

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0051

CHU Duo, ZHAXI Dunzhu, CIDAN Yuzhen. Analysis on applicability of NOAA IMS snow and ice products in snow cover monitoring over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(6):1659–1672. [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.]

NOAA IMS 雪冰产品在青藏高原积雪监测中的适用性分析

除 多^{1,2}, 扎西顿珠^{1,2}, 次丹玉珍^{1,2}

(1. 青藏高原大气环境科学研究所, 西藏 拉萨 850000; 2. 青藏高原大气环境研究重点实验室, 西藏 拉萨 850000)

摘 要: 在系统评估青藏高原积雪观测典型气象站历史定位坐标精度基础上, 利用站点雪深资料对 NOAA IMS 4 km 和 1 km 分辨率雪冰产品在青藏高原的精度和适用性进行了验证和评估, 定量分析了 IMS 4 km 到 1 km 空间分辨率提高和气象站历史定位与 GPS 定位坐标之间的差异对青藏高原 IMS 积雪监测精度的影响。结果表明: 青藏高原个别气象站历史坐标与当前 GPS 接收机定位之间存在较大的差异, 如安多气象站经度偏小 0.6°, 纬度偏大 0.08°。IMS 4 km 雪冰产品在青藏高原的总精度介于 76.4%~83.2%, 平均为 80.1%, 积雪分类精度介于 35.8%~60.7%, 平均为 47.2%, 平均误判率为 17.1%, 平均漏判率为 45.5%, 总体上呈现地面观测的积雪日数越多、平均雪深越大, 其总体监测精度越低, 而积雪分类精度越高的特点。IMS 分辨率从 4 km 到 1 km 总体精度平均提高了 2.9%, 积雪分类精度平均提高了 0.9%, 主要是由于个别站点的精度提升较大引起的, 对高原多数台站积雪监测精度的改进和提升很小。除个别台站外, 目前气象站历史坐标和 GPS 定位坐标之间的差异, 对 IMS 4 km 积雪监测精度验证结果没有影响。然而, 今后随着卫星遥感技术的发展, 更高时空分辨率的遥感积雪产品将用于积雪监测和研究, 精确的地面观测站坐标信息是对这些遥感数据开展精度验证与实际应用的前提。

关键词: IMS 雪冰产品; 积雪深度; 地面观测; 精度评价; 青藏高原

中图分类号: P468.0⁺25; P407 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)06-1659-14

0 引言

积雪是冰冻圈的重要组成部分和主要存在形式^[1-4], 主要分布在高纬度和高海拔环境中^[5-8]。积雪通过其高反照率特性对辐射平衡的敏感性和积雪融化过程中的能量分配影响全球气候变化^[9-13]。此外, 在世界许多地方, 积雪融水提供了年内绝大多数河流和地下水径流^[14-15], 这一季节性存储的水资源是全球变暖影响下变化最快的水文特征之一, 对经济、生态系统功能和洪水灾害产生广泛的影响^[15-20]。

青藏高原地处北半球中低纬度, 是世界上海拔最高的高原, 平均海拔在 4 000 m 以上, 位于亚洲高

山区的核心区域。积雪是青藏高原季节性变化最大的下垫面, 对区域乃至全球的气候变化具有重要影响^[21-25], 冰雪融水又是高原及其下游地区重要的水资源^[1-2, 23]。同时, 降雪过多和积雪持续时间过长会造成大范围雪灾, 影响农业与畜牧业的发展以及人民群众的生命财产安全, 是青藏高原面临的主要气象灾害之一。因此, 对于积雪和雪灾监测而言, 能否快速、准确地确定积雪范围对于确定雪灾的影响范围与划分灾情等级具有重要意义。

目前, MODIS 是大范围积雪和雪灾监测最为有效的手段, 也是青藏高原积雪业务化监测的主要卫星遥感数据, 但是作为光学遥感, 云的干扰使得对于积雪的实时监测应用存在很大的局限性, 无法发

收稿日期: 2020-05-11; 修订日期: 2020-10-23

基金项目: 科技部国家科技基础资源调查专项(2017FY100501); 国家自然科学基金项目(41561017); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK010312)资助

作者简介: 除多, 正研级高级工程师, 主要从事高原卫星遥感应用研究. E-mail: chu_d22@hotmail.com

挥其在积雪监测中的独特优势^[26-29]。NOAA IMS (Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System) 雪冰产品是多源数据的融合产品,提供逐日无云的北半球积雪覆盖产品,随着更多卫星遥感数据的融合,产品精度和空间分辨率得到了提高,在全球雪冰监测领域应用越来越广泛^[30-31]。Mazari 等^[32]利用地面自动积雪观测数据验证了 IMS 雪冰产品在美国科罗拉多高原的精度,认为在所有天气条件下 IMS 产品的制图精度要高于逐日 Terra 和 Aqua 合成的 MODIS 产品精度。Chen 等^[33]利用地面雪深观测资料对北美地区 IMS 4 km 产品进行了验证,结果表明两者具有很好的一致性。Brubaker 等^[34]发展了基于 MODIS 数据的假设检验方法来确定 IMS 和 MODIS 积雪产品之间的一致性,结果表明 IMS 和 MODIS 积雪产品大约有 80%~90% 的一致性。Frei 等^[35]研究表明,在季节尺度上 IMS 和 MODIS 在北美地区最明显的差异出现在融雪季节。Chen 等^[36]对 2008 年中国南部雪灾期间 IMS 与地面观测对比后发现,IMS 积雪数据比被动微波遥感数据和 MODIS 积雪产品更为精确。

青藏高原积雪遥感监测业务面临的最大问题是如何在多云条件下能够有效地监测到地面积雪。MODIS 逐日积雪产品虽比 IMS 空间分辨率高很多,但是受云的影响严重,图像平均被云覆盖 1/2 以上,在积雪的实时监测中无法发挥其作用。IMS 雪冰产品可以有效弥补多云天气条件下 MODIS 无法监测地面积雪的问题,提升青藏高原积雪的近实时监测精度,但是应用前提是对其精度进行系统评估和分析。刘洵等^[37]、陈爱军等^[38]利用台站雪深观测资料分别对青藏高原 IMS 4 km 和 1 km 雪冰产品精度进行了验证,结果表明两者的总体准确率在 85% 以上,非积雪季超过了 90%,夏季几乎接近 100%,利用 IMS 雪冰产品监测高原积雪范围是可靠的。然而,这些精度评价采用的地面雪深观测数据时间尺度较短,仅为 2 年,且包括了总体精度几乎接近 100% 的非积雪季节。此外,验证中利用了青藏高原绝大多数台站的雪深资料,但是高原多数台站位于东部和南部河谷地区,这些台站积雪日数少,雪深有限。总体的积雪监测精度因这些站点和研究时段包括高原上积雪很少的夏季,而使得最终精度“提高”了很多。青藏高原积雪监测业务缺少积雪季 IMS 4 km 和 1 km 分辨率雪冰产品的定量化精度评价结果。

为此,本文在已有的研究基础上,以积雪日数较多为主要原则,在青藏高原三大积雪日数最长的区域中选取高原内陆中东部和喜马拉雅山脉南坡积雪观测具有代表意义的 17 个气象站进行研究。首先对这些站点的区域代表性和历史地理坐标精度进行了评估,在此基础上利用这些站点地面雪深观测资料分别对 IMS 4 km 和 1 km 分辨率产品在青藏高原积雪监测中的精度进行验证,提出在青藏高原积雪监测中的优势和不足,进而更好地应用于青藏高原近实时的大尺度积雪遥感监测业务。

1 研究区概况

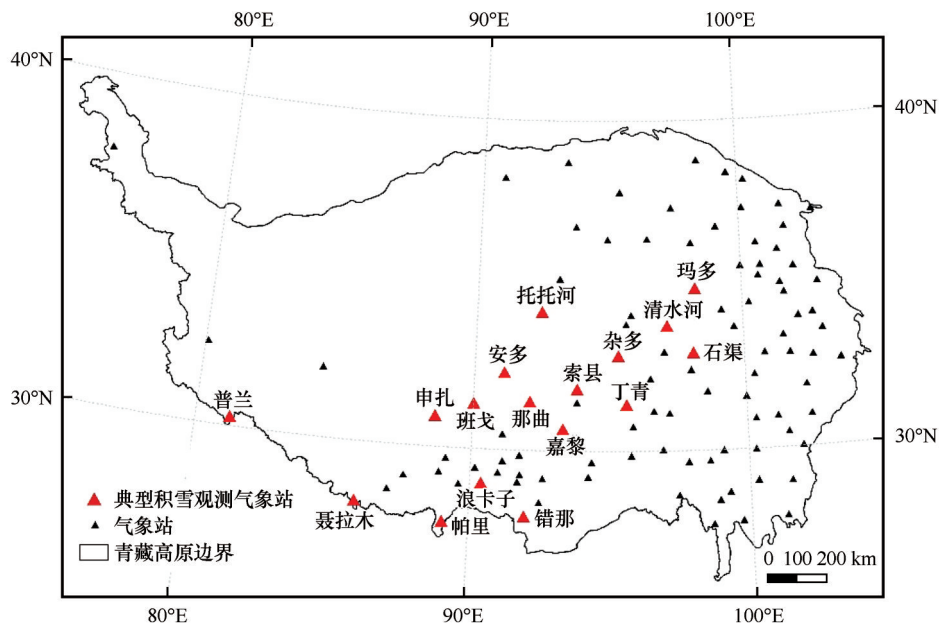
研究区边界采用以自然地貌为主导因素,同时综合考虑海拔、高原面和山地完整性原则确定的青藏高原范围^[39],见图 1。高原主体部分在西藏自治区和青海省,面积为 $257.2 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占我国陆地总面积的 26.8%。

