

doi: 10.6046/zrzyyg.2023065

引用格式: 孙禧勇, 刘稼丰, 范景辉, 等. 积雪遥感监测产品研究与应用进展[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(3): 13-27. (Sun X Y, Liu J F, Fan J H, et al. Advances in research and application of remote sensing-based snow monitoring products[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36(3): 13-27.)

# 积雪遥感监测产品研究与应用进展

孙禧勇<sup>1,2</sup>, 刘稼丰<sup>1</sup>, 范景辉<sup>1</sup>, 张文凯<sup>1</sup>, 石利娟<sup>3</sup>, 邱玉宝<sup>3</sup>, 朱发容<sup>4</sup>

(1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 武汉 430074; 3. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094; 4. 中国地质大学(北京) 土地科学技术学院, 北京 100083)

**摘要:** 积雪是表征地表冰冻圈的重要因子,也是重要的天气、水文现象的参数。借助遥感技术对积雪形态及变化进行长时序、大范围监测,在全球气候变化研究、水文水资源调查和地质灾害预防等领域有重要作用。经过数十年的发展,国内外积雪遥感监测技术领域取得了很大进展,积雪遥感监测产品种类不断丰富,积雪反演的算法也在不断改进。文章对现有应用比较广泛的积雪产品按照积雪范围产品、积雪覆盖率产品和雪深/雪水当量产品 3 类进行归纳总结,梳理当前典型积雪范围及覆盖率产品和雪深/雪水当量产品的业务化遥感反演算法。文章指出,随着国内外高时间和空间分辨率传感器的不断出现,在光学和微波新数据源、新技术支持下,研究人员逐渐针对区域特点优化积雪反演算法,使得反演精度不断提高,为未来积雪遥感监测产品的不断改进提供更多支持。

**关键词:** 积雪遥感监测产品; 积雪覆盖; 雪水当量; 积雪反演算法

**中图法分类号:** TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2024)03-0013-15

## 0 引言

积雪在地球表面分布面积广泛,陆地表面的淡水资源有 3/4 以冰雪的形式存在,在北半球每年冬季平均有超过 4 700 万 km<sup>2</sup> 陆地被季节性积雪覆盖<sup>[1]</sup>。作为冰冻圈最活跃、对气候变化响应最敏感的要素之一,积雪的覆盖和季节性变化影响着地球的水文、能量及碳循环等。积雪是地表的一种动态景观要素,影响着工程、农业、旅游等各种人类活动<sup>[2]</sup>,并且其高反照率和低导热率特性强烈地影响着地表能量收支和辐射平衡<sup>[3]</sup>。开展积雪面积、雪深以及雪水当量等的监测对于融雪径流预报、水资源管理以及洪水控制方面都具有重要的作用<sup>[4]</sup>。积雪在累积和融化过程中的时空变化与气候之间联系紧密,并且具有显著的生态和经济效应<sup>[5]</sup>。因此,开展积雪范围和雪量的精确监测,具有十分重要的科学意义和应用价值。

遥感监测技术可以提供长时间序列、大范围的积雪监测数据,一定程度解决了传统积雪参数实地测量的难题。自 20 世纪 70 年代以来,国内外学者

已经对积雪的相关研究做了大量工作,研发了多种反演方法,并生成了许多积雪范围/覆盖率和雪水当量产品。目前在国际上开发出的积雪遥感监测算法及产品类别丰富,但是由于算法原理的差异、精度对比验证时所用的指标差异以及验证方法不同等原因,导致积雪产品的种类多样,但缺乏统一系统的分类介绍。本文梳理了可支撑监测产品的主要传感器参数,围绕积雪范围及积雪覆盖率和雪深/雪水当量两类产品阐述主流反演算法的研究进展,探究当前主流积雪产品总结国内外典型积雪遥感监测产品(包括积雪范围产品、积雪覆盖率产品和雪深/雪水当量系列产品)特点并且对未来更高精度积雪产品的反演算法改进方向,及积雪产品的进一步应用提出研究展望。

## 1 支撑积雪遥感监测产品的主要传感器与算法

国内外学者以卫星遥感监测、野外实测、站台观测数据为基础,根据积雪的物理特征构建积雪辐射传输模型,研发了多种反演积雪覆盖面积/覆盖率

收稿日期: 2023-03-15; 修订日期: 2024-01-24

基金项目: 国家重点研发计划项目“高亚洲和北极积雪—冰川与地质灾害监测技术及示范应用”(编号: 2021YFE0116800)资助。

第一作者: 孙禧勇(1984-),男,博士研究生,正高级工程师,主要从事自然资源遥感研究。Email: sunxiyong@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 范景辉(1978-),男,博士,正高级工程师,主要从事环境遥感研究。Email: fanjinghui@mail.cgs.gov.cn。

和雪水当量/雪深的算法<sup>[6]</sup>。

1.1 主要传感器

各类卫星传感器是实现积雪遥感监测的基础。按传感器采用波段的不同,目前观测地表参数的遥感技术可分为光学/热红外遥感监测和微波遥感,微波遥感又分为主动和被动微波遥感 2 类<sup>[7]</sup>。光学遥

感传感器主要进行积雪面积、积雪反射率等的遥感监测,但是不能有效地估算积雪深度、雪水当量等参数,而且光学遥感容易受到天气的影响。微波遥感传感器能够穿透云层、积雪和大气进行全天候、全天时地工作,在估算积雪深度、雪水当量等积雪参数上有很大优势。常用传感器参数见表 1。

表 1 积雪遥感常用传感器  
Tab.1 Snow remote sensing commonly used sensors

传感器名称	传感器类型	波长( 频率)	空间分辨率/km	观测幅度/km	搭载卫星	
TM	光学传感器	0. 45~0. 52 μm	0. 03	185	Landsat5 ( 1984—2011 年) 美国	
		0. 52~0. 60 μm				
		0. 63~0. 69 μm				
		0. 75~0. 90 μm				
		1. 55~1. 75 μm				
		2. 08~2. 35 μm				
ETM+	光学传感器	10. 40~12. 50 μm	0. 12	185	Landsat7 ( 1999 年至今) 美国	
		0. 52~0. 90 μm	0. 015			
		0. 45~0. 52 μm	0. 03			
		0. 525~0. 605 μm				
		0. 63~0. 69 μm				
		0. 75~0. 90 μm				
OLI	光学传感器	1. 55~1. 75 μm	0. 03	185	Landsat8 ( 2013 年至今) 美国	
		2. 09~2. 35 μm				
		10. 40~12. 50 μm				0. 06
		0. 433~0. 453 μm				0. 03
		0. 450~0. 515 μm				
		0. 525~0. 600 μm				
0. 630~0. 680 μm						
MODIS	光学传感器	0. 845~0. 885 μm	0. 03	185	Landsat8 ( 2013 年至今) 美国	
		1. 560~1. 660 μm				
		2. 100~2. 300 μm				
		1. 360~1. 390 μm				
		0. 500~0. 680 μm				0. 015
		0. 620~0. 876 μm				0. 25
NOAA/AVHRR	光学传感器	0. 459~2. 155 μm	0. 5	2 330	EOS Terra ( 1999 年至今) 美国/日本/加拿大	
		0. 405~0. 877 μm	1			
		0. 890~0. 965 μm	1			
		3. 660~14. 385 μm	1			
		0. 58~0. 68 μm	1. 09			
		0. 725~1. 00 μm				
1. 58~1. 64 μm						
3. 55~3. 93 μm						
MODIS	光学传感器	10. 30~11. 30 μm	1. 09	2 800	TIROS-N ( 1979 年至今) 美国	
		11. 50~12. 50 μm				
		0. 620~0. 876 μm				0. 25
		0. 459~2. 155 μm				0. 5
		0. 405~0. 877 μm				1
		0. 890~0. 965 μm				1
AMSR-E	被动微波传感器	3. 660~14. 385 μm	1	1 445	EOS Aqua ( 2001 年至今) 美国	
		6. 925 GHz	10			
		10. 65 GHz				
		18. 7 GHz				
		23. 8 GHz				5
		36. 5 GHz				
89. 0 GHz						

(续表)

传感器名称	传感器类型	波长( 频率)	空间分辨率/km	观测幅度/km	搭载卫星
SMMR	被动微波传感	6. 33 GHz	96×153	地平线   地平线	NIMBUS-7
		10. 69 GHz	59×91		
		18. 00 GHz	41×55		
		21. 00 GHz	30×46		
		37. 00 GHz	18×27		
MWRI	被动微波传感器	10. 65 GHz	85×51	1 400	FY-3B/3C/3D (2008 年至今/2010 年 至今/2013 年至今) 中国
		18. 70 GHz	50×30		
		23. 80 GHz	45×27		
		36. 50 GHz	30×18		
		89. 00 GHz	15×9		
SMM/I	被动微波传感器	19. 30 GHz	70×45	1 394	DMSP-F8/ F11/ F13 (1987—1991 年/1991— 2000 年/1995—2009 年) 美国
		22. 20 V	60×40		
		37. 00 GHz	38×30		
		85. 50 GHz	16×14		
SSMIS	被动微波传感器	19. 30 GHz	70×45	1 700	DMSP-F17 (2006—2017 年) 美国  DMSP-F18 (2009 年至今) 美国
		22. 20 V	60×40		
		37. 00 GHz	38×30		
		85. 50 GHz	16×13		
Sentinel-1A	主动微波传感器	C 波段; 5. 405 GHz	0. 025	>80	Sentinel (2014—2016 年) 欧洲太空局
			0. 1	>250	
Sentinel-1B			1	>400	
			0. 025	400	

