

引用格式: Xiao Lin, Che Tao, Dai Liyun. Evaluation on the Spatial Characteristics of Multiple Snow Depth Datasets over China[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(6): 1133-1145. [肖林, 车涛, 戴礼云. 多源雪深数据在中国的空间特征评估[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(6): 1133-1145.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2019.6.1133

多源雪深数据在中国的空间特征评估

肖林^{1,2,3}, 车涛^{1,3}, 戴礼云^{1,3}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院黑河遥感实验研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 积雪的年际和年内变化强烈地影响着区域及全球的水量平衡, 同时, 积雪反照率反馈也显著地影响着气候变化。目前长时间序列的格网雪深数据主要来自被动微波遥感及再分析资料, 但不同数据之间存在着明显差异。基于多源雪深数据的评估, 特别是空间特性的评估还很缺乏。因此, 本研究选取了 AMSR-E、WESTDC、GlobSnow、RA-Interim 及 MERRA2 这 5 种雪深数据, 以站点观测数据为参考真值, 对它们进行了中国地区的空间误差对比及基于误差排序的相对表现分析。评估结果初步显示: ① WESTDC 在我国西北及东北积雪区表现较好, 适合用于我国北方的雪深研究; ② MERRA2 在西北和东北积雪区也有较好的表现, 但由于其分辨率较粗, 缺乏细节的空间信息, 因此认为比较适用于大区域的统计分析; ③ AMSR-E 在我国中部和东南地区表现最好, 因此认为适合我国中部及东南部的雪深研究。

关键词: 遥感数据; 再分析资料; 雪深数据; 评估; 中国

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2019)06-1133-13

1 引言

积雪是冰冻圈中分布最广, 变化最为显著的因素, 它的年际和年内变化对区域及全球的水量平衡有着重要影响^[1-2]。同时, 积雪具有很高的反照率, 对气候系统存在重要的正反馈作用^[3-4]。因此, 积雪不仅是气候变化灵敏的“指示器”, 也是影响气候变化的重要反馈因子。

目前全球及半球尺度, 长时间序列的格网雪深数据主要来自被动微波遥感数据及再分析资料(模型)。被动微波在不同频率的亮度温度差与积雪粒子的体散射有很好的线性关系, 因此可以用来探测积雪深度^[5-6]。再分析资料则是通过构建积雪模型, 通过一定的驱动数据和同化方法来获取雪深参数。

无论是被动微波遥感数据还是再分析资料, 自

身都存在着很大的不确定性, 数据之间也有明显差异^[7-8]。由于传感器和反演算法的差异, 不同被动微波遥感数据的时空特征存在着明显差异^[9-10]。由于模型设计、驱动数据以及同化方法等的不同, 再分析资料之间也往往表现出不同的区域特征^[11-12]。

基于不同数据间明显的时空特征差异, 数据对比及评估工作就显得尤为重要。中国地区的雪深数据评估工作主要在区域尺度展开, 如青藏高原^[13-15]、新疆^[16-17]、内蒙古^[18-19]以及东北地区^[20]。而几乎没有全国范围的多源雪深数据(包括遥感数据和再分析资料)的评估。此外, 现有的评估工作通常进行算法的评估^[21-22]或基于误差的区域平均的对比^[23-24], 对数据空间特性的评估还是十分缺乏。

因此, 本研究对多源雪深数据, 包括 3 种遥感数据及 2 种再分析资料, 在中国地区进行了空间特征

收稿日期: 2019-03-12; 修订日期: 2019-06-10

基金项目: 科技部国家科技基础资源调查专项“中国积雪特性及分布调查”(2017FY100500), 国家自然科学基金项目(41771389)资助。

作者简介: 肖林(1989-), 女, 四川汶川人, 博士研究生, 主要从事积雪遥感研究。E-mail: xiaolin@lzb.ac.cn。

通讯作者: 车涛(1976-), 男, 陕西周至人, 研究员, 主要从事冰冻圈遥感研究。E-mail: chetao@lzb.ac.cn。

的对比及评估,旨在对中国地区雪深研究的数据源选择提供一些参考信息。其中主要的研究内容有:①对比各数据的雪深空间分布;②通过偏差和均方根误差对各数据进行空间上的误差分析;③通过在每个站点对各数据的偏差和均方根误差进行排序,评估数据在各站点的相对表现。

2 数据及预处理

本研究评估的数据包括3种遥感数据和2种再分析资料,参考真值数据来自站点观测。评估指标主要是偏差和均方根误差。

2.1 评估数据

2.1.1 AMSR-E全球逐日雪深数据集

AMSR-E (the Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth Observing System) 是搭载于美国国家宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA) Aqua卫星上的1个微波扫描辐射计。AMSR-E可以在6种频率下进行水平和垂直极化共12个通道的亮温观测。基于这些亮温观测,日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)制作了全球范围的逐日积雪深度数据。

该数据制作过程中,首先对“不存在积雪”的地区进行了剔除。“不存在积雪”的地区主要是由可见光积雪面积产品及遥感地表覆盖数据处理得到^[25-26]。之后通过亮度温度差等条件对雪深进行了初步判识,如果积雪被判定为浅雪,则将雪深设置为5 cm。当积雪被判定为中雪或深雪时,则利用积雪体散射与不同频率的亮温差有很好的线性关系这一特性进行雪深反演。反演公式建立在Chang算法的基础上^[27],其中最重要的改进是将森林覆盖率引入了算法。算法的反演系数由不同波段,不同极化的亮温差决定^[26]。

逐日的AMSR-E雪深数据来自JAXA (<https://suzaku.eorc.jaxa.jp/>)。数据的时间范围为2002年6月~2011年10月,空间分辨率是0.25°,投影坐标系统是WGS84。值得注意的是,由于传感器探测范围的限制,在55°N以南部分区域的成像周期约为2~3 d^[28]。也就是说,单幅AMSR-E雪深影像在我国55°N以南部分地区会有一些条带状的数据间隙。

2.1.2 中国雪深长时间序列数据集

中国雪深长时间序列数据集(WESTDC)来自

中国西部环境与生态科学数据中心,该数据是一套逐日的基于多传感器的被动微波遥感数据集。

中国雪深长时间序列数据集的亮度温度数据来自SMMR、SMM/I和SMMI/S 3个传感器,首先对这些传感器的亮温数据进行了交叉订正^[29],以提高不同传感器在时间上的数据一致性。该数据在不同区域采用了不同的算法。在40°N以北的地区,算法在Chang算法的基础上引入了森林覆盖率,同时引入了动态的反演系数。具体来说,首先将传感器在不同频率的亮温差与来自气象观测站点的雪深数据进行月际尺度的拟合,再将各站点的拟合系数插值到空间上,之后利用逐月的拟合系数与亮温数据进行雪深反演。在40°N以南的地区则采用了Che算法^[30]。

该数据来自中国西部环境与生态科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>),数据时间为1979年1月~2016年12月。数据的空间分辨率是0.25°,投影坐标系统是WGS84。

2.1.3 GlobSnow北半球逐日雪水当量数据集

GlobSnow是欧洲航天局(European Space Agency, ESA)发布的北半球逐日雪水当量数据集。

数据生产过程中主要用到了站点资料、被动微波亮温数据(SMMR, SMMI, SMMI/S)以及HUT(Helsinki University of Technology)积雪辐射传输模型。数据生产过程主要分3步。首先将传感器的亮度温度与一定范围内的不同积雪粒径值输入HUT模型,通过将输出的雪深数值与对应的站点雪深进行多次迭代与匹配,选出最优的有效积雪粒径。之后将站点的有效积雪粒径插值得到区域上的积雪粒径数据。最后将优化之后的积雪粒径和被动微波亮温数据再次带入HUT模型,得到空间上的雪水当量数据^[31]。

