

被动微波遥感反演雪深与气象站观测雪深时空对比

王静^{1,2}, 车涛¹, 戴礼云¹, 岳珊娜^{1,2}, 郑照军³

1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 甘肃省遥感重点实验室 中国科学院黑河遥感试验研究站, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

摘要: 雪深是积雪重要的物理属性之一, 准确的获取雪深对积雪水文与水资源、气候变化、雪灾等研究至关重要。目前, 广泛用于长时间序列雪深研究的是气象站观测雪深数据和被动微波遥感(如SMMR、SSM/I和SSMIS)反演雪深数据。本文对这两种数据的雪深最大值和平均值在中国地区的空间分布、年际变化进行对比, 分析两种数据的分布特征。结果表明: 空间上, 站点观测雪深与站点对应遥感像元雪深在东北地区相关性最好, 新疆地区次之, 青藏高原地区相关性较差。两种雪深在稳定积雪区分布较为一致, 在大于40 cm的深雪区和雪深小于5 cm的南方地区站点观测雪深的最大值明显高于遥感反演雪深的最大值。时间上, 相比于1980年—2019年这一时间段, 1989年—2019年站点雪深与遥感雪深在各典型积雪区的相关性明显提高。进而对比近30 a中国地区两种雪深的变化, 结果显示两种数据在青藏高原东南部雪深有一致的显著($p < 0.05$)减少趋势, 在东北平原地区雪深有一致的显著($p < 0.05$)增加趋势。分布在青藏高原地区的气象站大多选址在海拔较低的地方, 不能很好的反映对应微波遥感像元中高海拔地区及山区内雪深的平均分布和变化情况, 而被动微波遥感雪深反演受积雪特性变化的影响, 对短时间内雪深变化较大的极端降雪事件不敏感。

关键词: 雪深, 气象站点, 被动微波遥感, 典型积雪区, 对比分析

中图分类号: P2

引用格式: 王静, 车涛, 戴礼云, 岳珊娜, 郑照军. 2023. 被动微波遥感反演雪深与气象站观测雪深时空对比. 遥感学报, 27(9): 2060–2071

Wang J, Che T, Dai L Y, Yue S N and Zheng Z J. 2023. Spatio-temporal comparison of snow depth between passive microwave remote sensing inversion data and meteorological station observation data. National Remote Sensing Bulletin, 27(9): 2060–2071 [DOI:10.11834/jrs.20221653]

1 引言

积雪是冰冻圈的重要组成部分, 对气候、水资源和环境的影响不可忽视 (Brown 和 Goodison, 1996; Mankin 等, 2015; 张廷军和钟歆玥, 2014)。雪深是积雪研究中的重要参数, 其不仅能反映积雪范围, 还能反映积雪质量 (Kuraš 等, 2008; Wang 等, 2014; Chang 等, 1976)。现阶段, 地面站点雪深观测资料和被动微波遥感反演雪深产品被广泛应用于中国地区的积雪研究。

站点雪深观测相较于其他雪深监测方法而言, 测量精度较高, 可信度强。许多学者利用站点雪

深观测数据对中国及主要积雪区雪深、雪密度、雪水当量等相关参数的空间分布现状和变化规律进行研究。李培基和米德生 (1983), 李培基 (1987, 1990) 利用气象站点雪深数据对中国1980年之前的积雪分布、积雪水资源变化进行研究, 发现中国积雪空间不均, 面积大但深度较小, 而且雪深年际变化显著, 季节性明显。戴礼云和车涛 (2010) 利用气象站观测雪深和雪压参数计算积雪密度, 对1999年—2008年中国地区雪密度的时空分布和影响特征进行研究, 发现雪深是西北和东北地区雪密度的主要贡献因子, 稳定积雪区雪密度变化相对平稳, 但最大雪密度却发生在1月份江

收稿日期: 2021-10-22; 预印本: 2022-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42125604); 科技部国家科技基础资源调查专项(编号:2017FY100500); 中国科学院“西部之光”人才培养引进计划

第一作者简介: 王静, 研究方向为积雪遥感。E-mail: wangjing2020@nieer.ac.cn

通信作者简介: 车涛, 研究方向为冰冻圈遥感。E-mail: chetao@lzb.ac.cn

南地区的湖南和江西的交界处。马丽娟和秦大河(2012)利用1957年—2009年气象站观测雪深数据分析中国的积雪变化,发现中国及各区域年平均雪深和雪水当量均表现为不显著的波动增加趋势。但气象台站又具有分布不均匀、空间不连续、山区站点稀少、甚至高海拔地区台站缺失等缺点,难以实现对积雪空间连续的动态监测(Kunkel等,2007)。此外,站点分布的空间代表性也会影响研究结果(Yang和Woo,1999;Chang等,2005;Trujillo等,2009)。

随着遥感技术的发展,被动微波遥感因其具有长时序,高时间分辨率和覆盖范围广等特点,逐渐发展成为主要的雪深监测手段,实现了对积雪大范围、宏观、快速、多尺度、多时相和周期性的监测(Hall等,2002;Matzler等,1982;吴杨等,2007),弥补了站点观测的不足。车涛等(2005)和Che等(2008)利用被动微波反演雪深数据对中国地区不同时间段内积雪和积雪水资源的分布及变化进行研究,发现1993年—2002年雪深存在年际波动,并没有明显的增加或减小趋势,但1987年—2006年中国积雪年际变化显著,西北地区 and 青藏高原地区雪量显著增加,东北地区雪量略有减少。戴声佩等(2010)利用被动微波反演雪深数据研究发现:1978年—2005年,中国积雪深度和积雪日数具有增加趋势,于1980s青藏高原地区增加和减少趋势并存,1990s整体增加,2000年—2005年基本不变。乔德京等(2018)等利用被动微波遥感反演雪深对1980年—2009年青藏高原积雪物候变化进行研究,得到20世纪80年代青藏高原地区雪深呈递减趋势的结论。随后,田柳茜等(2014)利用被动微波用反演雪深数据对青藏高原地区的雪深变化进行了研究,发现1988年前后青藏高原积雪分布显著不同,1979年—2007年青藏高原积雪日数、积雪深度和海拔三者之间在空间上具有显著的正相关。被动微波遥感雪深产品现以广泛应用于区域和全国尺度的雪深研究,但被动微波遥感原始亮温数据以及各类雪深产品在获取过程中易受原始遥感图像空间精度、传感器工作状态、大气特性、参数反演方法等多个因素的影响,导致雪深反演过程中仍具有不确定性。

正确认识积雪的时空变化特征对水文水资源、积雪灾害预警等具有重要的意义,但不论是台站观测雪深还是被动微波遥感反演雪深,得出中国

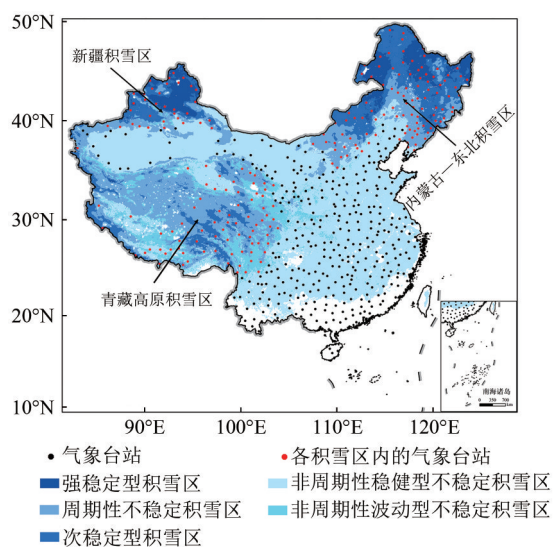
地区积雪时空变化情况是不完全一致的,而且研究时段不同、研究区、研究方法的不同均会导致各结论间不具有可比性。而对不同来源的雪深数据进行对比和评估,对其不确定性进行分析是一项非常重要的工作,是正确选择和高效使用雪深数据的前提。因此本文利用被动微波遥感反演雪深与地面观测逐日雪深对整个中国地区用统一的方式进行对比,明确1979年—2019年中国及各积雪区站点雪深、被动微波遥感反演雪深的变化和分布特征,详细分析不同雪深产品在主要积雪区的雪深变化差异,评价其一致性并探讨其优缺点,为利用这两种雪深数据集对中国地区长时间积雪变化的研究提供参考和依据。

