

引用格式:Chu Duo,Zheng Zhaojun,Laba Zhuoma,*et al.*Accuracy Assessment of IMS 4 km Snow and Ice Products on the Tibetan Plateau based on Landsat-8 OLI Images[J].Remote Sensing Technology and Application,2021,36(6):1223-1235.[除多,郑照军,拉巴卓玛,等.基于Landsat-8 OLI的青藏高原IMS 4 km雪冰产品精度评价[J].遥感技术与应用,2021,36(6):1223-1235.]  
DOI:10.11873/j.issn.1004-0323.2021.6.1223

## 基于Landsat-8 OLI的青藏高原IMS 4 km 雪冰产品精度评价

除 多<sup>1,2</sup>,郑照军<sup>3,4</sup>,拉巴卓玛<sup>1,2</sup>,次丹玉珍<sup>1,2</sup>

(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;

3. 国家卫星气象中心,北京 100081;

4. 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室,北京 100081)

**摘要:**IMS雪冰产品是多源数据的融合产品,提供北半球逐日无云的雪冰覆盖范围,在青藏高原积雪遥感监测和研究中具有广阔的应用前景。利用Landsat-8 OLI积雪覆盖数据对IMS 4 km分辨率雪冰产品在青藏高原积雪监测中的精度进行了评估验证。研究结果表明:①IMS 4 km雪冰产品的平均总精度为76.0%,平均制图和无雪分类精度分别是88.3%和84.9%,利用IMS 4 km雪冰产品监测青藏高原积雪具有较好的精度,可以用于青藏高原大尺度积雪覆盖监测;②平均多测率为45.4%,漏测率11.7%,IMS 4 km雪冰产品高估了实际积雪面积,且积雪面积比例越高,IMS的积雪判识能力越强,同时出现误判几率越高,而漏判几率越低;③IMS 4 km积雪监测精度在青藏高原总体上呈现海拔较高地段积雪的制图精度较高,随着海拔的降低,积雪监测的漏测和多测呈增加趋势;④相比地面观测数据的区域代表性不足问题,基于高分辨率遥感数据的地面积雪分布特征更为详细,得到更为准确可靠的验证结果。

**关键词:**IMS雪冰产品;Landsat-8 OLI;精度评价;青藏高原

**中图分类号:**TP79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2021)06-1223-13

### 1 引言

积雪作为青藏高原季节性变化最大的下垫面,不仅是高原重要的生态环境组成要素,冰雪融水是高原及其下游地区重要的水资源,而且对区域到全球的气候变化具有重要影响<sup>[1-4]</sup>。然而,降雪过多和积雪持续时间过长造成的雪灾是青藏高原主要气象灾害之一<sup>[5]</sup>。在雪灾的防灾减灾工作中,能否快速、及时、准确地获取积雪信息不仅是认识积雪灾

害特征和机制的基础,而且是救灾的关键所在<sup>[6]</sup>。常规的积雪监测主要依靠气象站点的观测数据,虽然地面观测数据精度和可靠性较高,但由于其空间分布有限,加上时间上的不连续性,极大地限制了对大范围积雪覆盖的实时监测和有效了解。卫星遥感监测积雪具有监测范围广、观测周期短,对积雪灾害响应快速等特点,尤其是在地域辽阔、地形复杂和雪灾频发的地区,遥感技术已成为目前积雪监测最为有效的手段<sup>[7-12]</sup>,在大范围积雪监测中发

收稿日期:2020-12-15;修订日期:2021-11-18

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK010312),科技部科技基础资源调查专项(2017FY100501),国家自然科学基金项目(41561017),西藏自治区科技厅“西藏主要地表特征科学考察及研究”项目。