需要说明的是,标准的GlobSnow数据对山区进行了掩膜。而本研究采用的数据是在GlobSnow v2.0标准数据基础上没有进行山区掩膜的数据(<http://www.globsnow.info/swe/>)。GlobSnow提供了1979~2012年北半球35°N~85°N逐日的雪水当量数据,通过与统一的积雪密度(0.24 g/cm³)相除,可将其转化为雪深数据。该数据的空间分辨率是0.25°,投影坐标系统是EASE-GRID。虽然是逐日数据集,但GlobSnow在6~9月有大量的数据缺失。

2.1.4 ERA-Interim再分析资料

ERA-Interim是欧洲中期天气预报中心(Euro-

pean Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的第四代再分析资料^[32]。该数据提供了全球多种地表及高空大气的同化数值产品。

该数据的积雪模型来自 TESSEL (hydrology tiled ECMWF schemes), 它是1个单层的能量-质量平衡模型^[33]。该模型的降水驱动数据通过全球降水气候学计划 (Global Precipitation Climatology Project, GPCP) 的降水数据进行了校正^[34]。

ERA-Interim 提供了1979年1月至今的数据 (<https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/>), 通过将平均雪水当量与平均积雪密度相除, 即可得到像元尺度的平均积雪深度。模型的原始空间分辨率是 0.75° , 时间分辨率6 h, 投影坐标系统是WGS84。

2.1.5 MERRA2再分析资料

MERRA2 是美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 的全球模型及同化办公室 (Global Modeling and Assimilation Office, GMAO) 最新发布的1套再分析资料^[35]。

该数据的积雪模块是一个3层积雪模型^[36-38], 模型生成的降水数据同样通过观测降水数据 (雨量筒) 进行了校正^[39]。其中, 低纬度地区的校正幅度较大, 而在 62.58°N 以北, 由于站点的降水数据比较少, 且数据质量不高, 因此没有进行降水校正。

MERRA2 提供了1980年1月至今的数据 (<https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/>)。研究中获取了像元中有雪范围的平均雪深和积雪覆盖率两个参数, 两者相乘即可得到像元尺度的平均雪深。获取数据的原始空间分辨率为 $0.625^\circ \times 0.5^\circ$, 时间分辨率为逐日, 投影坐标系统是WGS84。

2.2 站点资料

评估的参考真值来自中国国家气象局 (<http://data.cma.cn/>) 的气象站点观测资料。资料提供了全国 (台湾省数据暂无) 共893个气象台站的逐日雪深观测数据。站点分布总体上呈现东部密集, 西部稀疏的特点, 新疆南部和青藏高原西部的站点尤为稀少。

2.3 数据预处理

在研究中, 将每个积雪年定义为前一年的9月1日至当年的8月31日。结合各数据的重叠时间, 将本研究的时间范围确定为2002年9月1日~2011年8月31日, 即2003~2011积雪年。因此, 首先提取各数据在研究期间中国区域的雪深数据, 将其时空

分辨率分别统一到1 d和 0.25° , 并对各数据进行异常值剔除。之后, 将所有格网雪深数据与站点数据进行了时空匹配。其中, WESTDC、ERA-Interim 和 MERRA2 有很好的数据完整度, AMSR-E 和 GlobSnow 在研究期间存在数据缺失。其中 AMSR-E 在研究期间共有12 d数据缺失, 且在 55°N 以南部分地区的数据频率是每2~3 d。GlobSnow 在6~9月有严重的数据缺失, 研究期间6~9月的数据完整度 (有观测的天数/总天数) 分别是35.56%、0.72%、0和32.96%。此外, GlobSnow 在其他月份也有少量的数据缺失。

3 评价指标

本研究主要使用了偏差及均方根误差这两个指标进行误差评估, 并在此基础上对各数据在站点的偏差及均方根误差进行了排序及比较。

3.1 偏差

偏差 (BIAS) 直接度量了评估雪深数据和站点观测数据之间的数值差异。其公式为:

$$\text{BIAS} = X_d - X_{go} \quad (1)$$

其中: X_d 代表各雪深数据的像元雪深值, X_{go} 代表对应的站点观测数值。在研究中, 首先计算了各数据在像元尺度的逐日偏差, 之后将结果进行多年平均。

3.2 均方根误差

均方根误差 (RMSE) 是评估雪深数据 X_d 与参考真值 X_{go} 之间偏差的平方与观测次数比值的平方根。它描述了评估数据与站点数据的偏离程度, 其公式为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{d,i} - X_{go,i})^2}{n}} \quad (2)$$

其中, n 代表观测次数, 本研究将其设置为月尺度, 即 i 代表该月的第几次观测。由于 GlobSnow 在6~9月的数据缺失情况严重, 若当月有效数据小于6次, 则不计算当月的RMSE。

3.3 各误差评价指标的排序

基于各数据在观测站点的BIAS和RMSE, 对5种数据的误差数值分别在各站点进行排序, 从而对比数据间的相对表现。按照5个数据的误差大小分别赋值1~5, 其中1代表最好, 5代表最差, 如果出现相同的误差数值, 则给予相同排序, 如果没有观测, 则不进行排序。由于 GlobSnow 在6~9月有大量的数据缺失, 为了避免数据缺失对排序结果带来的影响, 没有直接对多年平均BIAS或RMSE的数值进

行排序。具体的排序过程为:

(1)首先对5个数据逐日的BIAS绝对值和逐月的RMSE以站点为单位进行排序。若定义5个数据的排名为 $Rank_{d_{i,j}}$, i 代表第 i 个数据, j 代表第 j 个站点,则 $Rank_{d_{i,j}}$ 的数值在 $35^{\circ}N$ 以北的地区介于1~5;由于GlobSnow在 $35^{\circ}N$ 以南没有数据,因此在 $35^{\circ}N$ 以南地区的排名数值介于1~4。

(2)接下来对逐日BIAS排名和逐月RMSE排序进行多年平均:

$$Rank_{data_{i,j}} = \frac{\sum_{i=1}^n Rank_{d_{i,j}}}{n} \quad (3)$$

其中 $Rank_{data_{i,j}}$ 代表5个数据的BIAS或RMSE排名的多年平均。由于BIAS是按照日尺度进行排序,因此 n 为3287,对应着研究期间共有3287d;RMSE按照月尺度进行排名,因此 n 为108,对应着研究期间共有108个月。

(3)最后对所有数据的多年平均排名 $Rank_{data_{i,j}}$ 进行排序,则可以得到5个数据在整个研究期间的相对表现排名。同样地,最终排名数值在 $35^{\circ}N$ 以北的地区介于1~5,在 $35^{\circ}N$ 以南的地区介于1~4。

4 评估结果

4.1 各数据的平均雪深空间分布

首先计算了各遥感数据,再分析资料及站点观测雪深数据在2003~2011年的多年平均雪深,其空间分布如图1所示。每个数据的年平均雪深由该像元在一个积雪年的雪深总和除以对应的观测天数得到。其中,由于GlobSnow在6~9月大量的数据缺失,GlobSnow的多年平均雪深主要来自10~5月的结果。5个评估数据统一的显示出中国的积雪多分布于青藏高原,新疆北部以及东北地区(包括内蒙东北部及东北三省)。

各数据在青藏高原的雪深分布有明显的空间差异,AMSR-E显示出明显的高原内部差异,雪深数值较大的地区主要位于高原内的山脉附近,山脉的平均雪深多为5~10cm。WESTDC和ERA-Interim的空间分布比较相似,在高原东南部念青唐古拉山脉附近雪深最大约5~10cm,且高原四周雪深值较大,高原腹地雪深数值较小。MERRA2则显示整个青藏高原的雪深都比较小,绝大部分地区的多年平均雪深小于1cm。

