

多源数据融合计算积雪覆盖数据集—— 以美国西北部试验区为例

高 杨^{1*}, 董怀伟^{1,2}

1. 中国科学院青藏高原研究所环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 山东科技大学测绘与空间信息学院, 青岛 266590

摘 要: 全面准确地认识积雪动态变化, 对制定积雪变化应对措施, 合理的进行持续变暖下区域水资源管理, 加深全球气候变化科学认识等具有重要意义。作者基于 MODIS 最新版本的 NDSI 数据、IMS 雪冰数据和 192 个 SNOTEL 站点地面积雪观测数据, 依据美国西北部积雪特征确定了适于该区域的 NDSI 积雪判识阈值, 针对各数据在不同时间段的积雪判识性能制定了不同的融合规则, 提出了多源数据融合算法, 得到多源数据融合计算积雪覆盖数据集——以美国西北部试验区 (2000–2020) 为例。验证结果表明, 该融合算法得到的数据不仅较源数据精度有所改善、积雪判识综合性能提高。数据集包括: (1) 试验区边界数据; (2) 试验区 2000–2020 年每天的积雪覆盖数据 (空间分辨率为 500 m)。另附雪深验证点数据。数据集存储格式为.tif、.shp、.xlsx 和.txt, 共由 7,688 个数据文件组成, 数据量为 170 GB (压缩为 1 个文件, 421 MB)。

关键词: 积雪覆盖; 多源数据; 日频率; 2000–2020; 美国西北部

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.02.15>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.02.15>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2022.02.08.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.02.08.V1>.

1 前言

全球 98% 的积雪分布于北半球, 北半球陆表冬季最大积雪范围约 $4.7 \times 10^7 \text{ km}^2$ ^[1], 约占北半球陆地面积的 50%^[2]。北半球积雪主要分布在北极和高纬度地区, 地中海附近的阿尔卑斯山脉^[3]、美国西北部山区^[4]和中国的东北^[5]、北疆^[6]等地区也存在着大量季节性积雪^[7,8]。美国西北部试验区范围为 105°W – 140°W , 40°N – 50°N , 海拔 600–3,100 m。美国西北部低海拔以农作物和草地为主, 中海拔以灌木和草地为主, 高海拔以森林为主。以科迪勒拉山脉和落基山脉为主的高海拔地区的积雪是华盛顿州、俄勒冈州、爱达荷州、内达华州、犹

收稿日期: 2022-03-09; 修订日期: 2022-05-29; 出版日期: 2022-06-25

基金项目: 中华人民共和国科学技术部 (2017YFA0603303); 国家自然科学基金 (42171136)

*通讯作者: 高杨 AFX-6602-2022, 中国科学院青藏高原研究所, yanggao@itpcas.ac.cn

数据引用方式: [1] 高杨, 董怀伟. 多源数据融合计算积雪覆盖数据集——以美国西北部试验区为例[J]. 全球变化数据学报. 2022, 6(2): 280–289. <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.02.15>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.02.15>.

[2] 高杨, 董怀伟. 多源数据融合计算积雪覆盖数据集——以美国西北部试验区为例 (2000–2020) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2022. <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.02.08.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.02.08.V1>.

他州、怀俄明州、蒙大拿州的主要淡水来源之一^[9]。持续的升温限制了冬季季节性积雪的数量,美国西北部低雪无雪山地到本世纪下半叶将会更加普遍^[10]。因此,美国西北部积雪数据的积累和研究对当地水资源管理具有重要的现实意义,对于同纬度青藏高原地区积雪的对比研究具有重要科学意义。

积雪观测方法主要有地面实测和遥感观测两类。地面实测可获得准确且精度高的数据,而遥感观测可获得更大范围、更全面的积雪信息^[11]。光学和微波是积雪遥感观测中最常用的波段。光学遥感观测获得的积雪数据分辨率较高,但受云遮挡的区域比较难以获得地表信息。微波遥感观测获得的数据可实现全天候观测,但空间分辨率较低^[12]。基于数据性能的多源数据融合已成为整合各数据优点,获得全覆盖高精度积雪数据的有效方法^[13-16]。IMS 雪冰数据(the interactive multisensory snow and ice mapping system)是目前最常用的积雪融合数据之一^[17]。已有研究表明美国西北部 IMS 雪冰数据的精度低于中分辨率成像光谱仪 MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)积雪数据^[18]。本研究依据 IMS 雪冰数据在不同时间段的空间分辨率,分三个阶段对比分析了 MODIS 和 IMS 积雪数据的特征和精度,针对各数据在不同时间段的积雪判识性能制定了不同的融合规则,提出了多源数据融合算法,得到多源数据融合计算积雪覆盖数据集——以美国西北部试验区为例。