作者简介:除 多(1969—),男,西藏白朗县人,正研级高工,主要从事卫星遥感应用研究。E-mail:chu\_d22j@hotmail.com

通讯作者:郑照军(1976—),男,吉林白山人,副研究员,主要从事冰冻圈遥感研究与风云卫星工程建设。E-mail:zhengzj@cma.gov.cn

挥着不可替代的作用。

早期的积雪遥感监测只是用于较小的研究范围,真正实现大范围的积雪监测则是从20世纪60年代初开始<sup>[13-14]</sup>。随后,不同传感器系列的相继出现及卫星资料时空分辨率和光谱分辨率的逐步提高,一系列雪盖制图算法及产品得到发展,如Landsat、SPOT、AVHRR、VEGETATION、MODIS等光学积雪遥感数据及产品以及SMMR、SSM/I和AMSR-E等微波积雪产品<sup>[15-22]</sup>,在积雪动态变化监测等领域得到了广泛应用<sup>[23-24]</sup>。

目前,大范围积雪遥感监测和动态变化研究中,应用最广泛的是NASA对地观测系统EOS Terra和Aqua卫星携带的中分辨率成像光谱仪MODIS<sup>[23]</sup>。该传感器是世界上经典的“图谱合一”光学遥感仪器,其较高的光谱和空间分辨率特点,对开展自然灾害与生态环境监测及全球变化综合性研究发挥着越来越重要的作用,为大尺度积雪遥感监测和探索研究提供了一个极其重要的数据来源<sup>[25]</sup>。NASA陆地产品组利用SNOMAP积雪算法制作的标准雪盖产品提供每日及多日合成MODIS积雪产品,空间分辨率为500 m,并且能够有效识别云层<sup>[15,25]</sup>。

所有数据可以从美国国家雪冰数据中心(NSIDC)网站免费获取。在MODIS积雪产品中,由于Terra/MODIS逐日积雪产品相比Aqua/MODIS产品有较少云层干扰的特点<sup>[25-27]</sup>,在积雪和雪灾时空分布的快速响应与制图中应用更为广泛。除了以上的光学和微波遥感数据之外,NOAA IMS (Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System)雪冰产品是由多种极轨与静止卫星的光学与微波、主动与被动传感器数据及产品以及地面积雪观测等资料融合而成<sup>[28-29]</sup>,提供北半球每日无云的雪冰覆盖范围,对于较大区域积雪的近实时监测和业务运行具有其他积雪产品不可替代的应用前景。

快速、准确地进行积雪覆盖范围制图对于划分雪灾等级和确定灾情影响范围具有重要意义,不仅是积雪遥感主要的研究内容,也决定积雪遥感监测的成败。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逐日积雪产品虽然比IMS产品空间分辨率高很多,但是受云的影响严重,图像平均被云覆盖50%以上,在积雪的实时监测中无法发挥更大作用。IMS雪冰产品可以有效弥补多云天气条

件下MODIS无法监测到地面积雪的问题,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验证。刘润等<sup>[30]</sup>和陈爱军等<sup>[31]</sup>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。Landsat系列和Sentinel-2等中高分辨率卫星遥感数据在区域积雪监测和较低空间分辨率积雪遥感产品的验证中得到广泛应用<sup>[32-36]</sup>,但在青藏高原IMS雪冰产品精度评估方面的研究鲜有报道。到目前为止,仅有Yang等<sup>[37]</sup>利用Landsat-5 TM (Thematic Mapper)积雪图像对青藏高原IMS 4 km分辨率雪冰产品进行了精度评价。此外,Chen等<sup>[38]</sup>利用Landsat ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)图像对中国南方地区IMS 4 km分辨率积雪覆盖精度进行了评估。相比其他光学遥感积雪产品,IMS雪冰产品具有不受云干扰的特点,在青藏高原积雪的近实时监测中具有非常广阔的应用前景,但是缺少青藏高原复杂地形条件下的系统验证和评价,尤其是利用最新的Landsat 8卫星遥感数据系统开展青藏高原IMS雪冰产品精度方面的研究成果,还未见正式报道。