光学传感器利用积雪在可见光波段反射率高、在短波红外波段吸收率高的光谱特性,借助已有积雪判别指数法识别积雪信息、反演特征参数。NOAA/AVHRR, EOS/MODIS, Landsat5 TM, Landsat7 ETM+, Landsat8 OLI 是在积雪覆盖反演中应用最为广泛光学传感器<sup>[8]</sup>。NOAA 系列卫星最早被应用于遥感积雪判识, AVHRR 是 NOAA 系列卫星的主要探测仪器,重访周期为 12 h,双星运行使得同一地区每天 4 次过境扫描。EOS/MODIS 的时间分辨率高于 Landsat 系列,光谱和空间分辨率又高于 AVHRR,优越的时空分辨率使其已成为全球大尺度积雪监测的最佳数据源<sup>[9-10]</sup>,但是地表覆盖类型和云雪混淆等问题对 MODIS 积雪产品精度有较大影响<sup>[11]</sup>。Landsat 系列传感器获取的数据空间分辨率高、图像信息清晰,可见光和短波红外波段均适用于积雪的判识分类<sup>[12]</sup>,且基于光学遥感对积雪判识已有较为成熟的算法,因此其遥感数据通常作为积雪监测的“真值”,被广泛用于较低空间分辨率积雪遥感产品在区域积雪遥感监测的精度验证<sup>[13-14]</sup>。

相较光学传感器,微波传感器具备更强的探测穿透能力,可穿透云层、植被层和积雪层反演雪密度和雪深等积雪信息<sup>[15]</sup>。应用广泛被动微波传感器有 DMSP 卫星搭载的 SSM/I 和 SSMIS 传感器、EOS Aqua 卫星搭载的 AMSR-E 传感器、NIMBUS-7 搭载的 SMMR 传感器、GCOM-W1 卫星上的 AMSR-2 传

感器以及风云三号(FY-3)系列卫星上搭载的 MWRI 传感器<sup>[16]</sup>等。MWRI 是一款 10 通道、5 频率的水平/垂直双极化圆锥扫描星载被动微波辐射计,相比于 FY-3A/C/D 和 FY-2B 搭载的 MWRI,解决了动态平衡问题并具备更稳定的灵敏度,被广泛用于积雪研究中<sup>[17-20]</sup>。

主动微波传感器是主动向地面发射微波辐射且捕获地面反射或散射到传感器的辐射信号来识别地物信息,空间分辨率相对被动微波遥感较高。目前该系列常用传感器主要为高分辨率合成孔径雷达,根据积雪与其他地物特性的明显差异识别反演积雪信息<sup>[21]</sup>。

TM, ETM+ 和 OLI 优势为空间分辨率高而主要不足在于幅宽窄、重访周期长; AVHRR 优势为扫幅宽、重访周期短,积累的数据序列年代长,最大不足为空间分辨率低且没有短波红外波段; MODIS 扫幅宽、重访周期短,监测积雪有明显优势,只是空间分辨率低于 Landsat 的传感器系列。

### 1.2 支撑积雪范围及覆盖率产品的主要算法

从 20 世纪 60 年代起,光学遥感逐渐开始被应用到大范围的积雪监测,如 Landsat, NOAA, Aqua 和 Terra 卫星搭载的光学热红外传感器获取到的光学积雪遥感数据,通过各种积雪范围制图算法得到许多雪盖产品。目前,积雪覆盖制图算法按照原理可以被分为 2 类:二值分类算法和亚像元制图算法。

利用积雪在可见光波段有高反射率,而在短波红外段的反射率骤低的光谱特征,发展有监督分类<sup>[22]</sup>、非监督分类<sup>[23]</sup>和归一化积雪指数(normalized difference snow index, NDSI)阈值法<sup>[24-25]</sup>等方法可以自动识别积雪像元,判识地物为雪和非雪 2 类。NDSI 是 Dozier<sup>[24]</sup> 基于积雪的光谱特征用 Landsat5 TM 数据提出的积雪判别算法,公式为:

$$NDSI = \frac{R_{VIS} - R_{SWIR}}{R_{VIS} + R_{SWIR}}, \quad (1)$$

式中  $R_{VIS}$  和  $R_{SWIR}$  分别为可见光和短红外波段反射率,在不同的卫星传感器有对应通道。通过在北美地区的验证,确定 NDSI 的标准阈值为 0.4<sup>[26]</sup>,即当  $NDSI \geq 0.4$  时,该像元被判别为积雪。Klein 等<sup>[27]</sup>和 Hall 等<sup>[28]</sup>基于 NDSI 提出全球逐日积雪自动化制图算法(SNOMAP 算法)进行逐像元积雪二值判别,被美国国家冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)列为 MODIS 积雪产品(MOD10 和 MYD10)中二值积雪范围数据的标准算法。

由于地表覆盖的破碎性、多样性及时空变异性,对于空间分辨率较低的遥感数据,通常存在混合像元的问题,这使得在积雪混合像元区域地表积雪二值反演信息会存在较大不确定性和偏差。因此从亚像元尺度反演积雪覆盖率逐渐取代了二值积雪信息。在亚像元尺度反演积雪覆盖度的方法主要有监督分类法、基于 NDSI 的经验统计法、插值法和混合像元分解法。基于积雪的光谱反射特征,Salomonson 等<sup>[29]</sup>采用 MODIS09GA 数据计算得出 NDSI,并分析得出利用 Landsat7 ETM+ 卫星数据得到的积雪覆盖率与 NDSI 存在很好的线性统计关系,公式为:

$$FSC = 0.06 + 1.21NDSI_M, \quad (2)$$

式中:  $FSC$  为积雪覆盖率;  $NDSI_M$  为 MOD09GA 某一像元(500 m)内的 NDSI 值。NSIDC 生产的全球逐日积雪覆盖率产品 MOD10A1 FSC 就是基于此关系建立的积雪覆盖率经验算法计算得出的。但是此经验算法应用于全球尺度,难以消除成像几何关系、地表覆盖类型等因素的复杂变化带来的较大误差<sup>[30]</sup>。因此,在植被覆盖区提出有如归一化差值林地积雪指数(normalized difference forest snow index, NDFS<sub>I</sub>)<sup>[31]</sup>、通用比率积雪指数(universal ration snow index, URSI)等其他积雪指数用于植被覆盖区积雪覆盖率的估算<sup>[32-33]</sup>。Masiokas 等<sup>[34]</sup>和 Metsämäki 等<sup>[35]</sup>基于光学数据提出估算寒带森林地区和冻土带积雪覆盖率的方法,从“双层透过率”来量化森林冠层对森林区积雪反射率的影响,通过构造森林地

区积雪反射率模型并对其反向解算获取积雪覆盖度。欧洲空间局将沿轨扫描辐射计(Along-Track Scanning Radiometer, ERS-2/ATSR-2)与先进沿轨扫描辐射计(Advanced Along-Track Scanning Radiometer, Envisat/AATSR)数据生产的 GlobSnow 积雪覆盖率产品就是使用此方法得到的。

目前学术领域开展较广的研究是利用 MODIS 积雪产品进行积雪制图并验证精度,除了官方采用经验回归类算法制作积雪产品外,还有大量研究针对 MODIS 观测数据提出反演积雪覆盖率的新方法。基于线性光谱模型的混合像元分解算法是一种物理方法,是目前大多数研究者的一项重要方法。Painter 等<sup>[36]</sup>根据实验室和野外现场实测光谱数据,提出一种基于辐射传输模型和多端元光谱线性混合模型来估算 MODIS 积雪覆盖率和雪粒径反演的算法——MODSCAG 算法,该模型是目前精度较高的 MODIS 积雪覆盖面积估算方法,但易产生大量无意义的负值,且依赖模型模拟其运算量很大<sup>[37]</sup>。近年,国内亦有许多基于混合像元分解理论的研究。施建成<sup>[38]</sup>提出一种通过对 MOD09GA 数据进行自动端元提取算法,并利用多端元光谱混合分析实现积雪覆盖率反演; Hao 等<sup>[39]</sup>发现在青藏高原地区,基于自动端元提取的混合像元分解算法与 MODSCAG 算法精度要高于 MODIS 官方积雪覆盖度产品(MOD10A1); 赵宏宇等<sup>[40]</sup>基于空间光谱端元提取方法自动提取端元,全约束最小二乘法求解线性混合模型,发展了国产 FY-3D 卫星 MERSI-II 资料积雪覆盖率提取算法。

目前应用广泛的中分辨率亚像元雪填图算法都不能用于实现 AVHRR 数据亚像元雪填图。因此,当前也有开展针对 AVHRR 数据亚像元雪填图研究,并开发相应的算法<sup>[41]</sup>。Allen 等<sup>[42]</sup>利用 AVHRR 提出了地面积雪识别算法,可以有效地区分云、积雪以及无雪地区; Slater 等<sup>[43]</sup>采用 AVHRR 数据,计算研究区冬季积雪区和非积雪区的 NDVI 值得不同进而估计积雪覆盖度; 2017 年朱骥等<sup>[41]</sup>利用 AVHRR 的 10 d 合成数据资料,提出亚像元积雪填图算法,在青藏高原地区的实验结果表明该算法可以满足水文和气象模型对长时序积雪数据集的需求。由于 NOAA-7 卫星发射年份较早(1981 年),相比于 MODIS 数据,AVHRR 可以将中分辨率遥感数据延伸到 30 a 以前,并提供高时间分辨率数据。但目前针对 AVHRR 数据还未形成有业务化的算法。除了上述方法,还有其他算法如小波-人工智能算法、隐性马尔可夫随机场(hidden Markov random field, HMRF)、时空插值方法等用来估算积雪覆