2 数据集元数据简介

《多源数据融合计算积雪覆盖数据集——以美国西北部试验区为例(2000–2020)》^[19]的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表1。

3 数据研发方法

3.1 数据源

本数据集的研发使用了遥感和地面实测两类数据。遥感数据包含 Terra MODIS、Aqua MODIS 积雪数据和 IMS 雪冰数据。使用了2000年1月1日至2020年12月31日的MOD数据集版本六(MODIS/Terra Snow Cover 8-Day L3 Global 500m SIN Grid,简称MOD)和2002年5月4日至2020年12月31日的MYD数据集版本6(MODIS/Aqua Snow Cover Daily L3 Global 500m SIN Grid,简称MYD)^[21,22]。与版本5仅提供“雪”“无雪”二值图不同,版本6积雪数据集提供了归一化积雪指数NDSI(Normalized Difference Snow Index)和一系列代表数据质量的参数^[23,24]。使用者可根据不同区域的积雪特征设置更适合该区域的判识阈值,从而获得更准确的积雪数据。MODIS NDSI数据的空间分辨率均为500 m,时间分辨率为1 d。数据获取时间分别为卫星过境时间上午10点30分和下午1点30分。两种数据的一致性夏季在10%左右,冬季在30%左右,最高可达62%^[25]。

IMS 雪冰数据是美国国家雪冰数据中心发布的北半球积雪和海冰数据集,该数据集包括来自美国海洋和大气管理局的极低轨道卫星、地球静止轨道环境卫星、日本同步气象卫星、美国国防部极地卫星、日本多功能卫星、欧洲同步气象卫星等多个卫星的数据,同时融合了欧洲各国、日本、中国、韩国、加拿大以及美国的多种雷达监测结果和多个

国家的观测站数据^[26]。数据集在 2000 年 1 月 1 日至 2004 年 2 月 23 日, 2004 年 2 月 24 日至 2014 年 12 月 2 日和 2014 年 12 月 2 日之后的空间分辨率分别为 24、4 和 1 km, 时间分辨率为 1 d^[27]。

表 1 《多源数据融合计算积雪覆盖数据集——以美国西北部试验区为例(2000–2020)》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	多源数据融合计算积雪覆盖数据集——以美国西北部试验区为例(2000–2020)
数据集短名	SnowCoverTest_2000-2020
作者信息	高杨 AFX-6602-2022, 中国科学院青藏高原研究所, yanggao@itpcas.ac.cn 董怀伟, 山东科技大学, donghw@itpcas.ac.cn
地理区域	美国西北部
数据年代	2000–2020
时间分辨率	1 d
空间分辨率	500 m
数据格式	.tif、.shp、.xlsx、.txt
数据量	170 GB (压缩为 1 个文件, 共 421 MB)
数据集组成	试验区边界数据、积雪覆盖数据、雪深验证点数据
基金项目	中华人民共和国科学技术部(2017YFA0603303); 国家自然科学基金(42171136)
数据计算环境	Python
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据(中英文)、通过《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》发表的实体数据集和通过《全球变化数据学报(中英文)》发表的数据论文。其共享政策如下:(1)“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放, 用户免费浏览、免费下载;(2)最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源;(3)增值服务用户或以任何形式散发和传播(包括通过计算机服务器)“数据”的用户需要与《全球变化数据学报(中英文)》编辑部签署书面协议, 获得许可;(4)摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10%引用原则, 即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%, 同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[20]

数据和论文检索系统 DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS

地面实测数据为美国国家资源保护局遥测站点 SNOTEL (Snow Telemetry) 的 2001–2003、2009–2011、2016–2018 积雪年(积雪年定义为从第一年 9 月 1 日到次年 8 月 31 日, 例如 2001 积雪年为 2000 年 9 月 1 日到 2001 年 8 月 31 日)的雪深观测数据^{[1][28]}。经过对观测时间短、观测时间不连续站点的筛减, 我们选择了美国西北部 192 个站点。这些站点多分布在科迪勒拉山脉和落基山脉, 海拔高度从 650 m 到 3,031 m, 其中位于 1,000 m 至 3,000 m 的站点个数占 72.4%, 覆盖了研究区的各个海拔和重点海拔区间, 为评估各种地理背景下积雪数据的融合和改进提供了条件。因而, 这些站点的观测值可作为“真值”对原始遥感数据和改进后的融合数据进行精度评估和结果检验。

3.2 数据判识与融合方法

本研究的目的是综合利用 MODIS 积雪数据和 IMS 雪冰数据的有效信息, 获得一套分

¹ <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/wcc/>.