为此,本研究以Landsat-8 OLI (Operational Land Imager)卫星遥感数据为参考图像,对IMS 4 km分辨率产品在青藏高原积雪监测中的精度进行评价和验证,系统分析了IMS 4 km雪冰产品在青藏高原的适用性和监测精度的时空差异及其产生的原因,提出在青藏高原积雪监测中的优势和不足,以期更好地将该产品应用于青藏高原近实时的大尺度积雪遥感监测业务中。

## 2 研究区与数据

### 2.1 研究区概况

研究区为整个青藏高原,平均海拔在4 000 m以上,素有“世界屋脊”之称。青藏高原积雪分布具有喜马拉雅山、喀喇昆仑山、昆仑山和祁连山脉等高原周边和念青唐古拉山、唐古拉山、巴颜喀拉山和阿尼玛卿山等高原中东部高大山脉积雪多而北部柴达木盆地、藏南谷地和藏东南河谷积雪覆盖少的特点<sup>[39-40]</sup>。

### 2.2 IMS雪冰产品

IMS雪冰产品是历史最为悠久且在雪冰业务化制图和气候分析及数值预报业务中应用最为广泛的大尺度雪冰范围产品,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雪冰覆盖范围<sup>[41-44]</sup>。

IMS 雪冰产品采用以北极点为中心的极地方位投影,时间分辨率为 1 d,包括 ASCII 和 TIFF 两种格式。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。美国国家雪冰数据中心 NSIDC (National Snow and Ice Data Center) 提供 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。从 2004 年开始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,使得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。从 2014 年 12 月 2 日开始,IMS 北半球雪冰产品分辨率再次提高到 1 km。

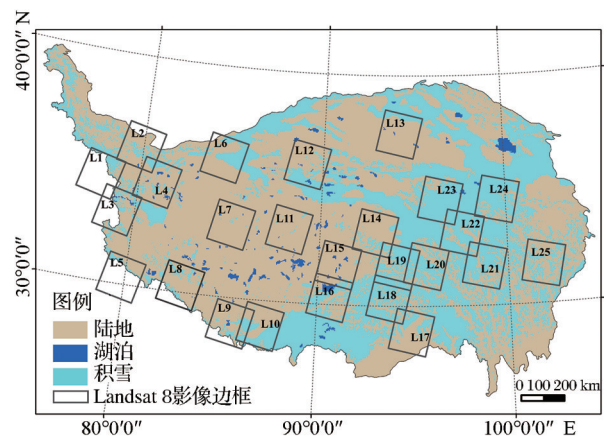
### 2.3 Landsat-8 OLI 数据

Landsat 8 是美国陆地资源卫星系列的第 8 颗卫星,于 2013 年 2 月 11 日成功发射,包括了 ETM+ 传感器的所有波段。相比 TM 和 ETM+ 传感器 8 位数据存储精度,OLI 的数据存储精度是 12 位,所获取的辐射精度和信噪比更高。计划于 2021 年发射的 NASA 和 USGS 合作项目 Landsat 9 将继续记录重要的地面观测数据,其两个传感器几乎与 Landsat 8 传感器一致<sup>[45]</sup>。

所有 Landsat-8 OLI 遥感数据是从中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(www.gscloud.cn)下载。根据研究目标,下载了 25 景晴空无云的 Landsat-8 OLI 影像用于 IMS 逐日积雪范围产品的精度评价与验证。研究区域及 Landsat-8 OLI 影像空间分布见图 1。

### 2.4 图像处理流程

遥感图像处理流程如下:首先从 NSIDC 或 NIC 网站下载 TIFF 格式的北半球 IMS 雪冰图像,将其 TIFF 格式转成 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,利用 Landsat-8 OLI 图像生成 1 km 分辨率的积雪图像,并将 IMS 4 km 分辨率雪冰产品重采样至 1 km;最后,利用 Landsat-8 OLI 积雪图对对应的 IMS 1 km 分辨率积雪图像进行精度验证和分析。



(背景为 2019 年 1 月 1 日青藏高原 IMS 4 km 积雪分布图)