2 数据与方法

2.1 IMS 雪冰产品

IMS 雪冰产品是由美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 下属的国家环境卫星数据信息服务中心 (NESDIS, National Environmental Satellite, Data, and Information Service) 制作,提供北半球逐日无云的积雪覆盖范围^[40]。研发 IMS 雪冰产品的最初目的是为 NOAA 国家环境预报中心 (NCEP, National Centers for Environmental Prediction) 的数值预报模式提供更为可靠的雪冰初始场^[30]。随着更多卫星遥感数据的融合和分辨率的提高,产品精度得到了不断提高,在全球雪冰监测和相关的应急响应及研究中得到越来越广泛的应用。

IMS 融合了静止到极轨的不同卫星遥感数据,包括 NOAA 极轨卫星、地球静止轨道环境卫星 (GOES)、日本 GMS 同步气象卫星、日本 MTSAT 多功能卫星、欧洲同步气象卫星 (METEOSAT)、美国国防部极地轨道卫星 (USDOD polar orbiters) 和美国国防气象卫星计划卫星 (DMSP),以及雷达和地面观测数据等。IMS 还融合了美国国家冰雪中心 (NIC, U. S. National Ice Center) 的每周海冰分析产品和美国空军雪深与雪冰分析产品等^[30-31]。2001 年 2 月起 IMS 雪冰产品融合了 AVHRR 的 3A 波段数据,2004 年 2 月起 MODIS 第 1 波段数据也融合到该产品,分辨率由原来的 24 km 提高到 4 km。从 2014



注:“托托河”也写作“沱沱河”

图1 青藏高原17个代表性积雪观测气象站的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of 17 typical meteorological stations for snow observation on the Tibetan Plateau

年12月2日起,IMS北半球雪冰产品分辨率再次提高到1 km。

IMS制图是以前一天的图作为初始状态,在此基础上分析人员根据输入数据的积雪覆盖范围绘制当天的IMS雪冰产品。算法采用了一系列决策树对积雪和非积雪区进行分类。IMS雪冰产品有别于其他积雪产品的关键特点是根据产品业务运行目的在数据分析过程中引入了人工判识^[40]。

美国国家冰雪数据中心(NSIDC, National Snow and Ice Data Center)提供了1997年至今24 km分辨率和2004年2月至今4 km分辨率ASCII格式IMS雪冰产品。2004年起还增加了在地理信息系统和图像处理软件中应用更加广泛的GeoTIFF格式数据,使更多的用户可以利用该产品开展相关的研究和雪冰监测应用。IMS雪冰产品采用以北极点为中心的极地方位投影(图2),时间分辨率为1天。产品中不同的像元值代表不同的地物:1代表海洋,2代表陆地,3代表海冰与湖冰,4代表积雪。

本研究使用了2010年9月1日至2019年5月31日共计9个积雪季的TIFF格式IMS雪冰产品,其中8天的数据缺失,分别为2012年9月8日、2014年1月2日、2014年10月20日和21日、2015年4月18日、2017年11月3日和4日、2018年1月29日。数据处理流程大致为:首先,从NSIDC或NOAA NIC网站下载TIFF格式的北半球IMS雪冰图像,将其转

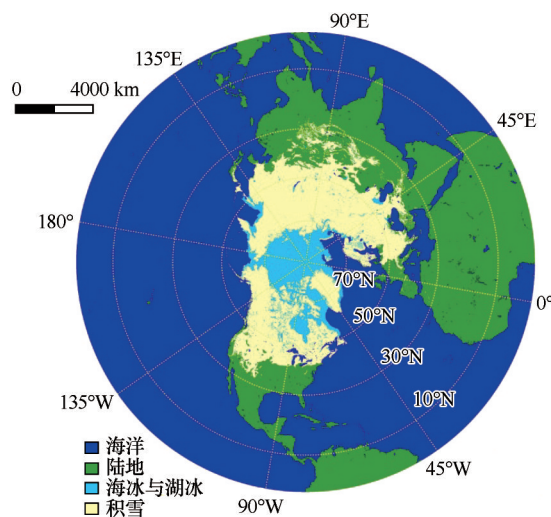


图2 2016年1月7日北半球IMS 4 km雪冰产品

Fig. 2 The IMS 4 km snow and ice product of the northern hemisphere on January 7, 2016

成ArcGIS GRID格式;其次,数据投影方式从极地方位投影转换成Albers投影,之后利用研究区边界逐一裁剪青藏高原范围内的IMS图像;再次,根据气象站点的坐标采样坐标点对应的IMS积雪像元值;最后,气象站的雪深数据与IMS积雪像元值在Excel软件中进行对比分析。

2.2 气象站观测数据

雪深观测数据是经过质量检测和控制的逐日雪深资料,由中国气象局国家气象信息中心气象资

料室和西藏自治区气象局气象信息网络中心提供。为了利用地面台站观测数据对青藏高原 1 km 和 4 km 分辨率 IMS 雪冰产品进行精度评价和适用性分析,根据积雪日数较多、观测场相对开阔平坦、地表类型相对均一且具有气候区域代表性和冰冻圈要素类型代表性的原则,在现有常规气象站中选取 17 个站用于 IMS 雪冰产品的验证和精度评价,其中 4 个站位于青藏高原强降雪中心喜马拉雅山脉南坡,1 个位于藏南中部,其余 12 个站位于藏北至青海南部的青藏高原中东部典型积雪观测区(图 1)。17 个气象站中,玛多站 2019 年 1 月至 5 月是自动雪深观测数据,有 1 位小数点,通过四舍五入之后取整值用于卫星遥感积雪产品的验证真值,其他站是每日北京时间 08:00 人工观测的雪深数据。在气象站雪深观测数据中,32 766 表示数据缺测或无观测任务,文中赋值雪深为 0;32 700 表示微量,文中雪深用 0.5 cm 来表示。

2.3 精度评估方法

精度评估采用构建误差矩阵的方法,将实测雪深数据与 IMS 雪冰产品分类结果进行比较。如果两者都有积雪或都无积雪,则表明 IMS 雪冰产品监测积雪结果正确。如果两者出现不一致,则表明 IMS 雪冰产品分类积雪错误。错误分类分为漏判和误判两种情况:误判是指地面观测无积雪,但是 IMS 雪冰产品监测到有积雪;而漏判则相反,地面实测数据有积雪,但是 IMS 雪冰产品没有监测到积雪。构建的误差矩阵见表 1。

表 1 误差矩阵
Table 1 Error matrix

		IMS 雪冰产品	
		有积雪	无积雪
地面观测	有积雪	a	b
	无积雪	c	d

$$\text{漏判率} = b / (a + b) \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{误判率} = c / (c + d) \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{积雪分类精度} = a / (a + c) \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{无雪分类精度} = d / (b + d) \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{总体精度} = (a + d) / (a + b + c + d) \times 100\% \quad (5)$$

式中: a 为实测数据与 IMS 雪冰产品均有积雪的像元数; b 为实测数据有积雪而 IMS 雪冰产品识别为无积雪的像元数; c 为实测数据无积雪而 IMS 雪冰产品识别为有积雪的像元数; d 为实测数据与 IMS 雪冰产品均无积雪的像元数。

漏判率(omission error rate)是指地面实测数据有积雪而 IMS 雪冰产品无积雪像元数与所有实测积雪像元数的比值;误判率(commission error rate)是指地面观测无积雪而 IMS 雪冰产品监测到有积雪像元数与所有实测无积雪像元数的比值;积雪分类精度(snow detection accuracy)是指正确分类出的积雪像元数与分类出的所有积雪像元的比值;无雪分类精度(no-snow detection accuracy)是指地面实测和 IMS 雪冰产品均无积雪像元数与分类结果中所有无雪像元的比值;总体精度(overall accuracy)是指地面实测和 IMS 雪冰产品均有积雪和均无积雪像元数与总像元数的比值。