分辨率更高、积雪判识准确度更高、积雪漏判更少的新数据集。数据的处理主要包括三个部分：第一部分是依据美国西北部试验区积雪特征确定适合该区的 NDSI 积雪判识阈值，生成 MODIS 积雪二值数据集；第二部分是两种 MODIS 积雪数据集的融合，利用 MYD 中的信息弥补 MOD 中云覆盖的区域，生成 MODIS 融合数据集 MOYD；第三部分是依据各数据在三个不同时段积雪评价结果，制定和采用相应的融合策略，将 MODIS 融合数据与 IMS 雪冰数据进行再融合，生成新的多源数据融合积雪覆盖数据集。数据研制的具体流程如图 1 所示。

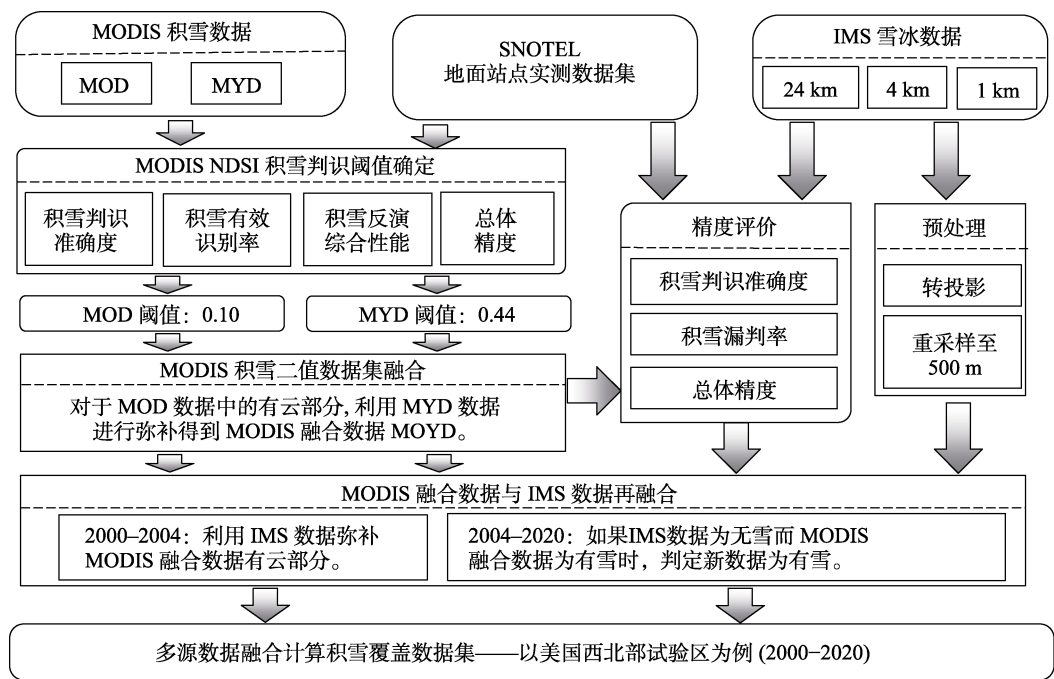


图 1 积雪数据研制流程图

MODIS 数据 NDSI 积雪判识阈值的确定采用了“分步迭代试验法”，NDSI 阈值以 0.01 为步长在 0–1 之间进行 99 次迭代^[29]。每一个阈值下的积雪判识结果都以地面实测数据为“真值”，计算积雪判识准确度、积雪有效识别率、积雪反演综合性能和总体精度^[6]。通过对比分析这些参数来确定 MODIS 两种数据的积雪判识最佳阈值。积雪判识准确度定义为遥感数据判识正确的积雪样本数与遥感数据所有判识为“有雪”的样本数的比值，代表该遥感数据积雪判识正确的比例。积雪有效识别率定义为产品判识正确的积雪样本数与实测“有雪”样本数的比值，代表产品识别到的积雪在所有积雪中的百分比。积雪反演综合性能定义为积雪判识准确度与积雪有效识别率的乘积。该值越大说明判识得到的积雪的可信度越高，判识到的积雪越多，用于评判数据积雪反演的综合表现。总体精度定义为分类正确的样本数与总样本数的比值，表示数据中“有雪”和“无雪”两种类别的整体判识准确度。

分析结果表明，当 NDSI 阈值为 0.10 和 0.15 时，美国西北部试验区 MOD 和 MYD 积雪数据具有最好的积雪反演综合性能，分别为 78.3% 和 67.9%。MYD 数据的积雪判识准确