图 1 研究区域及 Landsat-8 OLI 影像空间分布

Fig.1 Tibetan Plateau (TP) as study area and Landsat-8 OLI images selected for validation

## 3 积雪制图与精度评价方法

### 3.1 Landsat-8 OLI 积雪制图方法

归一化积雪指数 NDSI (Normalized Difference Snow Index) 是卫星遥感监测积雪的主要方法<sup>[11-13]</sup>。该方法不仅应用于 Landsat 等众多陆地资源卫星,基于 NDSI 的 NASA 积雪制图算法 SNOMAP 也被用于生成 MODIS 全球尺度的标准化积雪产品<sup>[13-14]</sup>。用于计算 NDSI 的 MODIS 传感器对应波段是波段 4 和波段 6, Landsat TM 和 ETM 传感器对应波段是波段 2 和波段 5。Landsat-8 OLI 对应的可将光和短波红外波段分别是波段 3 和波段 6,其计算公式如下:

$$\text{NDSI} = [\text{Band3} - \text{Band6}] / [\text{Band3} + \text{Band6}] \quad (1)$$

根据 Hall 等<sup>[46]</sup>研究表明,当  $\text{NDSI} \geq 0.40$  时,能够较好地识别积雪覆盖信息,并且能够区分大部分云,所以该阈值设定为 0.40。在此基础上,利用水体在近红外波段反射率低而雪在该波段具有较高反射率的光谱特性,第 5 波段的反射率大于 0.11 消除水体对积雪判识的影响。处理 Landsat-8 OLI 图像时,若某一像元同时满足  $\text{NDSI} \geq 0.40$  且第 5 波段的反射率大于 0.11,则该像元识别为积雪像元。

Landsat-8 OLI 图像处理过程是,在 ENVI 5.3 图像处理软件中,首先对下载好的 OLI 1~7 波段图像进行辐射定标,将图像 DN 值转化为辐射亮度值,之后运行大气校正模块 FLAASH,选择中纬度冬季大气模型、乡村型气溶胶模型、4 km 地面平均高程和 40 km 能见度,将各波段的辐射亮度值转为实际的地面反射率。获得 1~7 波段实际地面反射率之



后,利用其中的波段 3 和波段 6 反射率值根据公式 (1) 计算 NDSI。如果  $NDSI \geq 0.40$  且近红外波段 5 的反射率值大于 0.11, 则该像元识别为积雪像元, 其余设置为非积雪像元。之后, 空间分辨率为 30 m 的 NDSI 结果图像聚合重采样至 1 km, 同一天的 4 km 空间分辨率 IMS 图像投影转换至与 NDSI 一致的 UTM 投影, 并将其重采样至 1 km 的空间分辨率。最后, 根据两幅图像的像元值统计后进行精度评价, 并结合相同空间分辨率和投影坐标的数字高程模型开展精度误差随高程的分布特征分析。

### 3.2 精度评价方法

精度评价采用构建误差矩阵的方法, 将 Landsat 8 积雪覆盖与 IMS 雪冰产品之间进行比较。在二值积雪图像中, Landsat 8 与 IMS 两者都有积雪的像元数为 a, Landsat 8 有积雪而 IMS 无积雪的像元数为 b, Landsat 8 无积雪而 IMS 有积雪的像元数为 c, 两者都无积雪的像元数为 d。最后构建的误差矩阵如表 1 所示。通过误差矩阵可以计算一系列的精度评价指标, 包括总体精度 (Overall Accuracy)、制图精度 (Produce's Accuracy)、用户精度 (User's Accuracy)、无雪分类精度 (No-snow Detection Rate)、漏测率 (Omission Rate) 和多测率 (Commission Rate)。其中, 总体精度表示两者都有积雪或都无积雪的像元数与总像元数的比值。制图精度表示两者都有积雪的像元数与参考图像 Landsat 8 积雪像元总数的比值, 也称回召率。用户精度表示两者都有积雪的像元数与 IMS 积雪像元总数的比值, 也称为积雪分类精度。无雪分类精度是指 Landsat 8 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。误差矩阵中, 两者都有积雪或都无积雪, 则表明 IMS 雪冰产品监测积雪正确。如果两者出现不一致, 则表明 IMS 雪冰产品监测积雪出现错误。错误分为漏测和多测两种情况, 其中漏测率是指 Landsat 8 有积雪但是 IMS 没有积雪的像元数与所有 Landsat 8 积雪像元总数的比值, 而多测率是指 Landsat 8 无积雪但是 IMS 监测到积雪的像元数与所有参考图像 Landsat 8 无雪像元总数的比值。