3 结果与分析

3.1 气象站点代表性评估

2012—2013 年在青藏高原开展野外积雪观测和考察时利用 Trimble Geo XT GPS(global positioning system)接收机采集了青藏高原 17 个典型积雪观测气象站观测场的经纬度和高程信息。该 GPS 接收机精度达到实时亚米级。以此经纬度和高程为参考数据,与气象站历史记录的经纬度和高程信息进行了比较,结果发现两者之间存在一定的差异(表 2)。在 17 个气象站中,安多站的经度差异最大,两者相差 -0.5797° ,即历史记录的经度值偏小 0.5797° ,实际地面距离达到 54 588 m。其次,经度差异较大的气象站为普兰站,历史记录的经度偏大 0.0735° ,地面实际距离差异为 7 092 m。之后是申扎站和帕里站,历史记录的经度比 GPS 接收机定位值偏小 0.0714° 和 0.0705° ,历史定位的气象站位置距参考值偏西 6 827 m 和 6 953 m。此外,嘉黎站历史记录的经度较参考值偏大 0.0534° ,地面实际偏差为 5.1 km,而聂拉木站偏小 0.0146° ,地面实际偏西 1.4 km 左右。其余气象站的经度误差较小,都不到 1 km,均在 650 m 以下,其中浪卡子站和玛多站的误差不到 100 m,分别是 90 m 和 63 m。在 17 个气象站中,最大的纬度偏差同样出现在安多气象站,历史记录的纬度要大于参考值 0.0804° ,地面实际相距 8 917 m,即气象站的实际位置偏北 8 917 m。其次是聂拉木站、嘉黎站和申扎站,历史记录的气象站位置偏北 2.9 km、2.7 km 和 2.1 km,以弧度单位计算分别是 0.0258° 、 0.0241° 和 0.0189° 。之后是班戈站、帕里站和错那站,纬度偏差 $0.010^\circ \sim 0.014^\circ$,其中班戈站和错那站位置偏南 1.5 km 和

表2 青藏高原17个气象站历史记录与当前GPS定位信息对比

Table 2 Location information of 17 meteorological stations on the Tibetan Plateau (TP)

based on the historical record and current GPS

台站名称	省区	历史记录站点信息			当前GPS定位信息			经度差/	经度差/m	纬度差/	纬度差/m	海拔差/m
		经度/°E	纬度/°N	海拔/m	经度/°E	纬度/°N	海拔高度/m	(°)		(°)		
安多	西藏	91.1000	32.3500	4 800	91.67966	32.26958	4 699	-0.5797	-54 588	0.0804	8 917	102
班戈	西藏	90.0167	31.3833	4 700	90.01167	31.39728	4 706	0.0050	475	-0.0139	-1 546	-6
申扎	西藏	88.6333	30.9500	4 672	88.70478	30.93106	4 666	-0.0714	-6 827	0.0189	2 099	6
那曲	西藏	92.0667	31.4833	4 507	92.06115	31.47951	4 514	0.0055	524	0.0038	424	-7
嘉黎	西藏	93.2833	30.6667	4 489	93.22996	30.64257	4 497	0.0534	5 115	0.0241	2 671	-8
浪卡子	西藏	90.4000	28.9667	4 432	90.39907	28.97133	4 484	0.0009	90	-0.0047	-514	-52
帕里	西藏	89.0833	27.7333	4 300	89.15385	27.72116	4 333	-0.0705	-6 953	0.0122	1 345	-33
错那	西藏	91.9500	27.9833	4 280	91.95659	27.99373	4 366	-0.0066	-646	-0.0104	-1 151	-86
索县	西藏	93.7833	31.8833	4 023	93.77912	31.88758	4 031	0.0042	396	-0.0042	-476	-8
丁青	西藏	95.6000	31.4167	3 873	95.59339	31.41484	3 870	0.0066	629	0.0018	219	3
石渠	四川	98.1000	32.9833	4 200	98.09708	32.97628	4 184	0.0029	270	0.0071	784	16
托托河	青海	92.4333	34.2167	4 533	92.4385	34.21613	4 536	-0.0052	-476	0.0005	60	-3
玛多	青海	98.2167	34.9167	4 272	98.21598	34.91728	4 277	0.0007	63	-0.0006	-68	-4
杂多	青海	95.3000	32.9000	4 066	95.29472	32.89357	4 069	0.0053	493	0.0064	711	-2
聂拉木	西藏	85.9667	28.1833	3 810	85.98131	28.15754	3 752	-0.0146	-1 438	0.0258	2 858	58
清水河	青海	97.1333	33.8000	4 415	97.13789	33.80516	4 422	-0.0046	-425	-0.0052	-573	-6
普兰	西藏	81.2500	30.2833	3 900	81.17645	30.28988	3 878	0.0735	7 092	-0.0065	-729	22

注：“托托河”也写作“沱沱河”。

1.2 km,而帕里站偏北1.3 km。其余台站的纬度误差不到1 km,都小于790 m,其中玛多和托托河两站的纬度误差最小,在100 m以下,仅与参考值偏小68 m和偏大60 m,以弧度单位表示分别是0.0006°和0.0005°,其他8个站的纬度误差在200~790 m,以弧度单位计算在0.002°~0.007°范围之内。在17个气象站中,经度偏大的台站共有10个站,平均偏差为1.5 km,偏小的台站共有7个,平均达到10.2 km。同样,纬度偏大的台站共有10个站,平均偏差2.0 km,而偏小的气象站共计7个站,平均偏差为0.7 km。

从17个气象站记录的历史高程数据来看,多数台站的高程误差在±50 m以内,占全部台站的76%,但是个别台站的高程存在较大的差异,比如安多站历史记录的高程比当前GPS接收机定位海拔偏高102 m,而聂拉木气象站偏高58 m。相比这些高程偏高的台站,错那站历史记录的海拔比实际偏小86 m,浪卡子站偏小52 m,帕里站则偏小33 m,其余台站的高程偏差在±25 m以内。在17个气象站中,历史记录的高程偏大的台站共有6个,其中安多站和聂拉木站分别偏大102 m和58 m,其他都在25 m以下,而历史记录的高程偏小的台站共有11个,其

中错那站偏小86 m,其次是浪卡子站和帕里站分别偏小52 m和33 m,其余台站的高程偏差都不大,都在10 m以内。上述17个典型气象站中,西藏自治区境内的12个气象站于2009年安装了闪电定位仪,同时记录了GPS位置数据,获取的经纬度数据与2012—2013年野外考察时定位数据基本一致,绝大多数气象站的经纬度误差在25 m以内。此外,常规气象站点的位置信息仅到分,没有到秒,所以站点位置精度有限,所带来的经度平均误差在1.6 km以内,纬度平均误差在1.8 km以内(表3)。

由此可见,个别气象站历史定位数据与目前高精度GPS接收机观测的数据之间存在较大的差距,如安多站经度大约偏小0.6°,纬度则偏大0.08°。此外,目前常规气象台站经纬度坐标只到分,没有到秒,所带来的验证精度误差也是不容忽视的。因此,利用气象站点的观测数据对卫星遥感数据,特别是高分辨率卫星遥感数据进行验证和精度评价时,获取高精度的气象站位置信息是首要条件,才能让两者在位置上严格对应,保证验证结果的准确可靠。

3.2 IMS 4 km 雪冰产品精度评估

以气象站实测雪深数据为参考值,对IMS 4 km

表3 青藏高原17个气象站经纬度信息仅到分可能产生的误差
Table 3 Possible location errors for 17 meteorological stations on the TP caused by latitude and longitude information that have no seconds

序号	区站号	台站名称	省区	纬度/N	经度/E	最大纬度/N	最大经度/E	经度偏差/m	纬度偏差/m
1	55294	安多	西藏	32°21′	91°06′	32°21′59″	91°06′59″	1 590	1 786
2	55279	班戈	西藏	31°23′	90°01′	31°23′59″	90°01′59″	1 627	1 764
3	55472	申扎	西藏	30°57′	88°38′	30°57′59″	88°38′59″	1 659	1 739
4	55299	那曲	西藏	31°29′	92°04′	31°29′59″	92°04′59″	1 588	1 798
5	56202	嘉黎	西藏	30°40′	93°17′	30°40′59″	93°17′59″	1 581	1 814
6	55681	浪卡子	西藏	28°58′	90°24′	28°58′59″	90°24′59″	1 664	1 760
7	55773	帕里	西藏	27°44′	89°05′	27°44′59″	89°05′59″	1 710	1 731
8	55690	错那	西藏	27°59′	91°57′	27°59′59″	91°57′59″	1 656	1 781
9	56106	索县	西藏	31°53′	93°47′	31°53′59″	93°47′59″	1 550	1 826
10	56116	丁青	西藏	31°25′	95°36′	31°25′59″	95°36′59″	1 525	1 853
11	56038	石渠	四川	32°59′	98°06′	32°59′59″	98°06′59″	1 448	1 894
12	56004	托托河	青海	34°13′	92°26′	34°13′59″	92°26′59″	1 531	1 811
13	56033	玛多	青海	34°55′	98°13′	34°55′59″	98°13′59″	1 410	1 898
14	56018	杂多	青海	32°54′	95°18′	32°54′59″	95°18′59″	1 503	1 852
15	55655	聂拉木	西藏	28°11′	85°58′	28°11′59″	85°58′59″	1 755	1 679
16	56034	清水河	青海	33°48′	97°08′	33°48′59″	97°08′59″	1 451	1 881
17	55437	普兰	西藏	30°17′	81°15′	30°17′59″	81°15′59″	1 796	1 608