度为 87.1%，比 MOD 数据的积雪判识准确度 92.6% 低 5.5%。为了确保这两种数据的融合数据集的积雪判识准确度保持在较高的水平，将 MYD 的 NDSI 阈值重新设定为 0.44，这时 MYD 的积雪判识准确度与 MOD 数据相当（94.7%）。因此，设定 0.10 和 0.44 分别为美国西北部 MOD 和 MYD 的 NDSI 判识阈值。当 NDSI 大于等于该值时判识为“有雪”，当 NDSI 小于该值时判识为“无雪”。两种数据融合时，以准确度高的 MOD 数据作为最高优先级的输入数据。对于 MOD 数据中有云的部分，利用 MYD 数据进行弥补，得到 MODIS 融合数据 MOYD。

IMS 雪冰数据具有三种不同的空间分辨率，分别为 24、4 和 1 km。针对不同空间分辨率的数据，分别选取了 2000 年 9 月 1 日至 2003 年 8 月 31 日、2008 年 9 月 1 日至 2011 年 8 月 31 日和 2015 年 9 月 1 日至 2018 年 8 月 31 日三个时间段的数据，利用积雪判识准确度、积雪漏判率和总体精度三个指标对 MODIS 和 IMS 数据进行对比分析。积雪判识准确度和总体精度的定义与前文一致，积雪漏判率定义为遥感数据将“有雪”误判为“无雪”的样本数量与站点“有雪”样本数量的比值，表示被遥感数据漏判的积雪比例。分析结果表明，第一个阶段 IMS 空间分辨率为 24 km 时，积雪判识准确度略低于 MODIS 融合数据，同时其积雪漏判率远高于 MODIS 数据，因此，在进行下一步融合时，MODIS 融合数据应具有最高的优先级，数据融合规则定义为利用 IMS 数据弥补 MODIS 融合数据的有云部分；第二个阶段 IMS 空间分辨率为 4 km 时，积雪判识准确度高于 MODIS 融合数据，但其积雪漏判率仍高于 MODIS 数据，因此数据融合规则定义为如果 IMS 数据为“无雪”而 MODIS 融合数据为“有雪”时，判定新数据为“有雪”，其他部分不变；第三个阶段 IMS 数据空间分辨率为 1 km 时，积雪判识准确度高于 MODIS 融合数据，积雪漏判率低于 MODIS 数据，但其总体精度较低且仍有较高的积雪漏判存在，因此，为了进一步减少积雪漏判，数据融合规则与第二个阶段一致。

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

本数据集包括 7,688 个数据文件，时间阶段为 2000–2020，时间分辨率为 d，空间分辨率为 500 m。栅格文件为积雪二值数据，其中 1 代表“有雪”，0 代表“无雪”。数据量为 170 GB，压缩为 1 个文件，压缩后共计 421 MB。

4.2 数据结果

美国西北部试验区积雪在不同地区具有不同的分布特征（图 2）。西部沿海地区基本无雪。西经 122° 附近的科迪勒拉山脉随着海拔的升高积雪增多，2,000 m 以上年积雪覆盖日数在 120 d 以上，且该山脉海拔 3,000 m 以上的区域存在着常年积雪，年积雪覆盖日数在 330 d 以上。西经 115° 到 105° 的落基山脉 1500 m 以上的大部分区域积雪日数大于 180 d。而两大山脉之间的低海拔区域积雪日数则较短，通常少于 60 d。

图 3 可反映出美国西北部试验区积雪显著的年内变化过程。从 9 月开始高海拔地区开始有 1–2 d 的零星积雪，10 月高海拔地区的积雪覆盖日数增长到 6–10 d，11 月较大面积出现 6–10 d 的积雪，12 月更大范围被积雪覆盖，且高海拔地区积雪覆盖日数增加到 20 d 以

