时间序列的卫星遥感，获取特定区域、全国、全球的积雪相关信息，可为气候变化遥感服务提供有效参考数据。

国家卫星气象中心制作的 2012 年度冬季全国积雪日数图如图 3 所示。从图 3 可见：2012 年冬季积雪累计日数超过 60 d 的区域主要分布在东北大部分、内蒙古中东部和东北部、新疆北部、青藏高原东南部、西北地区东部等，这些区域中大部分地区的积雪累计日数超过 100 d，青藏高原西部，西北地区东部，华北、黄淮的局部地区的积雪累计日数为 40～60 d。

积雪日数距平图可以反映当年积雪覆盖与常年同期的差异，为冬季北方地区降水分布评估和雪灾预警提供依据。FY-3 卫星 2012 年度冬季全国积雪日数距平图（与 1989 年以来同期平均值相比）如图 4 所示。由图 4 可见：2012 年度冬季积雪日数正距平 30 d 以上的区域主要位于东北西部、内蒙古中东部等地区；积雪日数负距平为－30～－50 d的区域

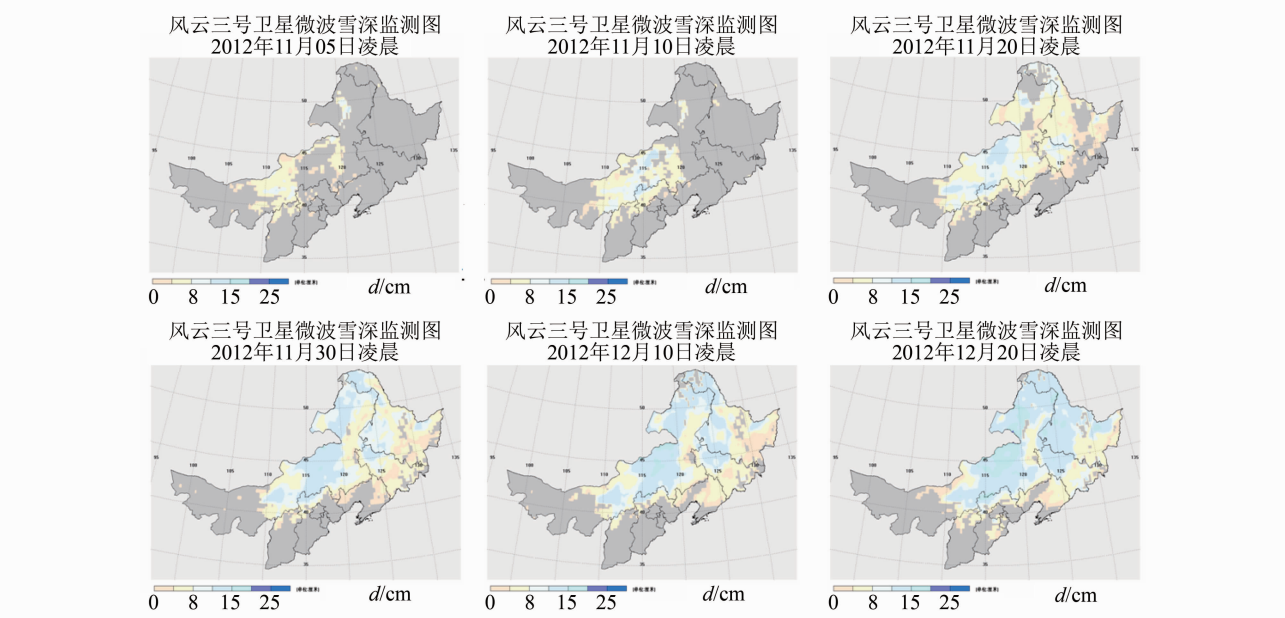

图 2　我国东北、内蒙古地区大范围雪灾微波成像积雪深度图

Fig.2　Snow depth of snow disaster in the northeast of China and the Inner Mongolia autonomous region

主要在青藏高原中北部部分地区、西北地区中部局部等。

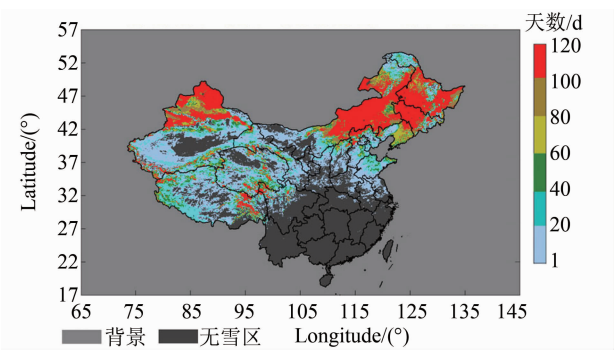

图 3　FY-3 气象卫星 2012 年度冬季全国积雪日数图

Fig.3　The number of days with snow cover of China in the winter of 2012, using FY-3 meteorological satellites