相比青藏高原,各数据在新疆地区的雪深空间分布的一致性相对更好。各数据几乎都表现出阿

尔泰山和天山有较大的雪深值。其中阿尔泰山的雪深值最大,5种数据几乎都显示其平均雪深值在15~20cm。准噶尔盆地的雪深数值多为1~5cm,其中GlobSnow显示盆地部分地区的雪深可达5~10cm。塔里木盆地的平均雪深都较小,平均雪深介于1~5cm或小于0.1cm。

东北地区的积雪主要分布于内蒙古东北部、黑龙江、吉林和辽宁。各产品的空间分布比较相似,多年最大平均雪深都位于内蒙古与黑龙江相邻的地区,也就是我国最北的地区,但该处的雪深数值差异较大。AMSR-E和GlobSnow在此处的平均雪深在10~15cm之间,WESTDC和MERRA2是5~10cm左右,而ERA-Interim的多年平均雪深最大,介于20~40.7cm之间。

除此之外,我国的积雪还少量地存在于从内蒙古东部、中部及往南延伸的地区(平均雪深介于0.1~1cm)。其中,AMSR-E、WESTDC和ERA-Interim显示积雪延伸到 $30^{\circ}N$ 附近,而MERRA2的数据则显示积雪延伸到了 $20^{\circ}N$ 附近地区。从全国范围来看,AMSR-E在5个数据中展示出最多的细节信息,而MERRA2的空间差异则最不明显。

站点数据的平均雪深分布与5种评估数据整体上较为相似,显示我国雪深数值较大的地区分布于新疆北部阿尔泰山、天山及准噶尔盆地附近、内蒙古东北部及黑龙江、吉林和辽宁北部,多年平均最大雪深为12.2cm。但位于青藏高原的站点数据的雪深值都比较小,绝大部分站点的年平均雪深值都小于1cm。

4.2 各数据的误差估计

该小节对各数据的多年平均偏差、多年平均均方根误差以及两个指标的空间排序进行了对比分析。为了体现区域特征,将我国的积雪划分为青藏高原积雪区、西北积雪区、东北积雪区以及其他地区^[30]。其中青藏高原积雪区包括西藏、新疆南部、甘肃西北部分地区、青海、四川西北以及云南西北部分地区。西北积雪区包括新疆北部、甘肃北部以及内蒙古西部部分地区。东北积雪区主要包括内蒙古东北部、黑龙江、吉林和辽宁。由于GlobSnow的数据缺失,其多年平均误差仍然主要来自10~5月的误差结果。

4.2.1 各数据平均偏差的空间分布

各评估数据基于观测数据的多年平均偏差如图2所示。基于现有的站点资料,AMSR-E在青藏高原的偏差分布没有明显的区域特征,总的来说在

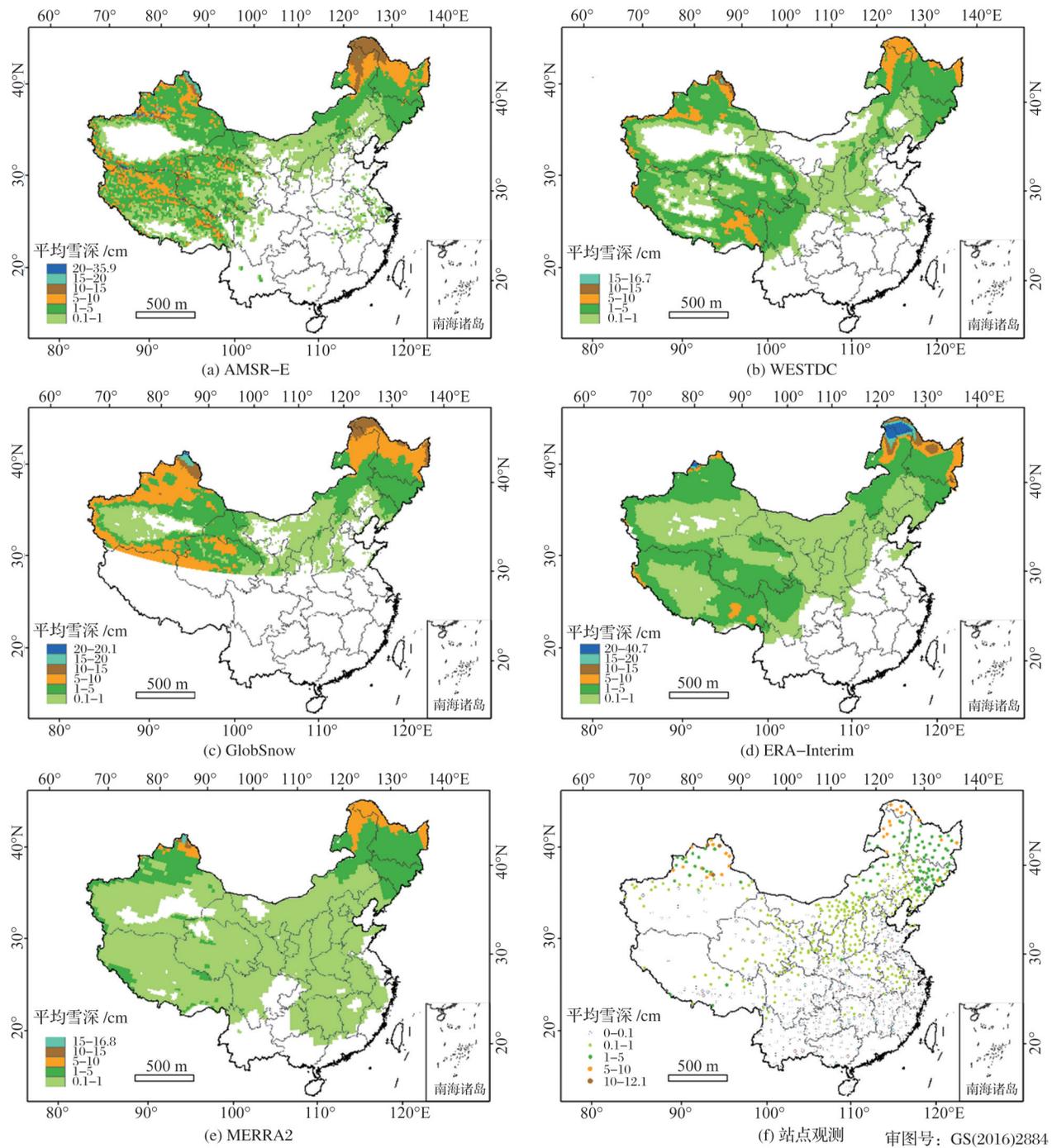


图 1 遥感数据、再分析资料及站点数据在 2003~2011 年的平均雪深分布

Fig.1 Average snow depth distribution between 2003~2011 among remote sensing and reanalysis datasets

高原部分站点有轻微的高估(1~5 cm)。WESTDC 和 ERA-Interim 在青藏高原偏差的空间分布比较相似,都表现为中部地区较好,东南部地区有一定高估,在念青唐古拉山脉东段附近偏差最大,部分站点的平均偏差大于 5 cm。GlobSnow 在青藏高原仅在纬度较高的青海及甘肃部分地区有数据,且高估明显,部分站点的高估大于 5 cm。MERRA2 在整个青藏高原的平均偏差较小,仅在喜马拉雅山脉有

一定的偏差(± 5 cm)。

各数据在西北积雪区的雪深偏差较为一致。其中,AMSR-E 和 WESTDC 在阿尔泰山,准噶尔盆地及天山北脉有一定低估,AMSR-E 还在新疆东北部有一定的高估。GlobSnow 在整个新疆北部同时存在着高估和低估。在甘肃北部及青海部分地区存在高估。ERA-Interim 在阿尔泰山附近有较大程度的低估,天山山脉也有一定的低估。MERRA2 在阿尔泰