上。1 月和 2 月海拔大于 1,000 m 的大部分区域在这一阶段持续被积雪覆盖。3 月开始低海

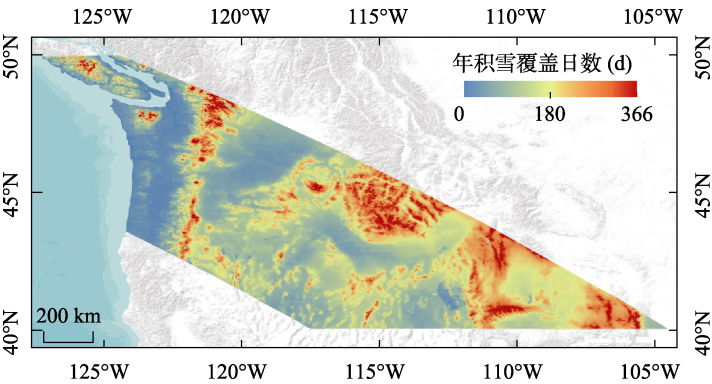


图 2 美国西北部试验区平均年积雪覆盖日数图

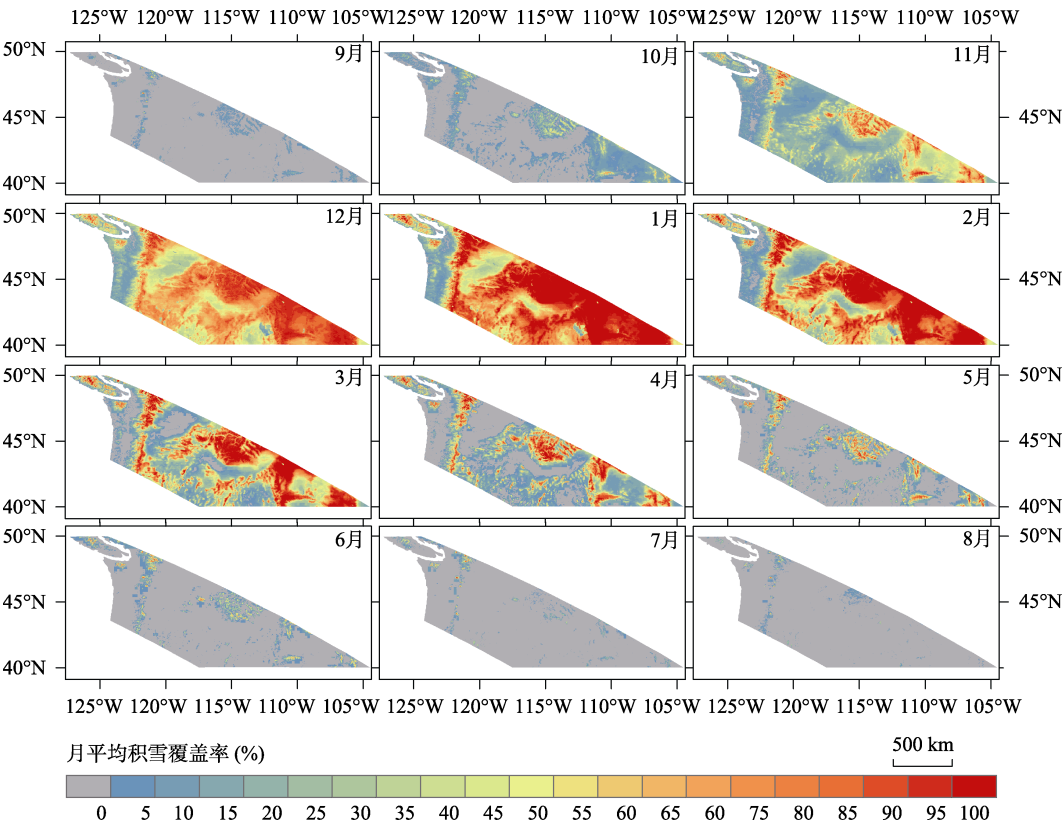


图 3 美国西北部试验区月平均积雪覆盖率对比图

拔区域 (<1,000 m) 积雪最先融化, 4 月中海拔区域 (1,000–2,000 m) 积雪融化, 5 月除高于 2,000 m 以上有零星积雪外, 其他区域的积雪基本全部融化, 6 月之后, 除科迪勒拉山脉北部顶端还有少量积雪外, 其他区域积雪消失殆尽。区内科迪勒拉山脉是南北走向的山脉, 通过 11 月和 5 月的数据可发现该山脉纬度较高的北部区域积雪开始的时间早而结束的时间晚。同样, 通过同纬度同海拔积雪年内变化对比, 可发现距离海洋相对较远的落基山脉积

雪开始的时间更早而积雪结束的时间更晚。

2000–2020 年美国西北部试验区内不同海拔区间月积雪日数都呈现下降的趋势(图 4)。月积雪日数 ($\text{d}\cdot\text{km}^{-2}$) 为区域内每平方公里的平均月积雪日数。按海拔将该区分为 $<1,000$ 、 $1,000\text{--}2,000$ 、 $2,000\text{--}3,000$ 和 $>3,000$ m 四个海拔区间,面积分别为 1.6×10^5 、 2.8×10^5 、 1.0×10^5 和 0.6×10^5 km^2 。无论处于那个海拔区间,美国西北部试验区月积雪日数的季节性波动都非常明显。6 月到 9 月基本无雪,12 月到 3 月积雪较多,一般在 1 月达到峰值。四个区间 1 月积雪日数分别为 41、86、110、111 $\text{d}\cdot\text{km}^{-2}$ 。 $<1,000$ m 区域的年际波动最明显, $1,000\text{--}2,000$ m 区间出现了 5 个积雪低值年,但 $>2,000$ m 的区域除 2019 和 2020 年出现积雪低值外,其他年份的波动较小。