盖率。Huang 等<sup>[44]</sup>将 HMRF 技术应用于过去 20 a 的原始 MODIS 积雪产品,通过在 HMRF 框架内优化整合光谱、时空和环境信息,充分填补了原有 MODIS 积雪产品的数据空白并且大大提高了积雪估计精度,生成了青藏高原 500 m 分辨率的长期每日无间隙积雪产品,与现场观测相比,准确度达到 98.29%; Moosavi 等<sup>[45]</sup>利用小波-人工智能混合方法反演积雪覆盖率,发现结合小波变换的预处理技可以提高人工神经网络和自适应神经模糊推理系统模型(adaptive-network-based fuzzy inference system, ANFIS)反演积雪覆盖率的精度; Dozier 等<sup>[46]</sup>以二维自适应维纳滤波技术检测 MODIS 积雪覆盖率数据噪声,并借助 MOD09 和 MODSCAG 的积雪信息对多云条件下的 MODSCAG 的积雪重新进行云雪判别,然后以 16 d 至一个雪季的时间长度做样条插值平滑,获取时空连续的积雪覆盖率。

1.3 支撑雪深/雪水当量产品的主要算法

对于雪深和雪水当量的反演研究已经有大量的成果。积雪深度和雪水当量是 2 个不同的积雪物理参数,两者计算关系为:

$$SWE = SD \times \rho_{\text{snow}}, \tag{3}$$

式中:  $SWE$  为雪水当量;  $SD$  为积雪深度;  $\rho_{\text{snow}}$  为积雪密度,其取值有常数值  $0.24 \text{ g/cm}^3$ ,也有研究采用空间分布静态积雪密度或动态积雪密度<sup>[47]</sup>。GlobSnow 雪深产品乘以积雪密度常数得到 GlobSnow 雪水当量产品; 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发布的雪水当量标准产品则是用反演的雪深产品乘以空间分布的静态积雪密度<sup>[48]</sup>。

光学热红外遥感的可见光对积雪的穿透深度只有几厘米,并且容易受到天气、云层的影响。由于微波遥感对云层和积雪层的穿透能力强和对积雪参数的敏感性高,并且可以全天候、大范围对积雪进行监测<sup>[49]</sup>,被广泛应用于获取地表雪深和雪水当量。被动微波传感器相比主动微波传感器具有监测区域较大、受地表粗糙度影响小等优势<sup>[50-51]</sup>。微波传感器主要接收来源于大气、雪层表面及其覆盖下地表的辐射能量,由于地表积雪层能散射微波辐射,因此地表雪深值与微波散射率呈正比关系; 被动微波传感器接收到辐射能量用亮度温度值表示,则雪深值与亮温值呈反比关系<sup>[52]</sup>。

在对积雪的物理特征和积雪辐射传输模型研究的基础上,采用被动微波技术对雪深和雪水当量反演的算法目前主要有基于亮温梯度的半经验算法、基于积雪辐射模型的迭代算法和查找表算法以及

同化算法、基于数据驱动的机器学习算法。

半经验线性模型是应用最为广泛的积雪雪深反演算法,是在积雪理论模型分析的基础上,通过足够的先验知识建立雪深和亮温梯度之间的线性统计关系。根据系数获取方式分为静态反演算法和动态反演算法,基本形式为:

$$SWE = A + B \cdot \Delta T_B, \tag{4}$$

式中:  $A$  和  $B$  分别为雪水当量与亮温差之间经验关系式的截距(mm)和斜率(mm/K),不同研究者在不同区域以及传感器数据差异,会得到不同的  $A$  和  $B$  值;  $\Delta T_B$  为一个高频(37 GHz 或 85 GHz)和低频(18 GHz 或 19 GHz)的亮温差。

雪水当量静态反演算法是国际上应用最早的积雪反演算法, Chang 等<sup>[53]</sup>基于均质积雪的辐射传输模型,将亮温与雪当量参数代入式(4),得到 SMMR 的雪水当量产品反演算法,算法公式为:

$$SWE = 4.8T_{B,18H} - T_{B,37H}, \tag{5}$$

式中  $T_{B,18H}$  和  $T_{B,37H}$  分别为 18 GHz 和 37 GHz 水平极化亮温。Chang 算法是半经验算法中最早用于生产雪水当量和雪深产品的经典算法之一。但 Chang 算法只适用于雪水当量小于 300 mm 的情况,否则会出现亮温差饱和。由于在建立算法时将雪粒径假设为 0.3 mm,因此在粒径增大时会高估雪水当量。但是目前此算法的应用最为广泛,很多学者<sup>[54-55]</sup>基于 Chang 算法开展了区域研究修正以适应不同地域尺度的雪深反演。Foster 等<sup>[56-57]</sup>考虑到植被层的存在,其影响了下层积雪的微波辐射并将自身辐射叠加到总的辐射亮温中,于是引入森林覆盖度  $f$ ,对早期 Chang 等<sup>[53]</sup>经验算法发展建立了 NASA96 算法,应用于 SSM/I 和 SSM/I-S 全球雪深/雪水当量产品的反演算法,算法公式为:

$$SWE = \frac{4.8(T_{B,18H} - T_{B,37H})}{1 - f}. \tag{6}$$

国内学者对积雪遥感反演算法已有大量探索,曹梅盛等<sup>[58-59]</sup>最先开始探究积雪的光谱反射特征与积雪遥感反演结合,将中国西部分为高山、高原、低山、丘陵及盆地 5 个单元,利用实用型扫描计(OSL)可见光积雪数据对 SMMR 反演的积雪深度数据进行订正并提高可靠性<sup>[60]</sup>。车涛等<sup>[61]</sup>在中国地区对 Chang 算法进行修正进行雪深反演,结合气象站点观察数据,分别修正了中国区域的 SMMR(1980 和 1981 年气象站点观测雪深数据)、SMM/I(2003 年气象站雪深观测数据)雪深算法系数,得到 SMMR 和 SMM/I 的雪深反演算法,并生成了中国长

时间序列雪深数据产品。孙知文等<sup>[62]</sup>将中国分为三大积雪区(新疆、东北、内蒙古和华北平原地区,青藏高原),分别建立各区的雪深反演算法;蒋玲梅等<sup>[19]</sup>利用 AMSR-E 获取的 2002—2009 年间亮温数据和气象站的常规观测资料,建立不同地表覆被类型对雪深反演影响的半经验统计雪深反演模型,针对像元中存在多种地表覆盖类型的混合情况,将下垫面分为草地、农田、裸地和森林 4 种地物类,利用 AMSR-E 亮温数据和气象站点数据构建纯像元雪深半经验反演公式,基于混合像元分解原理建立反演模型。目前该算法已作为我国的 FY3B-MWRI 雪深/雪水当量产品的业务化算法,算法公式为:

$$SD = f_{grass} \times SD_{grass} + f_{barren} \times SD_{barren} + f_{forest} \times SD_{forest} + f_{farmland} \times SD_{farmland}, \quad (7)$$

式中:  $f_{grass}$ ,  $f_{barren}$ ,  $f_{forest}$  和  $f_{farmland}$  分别为每个像元内草地、裸地、森林和农田的覆盖度;  $SD_{grass}$ ,  $SD_{barren}$ ,  $SD_{forest}$  和  $SD_{farmland}$  分别为相对“纯”像元内建立的雪深统计反演算法(纯像元指主要地物覆盖度  $\geq 85\%$ )。

与静态雪深算法相比,动态雪深算法会考虑积雪密度和雪粒径等积雪物理性质对雪深反演的影响来建立动态雪深反演模型。Kelly 等<sup>[63]</sup>一种结合致密介质辐射传输模型(dense media radiative transfer model, DMRT)将粒径、雪密度半经验动态变化算法参数化,首先根据时间计算雪粒径和积雪密度的变化,然后代入回归方程计算雪深,之后通过 DMRT 模型模拟亮温差与雪深的关系。后来, Kelly<sup>[64]</sup>使用每日亮温计测得亮温梯度与雪水当量关系式(4)中的系数  $B$ ,考虑了不同频率对不同厚度积雪的敏感性以及森林覆盖像元的影响,该算法被用于 AMSR-E 和 AMSR-2 雪深及雪水当量产品生产,算法公式为:

$$SD = f \times SD_f + (1 - f) \times SD_0, \quad (8)$$

式中:  $f$  为森林覆盖率;  $SD_f$  为森林区域积雪深度反演公式计算得到的积雪深度;  $SD_0$  为根据非森林区域的积雪深度反演公式得到的积雪深度。

由于亮度温度与雪深之间存在复杂的非线性关系,这些因素使得雪水当量反演变得复杂。并且使用被动微波方法反演雪水当量受到粗空间分辨率、积雪饱和效应以及对不同雪参数(如雪密度、温度、晶粒尺寸和雪层)的敏感性的影响。因此,迭代算法、查找表算法、机器学习算法和数据同化方法等反演方法被广泛应用于提高雪水当量估算精度和被动微波亮度温度与积雪特性非线性关系的表示。

迭代算法基于正向模型开发,通过迭代调整雪

水当量以使观测到的和模拟的亮度温度之间的代价函数最小化。该方法的计算量非常高,能够模拟亮度温度与雪水当量之间的非线性关系。为了降低计算复杂度,通常假设雪粒尺寸和深度是可变的,其他参数是固定的<sup>[65]</sup>。利用卫星观测的亮温,利用持续的迭代过程估算雪水当量。该方法的一个成熟模型是 HUT 模型,该模型通过最小二乘法 and 约束条件将模拟的亮度温度与观测值迭代拟合,以实现成本最小的雪水当量<sup>[66]</sup>。