目前，国家卫星气象中心已建立了 2000 年以来的可见光-红外遥感全国积雪监测数据库，正在整理 1978 年以来的微波遥感全国积雪深度、雪水当量监测数据库。与地面气象站点观测资料相比，上述数据库将为积雪监测服务提供更可靠的数据支撑。积雪覆盖产品精度优于 90%，积雪深度产品精度优于 10 cm，雪水当量产品精度优于 10 mm。以上产品精度在不同区域有所不同，平原地区产品精度优于山区产品精度。

针对 FY-3 卫星积雪监测产品的算法及验证，

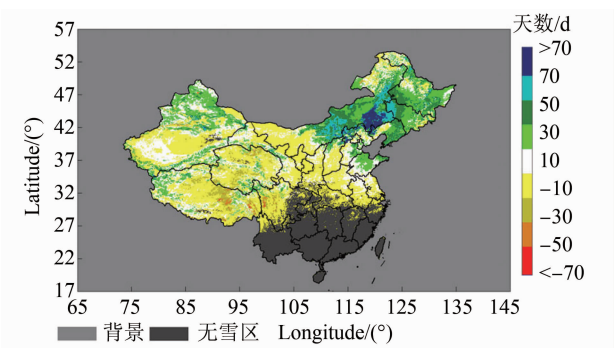

图 4　FY-3 气象卫星 2012 年度冬季全国积雪日数距平图

Fig.4　Anomaly of the number of days with snow cover of China in the winter of 2012, using FY-3 meteorological satellites

国内部分研究机构进行了相关研究。对比结果显示，FY-3 卫星微波成像仪积雪深度产品精度在中国大部分区域优于美国先进微波辐射计（AMSR-E）积雪深度产品[18-20]。

3　积雪监测产品的发展展望

3.1　可见光-近红外遥感手段与微波遥感手段进行融合，获取多源卫星遥感积雪监测产品

将可见光-近红外遥感和微波遥感 2 种遥感手段融合，是获取更高精度积雪监测产品的有效手段。

目前主要实现途径为：在有云覆盖区域，使用被动微波遥感积雪观测数据；在无云覆盖区域，将可见光-近红外遥感数据获取的高空间分辨率积雪覆盖产品与被动微波遥感数据获取的低空间分辨率积雪深度、雪水当量产品进行融合，得到更高空间分辨率的积雪深度、雪水当量产品。上述工作的难点主要有 2 点：第一，地形、水体、下垫面类型、风速、温度等影响因素在积雪深度、雪水当量空间分布中的作用如何用理论模型进行描述需深入研究；第二，光学遥感与微波遥感融合过程必然涉及到空间分辨率差异问题，光学遥感 1 km 或更高空间分辨率的积雪覆盖信息如何与微波遥感数十千米空间分辨率的积雪深度、雪水当量信息融合，是获取更高分辨率的积雪覆盖或积雪深度、雪水当量产品的关键。对于第 2 点，可采用积雪参数的空间分布特征及地面站点的观测资料作为先验知识进行融合。

3.2 改进积雪参数反演模式

目前，全球最先进的积雪参数反演算法是将被动微波遥感观测数据与地面积雪观测数据相融合，将积雪辐射传输模型作为核心媒介，进行积雪深度、雪水当量等参数的反演。芬兰气象局利用以上思路建立了 GlobSnow 系统，将 HUT 积雪模型作为驱动模型，地面观测站点数据以及被动微波辐射计观测数据作为输入，对积雪粒径参数进行时空反演，从而获取更准确的积雪深度、雪水当量信息。GlobSnow 系统对北美、北欧、西伯利亚等地区分别进行了验证[21]。结果表明：与传统方法相比，该系统获取的积雪深度、雪水当量的精度更高[22]。目前，国家卫星气象中心正在与芬兰气象局、加拿大环境部等合作，希望能够引进该系统，计划针对系统模型和地面观测进行适应性改进，并已将大量国内地面观测站点观测数据纳入 GlobSnow 系统，使 GlobSnow 雪水当量产品精度有所提高。国家卫星气象中心将对地面积雪参数进行连续观测，对 GlobSnow 系统中的参数进行进一步针对性的订正。