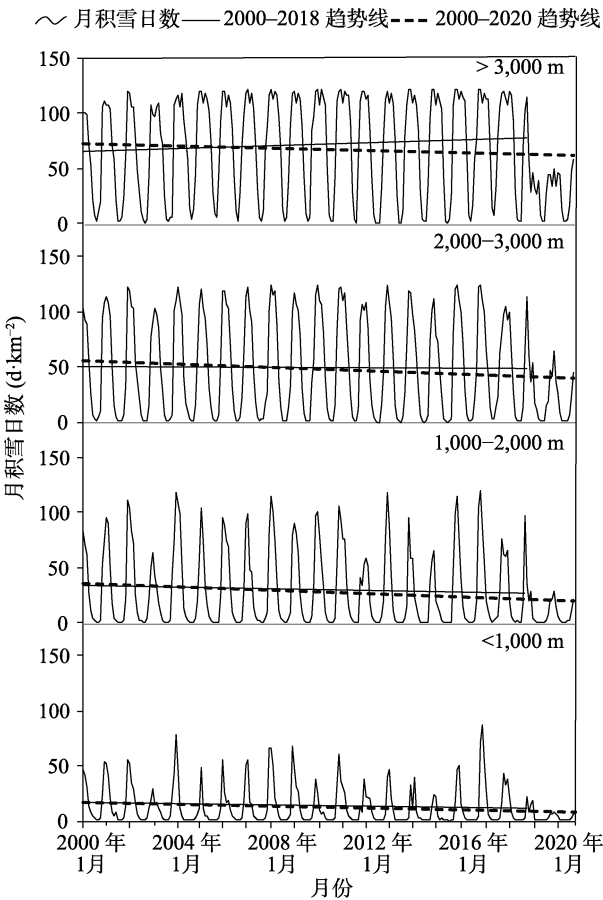


图 4 2000–2020 年美国西北部试验区不同海拔区间月积雪日数变化对比图

2000–2020 年四个海拔区间月积雪变化趋势分别为 -0.45 、 -0.73 、 -0.74 和 -0.54 $\text{d}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$ 。这些减少的趋势明显受到了 2019 和 2020 年的积雪低值影响。因此,重新计算了 2000–2018 年积雪变化趋势,用于表示该区长时间序列的积雪波动。2000–2018 年四个海拔区间月积雪日数变化趋势分别为 -0.29 、 -0.30 、 -0.04 、 0.66 $\text{d}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$ 。19 年间美国西北部 $<1,000$ 、 $1,000\text{--}2,000$ 、 $2,000\text{--}3,000$ m 区域月积雪日数分别减少了 5.5、5.7、

0.7 d·km⁻²，但>3,000 m 区域月积雪日数增加了 12.5 d·km⁻²。可见，本世纪以来美国西北部试验区小于 2,000 m 区域的积雪呈减少趋势，2,000–3,000 m 区域积雪基本保持不变，而大于 3,000 m 区域积雪呈较明显的增加趋势。

4.3 数据结果验证

利用 192 个 SNOTEL 站点地面实测积雪数据对 MODIS、IMS 原始积雪数据和两次融合后的积雪数据进行精度评价和结果验证（图 5）。验证结果表明无论是原始数据还是融合数据，所有数据都保持了较高的积雪判识准确度（90%以上）。第一次 MODIS 两种数据融合以去除云覆盖、增加可判识区域为目的。融合后的积雪数据较 MOD 原始数据，积雪判识准确度有微弱的下降（0.4%–0.5%），但其云含量取得了实质性的下降，月平均云含量减少了 6.7%（2.7%–9.1%），天去云效果最高可达 57.8%。且融合后的数据 MOYD 的漏判率仍比 IMS 原始数据的漏判率低。因此，MODIS 两种数据的融合能有效的降低数据的云覆盖，此种方法在美国西北部试验区仍然是可行且高效的。