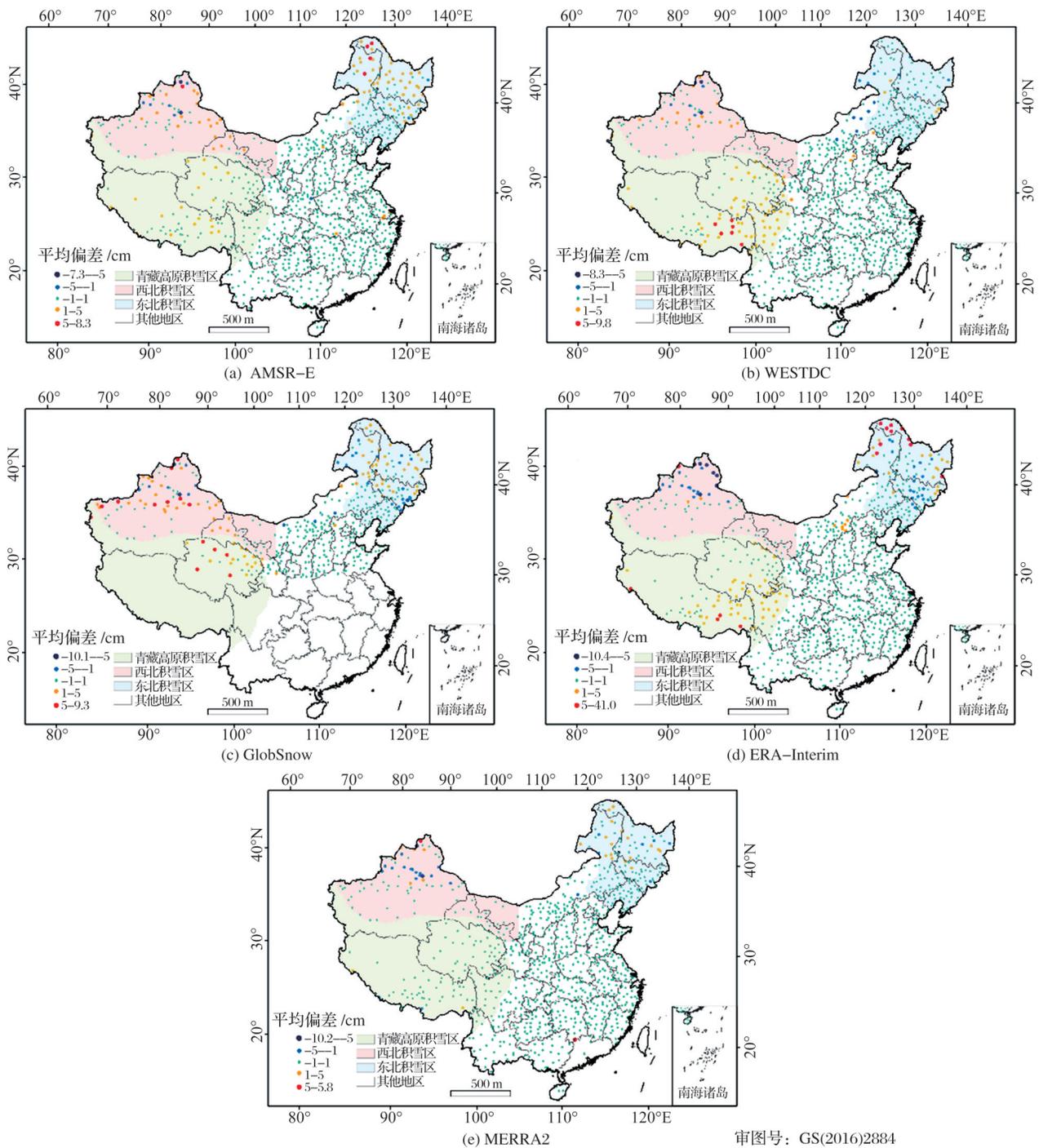


图2 遥感数据和再分析资料在2003~2011年的平均偏差

Fig.2 Average bias between 2003~2011 among remote sensing and reanalysis datasets

山东部有一定高估,天山山脉有一定低估。

在东北积雪区,AMSR-E整体表现出高估,其平均雪深最大的地区与站点观测雪深的差值大于5 cm。WESTDC在东北地区的偏差整体最小,仅有零星的站点存在一定低估(1~5 cm)。GlobSnow在辽宁的观测较好,其余地方同时存在着高估和低估(±5 cm)。ERA-Interim在黑龙江西北部地区的高估尤其明显,最大高估达41 cm,同时在黑龙江中