查找表算法通常使用 HUT 和 DMRT-QCACP 作为观测模型,通过寻找与亮温观测相似的估计亮度和温度组合得出估计雪水当量的雪参数。此算法可以是有先验知识(如雪粒大小、雪深、雪密度和雪层)的搜索方法<sup>[48]</sup>,也可以是没有先验知识的简单搜索方法<sup>[67]</sup>。Dai 等<sup>[68]</sup>基于具有先验知识的 MEMLS 模型,通过亮度温度分别为 10 GHz, 18 GHz 和 36 GHz 频率的雪层来构建查找表,并且通过纳入与森林相关的积雪透射率特性,建立了中国东北森林区域的修正查找表, RMSE 为 4.5 cm。但目前查找表算法在大区域的应用还比较受限。

机器学习算法,如人工神经网络(artificial neural network, ANN)、支持向量机(support vector machines, SVM)和具有先验信息的随机森林(random forest, RF),可以模拟被动微波亮度温度与积雪参数之间的复杂关系。人工神经网络模型是应用很广泛的一种求解非线性关系的方法,如 BP 神经网络算法,可以模拟双极化亮度温度、多频率和地表参数之间的非线性关系,而不需要先验知识。因此,这些模型可以克服典型方法(如经验和半经验模型)的雪深数据获取问题,成为估算雪水当量的强大工具<sup>[69]</sup>。SVM 在模拟多频亮度温度方面表现更好<sup>[70-71]</sup>。Xiao 等<sup>[72]</sup>研究表明, SVM 雪深算法表现出优于 ANN 方法、Chang 模型、线性回归算法和光谱偏振差算法的性能,并且该模型可用于模拟深层积雪。RF 不需要不相关的输入、代表性变量和复杂的数学运算,因此它被称为高速算法<sup>[73]</sup>。机器学习算法在一定程度上提高了雪水当量的检索精度。然而,机器学习算法都是基于数据驱动进行,无法很好的提取地表参数特征。因此,有学者将机器学习算法和积雪辐射传输模型<sup>[74]</sup>、数据同化算法<sup>[33]</sup>结合起来反演雪水当量。

数据同化时将观测引入过程模型的技术方法。GlobSnow 的雪水当量产品<sup>[48]</sup>就使用了 HUT 模型观测算子下的贝叶斯方法同化了地面雪深数据。在其他研究中, Kim 等<sup>[75]</sup>使用粒子滤波方法证明,使用高分辨率的多频率被动辐射的航空观测数据可以提

高雪水当量精度。也有学者通过平滑器通过积雪覆盖范围数据进行的雪水当量再分析,将积雪覆盖范围与批量平滑<sup>[76-77]</sup>相结合,估计了长期的雪水当量再分析数据。

目前学者还开发出了很多新方法来估算雪水当量。如 Wallbank 等<sup>[78]</sup>通过宇宙射线中子传感器估算了英国地区的雪水当量,并使用 COSMOS-UK 网络的数据进行了评估; Dagurov 等<sup>[79]</sup>提出了一种基于微摄动法的干涉传感近似模型,利用 ALOS-2/PALSAR-2,在俄罗斯贝加尔湖附近的试验场首次采用雷达干涉测量法确定了雪水当量,不同于普遍的干涉模型,此模型考虑了来自积雪表面的微波后向散射来估计雪面散射对振幅和干涉相位值的贡献; Zhu 等<sup>[80]</sup>利用 19 GHz 和 37 GHz 的被动微波观测数据确定雪的散射反照率,结合三通道 (9.6 GHz, 13.3 GHz 和 17.2 GHz) 雷达算法降低背景散射对雪土界面的影响,实现了一种新的主被动联合反演雪水当量的算法; Cheng 等<sup>[81]</sup>基于栅格分割和特征向量空间滤波回归模型的青藏高原中部雪水当量估算方法; Yang 等<sup>[82]</sup>通过对积雪下垫面分类和极化分解对 EQeau 模型进行了改进,并利用新的数据源 GF-3 输入模型完成了雪水当量高分辨率反演; Steiner 等<sup>[83]</sup>选取阿尔卑斯山研究了使用开源 GNSS 处理软件 RTKLIB 和基于偏置坐标 Up 分量的 GNSS 折射仪在后处理和(接近)实时中进行原位雪水当量测定,实现了近乎实时地提供连续的雪水当量估算方法。

## 2 国内外主流积雪遥感监测产品

在国际上,积雪遥感监测由最初针对单一传感器的反演算法研发,转向多种传感器数据的产品业务化生产<sup>[84]</sup>。如今利用卫星遥感技术监测积雪已达 50 余年的历史,积累了长时间序列全球及区域尺度的多种积雪遥感监测产品<sup>[1]</sup>。根据积雪遥感监测产品的表征含义,将其分为积雪范围(积雪面积)产品、积雪覆盖率产品和雪深/雪水当量产品。全面系统地梳理掌握积雪范围、积雪覆盖率和雪深/雪水当量积雪遥感监测产品,对了解当前积雪遥感反演的进展及开展更高精度的积雪反演研究有着关键作用<sup>[6]</sup>。

### 2.1 积雪范围遥感监测产品

积雪范围产品采用一组阈值判定的二值分类算法,将像元分为有雪或无雪来反映积雪覆盖范围(面积)<sup>[85]</sup>,因此亦叫做积雪二值数据产品。根据主要使用的传感器来看,有仅采用光学传感器生成的 AVHRR Pathfinder, MDS10C GHRM5C 等;也有多种光学与微波传感器数据融合而成的 MEaSURES, CryoClim, NOAA IMS 等积雪范围产品,这类产品具有多尺度、多时相、多谱段等优势,能够削弱云层干扰,能将代表性有限的信息提升为更能符合区域客观规律的积雪遥感数据信息。主要积雪范围产品见表 2。

表 2 主要的积雪范围产品  
Tab.2 Major snow cover products

产品	覆盖范围	空间 分辨率/km	时间 分辨率/d	时间范围	传感器	来源
NOAA IMS	全球	1 4 24	1	2014 年至今 2004 年至今 1997—2004 年	NOAA, AVHRR, MODIS, ASCAT	美国国家海洋和大气管理局 <a href="http://www.natice.noaa.gov/ims/">http://www.natice.noaa.gov/ims/</a>
CryoClim	全球	5	1	1982 年至今	AVHRR, SMMR/SSMI	挪威航天中心,欧洲航天局 <a href="http://www.cryoclim.net/cryoclim/subsites/data_portal/">http://www.cryoclim.net/cryoclim/subsites/data_portal/</a>
MDS10C GHRM5C	全球	5	1	1979—2013 年	MODIS, AVHRR	日本宇航局 <a href="http://kuroshio.eorc.jaxa.jp/JAS-MES/index.html">http://kuroshio.eorc.jaxa.jp/JAS-MES/index.html</a>
MEaSURES	北半球	25	1	1999—2012 年	MODIS, AVHRR, AMS- R-E, VIIRS, SSMI	NSIDC <a href="ftp://sidads.colorado.edu/pub/DATASETS/nsidc0530_MEASURES_nhsnow_daily25/">ftp://sidads.colorado.edu/pub/DATASETS/nsidc0530_MEASURES_nhsnow_daily25/</a>
青藏高原 MODIS 逐 日无云积雪产品	青藏高原	0.5	1	2002—2010 年	MODIS	国家青藏高原科学数据中心 <a href="http://data.tpdc.ac.cn">http://data.tpdc.ac.cn</a>
青藏高原 MODIS 逐 日无云积雪面积数 据集	青藏高原	0.5	1	2002—2015 年	MODIS	中国科学院空天信息创新研究院 <a href="https://www.scidb.cn/en/detail?dataSetId=533223505102110720">https://www.scidb.cn/en/detail?dataSetId=533223505102110720</a>
青藏高原逐日无云 积雪数据集	青藏高原	0.5	1	2002—2021 年	MODIS	国家青藏高原科学数据中心 <a href="http://data.tpdc.ac.cn">http://data.tpdc.ac.cn</a>



(续表)

产品	覆盖范围	空间 分辨率/km	时间 分辨率/d	时间范围	传感器	来源
FY-1&AVHRR 积雪范围产品	全球	5	10	1996—2010 年	MVISR, AVHRR	中国气象局 <a href="http://satellite.cma.gov.cn">http://satellite.cma.gov.cn</a>
Daily cloud-free snow cover products for Ti- betan Plateau from 2002 to 2021	Qinghai-Tibetan Plateau	0.5	1	2002—2021 年	MODIS	<a href="https://doi.org/10.11888/Cryos.tpdc.272204">https://doi.org/10.11888/Cryos.tpdc.272204</a>

NOAA IMS 产品由美国国家海洋和大气管理局提供,由极地轨道和地球静止轨道环境卫星等多种微波和可见光传感器的遥感数据融合反演而成,能够在各种天气环境下提供积雪监测信息,具有较高的时空分辨率和较好的精度,且不受云层的干扰,因此在全球对雪冰遥感监测领域的应用越来越广泛,是多源传感器数据融合的最具代表性产品之一<sup>[86-87]</sup>。它可提供北半球逐日积雪、海冰和湖冰范围的数据信息,采用以北极点为中心的极地方位投影,产品拥有 ASCII 格式和 TIFF 格式 2 种,不同的像元值代表不同的地物信息,但在森林和山区会出现积雪范围面积高估现象<sup>[88]</sup>。

中国的风云系列卫星数据也广泛应用在积雪面覆盖制图中,中国气象局已经制备了业务化的中国区域和全球积雪面积产品并投入使用,如 1996—2010 年中国区域 FY-1/MVISR & NOAA/AVHRR 积雪面积旬产品,全球 FY-3&MULSS 日/旬/月积雪范围产品是用 FY-3 的 MERSI 和 VIRR 积雪产品融合生成的。也有学者基于 MODIS 研发了青藏高原积雪范围产品<sup>[89-90]</sup>。华东师范大学的学者在 ESSD 发布了青藏高原逐日无云积雪产品,该产品基于长