2 数据及方法

2.1 数据来源

本文所用的站点雪深数据来自“中国地面气候积雪日值数据集”,该数据集包括全国2000多个气象观测站的地面积雪逐日观测资料。由于各气象站建站时间或开始有积雪观测要素时间的不同,导致不同站点观测起始时间有所不同。为了保证雪深记录的时间连续性,本研究挑选1979年9月1日至2019年8月31日内平均每个月雪深缺测不超过4天的606个站点进行分析,所得站点的空间分布如图1所示。分析时,定义从前一年的9月1日至当年的8月31日为一个完整的积雪年,即1980年积雪变化是指1979年9月1日至1980年8月31日内积雪的变化情况。

本文所用到的被动微波遥感反演雪深数据是“中国雪深长时间序列数据集(1979年—2020年)”,该雪深产品是车涛和李新(2005),李新和车涛(2007)在Chang算法(Chang等,1987)的基础上针对中国地区进行修正,利用交叉定标后具有时间一致性(Dai等,2015)的SMMR(1978年—1987年)、SSM/I(1987年—2007年)和SSMIS(2008年—2020年)逐日被动微波亮温数据反演得到,其空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。目前,该雪深产品可在国家青藏高原科学数据中心(<http://www.tpdc.ac.cn/>[2021-10-22])申请下载,用于生产雪深数据的原始被动微波亮度温度数据可以在美国国家雪冰数据中心(National Snow and Ice Data Center, <https://nsidc.org/>[2021-10-22])下载。



(审图号:GS(2022)2242号)

图1 气象站分布及典型积雪区

Fig. 1 Map showing the meteorological station and the typical snow cover areas

2.2 研究方法

本文提取站点和遥感数据的年最大雪深和年平均雪深进行逐年对比,采用线性趋势分析法对1980年—2019年两种数据的变化趋势进行分析,并利用F检验(F-test)确定近40年来两种数据变化趋势的显著性。线性方程的构建如下:

$$y_i = ax_i + b \quad (1)$$

式中, x_i 表示第 i 年, y_i 表示第 i 年的雪深(年最大雪深或年平均雪深), a 是斜率,表示雪深随时间的平均变化率和变化趋势,(若 $a > 0$ 表示近40年雪深趋势增加,若 $a < 0$ 表示雪深趋势减少,若 $a = 0$ 表示雪深没有变化)。 b 是回归直线的截距,表示研究时段内第一个积雪年即1980年的期望雪深值。文中对线性回归直线的斜率 a 进行 $p < 0.05$ 的F检验,本研究的研究期为40年,当F-test值大于4.098时,表示近40年内雪深具有显著的变化趋势。

求取两种数据的年最大雪深时,是在一个积雪年中直接统计12个月内的最大雪深值;年平均雪深值的计算,是在一个积雪年中先计算12个月逐月雪深平均值,再利用逐月雪深平均值求得年平均雪深值。

本文采用皮尔逊相关系数 r (Pearson's r) 和均方根误差 RMSE (Root Mean Square Error) 两种指标对不同时间段内站点雪深与被动微波遥感反演雪深的一致性进行评价。其计算公式分别如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (SD_O^i - \overline{SD_O})(SD_R^i - \overline{SD_R})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (SD_O^i - \overline{SD_O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (SD_R^i - \overline{SD_R})^2}} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (SD_O^i - SD_R^i)^2}{n}} \quad (3)$$

式中, $n=40$, 表示研究时段, SD (Snow Depth) 表示雪深, O (Observation data) 表示气象站观测雪深数据, R (remote sensing data) 表示被动微波遥感反演的雪深数据; SD_O^i 、 SD_R^i 分别表示第 i 年台站观测与遥感反演的年最大或年平均雪深值; $\overline{SD_O}$ 、 $\overline{SD_R}$ 分别表示1980年—2019年台站观测与遥感反演年最大或年平均雪深均值。