部,南部,以及吉林中部存在一定低估(1~5 cm)。MERRA2在东北地区的偏差整体较小,但仍然存在一定高估和低估(±5 cm)。

各数据在其它地区的绝大部分站点的平均偏差都很小,多年平均偏差多在1 cm以内。

4.2.2 各数据平均均方根误差的空间分布

各数据的多年平均均方根误差如图3所示。均方根误差较大的地区与平均误差较大的地区比较

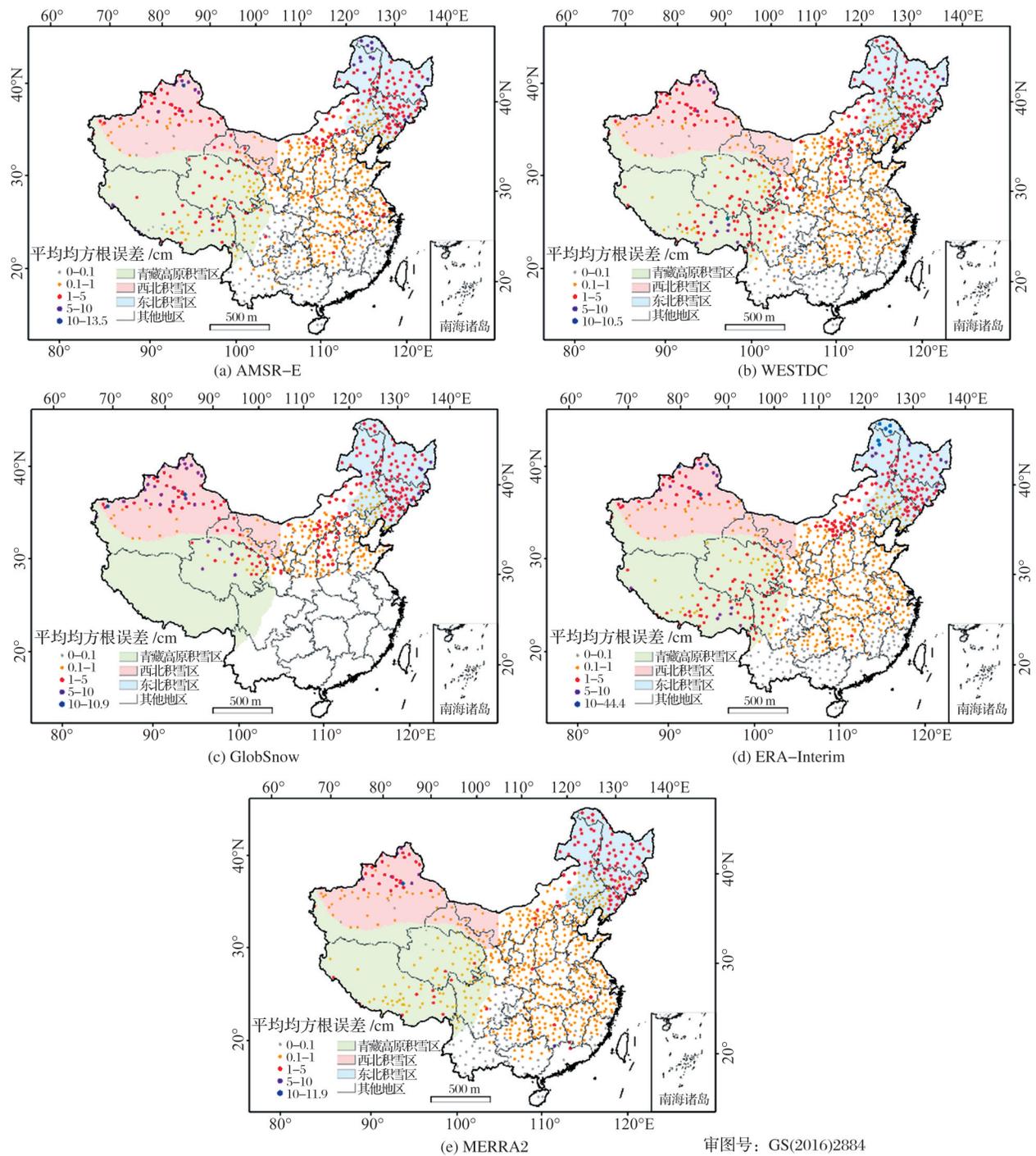
相似,同样位于青藏高原东南部、新疆北部阿尔泰山和天山、东北地区的北部。

AMSR-E在青藏高原的中部均方根误差较大,部分站点的RMSE在1~5 cm左右。WESTDC和ERA-Interim在青藏高原中部到东南部的RMSE较大,在念青唐古拉山脉附近的RMSE达5~10 cm。GlobSnow在青海的部分站点的均方根误差达5~10 cm。MERRA2在整个青藏高原的RMSE最小,

绝大部分地区的RMSE小于1 cm。

在西北积雪区,5个数据在天山北脉的RMSE比较相近,多介于1~5cm。MERRA2在阿尔泰山的RMSE略小于其他数据,大多为1~5 cm。GlobSnow在天山中脉的RMSE略大于其它数据,多为5~10 cm。

在东北积雪区的最北部,AMSR-E和ERA-Interim的RMSE较大,其中ERA-Interim的RMSE最大值超过40 cm,AMSR-E在此处的RMSE在5~



审图号: GS(2016)2884

图 3 遥感数据和再分析资料在 2003~2011 年的平均均方根误差
Fig.3 Average root mean square error between 2003~2011 among remote sensing and reanalysis datasets

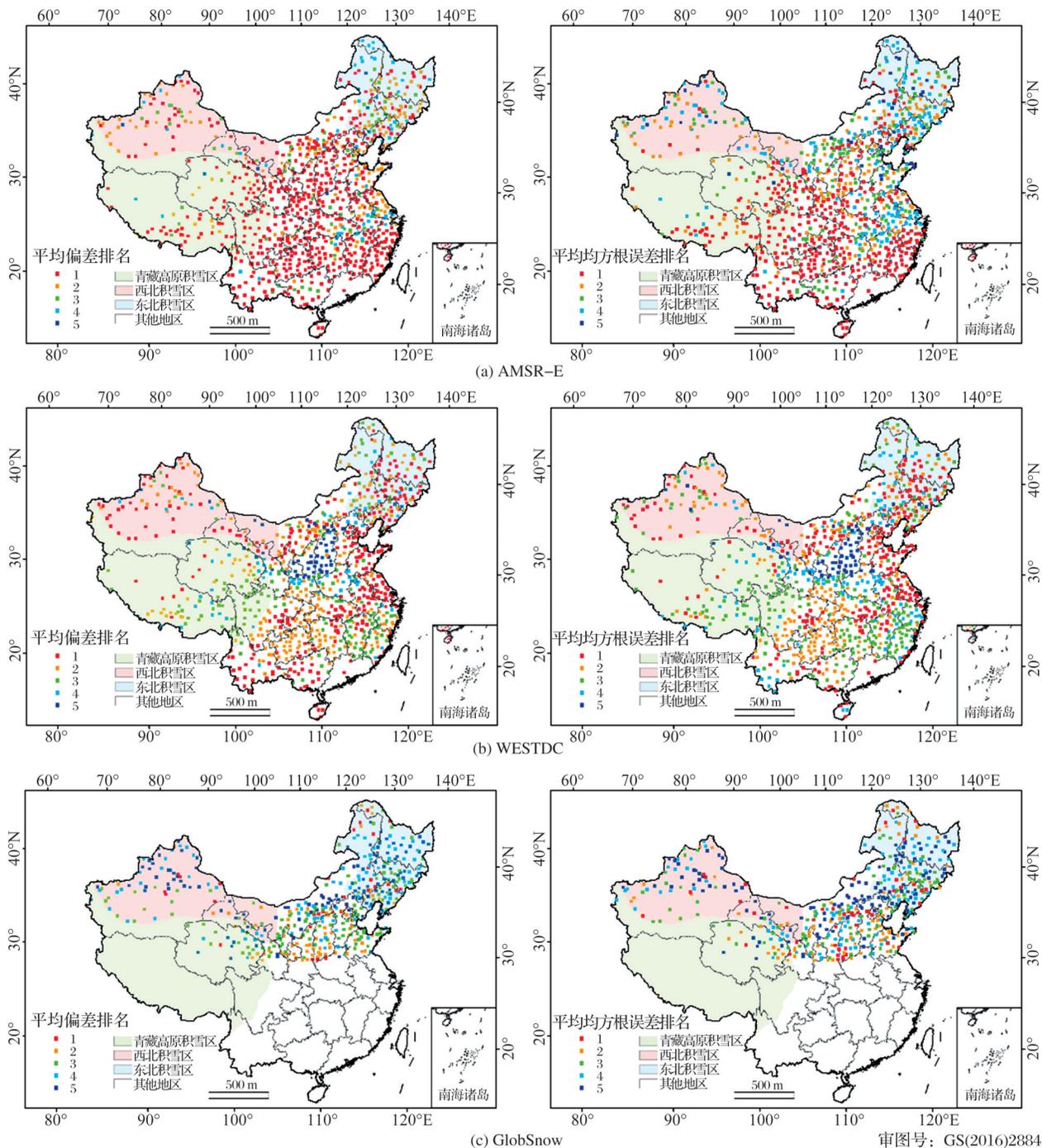
10 cm 之间。WESTDC, GlobSnow 和 MERRA2 的 RMSE 较小,多在 1~5 cm 之间。

4.3 各数据偏差的空间排序

按照第 3.3 节的方法对各站点进行排序,则 5 种数据在各站点的 BIAS 和 RMSE 排序结果的空间分布如图 4 所示。由于误差排序首先基于逐日 BIAS 绝对值或逐月 RMSE 进行排序,若没有观测则不进行排序,因此能在很大程度上减小 GlobSnow 的数据缺失对结果带来的影响。其中,AMSR-E 和 WESTDC 的 BIAS 排名整体上优于 RMSE 排名,而

GlobSnow 和 MERRA2 的 RMSE 排名略优于 BIAS 排名。这是由于基于日尺度的 BIAS 绝对值的排序结果更多地体现了数据间的表现差异,而基于月尺度的 RMSE 更加侧重于数据与参考真值的离散程度差异。两者的差异体现了数据的不同误差特性。

在青藏高原积雪区,5 个数据的在各站点的 BIAS 和 RMSE 排名比较相似。AMSR-E 在偏南和东部地区的表现相对最好,MERRA2 在高原的东南部站点则多排名第二。WESTDC 在这些地区的排名多在 3 名,ERA-Interim 则多在 4 名左右。