时间序列 MODIS 积雪产品,采用 HMRF 建模框架,制备了青藏高原 2002—2021 年的逐日无云积雪数据集<sup>[89-90]</sup>。该建模框架将 MODIS 积雪产品的光谱信息、时空背景信息,以及环境相关信息以最优形式进行整合,不仅填补了云层遮挡引起的数据空缺,而且提高了原始 MODIS 积雪产品的精度。

积雪指数产品是指积雪监测产品中利用积雪指数来识别积雪。MODIS 的积雪指数产品主要使用 SNOMAP 算法进行积雪制图<sup>[24]</sup>。主要包括使用 NDSI 和一些辅助的决策策略来识别积雪。积雪在可见光波段具有高反射率而在短波红外波段反射率较低,从而对应较高的 NDSI 值,基于 NDSI 制作的 MODIS 积雪指数产品在晴空下具有较高的精度<sup>[91]</sup>。

2.2 积雪覆盖率遥感监测产品

积雪覆盖率表示指定区域内的积雪覆盖比例,在亚像元尺度上即单位像元内积雪覆盖面积与单位像元面积的比值<sup>[92]</sup>。监测区域积雪覆盖率是遥感在积雪水文中的一个重要应用。当前已存在多种卫星遥感监测技术实现对区域积雪覆盖率的监测,并且形成了长时间序列的全球/区域尺度上的多种积雪覆盖率遥感产品。主要产品见表 3。

表 3 主要积雪覆盖率产品

Tab.3 Major fractional snow cover products

数据产品名称	覆盖范围	时间范围	空间分辨率	时间分辨率	传感器	来源
GlobSnow v2.1	北半球	1996—2012 年	0.01°×0.01°	逐日/8 d	ATSR-2, AATSR	欧洲航天局 <a href="http://www.globsnow.info">http://www.globsnow.info</a>
SCAG	北半球	2000—2013 年	500 m	逐日	MODIS, VIRRS	NASA <a href="http://snow.jpl.nasa.gov/portal/browse/dataset/urn:snow:MODSCAG">http://snow.jpl.nasa.gov/portal/browse/dataset/urn:snow:MODSCAG</a>
CryoLand	泛欧亚	2000 年至今	500 m	逐日	MODIS	欧洲航天局 <a href="http://cryoland.eu">http://cryoland.eu</a>
Terra 积雪产品 (MOD10A1/A2)	全球	2000 年至今	500 m/0.05°	逐日/8 d	MODIS	NSIDC <a href="https://nsidc.org">https://nsidc.org</a>
Aqua 积雪产品 (MYD10A1/A2)	全球	2002 年至今	500 m/0.05°	逐日/8 d	MODIS	NSIDC <a href="https://nsidc.org">https://nsidc.org</a>
高亚洲逐日积雪 覆盖度数据集	亚洲	2002—2018 年	500 m	逐日	MODIS	中国科学院空天信息创新研究院 <a href="https://www.scidb.cn/en/detail?dataSetId=633694460970008576">https://www.scidb.cn/en/detail?dataSetId=633694460970008576</a>
全球年均积雪面 积比例数据	全球	2000—2021 年	500 m	逐年	MODIS	国家青藏高原科学数据中心 <a href="http://data.tpdc.ac.cn">http://data.tpdc.ac.cn</a>



NSIDC 自 2000 年开始发布全球范围内的 MODIS 积雪产品数据,该产品的研发是基于 Terra 卫星制作的逐日积雪标准产品 (MOD10A1/A2) 和 Aqua 卫星的逐日积雪标准产品 (MYD10A1/A2) 所生成的<sup>[93]</sup>,目前已有 V004 版本、V005 版本和 V006 版本 3 种全球积雪监测产品投入使用,后两者包括积雪覆盖范围、积雪覆盖率、积雪反照率和质量评估 4 种数据集<sup>[94]</sup>。由于 MODIS 是光学传感器,MODIS 积雪范围产品在晴空状态下具有较高的精度,为全球积雪范围的变化提供了不错的识别,但大量云像元的存在严重影响了 MODIS 积雪产品的应用<sup>[95]</sup>。目前,中国学者如邱玉宝等<sup>[90]</sup>已研发了一系列融合去云算法,来消除 MODIS 积雪产品中的云污染,如青藏高原 MODIS 逐日无云积雪面积比例数据集 (2000—2015 年)、青藏高原 MODIS 逐日无云积雪面积数据集 (2002—2015 年)、高亚洲逐日积雪覆盖率数据集 (2002—2016 年) 都使用去云算法来降低云层带来的影响。

欧洲航天局资助的 GlobSnow v2.1 产品基于 ATSR-2 和 AATSR 传感器生成了一系列自 1995 年以来的近实时北半球 0.01°×0.01°分辨率的积雪覆盖率产品。但是由于 AATSR 的条带宽度较窄,无法

实现全球每日覆盖;并且由于低反射率动力学原理,在非常密集的森林中,积雪覆盖率存在被高估现象<sup>[96]</sup>。因此 2.1 版本改进了积雪覆盖率和雪水当量产品的反演方法,并利用改进的反演算法重新处理长时间序列数据集。

全球年均积雪面积比例数据集 (2000—2021 年)的制作方法为 BV-BLRM 积雪面积比例线性回归经验模型,其采用的源数据为 MOD09GA 500 m 全球逐日地表反射率产品,以及 MOD09A1 500 m 的 8 d 合成全球地表反射率产品,该数据集利用 Google Earth Engine 平台进行制作。

2.3 雪深/雪水当量遥感监测产品

雪深是重要的积雪参数之一,是衡量积雪变化的重要特征量。遥感反演得出雪深可以进一步推算出雪水当量。雪水当量表示单位横截面积的柱体雪完全融化后的液态水高度,单位为 cm 或者 mm<sup>[97]</sup>。它既是地球物质系统中不可缺少的成分,在积雪遥感监测中亦是重要的变量,其时空分布特点对全球变化、水资源利用和循环起着重要作用<sup>[98]</sup>。目前国内已发布多种相关的雪深/雪水当量产品,主要基于被动微波传感器生产,并大多采取所使用传感器来命名。典型产品见表 4。

表 4 典型的雪深/雪水当量产品  
Tab. 4 Major snow depth/water equivalent products

数据产品	空间范围	时间范围	空间分辨率	时间分辨率	数据源
SMMR 积雪雪深产品	全球	1978—1987 年	0.5°	逐月	NSIDC <a href="https://nsidc.org">https://nsidc.org</a>
SSM/I 雪深产品	全球	1987 年至今	25 km	逐日	NSIDC <a href="https://nsidc.org">https://nsidc.org</a>
SSM/I S 雪深产品	全球	2003 年至今	25 km	逐日	NSIDC <a href="https://nsidc.org">https://nsidc.org</a>
GlobSnow 雪水当量产品	北半球	1979 年至今	25 km	逐日/周/月	欧洲航天局 <a href="http://www.globsnow.info">http://www.globsnow.info</a>
AMSR-E 雪水当量产品	全球	2002—2011 年	25 km	逐日/5 d/月	NASA <a href="http://nsidc.org/data/docs/daac/ae_swe_ease-grids.gd.html">http://nsidc.org/data/docs/daac/ae_swe_ease-grids.gd.html</a>
AMSR-2 雪水当量/雪深产品	全球	2015 年至今	10 km/25 km/Swath	逐日	日本宇航局 <a href="https://suzaku.eorc.jaxa.jp/">https://suzaku.eorc.jaxa.jp/</a>
FY-3B/C 雪深/雪水当量产品	全球	2011/2014 年至今	25 km	逐日/旬/月	中国气象局 <a href="http://satellite.cma.gov.cn">http://satellite.cma.gov.cn</a>
中国雪深长时间序列数据集 (1979—2016 年)	中国	1979—2016 年	0.25°	逐日	国家青藏高原科学数据中心 <a href="https://data.tpd.cn/zh-hans/">https://data.tpd.cn/zh-hans/</a>
高亚洲地区被动微波遥感雪水当量数据集	亚洲	2002—2011 年 2003—2011 年	0.25°/500 m	逐日/周/月	中国科学院空天信息创新研究院 <a href="https://www.scidb.cn/en/detail?dataSetId=633694461121003524">https://www.scidb.cn/en/detail?dataSetId=633694461121003524</a>

1978 年 NSIDC 在利用 SMMR 的基础上发布了全球首个空间分辨率为 0.5°的逐月积雪雪深产品。1987 年由性能更优的 SSM/I 取代了 SMMR 进行监测 (SSM/I 于 2003 年开始提供监测数据),提供了全球尺度或半球的遥感监测雪深变化数据。

2002 年,发布了基于 Aqua 卫星所搭载的 AMSR-E 数据的逐日雪深产品,AMSR-E 雪水当量产品的空间分辨率为 25 km,所以常用于大尺度的积雪范围、雪深和雪水当量等方面的监测。

欧洲航天局支持的 GlobSnow 项目,基于

SMMR,SSMI,SSM/I 数据及气象站点长时间序列观测数据,利用数据同化方法生成了自 1979 年以来北半球的逐日/周/月雪水当量产品,产品监测范围覆盖了除山区和格陵兰岛的北半球所有陆地。

最初 NSIDC 发布了搭载在 Aqua 卫星上的 AMSR-E 数据的逐日雪深产品,该产品因为传感器的损坏而停用,随之日本宇航局基于 AMSR-2 的微波亮度温度数据发布了全球范围的逐日雪深/雪水当量产品。