3 结果与分析

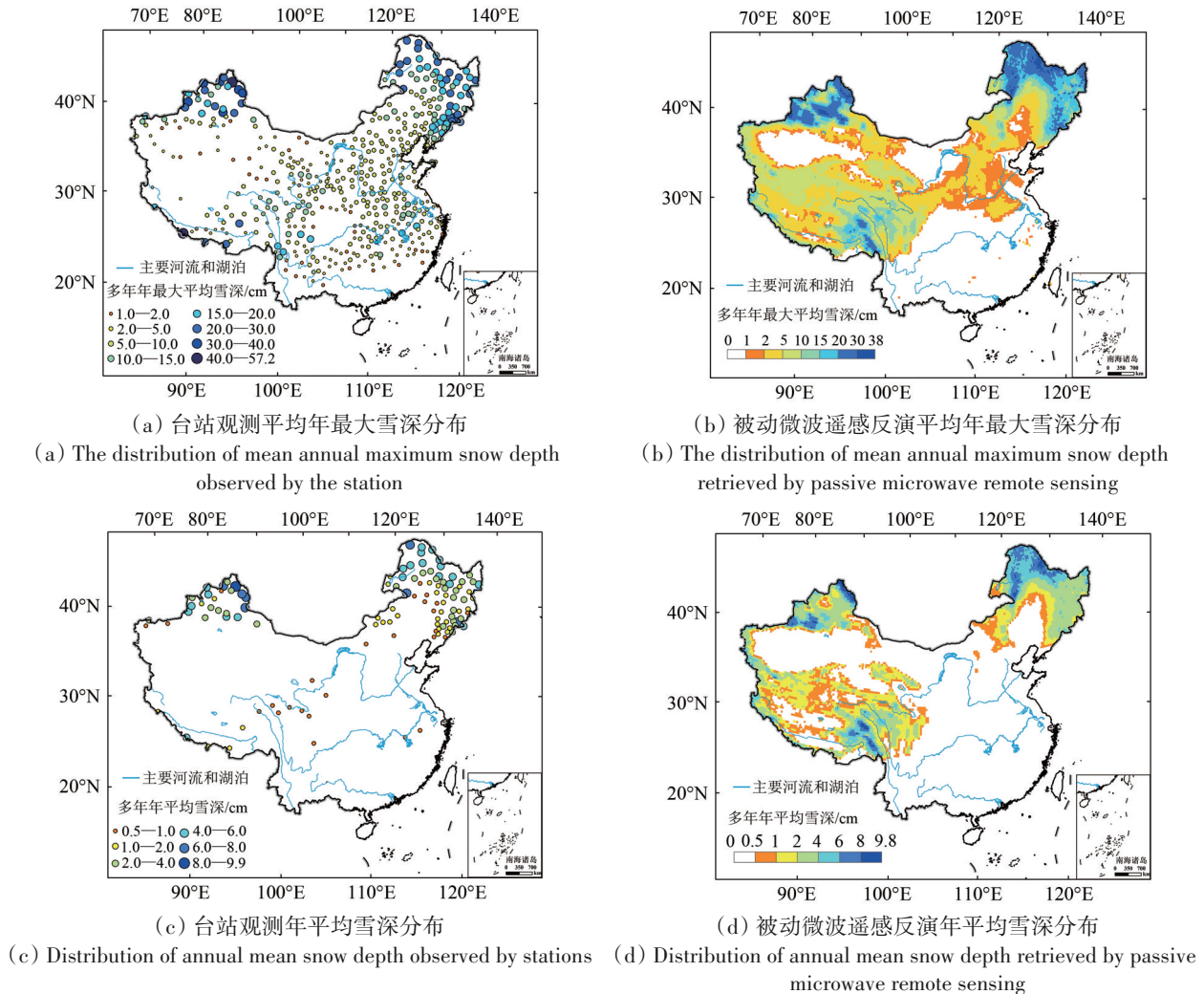
3.1 雪深空间分布对比分析

站点和遥感数据反映出中国的积雪主要分布在东北、西北和青藏高原地区,雪深的空间分布基本一致,但不同资料对中国地区雪深值的大小反映有所不同。对比年最大雪深的平均分布(图2(a)和图2(b)(审图号:GS(2022)2242号)),结果显示中国南方地区两者的分布差异较大,站点观测的平均年最大雪深值介于1—5 cm,但遥感数据显示出中国南方地区基本没有积雪。此外,遥感数据显示出中国新疆北部阿尔泰山和准噶尔盆地南部边缘地区、大兴安岭和小兴安岭部分地区雪深较大,平均年内最大雪深可达38 cm,而站点数据观测到新疆阿勒泰站和西藏聂拉木地区雪深较大,平均年最大雪深介于40—57.2 cm。对比雪深平均值分布(图2(c)和图2(d)),两种资料表现出新疆北部和内蒙古—东北地区积雪分布较为一致,青藏高原地区差异很大。数值上,站点数据的多年平均雪深值介于0—9.9 cm,遥感数据多年平均值介于0—9.8 cm,即针对整个中国地区,站点和遥感数据反映出中国的积雪一样多。

根据Li等(2022)对中国地区积雪稳定性类型的划分结果(积雪类型划分数据可在国家冰川冻土沙漠科学数据中心 <http://www.ncdc.ac.cn/> [2021-10-22]申请下载),选择内蒙古—东北地区、新疆北部和青藏高原3个区域作为典型积雪区对两种雪深数据进行比较(图1)。考虑到气象站分布不均的因素,为了更详细的对比站点雪深与遥感雪深之间的

关系，本文提取1980年—2019年各站点观测与之一对应遥感像元的逐日雪深进行对比分析，其中，

内蒙古—东北积雪区内可用于对比分析的站点为109个，新疆积雪区34个，青藏高原积雪区80个。



审图号:GS(2022)2242号

图2 1980年—2019年中国雪深分布特征

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of snow depth in China from 1980 to 2019

无论是年最大雪深还是年平均雪深，站点观测和遥感反演的结果均显示为新疆北部的积雪最深，其次是东北地区，青藏高原雪深最小。比较发现，典型积雪区最大积雪深度台站观测值要略大于遥感反演值。对比年平均雪深的大小，发现新疆积雪区台站观测值大于遥感反演值，青藏高原积雪区遥感反演雪深平均值与站点观测雪深值平均值差异最大，而内蒙古—东北积雪区遥感反演雪深站点观测雪深平均值基本相等。从各积雪区年平均最大积雪深度和年平均积雪深度的标准差变化来看，新疆北部地区台站观测的积雪深度比遥感观测的积雪深度年际变化大，青藏高原表现为遥感观测雪深年际变化大于站点观测，而在内蒙古—东北

地区二者的年际变化基本一致（图3）。

典型积雪区各站点与之一对应遥感像元雪深相关性结果显示（图4），内蒙古—东北地区两种雪深较为一致，回归方程的斜率大约为1。新疆积雪区两种数据雪深的相关性也较好，但当站点观测平均年最大雪深超过30 cm时，所有站点对应遥感像元雪深值均小于其相应站点的雪深值。青藏高原积雪区站点雪深跟遥感雪深相关性较差，由年最大雪深的散点分布可以看出，高原地区年大部分站点与对应遥感像元的年最大雪深分布较为一致，散点分布在1:1线的两侧；而从年平均雪深的散点分布中可以看出，散点分布偏向纵轴，即年平均雪深站点明显小于遥感像元。综合以上对

比分析, 3个典型区站点观测与之对应遥感反演雪深之间, 内蒙古—东北地区相关性最强, 新疆地区次之, 青藏高原地区较差。

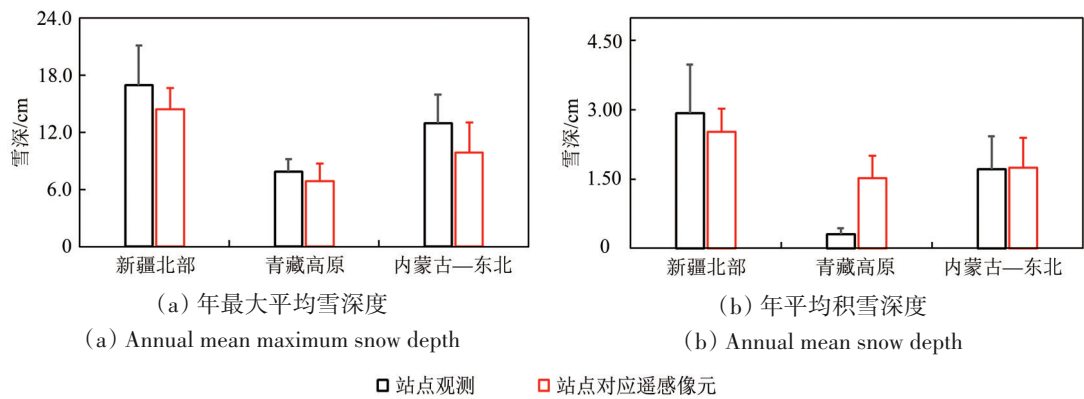


图3 典型积雪区雪深的平均值和标准差(箱体高度表示平均值,端线长度表示标准差)

Fig. 3 Mean and standard deviation of snow depth in typical snow cover areas (The box height represents the mean value and the whisker length represents the standard deviation)