审图号: GS(2016)2884

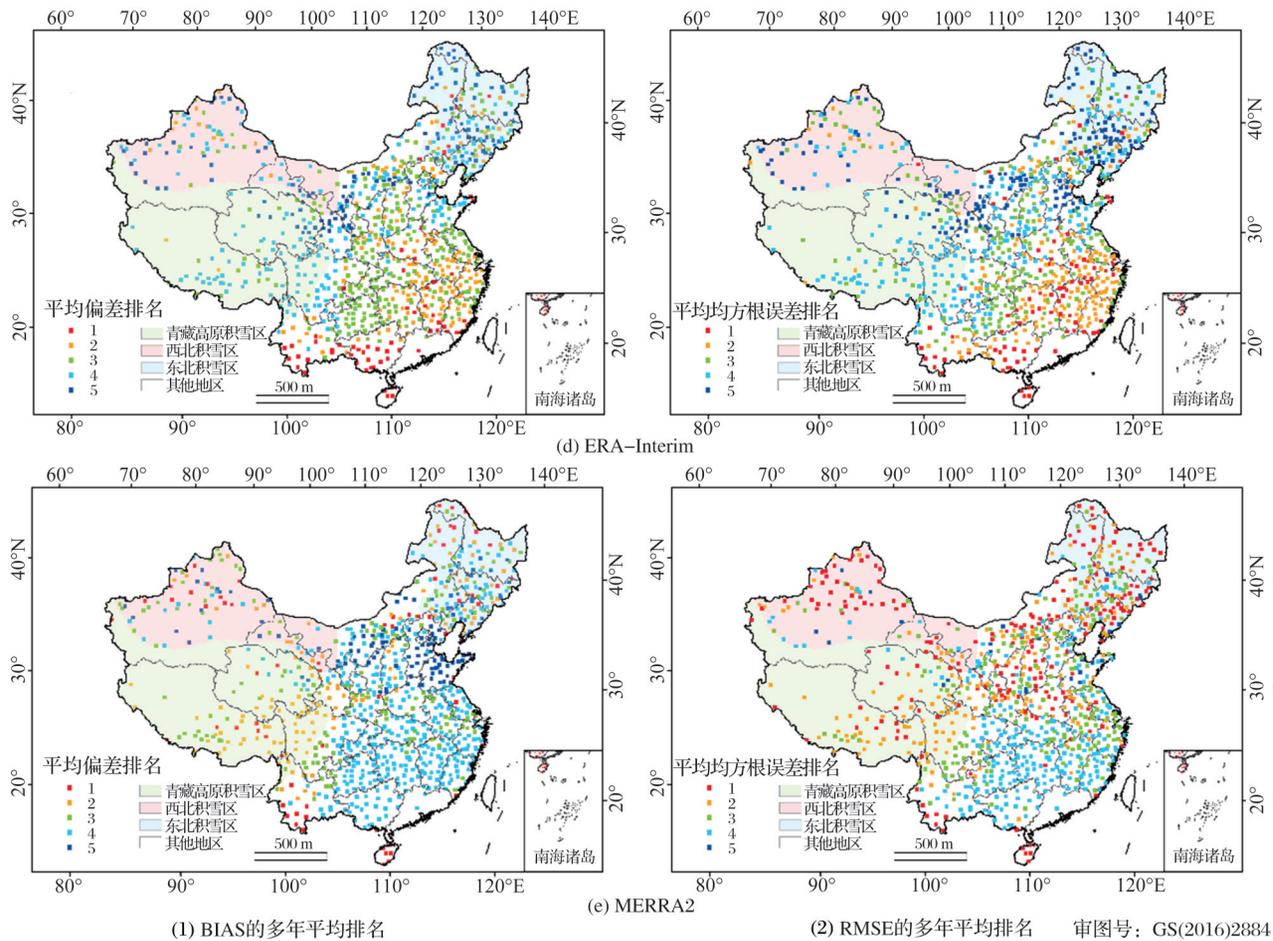


图 4 遥感数据和再分析资料在各站点的误差排序

Fig.4 Error rank of remote sensing and reanalysis datasets

在西北积雪区, AMSR-E、WESTDC 和 MERRA2 的整体表现更好。其中, WESTDC 在塔里木盆地附近站点的平均偏差排名最好, 而 MERRA2 在阿尔泰山及天山北脉附近站点的均方根误差排名最好。GlobSnow 和 ERA-Interim 在西北地区的表现则相对较差。

东北积雪区表现更好的数据同样是 AMSR-E、WESTDC 和 MERRA2。其中, AMSR-E 在东北最北部的 BIAS 平均排名多为第四, 其他站点则多在前三。而 RMSE 则多在 2~4 名。WESTDC 的 BIAS 排名多为前两名, 部分站点的 RMSE 排名则略

低于 BIAS 排名。MERRA2 的偏差排名多在 2~4 名, 但 RMSE 排名则明显更好。

在三大积雪区之外的其他地区, AMSR-E 存在明显的优势, 有绝大部分地区的站点的 BIAS 排名和 RMSE 均为第一。

4.4 各数据误差排名的区域统计

基于图 4 中各数据在不同站点的 BIAS 和 RMSE 排名结果, 分别统计三大积雪区、其他地区以及全国范围的区域平均值, 即得到了各数据在我国不同地区的 BIAS 和 RMSE 的排名平均值(表 1 和表 2)。由于 GlobSnow 在 35° N 以南没有数据, 仅

表 1 各数据在不同积雪区的 BIAS 排名

Table 1 BIAS rank of different datasets over different regions

BIAS 平均排名	AMSR-E	WESTDC	GlobSnow	ERA-Interim	MERRA2
青藏高原积雪区	1.32	2.73	NaN	3.93	2.41
西北积雪区	2.06	1.96	3.85	3.81	3.10
东北积雪区	2.28	1.88	3.74	3.74	3.23
其他地区	1.42	2.16	NaN	2.83	3.71
全国范围	1.61	2.16	NaN	3.20	3.43

表2 各数据在不同积雪区的RMSE排名

Table 2 RMSE rank of different datasets over different regions

RMSE平均排名	AMSR-E	NHSD	GlobSnow	ERA-Interim	MERRA2
青藏高原积雪区	1.60	2.92	NaN	3.89	2.09
西北积雪区	3.06	2.29	3.66	3.80	2.03
东北积雪区	3.00	2.21	3.61	3.92	2.12
其他地区	1.99	2.44	NaN	2.88	2.99
全国范围	2.21	2.45	NaN	3.25	2.66

在西北和东北积雪区进行了区域统计。AMSR-E在其他地区有明显的优势, BIAS和RMSE的区域平均排名分别为1.42和1.99。这些地区主要位于我国的中部及东南部, 积雪相对较浅。AMSR-E在这些积雪较浅的地方的优势可能由于AMSR-E在积雪反演之前, 首先会通过由可见光数据生成的积雪面积掩膜来剔除“不存在积雪”的地区。同时, 如果算法将积雪判定为浅雪, 则统一的赋值为5 cm, 这也可以很好地控制BIAS和RMSE的数值范围。

WESTDC在西北地区和东北地区的BIAS的排名是5个数据中最好的, BIAS的排名分别为1.96和1.88。RMSE的排名略大于MERRA2, 分别为2.29和2.21。WESTDC在35° N以北的地区表现相对更好, 一个可能的贡献是数据在40° N以北引入了动态的反演系数。

GlobSnow在西北和东北积雪区的表现都比较好, BIAS和RMSE的平均排名都介于3.5~4左右。总体结果不太好的一个可能的原因是GlobSnow在中国地区用于同化的站点较少。同时, 有研究表明, GlobSnow在积雪较深(SWE>30 mm)时, 反演结果更好^[40]。而中国绝大部分地区的多年平均雪深值都小于这一阈值, 因此可能也是造成了GlobSnow在中国的评估结果较差的一个原因。

ERA-Interim在我国各地区的相对表现也比较差, 在三大积雪区的BIAS和RMSE的平均排名都接近4。其中, ERA-Interim在西北积雪区的阿尔泰山附近有较大的低估, 在东北积雪区的最北部有明显的高估。由于再分析资料的结果主要决定于模型设计与驱动数据。积雪模型的最重要的驱动数据是降水和温度, 降水数据的不确定性可能是影响模型积雪模拟不确定性较大的一个直接原因^[41]。

MERRA2在西北和东北积雪区的RMSE排名最好, 在西北积雪区和东北积雪区分别为2.03和2.12, 在5个数据中排名最靠前。这两个地区的BIAS排名在5个数据中位列第3, 平均排名则不及WESTDC和AMSR-E。