注：“托托河”也写作“沱沱河”。

分辨率雪冰产品在青藏高原积雪监测精度进行了评估。图3给出了2010年9月至2019年5月9个积雪季青藏高原IMS雪冰产品总体精度,范围在76.4%~83.2%,平均总体精度为80.1%,最低精度76.4%出现在2018/2019年积雪季,最高值83.2%出现在2015/2016年积雪季。从精度分析结果表4中可以看出,2018/2019年积雪季平均积雪日数最多,达到72 d,平均最大雪深和平均雪深也最大,分

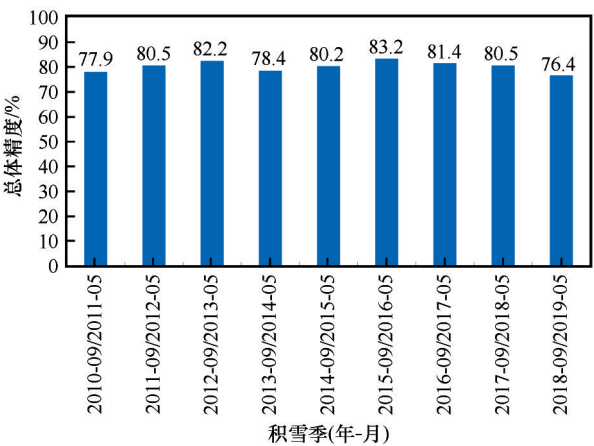


图3 2010年9月至2019年5月青藏高原IMS 4 km产品的总体精度

Fig. 3 Overall accuracy of IMS 4 km product on the TP from September 2010 to May 2019

别是21 cm和8.1 cm,但其总精度最低;2015/2016年积雪季年积雪天数不到积雪日数最大时期的一半,为33 d,平均最大雪深和平均雪深最低,分别是8 cm和2.1 cm,但其总体精度在9个积雪季中最大,达83.2%。IMS雪冰产品总体上呈现地面观测的积雪日数越多,平均雪深越大,其总体监测精度越低的现象。反之亦然。从表4可以看出,IMS的积雪分类精度要明显小于无雪分类精度和总体精度,在35.8%~60.7%,平均为47.2%,且与积雪日数、平均和最大雪深呈现显著的正相关(表5),即积雪日数越多、平均和最大雪深越大,积雪分类精度就越高。IMS 4 km雪冰产品的无雪分类精度要高于总体精度,均在85%以上,平均为90.9%,且与积雪日数和雪深之间存在显著的负相关(表5)。精度评价分析还表明,IMS雪冰产品的误判率在13.2%~19.8%,平均为17.1%,漏判率明显比误判率要大(表4),最小为35.0%,最大为56.5%,平均为45.5%,两者存在明显的反相关,即有此消彼长的现象。

图4给出了青藏高原积雪观测典型气象站IMS 4 km雪冰产品总体精度评价结果,浪卡子气象站的总体精度和无雪分类精度在17个台站中最高,分别是95.7%和96.8%,其次是申扎站、托托河站和班戈站,均在90%以上,而嘉黎站的总体精度最低,只

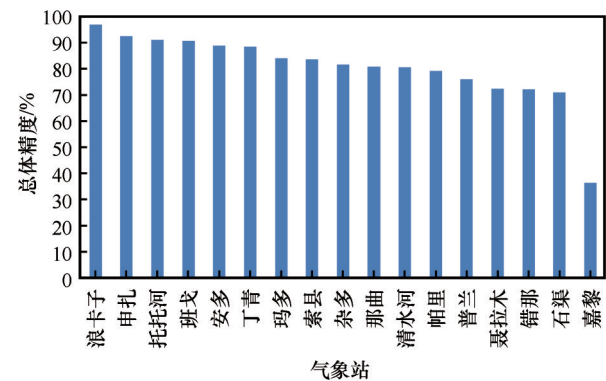
表4 2015年9月至2019年5月青藏高原IMS 4 km 产品精度评价结果
Table 4 Assessment results of IMS 4 km product on the TP from September 2015 to May 2019

积雪季(年-月)	积雪季 总天数/d	08:00 平均 积雪日数/d	平均最大 雪深/cm	平均最小 雪深/cm	平均 雪深/cm	漏判率 / %	误判率 / %	积雪分类 精度/ %	无雪分类 精度/ %	总体 精度/ %
2010-09/2011-05	273	49	15	0.5	3.0	56.5	17.5	46.7	89.2	77.9
2011-09/2012-05	274	67	18	0.5	3.3	44.7	16.7	53.6	88.0	80.5
2012-09/2013-05	273	48	22	0.5	6.8	51.3	13.2	49.2	90.0	82.2
2013-09/2014-05	273	48	12	0.5	2.9	42.6	19.0	39.4	91.9	78.4
2014-09/2015-05	273	60	16	0.6	6.4	35.0	18.5	60.7	90.2	80.2
2015-09/2016-05	274	33	8	0.6	2.1	54.5	14.6	41.9	93.6	83.2
2016-09/2017-05	273	34	14	0.7	3.6	45.1	16.6	46.5	94.2	81.4
2017-09/2018-05	273	30	8	0.7	2.2	36.0	19.8	35.8	95.8	80.5
2018-09/2019-05	273	72	21	0.8	8.1	43.7	17.9	50.9	85.6	76.4
平均	273.2	49	15	0.6	4.3	45.5	17.1	47.2	90.9	80.1

表5 IMS精度评价要素与雪深及相互之间的线性相关系数
Table 5 Linear correlation between assessment indicators and snow depth

	08:00 积 雪日数	最大 雪深	最小 雪深	平均 雪深	4 km 积 雪日数	总体 精度	无雪分 类精度	积雪分 类精度	误判率	漏判率
总体精度	-0.58	-0.34	-0.09	-0.32	-0.67*	1.00	0.59	-0.10	-0.61	0.16
无雪分类精度	-0.94**	-0.83**	0.17	-0.68*	-0.45	0.59	1.00	-0.66	0.11	-0.16
积雪分类精度	0.74*	0.69*	-0.04	0.66	0.44	-0.10	-0.66	1.00	-0.16	-0.14
误判率	0.09	-0.34	0.30	-0.17	0.75*	-0.61	0.11	-0.16	1.00	-0.69*
漏判率	-0.14	0.10	-0.43	-0.17	-0.70*	0.16	-0.16	-0.14	-0.69*	1.00

注: *表示通过了0.05显著性水平检验; **表示通过了0.01显著性水平检验。



注: “托托河”也写作“沱沱河”
图4 2010年9月至2019年5月青藏高原17个典型
气象站IMS 4 km 雪冰产品总体精度

Fig. 4 Overall accuracy of IMS 4 km product for 17 typical
meteorological stations on the TP from September
2010 to May 2019

有36.2%,其次是石渠站,但其总体精度也在70%以上,达70.9%,其后依次是位于喜马拉雅山脉南坡的错那、聂拉木、普兰和帕里站,在72%~79%。这里也是青藏高原强降雪和三大积雪日数最多的区域之一,错那、聂拉木、普兰和帕里站是青藏高原境内位于喜马拉雅山脉南坡仅有的四个常规气象站。

可见,IMS 4 km 总体精度基本上表现为青藏高原西南喜马拉雅山脉南坡地形复杂且雪深和积雪日数较多的台站精度较低,而位于高原内地形相对平坦、雪深和积雪日数较少的气象站总体精度较高的特点。应指出的是,嘉黎站2010—2019年每个积雪季的总体精度均低于55%,范围在23.8%~53.5%,平均仅36.2%,与其余站点形成了鲜明差异。相比总体精度,17个站的无雪分类精度没有明显差异,均在81%以上,其中嘉黎站判识精度最高,达98.1%,而清水河站最小,为81.8%,平均为90.8%。嘉黎站的积雪分类精度最小,为30.3%,其次是申扎站和丁青站,分别为31.3%和36.4%,其余均大于40%,而清水河站的积雪分类精度最高,为72.7%,其次是玛多站70.2%,之后是班戈站和错那站,分别是54.2%和51.4%。总体上表现为积雪日数越多,其分类精度越高的特点。

相比分类精度,IMS 雪冰产品的误判率和漏判率存在一定的区域性差异,其中嘉黎站的误判率异常偏大,达到88.0%,而且2010—2019年所有积雪季误判率均大于60%,最高为98.9%,出现在2015/2016年积雪季,其余台站的误判率为1%~26%。嘉