我国典型的雪深/雪水当量产品主要包括近年来中国气象局基于 FY-3B 搭载的 MWRI 研发的逐日雪深/雪水当量产品以及基于 FY-3C/MWRI 研发的逐日/旬/月雪深/雪水当量产品。另外有利用 SMMR,SSM/I 和 AMSR-E 所制作的中国雪深长时间序列数据集(1978—2012 年)<sup>[61]</sup>,该产品升级后为中国雪深长时间序列数据集(1979—2016 年)以及高亚洲地区被动微波遥感雪水当量数据集<sup>[99]</sup>。

3 总结与展望

本文综述了 3 大类主流积雪产品及其算法基础,以及积雪产品的业务化应用和精度验证研究。根据获取的积雪参数信息不同,主要分有积雪范围产品、积雪覆盖率产品和雪深/雪水当量产品,前两者的数据源是光学/热红外传感器,后者的数据源一般是被动微波传感器,亦有个别将 2 类传感器数据源融合生成的产品,如 IMS 雪冰产品。积雪产品的典型算法发展久远。基于 NDSI 的阈值判别法是积雪范围产品的最主流算法,NASA 算法和 NASA96 算法等半经验算法是当前应用最广泛的雪深/雪水当量产品基本算法。随着遥感监测传感器的性能不断提升,国内外研究者基于对上述算法模型的经验系数和反演结果修正改进,提高在各自研究区域的积雪参数反演精度。国内基于我国 FY-3 系列卫星传感器,将算法模型结合中国的积雪特点进行订正改进,已生成反演精度较高的国内积雪业务产品。当前积雪产品的业务化应用广泛,如在水文遥感、融雪径流模拟和雪灾监测等方面有重要作用。然而积雪性质的动态改变、地表覆被、地形变化和传感器技术等因素对积雪遥感反演精度有很大影响,如何突破这些限制,仍是目前研究亟需解决的问题。综合当前积雪遥感反演进展,提出以下几点展望:

1)全球或半球尺度的积雪产品因为空间分辨率低,在区域尺度上的反演精度有待提高。当前遥感技术对积雪粒径、积雪密度和含水量等积雪物理特性变化敏感,但是对于植被对微波辐射的影响以

及地形和山体阴影等对积雪遥感反演的影响还有待进一步的探索研究。比如在青藏高原这种地形复杂险要的地区,在构建积雪反演模型要充分考虑地形、山体阴影、云雾等因素的影响。如 GlobSnow 不提供像青藏高原这种地形复杂的山区积雪产品,AMSR-E 雪深产品在青藏高原也存在严重高估的现象。

2)被动微波是当前雪深反演应用最广泛的技术,但是地表覆被复杂及传感器低空间分辨率,使得微波遥感雪深反演面临混合像元现象突出<sup>[100]</sup>。当前针对被动微波混合像元的亮温响应特征和算法改进机制的研究尚不充分。当前的算法采用的微波频率主要是 18 GHz,19 GHz 和 37 GHz,雪深大于 50 cm 后会出现亮温差饱和现象,可以探索使用其他频率的波段来监测获取积雪亮温数据,解决混合像元内的植被和土壤等干扰因素的问题。

3)促进多源数据融合提高产品反演精度。被动微波传感器的空间分辨率低而时间分辨率高且覆盖范围广,光学/热红外传感器却恰恰相反,因此将两类遥感数据进行融合处理,可以更好地处理像元尺度内的地表异质性信息,获取更高反演精度的数据。除此之外,近年来主动微波遥感也已经成为监测积雪覆盖率和雪深反演的重要方法,并且其具有不受云雾影响、空间分辨率高的特点,可以有效弥补光学热红外遥感和被动微波遥感数据的不足。可以大力发展星载雷达数据与被动微波数据融合产品,提升机器学习算法,促进全球化应用尺度的积雪产品反演精度。

参考文献 (References) :

[1] Estilow T W, Young A H, Robinson D A. A long-term Northern Hemisphere snow cover extent data record for climate studies and monitoring[J]. Earth System Science Data,2015,7(1):137-142.

[2] 沙依然,外力,毛炜峰. 基于 AMSR2 被动微波积雪参量高精度反演方法研究[J]. 冰川冻土,2016,38(1):145-158.

Sayran W, Mao W Y. A research on the method of deriving high-precision snow parameters from AMSR2 passive microwave remote sensing data[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1):145-158.

[3] 王芝兰,张飞民,王澄海,等. 1980—2019 年青藏高原积雪深度时空差异性分析[J]. 冰川冻土,2022,44(3):810-821.

Wang Z L, Zhang F M, Wang C H, et al. Analysis on spatial and temporal difference of snow depth over the Tibetan Plateau from 1980 to 2019[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(3):810-821.

[4] 王顺久. 青藏高原积雪变化及其对中国水资源系统影响研究进展[J]. 高原气象,2017,36(5):1153-1164.

Wang S J. Progresses in variability of snow cover over the Qinghai-Tibetan Plateau and its impact on water resources in China[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(5):1153-1164.

- [5] 刘一静,孙燕华,钟歆玥,等.从第三极到北极:积雪变化研究进展[J].冰川冻土,2020,42(1):140-156.  
Liu Y J, Sun Y H, Zhong X Y, et al. Changes of snow cover in the Third Pole and the Arctic[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 140-156.
- [6] 王泽坤,甘甫平,闫柏琨,等.雪深和雪水当量被动微波反演及应用进展[J].自然资源遥感,2022,34(3):1-9. doi:10.6046/zzzyyg.2021322.  
Wang Z K, Gan F P, Yan B K, et al. Inversion of snow depth and snow water equivalent based on passive microwave remote sensing and its application progress[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(3): 1-9. doi:10.6046/zzzyyg.2021322.
- [7] 蒋玲梅,崔慧珍,王功雪,等.积雪、土壤冻融与土壤水分遥感监测研究进展[J].遥感技术与应用,2020,35(6):1237-1262.  
Jiang L M, Cui H Z, Wang G X, et al. Progress on remote sensing of snow, surface soil frozen/thaw state and soil moisture[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(6): 1237-1262.
- [8] Yang J, Jiang L, Shi J, et al. Monitoring snow cover using Chinese meteorological satellite data over China[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 143: 192-203.
- [9] Marchane A, Jarlan L, Hanich L, et al. Assessment of daily MODIS snow cover products to monitor snow cover dynamics over the Moroccan Atlas Mountain range[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 160: 72-86.
- [10] 韩琛惠.新一代静止气象卫星积雪判识算法的改进与应用研究[D].南京:南京信息工程大学,2018.  
Han C H. Improvement and application of snow detection algorithm using the new generation of geostationary meteorological satellite [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2018.
- [11] 曹海啸.基于深度学习的新疆地区遥感积雪判识研究[D].南京:南京信息工程大学,2021.  
Cao H X. Study on remote sensing snow identification in Xinjiang based on deep learning[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2021.
- [12] 沙依然.外力.基于新一代先进卫星遥感 AMSR2、VIIRS 数据融合积雪监测模型及应用研究[D].南京:南京信息工程大学,2017.  
Sayran W. Study on the snow cover inversion model and its application based on the new generation advanced satellite AMSR2 and VIIRS data fusion[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2017.
- [13] 除多,郑照军,拉巴卓玛,等.基于 Landsat-8 OLI 的青藏高原 IMS 4 km 雪冰产品精度评价[J].遥感技术与应用,2021,36(6):1223-1235.  
Chu D, Zheng Z J, Labazhuoma, et al. Accuracy assessment of IMS 4 km snow and ice products on the Tibetan Plateau based on Landsat-8 OLI images[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(6): 1223-1235.
- [14] 马光义.基于高时空分辨率卫星遥感影像的积雪判识算法研究与应用[D].南京:南京信息工程大学,2020.  
Ma G Y. Research and application of snow recognition algorithm using high temporal-spatial resolution remote sensing imageries [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology. 2020.
- [15] 吴杨,张佳华,徐海明,等.卫星反演积雪信息的研究进展[J].气象,2007,33(6):3-10.  
Wu Y, Zhang J H, Xu H M, et al. Advances in study of snow-cover from remote sensing data[J]. Meteorological Monthly, 2007, 33(6): 3-10.
- [16] 肖雄新,张廷军.基于被动微波遥感的积雪深度和雪水当量反演研究进展[J].地球科学进展,2018,33(6):590-605.  
Xiao X X, Zhang T J. Passive microwave remote sensing of snow depth and snow water equivalent: Overview[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(6): 590-605.
- [17] 李长春,徐轩,包安明,等.基于 FY3B-MWRI 数据新疆区域积雪深度反演[J].遥感技术与应用,2018,33(6):1030-1036.  
Li C C, Xu X, Bao A M, et al. The Study on snow depth retrieval in Xinjiang region based on FY3B-MWRI data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(6): 1030-1036.
- [18] 朱淑珍,黄法融,冯挺,等.1979—2020 年天山地区积雪量估算及其特征分析[J].冰川冻土,2022,44(3):984-997.  
Zhu S Z, Huang F R, Feng T, et al. Estimation of snow mass and its distribution characteristics from 1979 to 2020 in Tianshan Mountains, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(3): 984-997.
- [19] 蒋玲梅,王培,张立新,等. FY3B-MWRI 中国区域雪深反演算法改进[J].中国科学:地球科学,2014,44(3):531-547.  
Jiang L M, Wang P, Zhang L X, et al. Improvement of FY3B-MWRI snow depth inversion algorithm in China region[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2014, 44(3): 531-547.
- [20] 王功雪,蒋玲梅,武胜利,等. FY-3B 与 FY-3C/MWRI 交叉定标及雪深算法应用[J].遥感技术与应用,2017,32(1):49-56.  
Wang G X, Jiang L M, Wu S L, et al. Inter-calibrating FY-3B and FY-3C/MWRI for synergistic implementing to snow depth retrieval algorithm[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(1): 49-56.
- [21] 李震,曾群柱.合成孔径雷达影像提取雪盖信息研究[J].环境遥感,1996(3):200-205.  
Li Z, Zeng Q Z. Study on extracting snow cover information from synthetic aperture Radar images[J]. National Remote Sensing Bulletin, 1996(3): 200-205.
- [22] Dozier J, Marks D. Snow mapping and classification from Landsat thematic mapper data[J]. Annals of Glaciology, 1987, 9: 97-103.
- [23] Martinec J, Rango A. Interpretation and utilization of areal snow-cover data from satellites[J]. Annals of Glaciology, 1987, 9: 166-169.
- [24] Dozier J. Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat thematic mapper[J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 28: 9-22.
- [25] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data[J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 54(2): 127-140.
- [26] Hall D K, Foster J L, Verbyla D L, et al. Assessment of snow-cover mapping accuracy in a variety of vegetation-cover densities in central Alaska[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 66(2): 129-137.
- [27] Klein A G, Hall D K, Riggs G A. Improving snow cover mapping in