部分数据的BIAS平均排名与RMSE平均排名有所差异, 这也是由于基于日尺度的BIAS排名更多的展现了数据间的相对表现差异, 而基于月尺度的RMSE排名则更多地反映了数据与参考真值之间的离散程度差异。因此, 两个指标的差异并不冲突, 而是反映了数据在不同方面的误差特性。而结果的差异也在一定程度上突显了利用多个评估指标对数据进行综合评估的必要性。

需要特别说明的是, 由于青藏高原的平均海拔超过4 000 m, 高原内山脉众多, 地理位置和地形十分独特。而目前的台站数量较少, 且多分布于海拔较低的山谷, 观测站点的空间代表性还值得商榷^[42-43]。因此, 仅以目前数量和分布的站点观测作为参考真值, 还不足以很好地描绘青藏高原的积雪分布形态, 也不能在青藏高原给出一个十分可信的评估结果。虽然AMSR-E在青藏高原的雪深数据与站点数据的误差在5个数据中最小, 但AMSR-E在青藏高原的雪深反演结果及雪深分布却并不理想。通过MODIS积雪覆盖率数据及站点数据, 多项研究表明AMSR-E在青藏高原的反演结果存在总体的高估以及较大的不确定性^[14, 44-45]。

从全国范围看, AMSR-E的综合排名是最靠前的, WESTDC和MERRA2紧随其后, ERA-Interim相对靠后, 而GlobSnow在我国西北积雪区和东北积雪区的表现也不太理想。因此, 认为更适合我国雪深研究的数据是AMSR-E、WESTDC和MERRA2。

尽管AMSR-E在全国的BIAS和RMSE排名是最靠前的, 但它的优势地区主要在积雪较浅的中部及东南地区, 这些地区的站点较多, 因此对全国的排名也有很大的贡献。而在我国的三大积雪区, 特别是东北, AMSR-E的高估十分明显。同样, 如果用AMSR-E进行逐日的积雪变化分析, 还需要考虑AMSR-E在55° N以南数据间隙的问题。WESTDC在我国的西北积雪区和东北积雪区都有很好的表现, 因为比较适合我国北方积雪的研究。MERRA2在西北与东北积雪区也有很好的表现, 但

MERRA2在整个中国并没有很多细节信息(图1(e))。如果用于小区域的雪深分析,势必会缺失很多细节信息,因此认为比较适合区域的统计分析。

5 结 语

本研究采用中国国家气象局的893个站点雪深数据作为参考真值,对3种遥感数据(AMSR-E、WESTDC和GlobSnow)和2种再分析资料(ERA-Interim和MERRA2)在2003~2011年中国地区的平均偏差及均方根误差进行了空间上的对比与相对表现的排序。研究旨在对多源雪深数据在中国的空间特性有更好的理解,同时为中国地区雪深研究的数据源选择上提供一些参考信息。研究的主要结论如下:

(1)5种数据在不同区域的雪深空间分布及雪深数值有明显差异。AMSR-E显示出青藏高原积雪区的积雪主要分布于山脉附近,WESTDC和ERA-Interim则表现为高原东南部的念青唐古拉山脉附近有最大雪深值,高原腹地雪深较小。各数据在西北积雪区的雪深分布有相对较好的一致性。东北积雪区的差异则主要来自各数据在东北最北部的最大雪深数值,其中,ERA-Interim在该处的雪深值远高于其他数据,最大平均雪深超过40 cm。

(2)结合5种数据的误差空间分布及误差排序结果,得到了各数据在中国不同区域的表现。在青藏高原,AMSR-E与站点观测有最小的误差,MERRA2其次。WESTDC和ERA-Interim在高原东部有一定高估。在西北和东北积雪区,WESTDC和MERRA2分别有最好的BIAS排名和最好的RMSE排名。GlobSnow在新疆北部的山区误差较大。AMSR-E和ERA-Interim在东北最北部都有严重高估。AMSR-E在除三大积雪区的我国中部及东南等积雪较浅的地区表现最好。

(3)基于以上评估,认为5种数据中更适用于中国地区雪深研究的是AMSR-E、WESTDC和MERRA2,其中AMSR-E更加适合对中部及东南地区的瞬时积雪为主的积雪研究,WESTDC比较适合北方雪深的研究,MERRA2更适合大区域上的统计分析。此外,由于站点数据在青藏高原严重不足且分布不均,认为现有的站点数据及误差结果并不足以说明在各数据在青藏高原的适用性。

参考文献(References):

- [1] 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(1): 107-117.
- [2] Armstrong R L, Brun E. *Snow and Climate: Physical Processes, Surface Energy Exchange and Modeling*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [3] Xiao L, Che T, Chen L, *et al.* Quantifying Snow Albedo Radiative Forcing and Its Feedback during 2003-2016[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(9):883. doi:10.3390/rs9090883.
- [4] Stone R S, Dutton E G, Harris J M, *et al.* Earlier Spring Snowmelt in Northern Alaska as an Indicator of Climate Change[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107(D10): ACL 10-1-ACL 10-13.
- [5] Chang T C, Gloersen P, Schmugge T, *et al.* Microwave Emission from Snow and Glacier Ice[J]. *Journal of Glaciology*, 1976, 16(74): 23-39.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Li Xiaolan, Zhang Feimin, Wang Chenghai. Comparison and Analysis of Snow Depth Over China, Observed and Derived from Remote Sensing[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(4):755-764.[李小兰, 张飞民, 王澄海. 中国地区地面观测积雪深度和遥感雪深资料的对比分析[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(4): 755-764.]
- [9] Zhang Jiahua, Wu Yang, Yao Fengmei. Study on the Snow Distribution and Influencing Factors in Northern Tibet based on Remote Sensing Information[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(4): 1013-1021.[张佳华, 吴杨, 姚凤梅. 卫星遥感藏北积雪分布及影响因子分析[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(4):1013-1021.]
- [10] He Liye, Li Dongliang. Classification of Snow Cover Days and Comparing with Satellite Remote Sensing Data in West China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(2): 237-245.[何丽烨, 李栋梁. 中国西部积雪日数类型划分及与卫星遥感结果的比较[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(2): 237-245.]
- [11] Rutter N, Essery R, Pomeroy J, *et al.* Evaluation of Forest Snow Processes Models (SnowMIP2) [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009, 4(D6): D06111. doi: 10.1029/2008JD011063
- [12] Mudryk L R, Derksen C, Kushner P J, *et al.* Characterization of Northern Hemisphere Snow Water Equivalent Datasets, 1981~2010[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(20): 8037-8051.
- [13] Dai L, Che T, Xie H, *et al.* Estimation of Snow Depth over