4 结束语

卫星积雪监测产品在遥感服务中的重要性毋庸置疑，如何获取更高时间分辨率、空间分辨率、数据精度的积雪监测产品是遥感服务部门的关注目标。本文对获取积雪监测产品的遥感数据进行概述，对产品反演生成过程进行了阐述及分析，对积雪监测产品在遥感服务中的应用情况进行了分析和示例，对积雪监测产品未来发展前景进行了阐述。FY-3 卫星积雪监测产品目前已能基本满足遥感服务所需的遥感数据需求。随着遥感服务需求的日益提升，卫星积雪监测产品的质量需进一步改善。

参考文献

[1] SCHMUCKI E, MARTY C, FIERZ C, et al. Evaluation of modelled snow depth and snow water equivalent at three contrasting sites in Switzerland using SNOWPACK simulations driven by different meteorological data input[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 99: 27-37.

[2] LI J, LU Z. Snow leopard poaching and trade in China 2000-2013[J]. Biological Conservation, 2014, 176: 207-211.

[3] KAPIL J C, DATT P, KUMAR A, et al. Multi-sensor couplers and waveguides for efficient detection of acoustic emission behavior of snow[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 101: 1-13.

[4] HAN L, TSUNEKAWA A, TSUBO M, et al. Spatial variations in snow cover and seasonally frozen ground over northern China and Mongolia, 1988-2010[J]. Global and Planetary Change, 2014, 116: 139-148.

[5] KAPNICK S B, DELWORTH T L. Controls of global snow under a changed climate[J]. Journal of Climate, 2013, 26(15):5537-5562.

[6] HANCOCK S, BAXTER R, EVANS J, et al. Evaluating global snow water equivalent products for testing land surface models[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 128: 107-117.

[7] DONG C, YANG J, ZHANG W, et al. An overview of a new Chinese weather satellite FY-3A[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2009, 90(10): 1531-1544.

[8] 袁婧，王楠，孙卓. 我国气象卫星的发展与应用[J]. 农业与技术，2016，36(16)：221.

[9] 杨军，董超华，卢乃锰，等. 中国新一代极轨气象卫星—风云三号[J]. 气象学报，2009，67(4)：501-509.

[10] 杨忠东，张鹏，谷松岩，等. FY-3 卫星应用和发展[J]. 上海航天，2017，34(4)：1-7.

[11] LIU Y, PETERS-LIDARD C D, KUMAR S, et al. Assimilating satellite-based snow depth and snow cover products for improving snow predictions in Alaska[J]. Advances in Water Resources, 2013, 54: 208-227.

[12] KIKUCHI K，KAMEDA T，HIGUCHI K，et al. A global classification of snow crystals，ice crystals，and solid precipitation based on observations from middle latitudes to polar regions[J]. Atmospheric Research，2013，132：460-472.

[13] 张鹏，杨虎，邱红，等. 风云三号卫星的定量遥感应用能力[J]. 气象科技进展，2012(4)：6-11.

[14] 孙知文，施建成，杨虎，等. 风云三号微波成像仪积雪参数反演算法初步研究[J]. 遥感技术与应用，2007，22(2)：264-267.

[15] 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.

[16] SALOMONSON V V，APPEL I. Development of the Aqua MODIS NDSI fractional snow cover algorithm and validation results[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing，2006，44(7)：1747-1756.

[17] FOSTER J L，HALL D K，CHANG A T C，et al. An overview of passive microwave snow research and results[J]. Reviews of Geophysics，1984，22(2)：195.

[18] 蒋玲梅，王培，张立新. FY3B-MWRI 中国区域雪深反演算法改进[J]. 中国科学，2014，44(3)：531-547.

[19] 孙知文，施建成，杨虎，等. 风云三号微波成像仪积雪参数反演算法初步研究[J]. 遥感技术与应用，2007，22(2)：264-267.

[20] 高玉宏，程远，王文玲，等. 基于 RS 和 GIS 的黑龙江省积雪时空变化研究[J]. 测绘与空间地理信息，2015，38(8)：85-86＋89.

[21] ROY V，GOITA K，ROYER A，et al. Snow water equivalent retrieval in a Canadian boreal environment from microwave measurements using the HUT snow emission model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing，2004，42(9)：1850-1859.

[22] TAKALA M，LUOJUS K，PULLIAINEN J，et al. Estimating northern hemisphere snow water equivalent for climate research through assimilation of space-borne radiometer data and ground-based measurements[J]. Remote Sensing of Environment，2011，26(12)：3517-3529.