- forests through the use of a canopy reflectance model[J]. *Hydrological Processes*, 1998, 12(1011): 1723–1744.
- [28] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V, et al. MODIS snow-cover products[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1/2): 181–194.
- [29] Salomonson V V, Appel I. Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(3): 351–360.
- [30] Hori M, Sugiura K, Kobayashi K, et al. A 38-year (1978–2015) northern hemisphere daily snow cover extent product derived using consistent objective criteria from satellite-borne optical sensors[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 191: 402–418.
- [31] Wang X, Wang J. Retrieving snow cover in forests of Qilian Mountains from Landsat optional land imager (OLI) [C]//2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Milan, Italy. IEEE, 2015: 751–753.
- [32] Wang G, Jiang L, Shi J, et al. Snow-covered area retrieval from Himawari-8 AHI imagery of the Tibetan Plateau[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(20): 2391.
- [33] Kwon Y, Yang Z L, Hoar T J, et al. Improving the radiance assimilation performance in estimating snow water storage across snow and land-cover types in North America[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, 18(3): 651–668.
- [34] Masiokas M H, Villalba R, Luckman B H, et al. Snowpack variations in the central Andes of Argentina and Chile, 1951–2005: Large-scale atmospheric influences and implications for water resources in the region[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(24): 6334–6352.
- [35] Metsämäki S J, Anttila S T, Markus H J, et al. A feasible method for fractional snow cover mapping in boreal zone based on a reflectance model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(1): 77–95.
- [36] Painter T H, Rittger K, McKenzie C, et al. Retrieval of subpixel snow covered area, grain size, and albedo from MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(4): 868–879.
- [37] Rittger K, Painter T H, Dozier J. Assessment of methods for mapping snow cover from MODIS[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 51: 367–380.
- [38] 施建成. MODIS 亚像元积雪覆盖反演算法研究——纪念杰出的地理学家、冰川学家施雅风先生逝世一周年[J]. *第四纪研究*, 2012, 32(1): 6–15.
- Shi J C. An automatic algorithm on estimating sub-pixel snow cover from modis[J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(1): 6–15.
- [39] Hao S, Jiang L, Shi J, et al. Assessment of MODIS-based fractional snow cover products over the Tibetan Plateau[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, 12(2): 533–548.
- [40] 赵宏宇, 郝晓华, 郑照军, 等. 基于 FY-3D/MERSI-II 的积雪面积比例提取算法[J]. *遥感技术与应用*, 2018, 33(6): 1004–1016.
- Zhao H Y, Hao X H, Zheng Z J, et al. A new algorithm of fractional snow cover basing on FY-3D/MERSI-II [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(6): 1004–1016.
- [41] 朱骥, 施建成, 张祥信, 等. 基于 AVHRR/210d 合成数据的青藏高原亚像元雪填图[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 42(12): 1725–1730.
- Zhu J, Shi J C, Zhang X X, et al. Subpixel snow mapping using AVHRR/210-day compositing data of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(12): 1725–1730.
- [42] Allen R C Jr, Durkee P A, Wash C H. Snow/cloud discrimination with multispectral satellite measurements[J]. *American Meteorological Society*, 1990.
- [43] Slater M T, Sloggett D R, Rees W G, et al. Potential operational multi-satellite sensor mapping of snow cover in maritime sub-polar regions[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(15/16): 3019–3030.
- [44] Huang Y, Xu J, Xu J, et al. HMRFS-TP: Long-term daily gap-free snow cover products over the Tibetan Plateau from 2002 to 2021 based on hidden Markov random field model[J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14(9): 4445–4462.
- [45] Moosavi V, Malekinezhad H, Shirmohammadi B. Fractional snow cover mapping from MODIS data using wavelet-artificial intelligence hybrid models[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 511: 160–170.
- [46] Dozier J, Painter T H, Rittger K, et al. Time-space continuity of daily maps of fractional snow cover and albedo from MODIS[J]. *Advances in Water Resources*, 2008, 31(11): 1515–1526.
- [47] McCreight J L, Small E E. Modeling bulk density and snow water equivalent using daily snow depth observations [J]. *The Cryosphere*, 2014, 8(2): 521–536.
- [48] 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, 115(12): 3517–3529.
- [49] 施建成, 熊川, 蒋玲梅. 雪水当量主被动微波遥感研究进展[J]. *中国科学: 地球科学*, 2016, 46(4): 529–543.
- Shi J C, Xiong C, Jiang L M. Review of snow water equivalent microwave remote sensing [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2016, 46(4): 529–543.
- [50] 黄新宇, 冯筠. 冰雪微波遥感研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2004, 19(6): 533–536.
- Huang X Y, Feng Y. The development of study on the snow ice using microwave remote sensing data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2004, 19(6): 533–536.
- [51] 赵亮, 朱玉祥, 程亮, 等. 遥感-测站相结合的动态雪深反演方法初探[J]. *应用气象学报*, 2010, 21(6): 685–697.
- Zhao L, Zhu Y X, Cheng L, et al. A dynamic approach to retrieving snow depth based on integration of remote sensing and observed data[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2010, 21(6): 685–697.
- [52] Mätzler C. Applications of the interaction of microwaves with the natural snow cover[J]. *Remote Sensing Reviews*, 1987, 2(2): 259–387.
- [53] 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.
- [54] Gladkova I, Grossberg M, Bonev G, et al. Increasing the accuracy of MODIS/aqua snow product using quantitative image restoration technique[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*,

- 2012,9(4):740-743.
- [55] Lee Y K,Kongoli C,Key J. An in-depth evaluation of heritage algorithms for snow cover and snow depth using AMSR-E and AMSR2 measurements[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2015,32(12):2319-2336.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 曹梅盛,冯学智,金德洪. 积雪的若干光谱反射特征[J]. 科学通报,1982,27(20):1259-1261.
- Cao M S,Feng X Z,Jin D H. Some spectral reflection characteristics of snow cover[J]. Chinese Science Bulletin,1982,27(20):1259-1261.
- [59] 曹梅盛,冯学智,金德洪. 积雪若干光谱反射特征的初步研究[J]. 冰川冻土,1984,6(3):15-26,99-102.
- Cao M S,Feng X Z,Jin D H. Preliminary research on some characteristics of the spectral reflection of snow cover[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,1984,6(3):15-26,99-102.
- [60] 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(4):260-269.
- Cao M S,Li P J,Robinson D A,et al. Evaluation and primary application of microwave remote sensing smmr-derived snow cover in western China[J]. National Remote Sensing Bulletin,1993(4):260-269.
- [61] 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.
- Che T,Li X,Gao F. 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.
- [62] 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.
- Sun Z W,Shi J C,Yang H,et al. A study on snow depth estimating and snow water equivalent algorithm for FY-3 MWRI[J]. Remote Sensing Technology and Application,2007,22(2):264-267.
- [63] 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.
- [64] Kelly R. The AMSR-E snow depth algorithm:Description and initial results[J]. Journal of Remote Sensing,2009,29:307-317.
- [65] Taheri M,Mohammadian A. An overview of snow water equivalent:Methods,challenges,and future outlook[J]. Sustainability,2022,14(18):11395.
- [66] Pulliainen J T,Grandell J,Hallikainen M T. HUT snow emission model and its applicability to snow water equivalent retrieval[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,1999,37(3):1378-1390.
- [67] Butt M J. A comparative study of Chang and HUT models for UK snow depth retrieval[J]. International Journal of Remote Sensing,2009,30(24):6361-6379.
- [68] Dai L,Che T,Wang J,et al. Snow depth and snow water equivalent estimation from AMSR-E data based on a priori snow characteristics in Xinjiang,China[J]. Remote Sensing of Environment,2012,127:14-29.
- [69] Vafakhah M,Nasiri K A,Janizadeh S,et al. Evaluating different machine learning algorithms for snow water equivalent prediction[J]. Earth Science Informatics,2022,15(4):2431-2445.
- [70] Forman B A,Reichle R H. Using a support vector machine and a land surface model to estimate large-scale passive microwave brightness temperatures over snow-covered land in North America[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2015,8(9):4431-4441.
- [71] Bair E H,Abreu Calfa A,Rittger K,et al. Using machine learning for real-time estimates of snow water equivalent in the watersheds of Afghanistan[J]. The Cryosphere,2018,12(5):1579-1594.
- [72] Xiao X,Zhang T,Zhong X,et al. Support vector regression snow-depth retrieval algorithm using passive microwave remote sensing data[J]. Remote Sensing of Environment,2018,210:48-64.
- [73] Eppler J,Rabus B,Morse P. Snow water equivalent change mapping from slope-correlated synthetic aperture Radar interferometry (InSAR) phase variations[J]. The Cryosphere,2022,16(4):1497-1521.
- [74] Tedesco M,Jeyaratnam J. A new operational snow retrieval algorithm applied to historical AMSR-E brightness temperatures[J]. Remote Sensing,2016,8(12):1037.
- [75] Kim R S,Durand M,Li D,et al. Estimating alpine snow depth by combining multifrequency passive radiance observations with ensemble snowpack modeling[J]. Remote Sensing of Environment,2019,226:1-15.
- [76] Aalstad K,Westermann S,Schuler T V,et al. Ensemble-based assimilation of fractional snow-covered area satellite retrievals to estimate the snow distribution at Arctic sites[J]. The Cryosphere,2018,12(1):247-270.
- [77] Cortés G,Margulis S. Impacts of El Niño and La Niña on interannual snow accumulation in the Andes:Results from a high-resolution 31year reanalysis[J]. Geophysical Research Letters,2017,44(13):6859-6867.
- [78] Wallbank J R,Cole S J,Moore R J,et al. Estimating snow water equivalent using cosmic-ray neutron sensors from the COSMOS-UK network[J]. Hydrological Processes,2021,35(5):16420.
- [79] Dagurov P N,Chimitdorzhiev T N,Dmitriev A V,et al. Estimation of snow water equivalent from L-band Radar interferometry:Simulation and experiment[J]. International Journal of Remote Sensing,2020,41(24):9328-9359.
- [80] Zhu J,Tan S,Tsang L,et al. Snow water equivalent retrieval using active and passive microwave observations[J]. Water Resources Research,2021,57(7):e2020WR027563.
- [81] Cheng Q S,Chen Y M,Yang J X,et al. An enhanced method for estimating snow water equivalent in the central part of the Tibetan Plateau using raster segmentation and eigenvector spatial filtering regression model[J]. Journal of Mountain Science,2022,19(9):2570-2586.
- [82] Yang Y,Fang S,Wu H,et al. High-resolution inversion method for the snow water equivalent based on the GF-3 satellite and optimized EQueau model[J]. Remote Sensing,2022,14(19):4931.
- [83] Steiner L,Studemann G,Grimm D E,et al. (Near) real-time snow