- the Qinghai-Tibetan Plateau Based on AMSR-E and MODIS Data[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(12): 1989. doi: 10.3390/rs10121989.
- [14] Dai L, Che T, Ding Y, *et al.* Evaluation of Snow Cover and Snow Depth on the Qinghai-Tibetan Plateau Derived from Passive Microwave Remote Sensing [J]. *The Cryosphere*, 2017, 11(4): 1933-1933.
- [15] Yin X, Shi J, Du J, *et al.* Evaluating Snow Depth in Western China based on Passive Microwave Remote Sensing [C] // IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, IGARSS 2009, July 12-17, 2009, University of Cape Town, Cape Town, South Africa, Proceedings, 2009.
- [16] 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): 14-29.
- [17] Zhang R, Liang T, Feng Q, *et al.* Evaluation and Adjustment of the AMSR2 Snow Depth Algorithm for the Northern Xinjiang Region, China[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016(99): 1-12.
- [18] Liu Hao, Song Haiqing, Zhang Chao, *et al.* Preliminary Evaluation of ERA-Interim/Land Snow Depth Dataset over Inner Mongolia[J]. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 2017(2): 50-53. [刘昊, 宋海清, 张超, 等. ERA-Interim/Land 积雪资料在内蒙古的初步评估[J]. *内蒙古科技与经济*, 2017(2): 50-53.]
- [19] Wang Fei, Zhu Zhongyuan, Hao Xiangyun, *et al.* Applicability Evaluation of Snow Depth Reanalysis Data in Xilinhot and its Surrounding Areas[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2019, 40(2): 76-85. [王飞, 朱仲元, 郝祥云, 等. 雪深再分析资料在锡林浩特地区的适用性评价[J]. *中国农业气象*, 2019, 40(2): 76-85.]
- [20] Che T, Dai L, Zheng X, *et al.* Estimation of Snow Depth from Passive Microwave Brightness Temperature Data in Forest Regions of Northeast China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 183: 334-349.
- [21] Zheng Lei, Zhang Tingjun, Che Tao, *et al.* Evaluation of Snow Depth Products Derived from Passive Microwave Satellite Remote Sensing Data Using Ground-based Snow Measurements[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(3): 413-423. [郑雷, 张廷军, 车涛, 等. 利用实测资料评估被动微波遥感雪深算法[J]. *遥感技术与应用*, 2015, 30(3): 413-423.]
- [22] Wu Lili, Li Xiaofeng, Zhao Kai, *et al.* The Space-time Analysis and Validation of Snow Depth Inversion Algorithm of Passive Microwave in Northeast China[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(3): 565-572. [武黎黎, 李晓峰, 赵凯, 等. 被动微波雪深反演算法在东北地区的时空分析与验证[J]. *遥感技术与应用*, 2015, 30(3): 565-572.]
- [23] Che Tao, Li Xin. Retrieval of Snow Depth in China by Passive Microwave Remote Sensing Data and Its Accuracy Assessment[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2004, 19(5): 301-306. [车涛, 李新. 利用被动微波遥感数据反演我国积雪深度及其精度评价[J]. *遥感技术与应用*, 2004, 19(5): 301-306.]
- [24] Qiao D, Li Z, Wang N, *et al.* Validation of the Daily Passive Microwave Snow Depth Products over Northern China[J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018: 1401-1407.
- [25] Dewey K F, Heim J R. A Digital Archive of Northern Hemisphere Snow Cover, November 1966 Through December 1980 [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1982, 63(10): 1132-1141.
- [26] Kelly R. The AMSR-E Snow Depth Algorithm: Description and Initial Results[J]. *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, 2009, 29(1): 307-317.
- [27] 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.
- [28] Mao Kebiao, Qin Zhihao, Li Manchun, *et al.* Introduction of Passive Microwave-AMSR-E and Their Research and Application Fields [J]. *Remote Sensing Information*, 2005, (3): 63-65. [毛克彪, 覃志豪, 李满春, 等. AMSR 被动微波数据介绍及主要应用研究领域分析[J]. *遥感信息*, 2005, (3): 63-65.]
- [29] Dai L, Che T, Ding Y. Inter-calibrating SMMR, SSM/I and SSMI/S Data to Improve the Consistency of Snow-Depth Products in China[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(6): 7212-7230.
- [30] Che T, Li X, Jin R. *et al.* Snow Depth Derived from Passive Microwave Remote-sensing Data in China[J]. *Annals of Glaciology*, 2008, 49: 145-154.
- [31] Takala M, Luoju 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.
- [32] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, *et al.* The ERA-Interim Reanalysis: Configuration and Performance of the Data Assimilation System[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137(656): 553-597.
- [33] Dutra E, Balsamo G, Viterbo P, *et al.* An Improved Snow Scheme for the ECMWF Land Surface Model: Description and Offline Validation [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(4): 899-916.
- [34] Balsamo G, Albergel C, Beljaars A, *et al.* ERA-Interim/Land: A Global Land Surface Reanalysis Data Set [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19(1): 389-407.
- [35] Gelaro R, McCarty W, Suárez M J, *et al.* The Modern-era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(14): 5419-5454.
- [36] Koster R D, Suarez M J, Ducharme A, *et al.* A Catchment-based Approach to Modeling Land Surface Processes in a General Circulation Model: 1. Model Structure [J]. *Journal of*

- Geophysical Research: Atmospheres, 2000, 105 (D20) : 24809-24822.
- [37] Ducharne A, Koster R D, Suarez M J, *et al.* A Catchment-based Approach to Modeling Land Surface Processes in a General Circulation Model: 2. Parameter Estimation and Model Demonstration [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2000, 105(D20): 24823-24838.
- [38] Stieglitz M, Ducharne A, Koster R, *et al.* The Impact of Detailed Snow Physics on the Simulation of Snow Cover and Subsurface Thermodynamics at Continental Scales [J]. Journal of Hydrometeorology, 2001, 2(3): 228-242.
- [39] Reichle R H, Liu Q, Koster R D, *et al.* Land Surface Precipitation in MERRA-2 [J]. Journal of Climate, 2016, 30(5): 1643-1664.
- [40] Li Z, Liu J, Huang L, *et al.* Snow Mass Decrease in the Northern Hemisphere (1979/80-2010/11) [J]. Cryosphere Discussions, 2014, 8(6): 5623-5644.
- [41] Liu Pengfei, Liu Dandan, Liang Feng, *et al.* Comparison the Adaptability of CFSR, MERRA, NCEP Reanalysis Precipitation Data and Observation in Northeast China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(4): 215-221. [刘鹏飞, 刘丹丹, 梁丰, 等. 三套再分析降水资料在东北地区的适用性评价 [J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 215-221.]
- [42] Li Peiji, Mi Desheng. Distribution of Snow Cover in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1983, 5(4): 9-18. [李培基, 米德生. 中国积雪的分布 [J]. 冰川冻土, 1983, 5(4): 9-18.]
- [43] Ma Lijuan, Qin Dahe. Spatial-temporal Characteristics of Observed Key Parameters for Snow Cover in China during 1957~2009 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(1): 1-11. [马丽娟, 秦大河. 1957~2009年中国台站观测的关键积雪参数时空变化特征 [J]. 冰川冻土, 2012, 34(1): 1-11.]
- [44] Yang J, Jiang L, Ménard C B, *et al.* Evaluation of Snow Products Over the Tibetan Plateau [J]. Hydrological Processes, 2015, 29(15): 3247-3260.
- [45] Savoie M H, Armstrong R L, Brodzik M J, *et al.* Atmospheric Corrections for Improved Satellite Passive Microwave Snow Cover Retrievals over the Tibet Plateau [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(12): 2661-2669.

Evaluation on the Spatial Characteristics of Multiple Snow Depth Datasets over China

Xiao Lin^{1,2,3}, Che Tao^{1,3}, Dai Liyun^{1,3}

(1. 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. Heihe Remote Sensing Experimental Research Station, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Snow cover is of great significance to both global water balance and the climate system, due to its significant variability, as well as snow albedo feedback. Current grid snow depth datasets of long time series are mainly derived from passive microwave remote sensing and reanalysis, but apparent inconsistencies exist among them. Nevertheless, the assessment on multi-source snow depth datasets is still inadequate, especially assessment on their spatial characteristics. Therefore, 5 snow depth datasets, including AMSR-E, WESTDC, Glob-Snow, ERA-Interim and MERRA2, were evaluated against ground observations on their spatial uncertainties and relative performances. Preliminary results were: (1) Due to the fine performances at northwest and northeast part of China, WESTDC is quite suitable in snow depth study over northern China; (2) MERRA2 shows general good performances in northwest and northeast part of China, while it lacks of detailed information due to the coarse resolution, it is recommended to conduct statistical analysis over large regions. (3) AMSR-E performs best in middle to southeast part of China, which makes it a good choice in snow depth analysis over mid-southeast part of China.

Key words: Remote sensing datasets; Reanalysis; Snow depth datasets; Evaluation; China