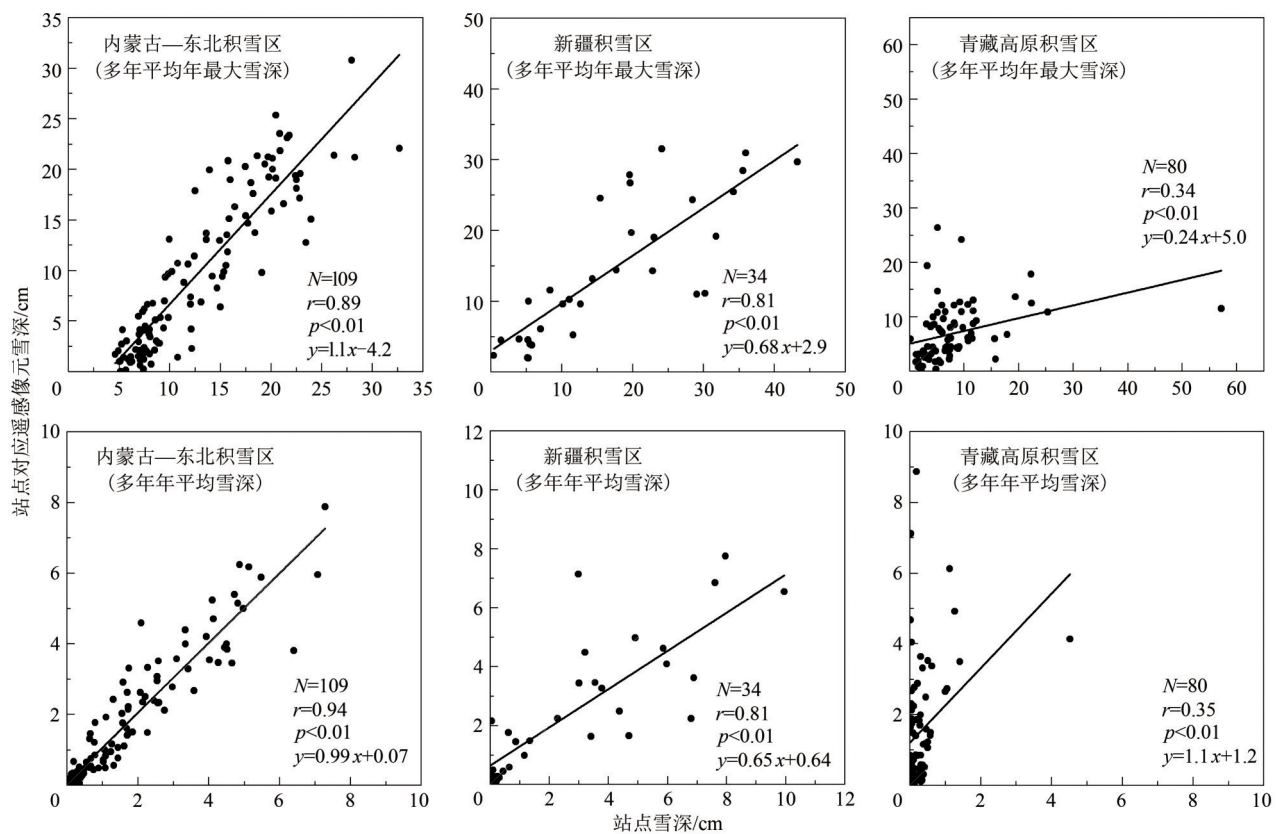


图4 1980年—2019年典型积雪区站点雪深与站点对应遥感像元雪深的相关散点图

Fig. 4 The correlation scatter diagram of snow depth from meteorological observation and corresponding remote sensing pixel in typical snow areas

3.2 雪深年际变化对比分析

对比中国地区站点与遥感数据年最大、年平均雪深的年际变化趋势, 结果显示近40年中国地区两种数据的雪深年际变化趋势存在差异, 主要表现为站点观测有雪深增加的趋势, 而遥感反演雪深有减少的趋势。最大雪深站点观测雪深于各

年均大于遥感反演雪深, 并且两者之间的雪深偏差逐年增大; 而年平均雪深却表现为遥感反演大于站点观测, 两者之间的偏差逐年减小。

对比各积雪区站点雪深和遥感雪深, 结果显示在内蒙古—东北积雪区和新疆积雪区过去40年内变化趋势相反, 均是站点雪深呈现增加趋势, 遥

感雪深呈现减少趋势，并且站点观测雪深的年际变化大于遥感反演雪深的年际变化。青藏高原积雪区近40年间遥感反演得到的年平均雪深值于各积雪年内明显高于站点观测年平均雪深值，两者偏差较大，这可能与该地区海拔较高，空间异质

性强有关，因为气象站点大多位于遥感像元中海拔比较低的地方，大部分时间站点无雪，而周围山区有雪，所以导致遥感雪深年平均值明显大于站点观测雪深年平均值。

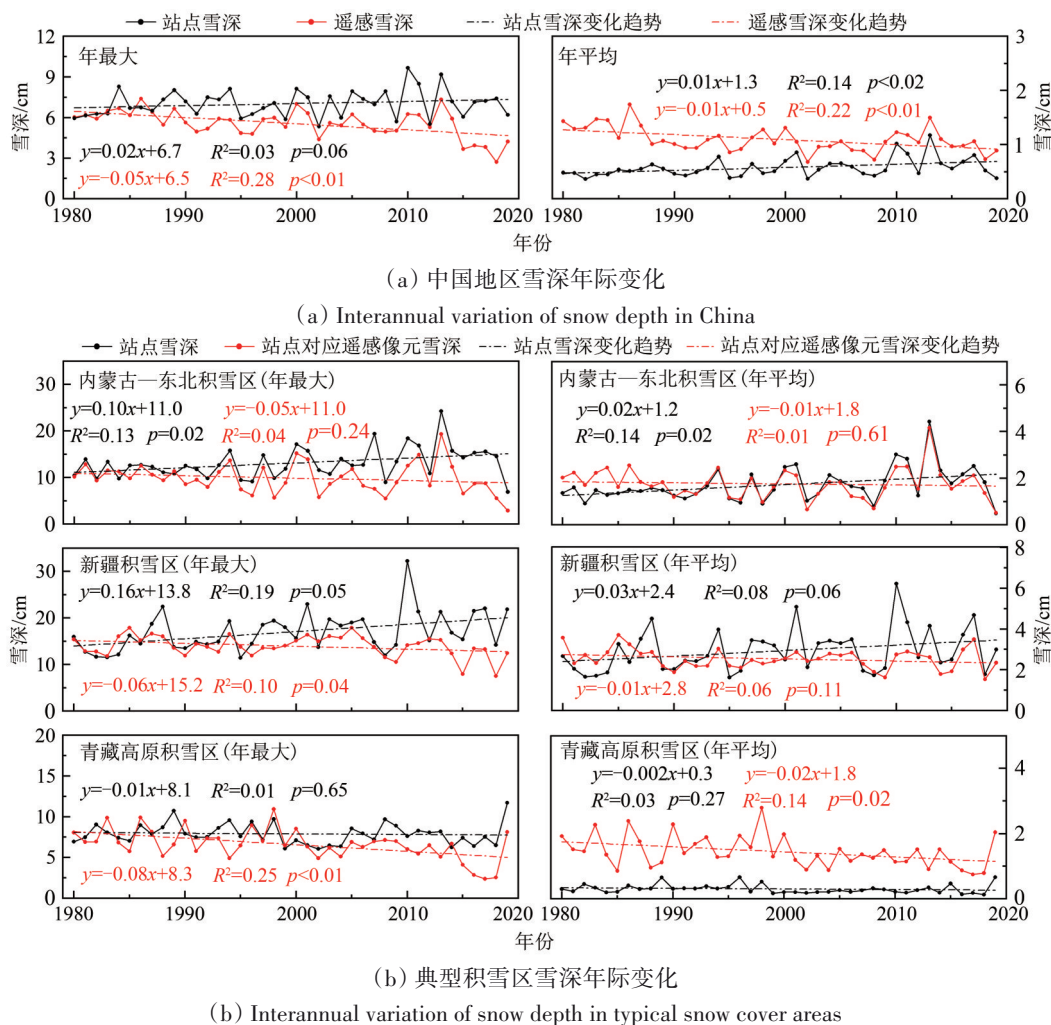


图5 1980年—2019年中国及典型积雪区年最大积雪深度、年平均积雪深度的年际变化

Fig. 5 Interannual variation of annual maximum snow depth and annual mean snow depth in China and typical snow cover areas from 1980 to 2019