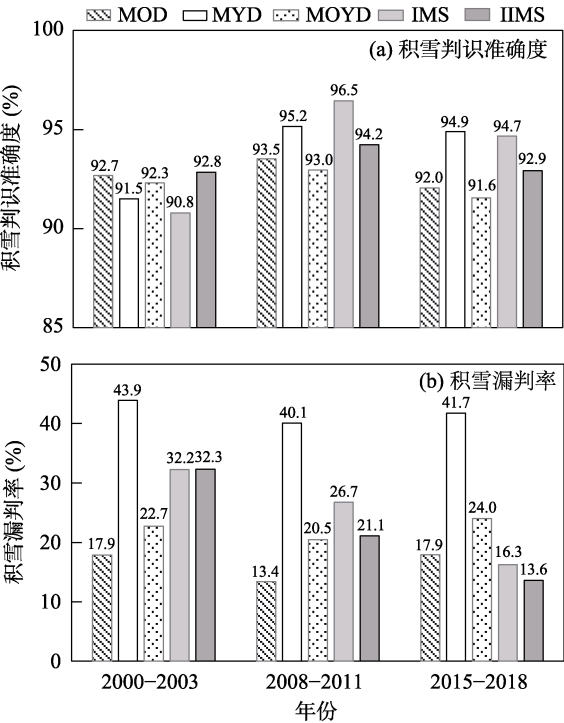


图 5 MODIS 和 IMS 原始数据与融合数据精度评价与结果验证对比图

第二次 MODIS 融合数据与 IMS 数据再融合以提高 IMS 空间分辨率和降低积雪漏判率为目的。数据的融合根据不同时段采用了两种规则。2000–2004 年数据的融合首先将 IMS 数据的空间分辨率从 24 km 提高到 500 m，其次积雪判识准确度也有所提高（增加了 2.0%）。2004–2020 年数据融合将 IMS 数据的空间分辨率分别从 4 km 和 1 km 提高到 500 m，融合结果虽然牺牲了少量的积雪判识准确度（分别减少了 2.3%和 1.8%），但积雪漏判率明显下降（分别下降了 5.6%和 2.7%）。且融合后数据的积雪判识准确度仍处于较高的水平，分别为 94.2%和 92.9%。以上验证结果表明 MODIS 与 IMS 数据的再融合一方面可有效提高数

据的空间分辨率,另一方面在保持较高积雪判识准确度的情况下有效降低了积雪漏判率。多源数据融合计算的新数据集较源数据集相比,综合性能得以提高。

5 讨论和总结

积雪是全球气候系统的重要组成部分,影响地表能源收支,调节温度,增强大气遥感,调控水文系统。全面准确地认识积雪动态变化,不仅对加深认识全球气候变化具有重要的科学意义,而且对制定积雪变化应对措施,合理的进行持续变暖下区域水资源管理具有重要的现实意义。本研究基于 MODIS 最新版本的 NDSI 数据和 IMS 雪冰数据,针对各种数据在不同时间段的特征和积雪判识性能,制定了不同的融合规则对多源数据进行融合,研发了一套多源数据融合计算积雪覆盖数据集(以美国西北部试验区为例)。

本文用于精度评价和结果验证的实测数据来自于 192 个 SNOTEL 站点的日积雪观测数据。这些站点分布在研究区的各个海拔区间,其积雪观测数据能代表该区的积雪特性。经与站点实测积雪数据对比验证,改进的多源数据融合计算的积雪覆盖数据集具有较高的积雪判识准确度和最低的积雪漏判率,且空间分辨率提高到 500 m。同时,该数据能充分反映美国西北部研究区积雪覆盖的年际、年内变化和不同海拔区间的积雪空间分布差异。在去除 2019 和 2020 年两个异常低值年后,2000–2018 年不同海拔区间月积雪日数变化分析表明本世纪以来美国西北部试验区小于 2,000 m 区域的积雪呈减少趋势,2,000–3,000 m 区域积雪基本保持不变,而大于 3,000 m 区域积雪呈增加趋势。

综上,本文研发的基于 MODIS 和 IMS 的多源数据融合计算积雪覆盖数据集,可提供美国西北部试验区内积雪覆盖长时间序列的基础数据,可用于积雪时空分布及变化规律研究。多源数据融合是提高积雪数据综合性能的有效方法之一,为进一步生产全球高分辨率长时间序列积雪覆盖数据集奠定了基础。

作者分工:高杨对数据集的开发做了总体设计,修改了数据论文;董怀伟采集和处理了 MODIS 和 IMS 数据,做了数据验证;所有作者共同撰写了数据论文等。

利益冲突声明:本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

- [1] Brown, R., Derksen, C., Wang, L. Assessment of spring snow cover duration variability over northern Canada from satellite datasets [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 111: 367–381.
- [2] Armstrong, R. L., Brodzik, M. J. Recent northern hemisphere snow extent: a comparison of data derived from visible and microwave satellite sensors [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(19): 3673–3676
- [3] Organization, W. M. IGOS Cryosphere Theme: a Cryosphere Theme Report for the IGOS Partnership [M]. World Meteorological Organization, 2007.
- [4] Abbas, F., Simon, G., Ghaleb, F., et al. Snow hydrology in Mediterranean mountain regions: a review [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 374–396.
- [5] Franz, K. J., Hogue, T. S., Sorooshian, S. Operational snow modeling: addressing the challenges of an energy balance model for National Weather Service forecasts [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 360(1/4): 48–66.
- [6] 仲桂新, 宋开山, 王宗明等. 东北地区 MODIS 和 AMSR-E 积雪产品验证及对比[J]. 冰川冻土, 2010, 32(6): 1262–1269.