water equivalent observation using GNSS refractometry and RT-KLIB[J]. *Sensors*,2022,22( 18 ):6918.

[ 84 ] 于小淇. 高亚洲地区积雪面积产品去云方法研究及精度验证 [ D ]. 阜新:辽宁工程技术大学,2017.

Yu X Q. Cloud removing method and accuracy verification of snow extent product in high Asia area [ D ]. Fuxin:Liaoning Technical University,2017.

[ 85 ] 段金亮. 基于混合像元分解的川西高原地区积雪覆盖度反演模型 [ D ]. 成都:西南交通大学,2021.

Duan J L. Inversion model of snow coverage in western Sichuan Plateau based on mixed pixel decomposition [ D ]. Chengdu:South-west Jiaotong University,2021.

[ 86 ] Ramsay B H. The interactive multisensor snow and ice mapping system [ J ]. *Hydrological Processes*, 1998, 12 ( 10/11 ): 1537 – 1546.

[ 87 ] Helfrich S R,McNamara D,Ramsay B H,et al. Enhancements to, and forthcoming developments in the Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System ( IMS ) [ J ]. *Hydrological Processes*, 2007,21( 12 ):1576–1586.

[ 88 ] 张 帅. 基于 CLDAS 的遥感积雪产品同化研究与应用 [ D ]. 南京:南京信息工程大学,2019.

Zhang S. Research of remote sensing snow product assimilation based on CLDAS and its application [ D ]. Nanjing:Nanjing University of Information Science & Technology,2019.

[ 89 ] 黄晓东,郝晓华,王 玮,等. MODIS 逐日积雪产品去云算法研究 [ J ]. *冰川冻土*,2012,34( 5 ):1118–1126.

Huang X D,Hao X H,Wang W,et al. Algorithms for cloud removal in MODIS daily snow products [ J ]. *Journal of Glaciology and Geocryology*,2012,34( 5 ):1118–1126.

[ 90 ] 邱玉宝,郭华东,陈 多,等. 青藏高原 MODIS 逐日无云积雪面积数据集 ( 2002—2015 年 ) [ J ]. *中国科学数据*,2016,1( 1 ):7–17.

Qiu Y B,Guo H D,Chu D,et al. MODIS daily cloud-free snow cover products over Tibetan Plateau ( 2002—2015 ) [ J ]. *China Scientific Data*,2016,1( 1 ):7–17.

[ 91 ] Parajka J,Blöschl G. Validation of MODIS snow cover images over Austria [ J ]. *Hydrology and Earth System Sciences*,2006,10( 5 ): 679–689.

[ 92 ] 邹逸凡,孙 鹏,张 强,等. 2001—2019 年横断山区积雪时空变化及其影响因素分析 [ J ]. *冰川冻土*,2021,43( 6 ):1641–1658.

Zou Y F,Sun P,Zhang Q,et al. Analysis on spatial-temporal variation of snow cover and its influencing factors in the Hengduan Mountains from 2001 to 2019 [ J ]. *Journal of Glaciology and Geocryology*,2021,43( 6 ):1641–1658.

[ 93 ] 陈思勇. MODIS 积雪产品去云算法研究及应用 [ D ]. 兰州:兰州大学,2021.

Chen S Y. Research and application of cloud removal algorithm for MODIS snow products [ D ]. Lanzhou:Lanzhou University,2021.

[ 94 ] 周 婵. 青藏高原地表反照率与积雪遥感产品的分析与应用研究 [ D ]. 南京:南京信息工程大学,2016.

Zhou C. Analysis and application of remote sensing products of surface albedo and snow cover in Qinghai-Tibet Plateau [ D ]. Nanjing:Nanjing University of Information Science & Technology, 2016.

[ 95 ] 谢佩瑶,韩 超,欧阳志棋,等. 青藏高原不同土地覆盖类型下积雪面积判别算法优化 [ J ]. *冰川冻土*,2023,45( 3 ):1168–1179.

Xie P Y,Han C,Ouyang Z Q,et al. Optimization of snow area discrimination algorithm under different land cover types in Qinghai-Tibet Plateau [ J ]. *Journal of Glaciology and Geocryology*,2023,45( 3 ):1168–1179.

[ 96 ] Metsämäki S,Pulliainen J,Salminen M,et al. Introduction to Glob-Snow Snow Extent products with considerations for accuracy assessment [ J ]. *Remote Sensing of Environment*,2015,156:96–108.

[ 97 ] 梁顺林,李小文,王锦地,等. 定量遥感:理念与算法 [ M ]. 2 版. 北京:科学出版社,2019.

Liang S L,Li X W,Wang J D. Quantitative remote sensing:Ideas and algorithms [ M ]. 2nd ed. Beijing:Science Press,2019.

[ 98 ] 赵文宇. 基于被动微波遥感和 MODIS 产品的天山雪水当量降尺度研究 [ D ]. 石河子:石河子大学,2016.

Zhao W Y. Downscaling of snow water equivalent in Tianshan Mountains based on passive microwave remote sensing and MODIS products [ D ]. Shihezi:Shihezi University,2016.

[ 99 ] 邱玉宝,卢洁羽,石利娟,等. 高亚洲地区被动微波遥感雪水当量数据集 [ J ]. *中国科学数据*,2019,4( 1 ):110–125.

Qiu Y B,Lu J Y,Shi L J,et al. Passive microwave remote sensing data of snow water equivalent in High Asia [ J ]. *China Scientific Data*,2019,4( 1 ):110–125.

[ 100 ] 刘晓敬. 被动微波遥感雪深反演混合像元问题研究 [ J ]. *测绘学报*,2022,51( 2 ):313.

Liu X J. Study on the mixed pixel effect on passive microwave snow depth retrieval [ J ]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*,2022,51( 2 ):313.

Advances in research and application of remote sensing-based snow monitoring products

SUN Xiyong<sup>1,2</sup>, LIU Jiafeng<sup>1</sup>, FAN Jinghui<sup>1</sup>,ZHANG Wenkai<sup>1</sup>,SHI Lijuan<sup>3</sup>, QIU Yubao<sup>3</sup>,ZHU Farong<sup>4</sup>  
( 1. China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Natural Resources,Beijing 100083,China; 2. School of Geography and Information Engineering,China University of Geoscience(Wuhan),Wuhan 430074, China; 3. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094,China; 4. School of Land Science and Technology,China University of Geoscience(Beijing),Beijing 100083, China)

**Abstract:** Snow proves to be both an important factor in characterizing the surface cryosphere and a critical parameter for weather and hydrological phenomena. Employing remote sensing to conduct long-term and large-



scale monitoring of snow morphologies and their changes plays a vital role in research into global climate change, investigations into hydrology and water resources, and geological disaster prevention. After decades of development, significant progress has been made in the field of remote sensing-based snow monitoring technology both in China and abroad. Accordingly, the products for remote sensing-based snow monitoring have become increasingly abundant, and the snow-orientated inversion algorithms have been continuously improved. This paper provides a summary of the existing, widely applied products after categorizing them into three types: snow-cover extent (SEC), snow coverage, and snow depth/snow water equivalent (SWE) products. Furthermore, this study organizes the commercialized remote sensing inversion algorithms used in existing, typical SEC and SWE products. The review of advances in the relevant scientific research reveals that, with the constant presence of sensors with high temporal and spatial resolutions in China and abroad and the support of both novel optical and microwave data sources and new technologies, researchers have gradually improved the accuracy of snow-orientated inversion algorithms by optimizing these algorithms based on regional characteristics. This will provide more support for continuously improving remote sensing-based snow monitoring products in the future.

**Keywords:** remote sensing-based snow monitoring product; snow cover; SWE; snow-orientated inversion algorithm

(责任编辑: 张 仙)