各典型积雪区雪深年际变化趋势的对比结果显示，内蒙古—东北地区站点与对应遥感像元年平均雪深的年际波动趋势于1989年之后基本一致，1980年—1989年这一时间段内两者的差异相对较大。针对该现象，文中分别计算了1980年—2019年、1989年—2019年这两个时间段内各典型积雪区站点观测与对应遥感像元年雪深的相关性(r)和均方根误差(RMSE)(表1)。对比结果显示，1988年之后各典型积雪区两种数据平均雪深的相关性明显提高，新疆积雪区两种雪深的偏差没有明显变化，但内蒙古—东北积雪区和青藏

高原积雪区站点雪深与遥感像元雪深平均值之间的偏差均有不同程度的减小。分析发现，早期(1978年10月26—1987年8月20)SMMR传感器在中低纬度的扫描带宽较窄，导致该传感器在中纬度地区有大面积的亮度温度缺失，而且该传感器每两天采集一次亮温值，时间分辨率较低。在利用该传感器的被动亮温数据反演雪深数据时，Dai等(2015)通过不同传感器的交差定标，已经提高了SMMR亮温数据与SMMI亮温数据在时间上的一致性，但是利用SMMR传感器提供的亮温数据反演的雪深产品还是存在问题。

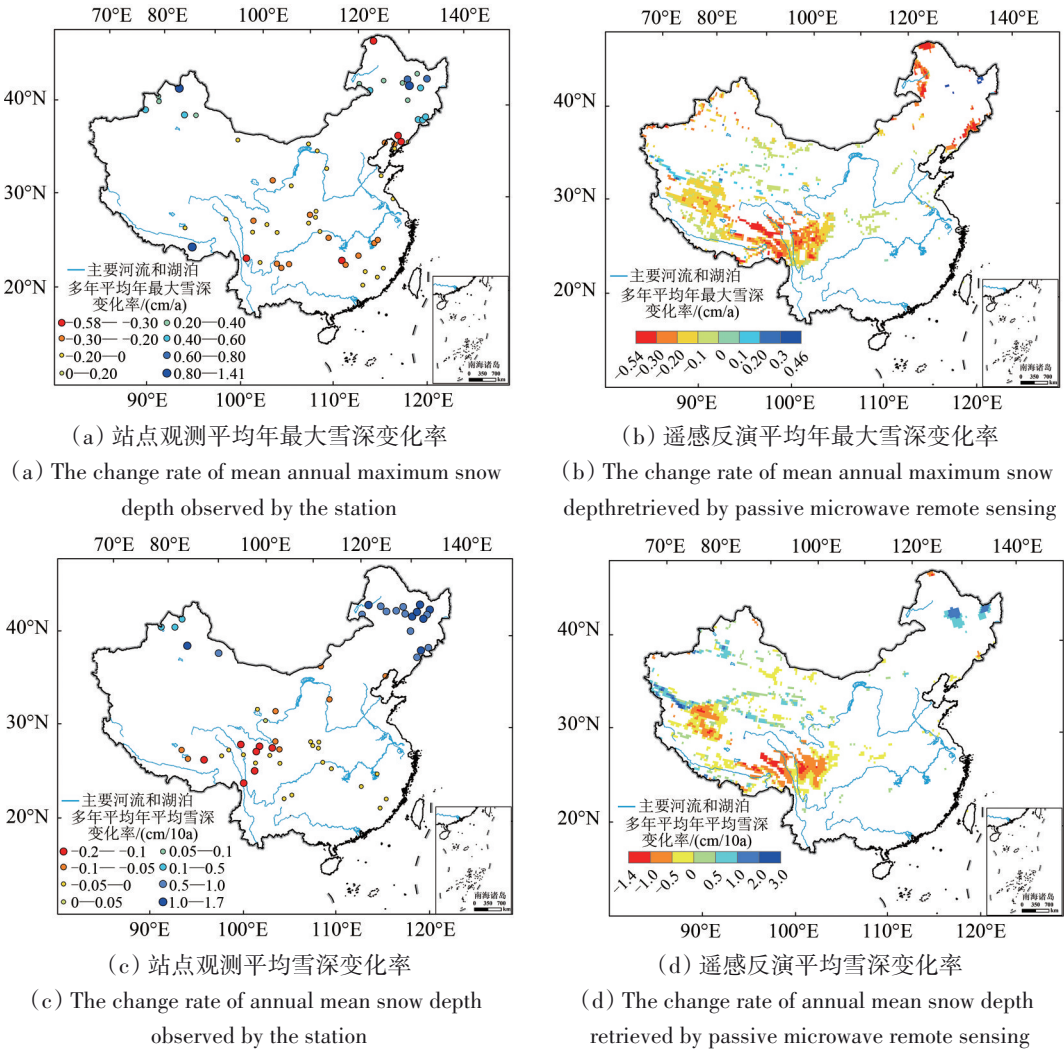
表1 中国典型积雪区不同时间段内站点观测与站点对应遥感像元最大(max)、平均(mean)积雪深度的均方根误差(RMSE)和相关性(r)

Table 1 The maximum and mean snow depth of meteorological observations and corresponding remote sensing pixels in different time periods in China's typical snow cover areas Root Mean Square Error (RMSE) and Correlation (r)

典型积雪区	最大积雪深度(max)				平均积雪深度(mean)			
	1980年—2019年		1989年—2019年		1980年—2019年		1989年—2019年	
	RMSE	r	RMSE	r	RMSE	r	RMSE	r
内蒙古—东北积雪区	4.12	0.67	4.61	0.74	0.42	0.78	0.28	0.94
新疆积雪区	5.06	0.32	5.57	0.35	0.98	0.52	1	0.78
青藏高原积雪区	2.21	0.39	2.35	0.44	1.22	0.46	1.17	0.49

根据以上分析的结果，对比中国地区站点观测雪深和遥感反演雪深1990年—2019年间年最大雪深、年平均雪深的变化率，并进行 $p<0.05$ 的显著性检验。结果显示近30年两种数据在东北平原地区有一致的雪深显著($p<0.05$)增加的变化趋势，在青藏高原西部、东南部雪深具有一致的显著($p<0.05$)减少的变化趋势（图6）。但两种雪

深变化率值域差异较大，具体表现为最大雪深变化率站点观测明显大于遥感反演，平均雪深变化率遥感反演明显大于站点观测。遥感反演雪深结果显示在天山山脉、昆仑山脉、祁连山脉均有雪深显著增加的趋势，而站点雪深却没有相同的结果，这可能与高海拔地区站点数据的缺失有关。



审图号:GS(2022)2242号

图6 1990年—2019年中国雪深显著变化($P<0.05$)分布特征

Fig. 6 Spatial distribution characteristics of snow depth in China during 1990—2019 were significantly changed ($P<0.05$)

4 讨 论

本研究发发现新疆积雪区站点雪深和被动微波遥感雪深年际变化差异较大，并且差异较大的年份均表现为站点雪深明显大于遥感雪深，尤其在1988年、2001年、2010年、2011年和2013年站点观测与之对应遥感像元雪深差异较其他年份更大。但对比内蒙古—东北积雪区的年平均积雪变化，

发现在1988年之后站点与遥感雪深变化趋势一致性较好。为了进一步探讨相应年份站点雪深与之对应遥感雪深差异过大的可能原因，以新疆积雪区12个站点的雪深变化为例（图7，站点信息如表2所示），对2007年—2012年共5个积雪年内不同积雪类型站点与之对应遥感像元的逐日雪深变化趋势进行对比。