黎是青藏高原降雪中心之一,其平均年降雪日数在青藏高原最多,达154 d^[41-42]。这里山脉纵横交错,嘉黎正好位于向东开口的喇叭口山谷中,南来气流携带充沛水汽到达此地后,由于地形辐合,强迫抬升,加强了上升运动及延续性,导致降雪异常偏多,积雪季节多云天气多^[43]。嘉黎气象站又位于河谷县城中心区域,降雪之后气温上升较快,易于积雪消融。积雪季节持续多日的多云天气,导致IMS无法有效地监测到地面积雪,进而出现了地面积雪过高估计和严重误判现象。漏判率正好与误判率相反,嘉黎站的漏判率在所有台站中最低,仅1.0%,而积雪日数最少的浪卡子站漏判率最高,达88.2%。在17个台站中,浪卡子站08:00观测到的平均年积雪日数最少,仅为9 d,2010—2019年积雪季积雪日数在4~16 d,而对应的漏判率在60%~100%,其中2010—2013年3个积雪季漏判率为100%,出现了所有积雪样本均被漏判的现象。总体上,高原内陆积雪日数较少的台站IMS产品的误判率少,漏判率高,而喜马拉雅山脉南坡和嘉黎—清水河—石渠一带高原中东部降雪和积雪日数较多的台站误判率高,漏判率较低。对于积雪日数很少的台站来说,受积雪覆盖范围和云等因素的影响,卫星遥感监测地面积雪偶然性强,极易出现所有样本可能被漏判的现象,进而导致总体精度很高,但是漏判率异常高的现象。所以,选取积雪日数较多的台站资料对卫星产品进行精度验证,才能较好地评估卫星遥感积雪产品在高原积雪监测中的适用性和应用潜力。

3.3 IMS 1 km 雪冰产品评估

随着卫星遥感技术的发展,遥感对地观测的时空分辨率得到了空前的提高,更多卫星数据融合到IMS雪冰制图产品,其精度得到了不断改进。为了更好地满足北半球冰雪监测和研究需求,从2014年底开始,NOAA IMS雪冰产品分辨率从原来的4 km提高到了1 km,提高了16倍。本节利用17个

代表性积雪观测气象站逐日雪深观测资料对青藏高原2015年9月至2019年5月共计4个积雪季的IMS 1 km雪冰产品进行了精度评价,并与IMS 4 km产品评价结果进行了对比。

IMS 1 km分辨率雪冰产品总体精度较高,在79.6%~85.2%,平均为83.3%。相比IMS 4 km产品80.4%的精度,总体精度平均提高了2.9%,积雪分类精度提升了0.9%,平均误判率减少了5.1%,漏判率反而有所增加,增加了4.1%(图5和表6)。由于产品空间分辨率的提高,2015—2019年IMS雪冰产品在青藏高原上监测的平均积雪日数从4 km分辨率的63 d减少至1 km分辨率的50 d,平均减少了13 d,与43 d的地面观测积雪日数更加接近,进而积雪误判率减少明显。从青藏高原17个气象站的积雪监测情况来看(图6),嘉黎站的总体精度提升最大,2015年9月至2019年9月期间,从4 km分辨率的32.5%提升到了1 km分辨率里的71.1%,平均提升了38.6%,主要是通过IMS 1 km雪冰产品减少积雪监测的误判率后实现的,平均误判率减少了71.7%,但是平均漏判率相应提高了59.0%。2015—2019年在IMS 4 km图像上嘉黎站监测到的平均积雪次数就有255次,实际观测的平均积雪日数只有70次,严重高估了积雪监测次数,使得出现了平均漏判率为0、误判率为91.2%和无雪分类精度为100%的监测结果,但是在1 km分辨率的图像上积雪监测次数平均只有69次,与70次的地面观测次数极为接近。该站的积雪分类精度提升也最大,从IMS 4 km分辨率的27.5%提高到了1 km分辨率的42.7%,平均提高了15.2%(图7)。除了嘉黎站之外,积雪监测总体精度提升较大的台站是错那站和索县站,也均在10%以下,分别是7.3%和3.7%,对于其余台站而言,IMS空间分辨率的提高对其积雪监测总体精度的提升和改进程度很小。但从积雪分类精度而言,错那站的积雪分类精度改进仅次于嘉黎站,精度平均提高了13.0%。2015年9月至

表6 2015年9月至2019年5月青藏高原IMS 1 km和4 km产品平均积雪监测精度
Table 6 Average snow monitoring accuracy of IMS 1 km and 4 km products on the TP from September 2015 to May 2019

积雪季(年-月)	积雪日数/d		漏判率/%		误判率/%		积雪分类精度/%		无雪分类精度/%		总体精度/%	
	1 km	4 km	1 km	4 km	1 km	4 km	1 km	4 km	1 km	4 km	1 km	4 km
2015-09/2016-05	36	49	58.4	54.5	9.6	14.6	44.0	45.3	91.9	93.6	85.2	83.2
2016-09/2017-05	43	59	52.2	45.1	10.6	16.6	47.5	46.5	93.0	94.2	85.1	81.4
2017-09/2018-05	56	66	37.0	36.0	15.7	19.8	36.8	35.8	95.2	95.8	83.4	80.5
2018-09/2019-05	65	78	47.9	43.7	12.6	17.9	53.6	50.9	84.7	85.6	79.6	76.4
平均	50	63	48.9	44.8	12.1	17.2	45.5	44.6	91.2	92.3	83.3	80.4

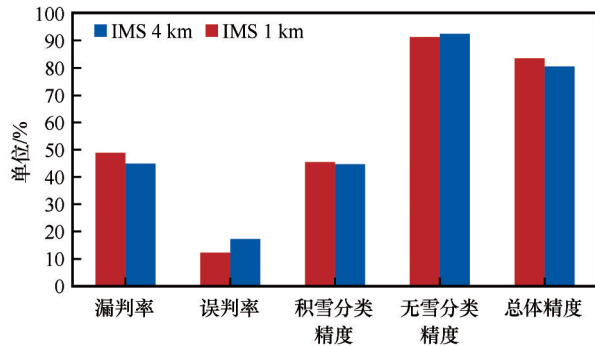
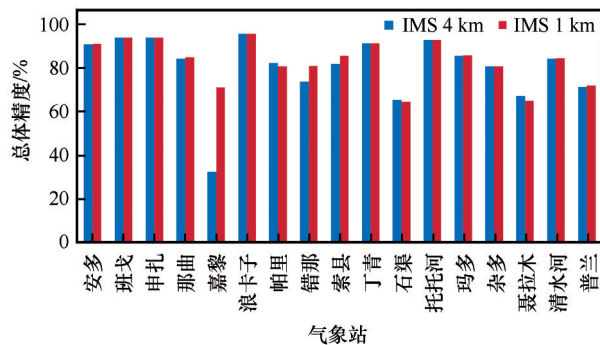


图5 2015年9月至2019年5月青藏高原IMS 1 km和4 km产品平均积雪监测精度对比

Fig. 5 Comparison of average snow monitoring accuracy between IMS 1 km and 4 km products on the TP from September 2015 to May 2019

2019年5月错那站IMS 4 km监测到的积雪日数是89次,对应的1 km监测的积雪日数是65次,后者与63次的地面观测次数更为接近,此外IMS 1 km产品的平均误判率减少了10.1%,而相应的平均漏判率变化不大。在17个代表性站点中,半数气象站的积雪分类精度得到了提高,除了嘉黎和错那两个站之外,那曲、申扎和班戈站的积雪分类精度提升了2.0%~4.1%,而个别站点出现了积雪分类精度减少情况,如帕里站的积雪监测精度减少了2.4%。



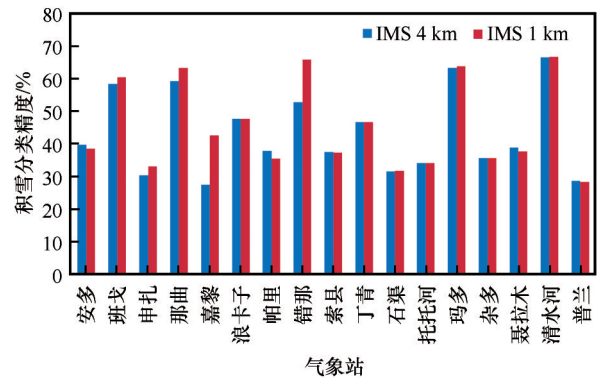
注:“托托河”也写作“沱沱河”

图6 2015年9月至2019年5月青藏高原17个站IMS 1 km和4 km产品总体精度对比

Fig. 6 Comparison of overall accuracy between IMS 1 km and 4 km products for 17 stations on the TP from September 2015 to May 2019

3.4 站点坐标对IMS积雪分类精度的影响

从前面的气象站坐标位置评估分析得知,17个站历史定位的坐标信息与当前高精度GPS接收机定位信息之间存在一定的偏差。为了定量分析这些差异对IMS雪冰产品精度评价可能产生的影响,分别利用历史定位的气象站坐标信息和GPS定位



注:“托托河”也写作“沱沱河”

图7 2015年9月至2019年5月青藏高原17个站IMS 1 km和4 km产品积雪分类精度对比

Fig. 7 Comparison of snow detection accuracy between IMS 1 km and 4 km products for 17 stations on the TP from September 2015 to May 2019