- [7] 黄晓东, 张学通, 李霞等. 北疆牧区 MODIS 积雪产品 MOD10A1 和 MOD10A2 的精度分析与评价[J]. 冰川冻土, 2007(5): 722–729.
- [8] 陈仁升, 康尔泗, 吴立宗等. 中国寒区分布探讨[J]. 冰川冻土, 2005(4): 469–475.
- [9] Rasouli, K., Pomeroy, J. W., Whitfield, P. H. Hydrological responses of headwater basins to monthly perturbed climate in the North American Cordillera [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2019, 20(5): 863–882.
- [10] 张廷军, 钟敏玥. 欧亚大陆积雪分布及其类型划分[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 481–490.
- [11] Siirila-Woodburn, E. R., Rhoades, A. M., Hatchett, B. J., et al. A low-to-no snow future and its impacts on water resources in the western United States [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2: 800–819.
- [12] 黄晓东, 李旭冰, 刘畅宇等. 青藏高原积雪范围和雪深/雪水当量遥感反演研究进展及挑战[J]. 冰川冻土, 2019, 41(5): 1138–1149.
- [13] Gao, Y., Lu, N., Yao, T. D. Evaluation of a cloud-gap-filled MODIS daily snow cover product over the Pacific Northwest USA [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 404: 157–165.
- [14] Gao, Y., Xie, H. J., Lu, N., et al. Toward advanced daily cloud-free snow cover and snow water equivalent [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 385: 23–25.
- [15] Li, X. H., Jing, Y. H., Shen, H. F., et al. The recent development in cloud removal approaches of MODIS snow cover product [J]. *Hydrology and Earth system Sciences*, 2019, 23(5): 2401–2416.
- [16] Gao, Y., Xie, H. J., Yao, T. D., et al. Integrated assessment on multi-temporal and multi-sensor combinations for reducing cloud obscuration of MODIS snow cover products of the Pacific Northwest USA [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114: 1662–1675.
- [17] 除多, 扎西顿珠, 次丹玉珍. NOAA IMS 雪冰产品在青藏高原积雪监测中的适用性分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(6): 1659–1672.
- [18] Mazari, N., Ahmet, E., Xie, H. J., et al. Assessment of ice mapping system and moderate resolution imaging spectroradiometer snow cover maps over Colorado Plateau [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2013, 7(1): 1–16.
- [19] 高杨, 董怀伟. 多源数据融合计算积雪覆盖数据集——以美国西北部试验区为例 (2000–2020) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2022. <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.02.08.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.02.08.V1>.
- [20] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新).
- [21] Hall, D. K., Riggs, G. A. MODIS/Terra snow cover daily L3 global 500m Sin grid, Version 61 [D B]. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2021. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD10A1.061>.
- [22] Hall, D. K., Riggs, G. A. MODIS/Aqua snow cover daily L3 Global 500m Sin grid, version 61 [DB]. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2021, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MYD10A1.061>.
- [23] Hall, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V., et al. MODIS snow-cover products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83: 181–194.
- [24] Riggs, G. A., Hall, D. K., Román, M. MODIS snow products user guide for Collection 6(C6) [R/OL]. [2019-07-02]. https://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/uploads/C6_MODIS_Snow_User_Guide.pdf.
- [25] 曾桐瑶. 青藏高原地区积雪物候对气候的响应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [26] 刘洵, 金鑫, 柯长青. 中国稳定积雪区 IMS 雪冰产品精度评价[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 500–507.
- [27] U.S. National Ice Center. IMS daily northern hemisphere snow and ice analysis at 1-km, 4-km, and 24-km resolutions, version 1 [DB]. *National Snow and Ice Data Center*, 2008. <https://doi.org/10.7265/N52R3PMC>.
- [28] USDA Natural Resources Conservation Service. Snowpack: Snow Water Equivalent (SWE) and Snow Depth [DB/OL]. <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/wcc/>.
- [29] Zhang, H. B., Zhang, F., Zhang, G. Q., et al. Ground-based evaluation of MODIS snow cover product V6 across China: implications for the selection [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 2712–2726.