表2 新疆积雪区不同积雪类型站点信息

Table 2 The information of meteorological observations on snow area in Xinjiang

类别	站点信息
稳定积雪	阿勒泰站(51076,(47.733°N,88.083°E))、富蕴站(51087,(46.983°N,89.517°E))、青河站(51186,(46.667°N,90.383°E))、奇台站(51379,(44.017°N,89.567°E))、邵苏站(51437,(43.15°N,81.133°E))、巴音布鲁克站(51542,(43.033°N,84.15°E))
不稳定积雪	阿拉山口站(51232,(45.183°N,82.567°E))、克拉玛依站(51243,(46.667°N,90.383°E))、精河站(51334,(44.6°N,82.9°E))
瞬时积雪	阿克苏站(51628,(41.167°N,80.233°E))、轮台站(51642,(41.783°N,84.25°E))、库车站(51644,(41.717°N,82.967°E))

对比发现，被动微波遥感不能很好地反映短时间内积雪厚度快速变化的雪深信息。如图7所示阿勒泰站（51076）、富蕴站（51087）和青河站（51186）这3个站点均在2010积雪年达到雪深最大值，分别为94 cm、88 cm和95 cm。《中国气象灾害年鉴》（2009，2011）中统计到，近些年中2008年和2010年为雪灾偏重年份，有研究（张淑萍和祝从文，2011）也发现2009年12月—2010年2月新疆北部地区共出现7次持续性强降雪时段，其中4次出现了大暴雪天气过程。而被动微波遥感反演得到的雪深在2008年—2012年间年际波动较小，2010年积雪年阿勒泰站（51076）、富蕴站（51087）和青河站（51186）站点对应遥感像元位置反演最大雪深值分别为34 cm、38 cm和30 cm，并没有反映出这些强降雪事件。已有研究（车涛，2006）表明当雪深超过50 cm后，积雪辐射增加，Ka波段被动微波信号出现饱和，体散射信号减弱，导致雪深低估。而针对中国地区，被动微波没有反映出如2010年北疆地区短时间内雪深大于40 cm的极端降雪事件。雪深较浅时，两种数据的雪深差异也较大，因为浅雪会在短时间内快速融化，站点观测有雪，但卫星过境时遥感像元无雪，所以两者雪深观测的时间差会导致他们之间的差异。也可能是浅雪部分融化导致雪层中液态水含量加多，而被动微波遥感无法反演湿雪的雪层厚度，最终表现为站点雪深与被动微波反演雪深之间的差异较大。

对比图1和图6，发现青藏高原西部和西南部近30 a遥感雪深显著减少的区域基本没有长时间序列的台站雪深观测数据。以青藏高原积雪变化的相关研究为例，田柳茜等（2014）和马丽娟等（2010）对影响青藏高原积雪日数变化原因得出了不一致的结论，除了研究方法的不同会影响研究结果外，高海拔地区站点数据的缺失可能也是导致两者结果具有差异的主要影响因素。因为遥感能监测到各个海拔高度的积雪变化，所以田柳茜等利用被动微波遥感反演雪深数据得到的是整个青藏高原积雪日数的变化与海拔在空间上具有显著的正相关；而马丽娟等（2010）用于研究青藏高原积雪日数变化的92个站点集中分布在高原的东部和东南部，最高海拔不超过5000 m（目前分布在青藏高原地区的安多站是中国地区海拔最高（4801 m）、雪深观测数据较全的地面观测站点），研究得到青藏高原积雪日数的变化与气温变化有显著的相关关系，对海拔变化依赖性不大。

研究中对各典型积雪区内站点所在遥感像元雪深与站点观测雪深进行对比，结果显示中国东北地区站点与之对应遥感像元相关性最强，新疆地区次之，青藏高原较差。根据气象站选址要求，观测场必须设在四周空旷平坦且避免有高大建筑物的地方，所以证明文中所选站点能够较好的代表东北和新疆地区相应像元内雪深变化的平均状态，而分布在青藏高原的站点则不能很好地代表相应像元的平均雪深变化，这可能与该地区空间

异质性强，站点代表性差等因素有关（李新，2013；徐保东等，2015；谭秋阳等，2021）。青藏高原地区地形复杂多变，高海拔地区气温低有利于积雪的形成和维持，低海拔地区气温偏高不利于积雪的维持，坡度坡向也会导致同一海拔高度雪深的差异较大，因此积雪多呈斑块状分布（除多等，2017）；被动微波遥感分辨率较低，传

感器获取的是整个像元内总的亮温值，其产品代表一定空间范围内雪深的整体分布状态。因为高原上的站点大多都选择在海拔较低的地方，空间代表范围有限，大部分时间站点观测无雪而周围山区有雪，所以遥感反演雪深平均值明显高于站点观测的雪深平均值。

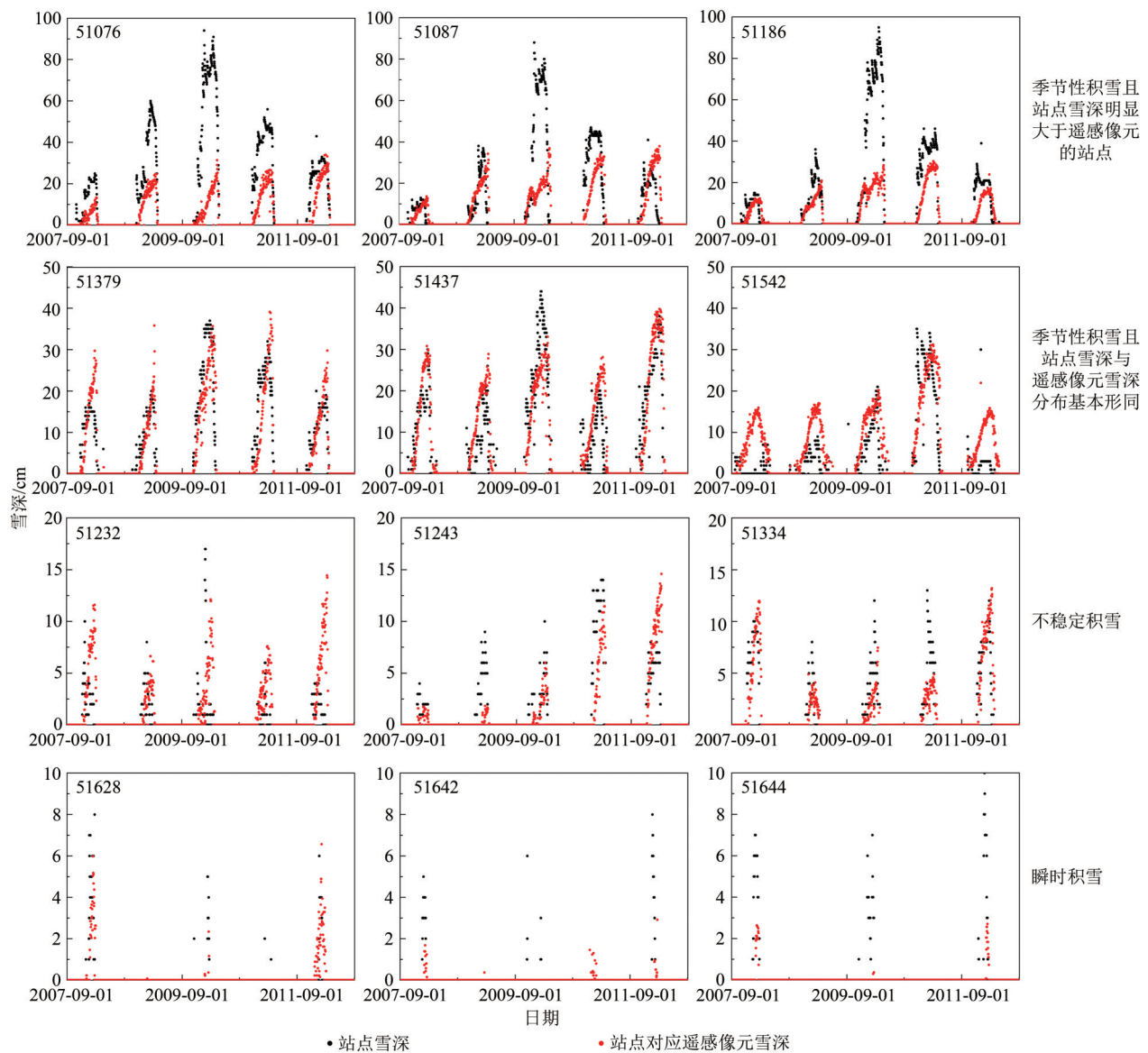


图7 2008年—2012年新疆地区站点观测与站点对应遥感像元逐日雪深变化

Fig. 7 Daily variation of snow depth in Xin Jiang from 2008 to 2012 based on meteorological observation and corresponding remote sensing pixel