信息对2010—2019年积雪季IMS 4 km分辨率产品的积雪监测结果进行了对比分析。图8给出的结果

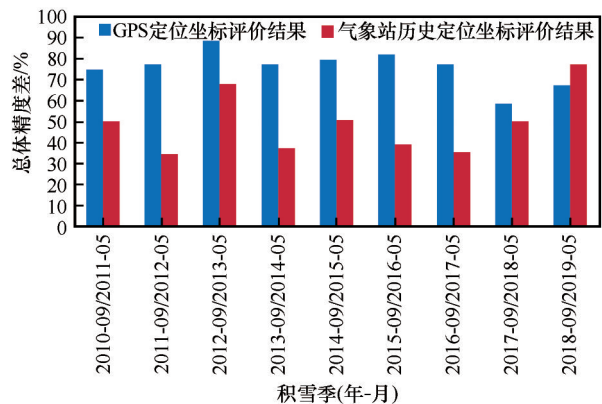
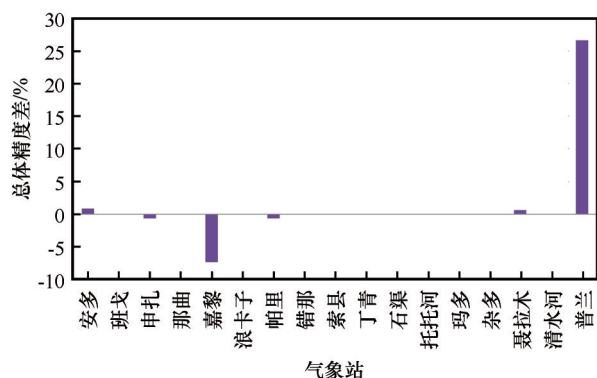


图8 2010—2019年积雪季普兰站历史记录与当前GPS定位坐标采集的IMS 4 km产品总体精度

Fig. 8 Overall accuracy of IMS 4 km product of Burang (Pulan) Station during snow seasons from 2010 to 2019 based on the historical station record and current GPS positioning

表明,由于坐标位置的误差,导致部分台站的精度评价结果存在一定差异,其中普兰站的总体精度偏差最大,历史定位坐标的总体精度为49.2%,而基于GPS定位坐标采集的总体精度可以达到75.8%,两者相差26.6%,相应的积雪分类精度也从27.1%提高到41.6%,提高了14.5%。从图8同样可以看出,如果利用该站历史定位坐标对IMS 4 km进行精度评价,2010—2019年每年产生较大的总体精度误差。除了2018年9月至2019年5月之外,利用GPS定位数据可以明显提高普兰站IMS 4 km产品的精度评价效果,其主要原因是历史定位的普兰站实际

上位于 GPS 定位点东面偏南距 7 113 m 的海拔 4 804 m 山坡上,而 GPS 定位的普兰站位于海拔 3 878 m 的河谷地区,两地的积雪覆盖分布存在明显的差异,进而产生显著的总体精度误差。此外,安多站采用 GPS 定位坐标之后,总体精度提高 0.9%,积雪分类精度提高了 6.0%,聂拉木站的总体精度提高了 0.6%。嘉黎站的精度反而有所下降,下降了 7.3%,其主要原因可能是积雪季这里多云天气为主,气象站又位于河谷县城,南北是近东西向的高山,地形复杂,加上该站的积雪日数在青藏高原所有台站中最多^[44],导致积雪误判率显著高于其他台站,使得出现总体精度有所下降的情况。另外,历史定位的嘉黎气象站位置实际位于 GPS 定位点东北面 5 771 m 处海拔高度 5 332 m 山顶上。无论用历史定位坐标还是 GPS 定位坐标,采集的 IMS 4 km 分辨率数据由于极高的误判率和偶然因素使得出现总体精度有所下降的情况。此外,申扎站和帕里站也略有下降,下降幅度仅为 0.6%。由于 IMS 4 km 空间分辨率较低,IMS 分类精度因一些偶然因素发生变化。对剩余 11 个站而言,历史定位和 GPS 定位坐标之间的差异对 IMS 4 km 总体和积雪精度评价结果没有影响,见图 9。



注:“托托河”也写作“沱沱河”

图9 2010—2019年青藏高原17个站当前GPS定位与历史记录坐标采集的IMS 4 km产品总体精度差

Fig. 9 Overall accuracy bias of IMS 4 km product for 17 stations based on current GPS positioning and the historical station record

根据对17个气象站的定位坐标评估表明,个别气象站历史定位数据与目前高精度GPS接收机观测的数据之间存在较大的差距,如安多站的经度差异最大,达54 588 m,其次是普兰站,历史记录的经度偏大7 092 m,之后是帕里和申扎两个气象站,距参考值偏西6 953 m和6 827 m。此外,嘉黎站历史记

录的经度较GPS接收机定位的参考值偏大5.1 km,而聂拉木站偏小1.4 km,其余气象站的经度误差不到1 km。在17个气象站中,最大的纬度偏差同样出现在安多气象站,历史记录的纬度偏大8 917 m,其次是聂拉木、嘉黎和申扎气象站,偏差分别是2.9 km、2.7 km和2.1 km。可见,IMS 4 km精度评价结果偏差较大的几个站都存在气象站历史定位数据与GPS接收机观测的数据之间存在较大差距,而经度误差不足1 km的台站,新旧坐标对IMS 4 km精度评价结果没有影响。很显然,目前个别台站的历史坐标与GPS定位坐标之间存在较大的差异,对卫星遥感积雪产品的精度验证和评估产生一定的影响,而绝大多数气象站点的历史坐标精度和其经纬度坐标仅到分没有到秒带来的误差,对于当前公里级别空间分辨率卫星遥感数据的精度评价影响不大。然而,今后随着卫星遥感技术的发展,遥感数据的时空分辨率将会大大提高,更高分辨率的积雪遥感产品将用于积雪监测和研究,尤其是当空间分辨率提高到几百米乃至几十米时,对于这些遥感数据的验证与实际应用,地面气象站点的坐标精度必须予以考虑。

4 讨论

IMS作为第一个多源数据融合的代表性积雪监测产品,除了用于数值预报模式初始场之外,随着更多卫星遥感数据的融合和分辨率的进一步提高,在北半球雪冰监测、气候变化以及相关的应急响应及研究中得到越来越广泛的应用。青藏高原是北半球中低纬度积雪覆盖最大的地区和欧亚大陆积雪的重要组成部分。刘润等^[37]基于气象站实测雪深数据为真值的北疆、东北和青藏高原三个中国三大稳定积雪地区验证表明,IMS 4 km雪冰产品的年总体准确率在三大积雪区均超过了92%,非积雪季的总体准确率比积雪季要高,在积雪季的各个月份中,三个地区的总体准确率也均超过80%,5—9月非积雪季青藏高原地区也超过了90%。陈爱军等^[38]利用地面雪深观测资料对青藏高原IMS 1 km产品进行了验证,结果表明IMS 1 km冰雪产品的总体判识准确率在青藏高原大部分地区全年均在85%以上,夏季几乎接近100%,仅在冬季出现少数低值,最低约80%。Yang等^[45]以Landsat-5 TM积雪图像为真值对IMS雪冰产品进行了精度评价,结果表明总体精度大于79%。更多的IMS雪冰产品精

度验证工作集中在北美地区。Brubaker 等^[34]利用逐日地面观测数据,对美国大陆 IMS 雪冰产品进行了评估,结果表明在积雪累积期早起的 10 月 IMS 积雪判识率较低,小于 20%,11 月超过 60%,12 月高达 95%,3 月积雪判识率大约是 70%。IMS 的无雪像素的判识精度在 3 月至 10 月是 95%~100%,而 12 月无雪判识率下降至约 80%。整个季节随着积雪覆盖范围的增加,IMS 的积雪覆盖面积判识能力有提高(较少的漏判误差),但是非积雪面积识别能力有所下降(误判误差增多)。破碎积雪面积的判识能力总体上在积雪消融阶段要好于累计阶段。Chen 等^[33]利用地面雪深资料对北美地区 IMS 4 km 产品进行了验证,结果表明两者具有很好的一致性,当冬季美国大陆 1/4~1/3 被积雪覆盖时两者的逐日一致率绝大部分为 80%~90%,并且雪深越大一致性越高。两者最高的一致率出现在夏季,大约为 100%,夏季很少站点被积雪覆盖,导致很高的一致率。其他在土耳其境内进行的验证结果表明^[46],IMS 积雪产品的总体正确率 POD 和空报率 FAR 分别是 73.55% 和 25.11%。