5 结 论

本文通过对比气象台站地面观测雪深与被动微波遥感反演雪深的空间分布与年际变化趋势，得到两种雪深数据在中国及各积雪区雪深时空分

布及变化的异同。

首先，两种数据都显示中国积雪主要分布在东北、西北等高纬度地区和青藏高原等高海拔地区，站点雪深与之对应遥感像元反演雪深在东北地区相关性最好，新疆地区次之，青藏高原两者

的相关性较弱。在大于40 cm的深雪区和雪深小于5 cm的南方地区两者分布差异较大,具体表现为站点观测最大雪深明显高于遥感反演的最大雪深。1990年—2019年,站点雪深与遥感反演雪深年际变化较为一致,在东北平原地区雪深显著($p<0.05$)增加,在青藏高原东南部雪深显著($p<0.05$)减少。

其次,站点代表性与点面之间的尺度不匹配是两种雪深产生差异的主要原因。本研究中,青藏高原地区站点雪深与对应被动微波遥感反演像元雪深差异较大,是因为青藏高原地区的气象站大多选址在海拔较低的地方,大部分时间站点观测无雪而周围山区有雪,所以站点观测数据不能很好的反映对应微波遥感像元25 km范围内中高海拔地区及山区内雪深的平均分布和变化状况。而被动微波遥感数据的分辨率较低,其雪深产品也受积雪特性变化的影响,对短时间内雪深变化较大的极端降雪事件不敏感。

最后,卫星遥感平台的不同和更替也会影响遥感雪深产品的质量和时间一致性。由于早期(1978年—1987年)SMMR传感器在中低纬地区的扫描带宽较窄,并且每两天采集一次亮温,时间分辨率较低,导致利用该传感器亮温数据反演雪深数据的质量较低。虽然已有的遥感积雪产品具有以上不足,但因为积雪的分布和动态特性较为复杂,只能利用遥感方法获取大面积范围内积雪的整体变化趋势,而被动微波遥感能够很好的获取积雪信息且时间分辨率较高,适合用于长时间的积雪变化监测。所以,根据本研究的对比结果建议利用1988年之后的被动微波遥感雪深产品评估中国地区长时间内的雪深分布及变化,进一步提高其结论的可信度。

参考文献(References)

- Brown R D and Goodison B E. 1996. Interannual variability in reconstructed Canadian snow cover, 1915-1992. *Journal of Climate*, 9 (6): 1299-1318 [DOI: 10.1175/1520-0442(1996)009<1299:IVIRCS>2.0.CO;2]
- Chang A T C, Foster J L and Hall D K. 1987. Nimbus-7 SMMR derived global snow cover parameters. *Annals of Glaciology*, 9: 39-44 [DOI: 10.1017/S0260305500000355]
- Chang A T C, Foster J L, Kelly R E J, Josberger E G, Armstrong R L and Mognard N M. 2005. Analysis of ground-measured and passive-microwave-derived snow depth variations in midwinter across the northern great plains. *Journal of Hydrometeorology*, 6 (1): 20-33 [DOI: 10.1175/JHM-405.1]
- Chang T C, Gloersen P, Schmugge T, Wilheit T T and Zwally H J. 1976. Microwave emission from snow and glacier ice. *Journal of Glaciology*, 16(74): 23-39 [DOI: 10.1017/S0022143000031415]
- Che T. 2006. Study on Passive Microwave Remote Sensing of Snow and Snow Data Assimilation Method. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences (车涛. 2006. 积雪被动微波遥感反演与积雪数据同化方法研究. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所)
- Che T and Li X. 2005. Spatial distribution and temporal variation of snow water resources in China during 1993-2002. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 27(1): 64-67 (车涛, 李新. 2005. 1993年—2002年中国积雪水资源时空分布与变化特征. 冰川冻土, 27(1): 64-67) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2005.01.009]
- Chu D, Da Z and Laba Z M. 2017. Spatio-temporal distribution patterns of snow cover on the Tibet and orographic impacts. *Journal of Geo-Information Science*, 19(5): 635-645 (除多, 达珍, 拉巴卓玛. 2017. 西藏高原积雪覆盖空间分布及地形影响. 地球信息科学学报, 19(5): 635-645) [DOI: 10.3724/SP.J.1047.2017.00635]
- Dai L Y and Che T. 2010. The spatio-temporal distribution of snow density and its influence factors from 1999 to 2008 in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 32(5): 861-866 (戴礼云, 车涛. 2010. 1999年—2008年中国地区雪密度的时空分布及其影响特征. 冰川冻土, 32(5): 861-866)
- Dai L Y, Che T and Ding Y J. 2015. Inter-calibrating SMMR, SSM/I and SSMI/S data to improve the consistency of snow-depth products in China. *Remote Sensing*, 7(6): 7212-7230 [DOI: 10.3390/rs70607212]
- Dai S P, Zhang B, Cheng F, Wang H J and Wang P. 2010. The Spatio-temporal variations of snow cover in China from the snow depth time series dataset based on passive microwave remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 32(6): 1066-1073 (戴声佩, 张勃, 程峰, 王海军, 王鹏. 2010. 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. 冰川冻土, 32(6): 1066-1073)
- Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V, Digirolamo N E and Bayr K J. 2002. MODIS snow-cover products. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 181-194 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00095-0]
- Kunkel K E, Palecki M A, Hubbard K G, Robinson D A, Redmond K T and Easterling D R. 2007. Trend identification in twentieth-century U.S. snowfall: the challenges. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 24(1): 64-73 [DOI: 10.1175/JTECH2017.1]
- Kuraş P K, Weiler M and Alila Y. 2008. The spatiotemporal variability of runoff generation and groundwater dynamics in a snow-dominated catchment. *Journal of Hydrology*, 352(1/2): 50-66 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.12.021]

- Li H X, Zhong X Y, Zheng L, Hao X H, Wang J and Zhang J. 2022. Classification of snow cover persistence across China. *Water*, 14, 933 [DOI: 10.3390/w14060933]
- Li P J. 1987. Seasonal snow resources and its fluctuation in China. *Chinese Science Bulletin*, 32(17): 1329-1332 (李培基. 1987. 中国季节积雪资源及其波动. *科学通报*, 32(17): 1329-1332)
- Li P J. 1990. A Preliminary study of snow mass variations over past 30 years in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 48(4): 433-437 (李培基. 1990. 近30年来我国雪量变化的初步探讨. *气象学报*, 48(4): 433-437)
- Li P J and Mi D S. 1983. Distribution of snow cover in China. *Journal of Glaciology and Cryopedology*, 5(4): 9-18 (李培基, 米德生. 1983. 中国积雪的分布. *冰川冻土*, 5(4): 9-18)
- Li X. 2014. Characterization, controlling, and reduction of uncertainties in the modeling and observation of land-surface systems. *Science China: Earth Sciences*, 57(1): 80-87 (李新. 2013. 陆地表层系统模拟和观测的不确定性及其控制. *中国科学: 地球科学*, 43(11): 1735-1742)
- Li X and Che T. 2007. A review on passive microwave remote sensing of snow cover. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 29(3): 487-496 (李新, 车涛. 2007. 积雪被动微波遥感研究进展. *冰川冻土*, 29(3): 487-496) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2007.03.023]
- Ma L J and Qin D H. 2012. Spatial-Temporal characteristics of observed key parameters for snow cover in China during 1957-2009. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 34(1): 1-11 (马丽娟, 秦大河. 2012. 1957年—2009年中国台站观测的关键积雪参数时空变化特征. *冰川冻土*, 34(1): 1-11)
- Ma L J, Qin D H, Bian L G, Xiao C D and Luo Y. 2010. Analysis of air temperature sensitivity of snow cover days on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Advances in Climate Change Research*, 6(1): 1-7 (马丽娟, 秦大河, 卞林根, 效存德, 罗勇. 2010. 青藏高原积雪日数的气温敏感度分析. *气候变化研究进展*, 6(1): 1-7) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2010.01.001]
- Mankin J S, Viviroli D, Singh D, Hoekstra A Y and Diffenbaugh N S. 2015. The potential for snow to supply human water demand in the present and future. *Environmental Research Letters*, 10(11): 114016 [DOI: 10.1088/1748-9326/10/11/114016]
- Matzler C, Schanda E and Good W. 1982. Towards the definition of optimum sensor specifications for microwave remote sensing of snow. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-20(1): 57-66 [DOI: 10.1109/TGRS.1982.4307521]
- Qiao D J, Wang N Q, Li Z, Zhou J M and Fu X Y. 2018. Spatio-temporal changes of snow phenology in the Qinghai-Tibetan Plateau during the hydrological year of 1980-2009. *Climate Change Research*, 14(2): 137-143 (乔德京, 王念秦, 李震, 周建民, 符喜优. 2018. 1980年—2009年水文年青藏高原积雪物候时空变化遥感分析. *气候变化研究进展*, 14(2): 137-143) [DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2017.088]
- Tan Q Y, Cheng L, Xu Z X, Zhao Y J, Liu J T and Liu X W. 2021. Spatiotemporal distribution of snow cover depth and its driving factors in the Yarlung Zangbo River basin, 1979-2017. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 43(4): 1049-1059 (谭秋阳, 程磊, 徐宗学, 赵彦军, 刘江涛, 刘晓婉. 2021. 1979年—2017年雅鲁藏布江流域雪深时空分布特征及其影响因素分析. *冰川冻土*, 43(4): 1049-1059) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0070]
- Tian L Q, Li W Z, Zhang Y, Tian L J, Zhu Q A, Peng C H and Chen H. 2014. The analysis of snow information from 1979 to 2007 in Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 34(20): 5974-5983 (田柳茜, 李卫忠, 张尧, 田立军, 朱求安, 彭长辉, 陈槐. 2014. 青藏高原1979年—2007年间的积雪变化. *生态学报*, 34(20): 5974-5983) [DOI: 10.5846/stxb201303070365]
- Trujillo E, Ramirez J A and Elder K J. 2009. Scaling properties and spatial organization of snow depth fields in sub-alpine forest and alpine tundra. *Hydrological Processes*, 23(11): 1575-1590 [DOI: 10.1002/hyp.7270]
- Wang J, Li H X, Hao X H, Huang X D, Hou J L, Che T, Dai L Y, Liang T G, Huang C L, Li H Y, Tang Z G and Wang Z Y. 2014. Remote sensing for snow hydrology in China: challenges and perspectives. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8(1): 084687 [DOI: 10.1117/1.JRS.8.084687]
- Wu Y, Zhang J H, Xu H M and He J H. 2007. Advances in study of snow-cover from remote sensing data. *Meteorological Monthly*, 33(6): 3-10 (吴杨, 张佳华, 徐海明, 何金海. 2007. 卫星反演积雪信息的研究进展. *气象*, 33(6): 3-10) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0526.2007.06.001]
- Xu B D, Li J, Liu Q H, Xin X Z, Zeng Y L and Yin G F. 2015. Review of methods for evaluating representativeness of ground station observations. *Journal of Remote Sensing*, 19(5): 703-718 (徐保东, 李静, 柳钦火, 辛晓洲, 曾也鲁, 尹高飞. 2015. 地面站点观测数据代表性评价方法研究进展. *遥感学报*, 19(5): 703-718) [DOI: 10.11834/jrs.20154178]
- Yang D Q and Woo M K. 1999. Representativeness of local snow data for large scale hydrologic investigations. *Hydrological Processes*, 13(12/13): 1977-1988 [DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(199909)13:12/13<1977::AID-HYP894>3.0.CO;2-B]
- Zhang T J and Zhong X Y. 2014. Classification and regionalization of the seasonal snow cover across the Eurasian Continent. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 36(3): 481-490 (张廷军, 钟敬玥. 2014. 欧亚大陆积雪分布及其类型划分. *冰川冻土*, 36(3): 481-490) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2014.0058]

Spatio-temporal comparison of snow depth between passive microwave remote sensing inversion data and meteorological station observation data

WANG Jing^{1,2}, CHE Tao¹, DAI Liyun¹, YUE Shanna^{1,2}, ZHENG Zhaojun³

1. Heihe Remote Sensing Experimental Research Station, Key Laboratory of Remote Sensing of Gansu Province, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

Abstract: Snow depth is one of the most important physical properties of snow, and the accurate estimation of snow depth is critical to human production and life, such as water resource management, climate change research, disaster early warning, and management. At present, snow depth data observed by meteorological stations and retrieved by passive microwave remote sensing (SMMR, SSM/I, and SSMI/S) have been widely used for long time series snow depth research. To clarify the advantages and disadvantages of these data in the study of snow depth change, this paper compares the spatial distribution and interannual variation of the maximum snow depth and mean snow depth of these in China. Results show the distribution of the two types of snow depth is consistent in the stable snow cover areas, but the maximum snow depth observed by meteorological stations is remarkably greater than the maximum retrieved by remote sensing in the deep snow area of more than 40 cm and the snow depth of less than 5 cm in southern China. The correlation between the two snow depth data is the best in northeast China, the second in Xinjiang, and the worst in the Qinghai-Tibet Plateau. Using the passive microwave snow depth data after 1988 is more suitable to study the snow depth changes in China because the SMMR sensor (1978.10.26—1987.8.20) has low time resolution and serious data loss in the middle and low latitudes, resulting in poor quality of the corresponding snow depth data. Furthermore, comparing the changes of the two types of snow depth in China in recent 30 years, the results show the changes of those are the same in different regions, with a substantial increase in the northeast Plain and a considerable decrease in the western and southeastern parts of the Qinghai-Tibet Plateau. Meteorological stations, influenced by their site selection, cannot reflect the high-altitude snow depth and mountain district time distribution and the change of situation. However, the snow depth retrieved by passive microwave remote sensing is affected by snow thickness, seasonal variation of snow density, liquid-water content of snowpacks, snow grain size, and other factors. Therefore, it cannot reflect the extreme snowfall events with rapid changes of snow attribute in a short time.

Key words: snow depth, meteorological stations, passive microwave remote sensing, typical snow areas, comparative analysis

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42125604); Science and Technology Basic Resources Investigation Program of China (No. 2017FY100500); West Light Talent Program of the Chinese Academy of Sciences