本研究中,IMS 4 km 雪冰产品在青藏高原的平均总体精度为 80.1%,且呈现地面观测积雪日数越多,平均雪深越大,积雪识别精度越高的特点。IMS 4 km 的无雪分类精度高于总体精度,均在 85% 以上,平均达 90.9%。然而,IMS 的平均积雪分类精度较低,在 35.8%~60.7%,平均 47.8%,存在观测的积雪日数和平均雪深越大,IMS 积雪分类精度越高的特点。IMS 雪冰产品在青藏高原积雪监测中的漏判明显,最小为 35.0%,最大为 56.5%,平均 45.5%,而误判率相对较小,范围在 13.2%~19.8%,平均 17.1%。这些研究结论与已有的研究结果基本上是一致的。此外,青藏高原上气象台站的空间分布极不均匀,多数位于东部和南部,西部和西北部分布极为稀疏,而且气象观测站大多位于海拔较低的河谷^[41]。刘洵等^[37]利用了青藏高原地区 108 个气象站的资料,而陈爱军等^[38]利用了 77 个地面观测站点的逐日雪深。这些站点大部分位于青藏高原东部和南部,多数台站平均年积雪日数不足 10 d。总体积雪监测精度因这些站点和研究时段包括了高原上积雪很少的夏季,使得最终精度会提高很多。在本研究中,以积雪日数较多为主要原则,在青藏高原三大积雪日数最长的区域中选取高原内陆中东部和喜马拉雅山脉南麓积雪观测具有代表意义的 17

个台站,且研究时段仅涵盖了 2010—2019 年 9 月至次年 5 月整个高原积雪季节,对于积雪日数很少而总体精度可能接近 100% 的夏季并未考虑,所以无论从站点代表性的选择、时间尺度的把握还是精度评价指标要素的选取上相比以往的研究更具代表性和普遍意义,得出的研究结论更加符合高原积雪监测的实际,在青藏高原积雪监测中更具现实指导意义。本研究得出的 IMS 雪冰产品在青藏高原积雪监测中漏判明显,相比误判率相对较小的结论也与上述的研究结果一致。实际上 IMS 雪冰产品相对高估了积雪面积,在青藏高原漏判率高的原因是 IMS 对零碎积雪的识别能力有限^[37]。由于研发 IMS 雪冰制图产品的主要目的之一是能够有效地监测北半球的陆地积雪,所以产品关注重点是积雪季的监测精度,对于非积雪季接近 100% 的积雪监测精度对于产品的实际应用价值不大。通过本研究揭示了青藏高原 IMS 雪冰产品精度的空间分布特点,主要表现在 IMS 4 km 总体精度基本上表现为青藏高原西南喜马拉雅山脉南坡地形复杂且雪深和积雪日数较多的台站总体精度较低,而位于高原内陆地地形相对平坦、雪深和积雪日数较少的气象站总体精度较高的特点。高原内陆积雪日数较少的台站 IMS 产品的误判率少,漏判率高,而喜马拉雅山脉南坡和嘉黎—清水河—石渠一带高原中东部降雪和积雪日数较多的典型积雪观测台站误判率高,漏判率较低。

5 结论

在系统评估青藏高原积雪观测典型气象站历史定位坐标精度基础上,对 IMS 4 km 和 1 km 分辨率雪冰产品在青藏高原的精度进行了验证和评价,定量分析了 IMS 空间分辨率从 4 km 到 1 km 的提高对青藏高原积雪监测精度产生的影响,最后,气象站历史定位和 GPS 定位坐标之间的差异对 IMS 精度评估结果产生的影响进行分析。得出了如下主要结论:

(1) 青藏高原个别气象站历史定位坐标与当前 GPS 接收机观测位置之间存在较大的差距,如安多气象站经度偏小 0.6°,纬度偏大 0.08°,地面实际相距 55 km 和 9 km。另外,常规气象台站经纬度坐标只到分没有到秒对目前主要卫星遥感产品的精度影响有限,但是随着卫星遥感数据分辨率的不断提高,所引起的误差是不容忽视的。精确的气象站点

坐标信息是验证高分辨率卫星遥感数据的前提和定量分析站点要素变化所必须的。

(2)IMS 4 km 分辨率雪冰产品在青藏高原的总精度在 76.4%~83.2%,平均 80.1%,总体上呈现地面观测的积雪日数越多,平均雪深越大,其监测精度越低的现象。IMS 4 km 积雪分类精度在 35.8%~60.7%,平均 47.2%,平均误判率 17.1%,平均漏判率 45.5%,积雪日数和平均雪深越大,积雪分类精度就越高。IMS 4 km 总体精度基本上表现为青藏高原西南喜马拉雅山脉南坡地形复杂且雪深和积雪日数较多的台站精度较低,而位于高原内陆地形相对平坦、雪深和积雪日数较少的气象站总体精度较高的特点。高原内陆积雪日数较少的台站 IMS 产品的误判率少,漏判率高,而喜马拉雅山脉南坡和嘉黎—清水河—石渠一带高原中东部降雪和积雪日数较多的典型积雪观测台站误判率高,漏判率较低。

(3)IMS 1 km 分辨率雪冰产品相比 IMS 4 km 产品总体精度平均提高了 2.9%,积雪分类精度平均提升 0.9%,平均误判率减少 5.1%,漏判率反而有所增加,平均增加了 4.1%,主要是通过嘉黎站等个别台站的精度提升较大引起的,对于绝大多数青藏高原典型台站而言,IMS 空间分辨率从 4 km 到 1 km 对其积雪监测总体精度的提升和改进程度很小。

(4)定量分析了青藏高原典型气象站历史坐标信息与当前高精度 GPS 接收机定位信息之间的差异对 IMS 雪冰产品精度评价可能产生的影响。由于坐标位置的误差,导致部分台站的精度评价结果存在一定差异,其中普兰站从历史定位坐标的总体精度 49.2% 提高到 GPS 定位的 75.8%,积雪分类精度提高了 14.5%。IMS 4 km 精度评估结果较大的误差均发生在气象站历史定位数据与 GPS 接收机观测数据之间差距较大的几个站,而经度误差不足 1 km 的台站,新旧坐标对 IMS 4 km 精度评价结果没有影响。今后随着航空航天技术的发展,更高时空分辨率的遥感积雪产品将用于积雪监测和研究,精确的地面观测站坐标信息是开展遥感数据验证与实际应用的前提。

此外,除了利用地面站点观测数据作为真值对遥感积雪产品进行验证之外,目前更多的中低分辨率遥感积雪产品的验证采用高分辨率的卫星遥感影像作为真值进行的。下一步将利用 Landsat 和 Sentinel-2 等卫星遥感数据验证 IMS 雪冰产品在青

藏高原的精度,进一步分析区域差异和产生的原因,进而使之更好地应用于青藏高原积雪监测和时空变化研究。

参考文献(References):

- [1] Li Wenkai, Guo Weidong, Qiu Bo, et al. Influence of Tibetan Plateau snow cover on East Asian atmospheric circulation at medium-range time scales[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4243.
- [2] You Qinglong, Wu Tao, Shen Liuchen, et al. Review of snow cover variation over the Tibetan Plateau and its influence on the broad climate system[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 201: 103043.
- [3] 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.]
- [4] Zhong Zhentao, Li Xia, Xu Xiacong, et al. Spatial-temporal variations analysis of snow cover in China from 1992-2010[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(25): 2641-2654. [钟镇涛, 黎夏, 许晓聪, 等. 1992-2010 年中国积雪时空变化分析[J]. *科学通报*, 2018, 63(25): 2641-2654.]
- [5] Skiles S M, Flanner M, Cook J M, et al. Radiative forcing by light-absorbing particles in snow[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8: 964-971.
- [6] Hall D K. Assessment of polar climate change using satellite technology[J]. *Reviews of Geophysics*, 1988, 6(21): 26-39.
- [7] Robinson D A, Dewey K F, Heim R R. Global snow cover monitoring: an update[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1993, 74(9): 1689-1696.
- [8] Henderson G R, Peings Y, Furtado J C, et al. Snow-atmosphere coupling in the Northern Hemisphere[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8: 954-963.
- [9] Musselman K N, Clark M P, Liu Changhai, et al. Slower snowmelt in a warmer world[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(3): 214-219.
- [10] Fyfe J C, Derksen C, Mudryk L, et al. Large near-term projected snowpack loss over the western United States[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14996.
- [11] Bormann K J, Brown R D, Derksen, C, et al. Estimating snow-cover trends from space[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8: 924-928.
- [12] Webster M, Gerland S, Holland M, et al. Snow in the changing sea-ice systems[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8: 946-953.
- [13] IPCC. Climate change 2014: synthesis report[R]. Geneva, Switzerland: WMO, 2014.
- [14] Mudryk L R, Kushner P J, Derksen C, et al. Snow cover response to temperature in observational and climate model ensembles[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44: 919-926.
- [15] Beniston M. Impacts of climatic change on water and associated economic activities in the Swiss Alps[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 412: 291-296.
- [16] Hamlet A F, Lettenmaier D P. Effects of 20th century warming and climate variability on flood risk in the western US[J/OL]. *Water Resources Research*, 2007, 43(6) [2021-06-04]. <https://doi.org/10.1029/2006WR005099>.
- [17] Mote P W, Hamlet A F, Clark M P, et al. Declining mountain snowpack in western North America[J]. *Bulletin of the Ameri-*

- can Meteorological Society, 2005, 86: 39-49.
- [18] Chu Duo. Remote sensing of land use and land cover in mountain region: A comprehensive study at the central Tibetan Plateau [M]. Singapore: Springer Nature, 2020.
- [19] Barnett T P, Adam J C, Lettenmaier D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions[J]. *Nature*, 2005, 438: 303-309.
- [20] McCabe G J, Wolock D M. Recent declines in western U. S. snowpack in the context of twentieth-century climate variability [J/OL]. *Earth Interactions*, 2009, 13 (12) [2021-06-04]. <https://doi.org/10.1175/2009EI283.1>.
- [21] Smith T, Bookhagen B. Changes in seasonal snow water equivalent distribution in High Mountain Asia (1987 to 2009) [J]. *Science Advances*, 2018, 4: e1701550.
- [22] Lievens H, Demuzere M, Marshall H P, et al. Snow depth variability in the Northern Hemisphere mountains observed from space[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 4629.
- [23] Wu G X, Liu Y M, He B, et al. Thermal controls on the Asian summer monsoon[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 404.
- [24] Zhu Yuxiang, Ding Yihui, Xu Huaigang. The decadal relationship between atmospheric heat source of winter and spring snow over Tibetan Plateau and rainfall in east China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007, 65(6): 946-958. [朱玉祥, 丁一汇, 徐怀刚. 青藏高原大气热源和冬春积雪与中国东部降水的年代际变化关系[J]. *气象学报*, 2007, 65(6): 946-958.]
- [25] Blanford H F. On the connexion of the Himalayan snowfall with dry winds and seasons of drought in India[J]. *Proceedings of the Royal Society of London: Series I*, 1884, 37: 3-22.
- [26] 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.
- [27] Che Tao, Li Xin, Gao Feng. 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. [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.]
- [28] Bin Chanjia, Qiu Yubao, Shi Lijuan, et al. Comparative validation of snow depth algorithms using AMSR-E passive microwave data in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(4): 801-813. [宾婵佳, 邱玉宝, 石利娟, 等. 我国主要积雪区 AMSR-E 被动微波雪深算法对比验证研究[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(4): 801-813.]
- [29] Chen He, Che Tao, Dai Liyun. Snow identification algorithm based on FY-MWRI in western China [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(6): 1037-1045. [陈鹤, 车涛, 戴礼云. 基于 FY-MWRI 的中国西部被动微波积雪判别算法[J]. *遥感技术与应用*, 2018, 33(6): 1037-1045.]
- [30] 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.
- [31] Ramsay B. The interactive multisensor snow and ice mapping system[J]. *Hydrological Processes*, 1998, 12: 1537-1546.
- [32] Mazari N, Tekeli A E, Xie Hongjie, 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): 073540.
- [33] Chen C, Lakhankar T, Romanov P, et al. Validation of NOAA-Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System (IMS) by comparison with ground-based measurements over continental United States [J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(5): 1134-1145.
- [34] Brubaker K L, Pinker R T, Deviatova E. Evaluation and comparison of MODIS and IMS snow-cover estimates for the continental United States using station data [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2005, 6: 1002-1017.
- [35] Frei A, Lee S Y. A comparison of optical-band based snow extent products during spring over North America [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(9): 1940-1948.
- [36] Chen Xiyu, Jiang Lingmei, Yang Juntao, et al. Validation of ice mapping system snow cover over southern China based on Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus imagery [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 8(1): 084680.
- [37] Liu Xun, Jin Xin, Ke Changqing. Accuracy evaluation of the IMS snow and ice products in stable snow covers regions in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(3): 500-507. [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.]
- [38] Chen Aijun, Han Chenhui, Zheng Zhaojun, et al. Analysis of IMS ice and snow products over the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *China Science Paper*, 2018, 13(3): 340-344. [陈爱军, 韩琛惠, 郑照军, 等. 青藏高原 IMS 冰雪产品精度分析[J]. *中国科技论文*, 2018, 13(3): 340-344.]
- [39] Zhang Yili, Li Bingyuan, Zheng Du. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China [J]. *Geographical Research*, 2002, 21(1): 1-8. [张懿锂, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积[J]. *地理研究*, 2002, 21(1): 1-8.]
- [40] Frei A, Tedesco M, Lee Shihyan, et al. A review of global satellite-derived snow products [J]. *Advances in Space Research*, 2012, 50(8): 1007-1029.
- [41] Chu Duo, Luosang Quzhen, Yang Zhigang, et al. Spatiotemporal variations of snowfall days over the Tibetan Plateau from 1981 to 2010 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2017, 28(3): 292-305. [除多, 洛桑曲珍, 杨志刚, 等. 1981-2010 年青藏高原降雪日数时空变化特征[J]. *应用气象学报*, 2017, 28(3): 292-305.]
- [42] Chu Duo. Snow atlas of Tibetan Plateau [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2018: 29-30. [除多. 青藏高原积雪图集[M]. 北京: 气象出版社, 2018: 29-30.]
- [43] Zou Jinshang, Cao Caizhu. Some factors of impacts on snowfall over Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Advances in Water Science*, 1991, 2(1): 42-49. [邹进上, 曹彩珠. 影响青藏高原降雪的若干因子研究[J]. *水科学进展*, 1991, 2(1): 42-49.]
- [44] Chu Duo, Yang Yong, Luobu Jiancan, et al. The variations of snow cover days over the Tibetan Plateau during 1981-2010 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(6): 1461-1472. [除多, 杨勇, 罗布坚参, 等. 1981-2010 年青藏高原积雪日数时空变化特征分析[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(6): 1461-1472.]
- [45] Yang Juntao, Jiang Lingmei, Ménard C B, et al. Evaluation of snow products over the Tibetan Plateau [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(15): 3247-3260.
- [46] Sönmez I, Tekeli A E, Erdi E. Snow cover trend analysis using interactive multisensor snow and ice mapping system data over Turkey [J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(7): 2349-2361.

Analysis on applicability of NOAA IMS snow and ice products in snow cover monitoring over the Tibetan Plateau

CHU Duo^{1,2}, ZHAXI Dunzhu^{1,2}, CIDAN Yuzhen^{1,2}

(1. Tibet Institute of Plateau Atmospheric and Environmental Sciences, Lhasa 850000, China; 2. Tibet Key Laboratory of Plateau Atmosphere and Environment Research, Lhasa 850000, China)

Abstract: Snow on the Tibetan Plateau (TP) is a vital fresh water source in western China and Himalayan regions, and snow cover variation is also a significant indicator of climate condition in the TP and its surroundings. As a snow cover product based on blended approaches, including active and passive satellite sensors, ground observation and other auxiliary information, NOAA IMS (Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System) is most widely used for large-scale snow cover detection and relevant climate research. In this study, the evaluation of the historical positioning coordinate accuracy of representative meteorological stations for snow observation in the TP is systematically made for the first time, and then the accuracy and applicability of NOAA IMS 4 km and 1 km products over the TP are verified and evaluated using snow depth data from these stations, and the effect of IMS spatial resolution improvement from 4 km to 1 km on the snow detection accuracy over the TP, and the influence of the difference between the historical and GPS positioning coordinates of meteorological stations on the accuracy of IMS snow detection over the TP are quantitatively analyzed in this study. The results show that: There are great differences between the historical coordinates and current GPS positioning information for some meteorological stations in the TP, such as the longitude of Amdo (Anduo) Meteorological Station recorded by historical positioning is 0.6° smaller than GPS positioning and the latitude is 0.08° greater than GPS positioning information. Overall accuracy of IMS 4 km product on the TP ranges 76.4%~83.2% with an average of 80.1%. The accuracy of snow detection is 35.8%~60.7% with an average of 47.2%, and average commission error rate is 17.1% while average omission error rate is 45.5%, which generally features that the more snow-covered days and the higher average snow depth are observed on the ground, the lower the overall monitoring accuracy and the higher the snow detection accuracy. Compared with IMS 4 km product, overall accuracy of IMS 1 km increased by 2.9% on average, the accuracy of snow detection increased by 0.9%, average commission error rate reduced by 5.1% and omission error rate increased by 4.1%, which is mainly caused by the greater accuracy improvement of several stations while there is little impact on the overall accuracy improvement of snow detection for most of stations on the TP. Except for some meteorological stations, the impact of differences between the historical and GPS positioning coordinates of meteorological stations on IMS 4 km product accuracy over the TP is limited at present. However, with the development of satellite remote sensing technology, remote sensing snow products with higher spatial-temporal resolution will be used for snow monitoring and study in the future. Accurate coordinate information of ground observation station is essential for accuracy validation and practical application of these remote sensing data.

Key words: IMS snow and ice products; snow depth; ground observation; accuracy evaluation; Tibetan Plateau

(责任编辑: 车涛; 编辑: 武俊杰)