$$\text{总体精度} = (a + d) / (a + b + c + d) \times 100 \quad (2)$$

$$\text{制图精度} = a / (a + b) \times 100 \quad (3)$$

$$\text{用户精度} = a / (a + c) \times 100 \quad (4)$$

$$\text{漏测率} = b / (a + b) \times 100 \quad (5)$$

$$\text{多测率} = c / (c + d) \times 100 \quad (6)$$

$$\text{无雪分类精度} = d / (b + d) \times 100 \quad (7)$$

表 1 误差矩阵

Table 1 Error matrix

		IMS			
		积雪	无积雪	像元总数	制图精度
Landsat-8 OLI	积雪	a	b	a+b	a/(a+b)
	无积雪	c	d	c+d	
	像元总数	a+c	b+d	a+b+c+d	
	用户精度	a/(a+c)			

除了上述的精度指标之外, 还采用了 Kappa 系数, 它是一个用来评价两个图像之间一致性的综合指标。研究表明<sup>[47]</sup>, Kappa 系数  $> 0.80$  可认为被评价图和参考图之间高度一致, Kappa 系数  $0.60 \sim 0.80$  可认为被评价图和参考图之间一致性极好, Kappa 系数在  $0.40 \sim 0.60$  表示一致性中等, Kappa 系数  $0.20 \sim 0.40$  表示一致性差, Kappa 系数  $< 0.20$  表示一致性很差。

## 4 结果与讨论

### 4.1 精度评价

研究选取了 2013~2019 年青藏高原相对均匀分布的积雪季 25 景晴空无云的 Landsat-8 OLI 图像, 其信息见表 2, 影像空间分布见图 1。从成像时间来看, 绝大多数图像成像于冬季, 共有 19 幅图, 其中 1 月份最多, 共计 13 幅图, 占一半以上, 其他积雪季月份的图像在 1~3 个。冬季青藏高原积雪日数最多<sup>[48]</sup>, 且冬季高原晴空天数较多, 有利于积雪的卫星遥感监测。具体 Landsat 图像处理过程见 3.1 节。将具有相同投影和空间分辨的 NDSI 积雪覆盖图像与同一天的 IMS 图像进行对比, 其中前 10 个图像处理结果见图 2。经过对所有图像逐一进行计算之后, 最终精度评价结果如表 2 所示。

从表 2 中可以看出, IMS 4 km 雪冰产品的总体精度较高, 最低为 54.3%, 最高达 93.9%, 平均总体精度为 76.0%, 且绝大多数图像的精度大于 70%, 见图 3。Yang 等<sup>[32]</sup>利用 Landsat-5 TM 积雪图像对青藏高原 IMS 4 km 分辨率雪冰产品进行了精度评价, 结果表明总体精度达 79.2%, 其精度随雪深的减少而减少, 森林地区多测率最为普遍, IMS 雪冰产品更适合较大尺度的积雪分析和应用, 且相比 MODIS 具有不受云干扰的特点。Chen 等<sup>[33]</sup>利用 Landsat ETM+ 图像对中国南方地区 IMS 4 km 分辨率积雪覆盖精度评估后表明, 在农田等平地 IMS 积雪产品与 ETM+ 积雪图像存在很好的一致, 平均一致性大于 85%, 而在林地和山区, IMS 的精度

表 2 基于 Landsat-8 OLI 的 IMS 4 km 雪冰产品精度评价结果

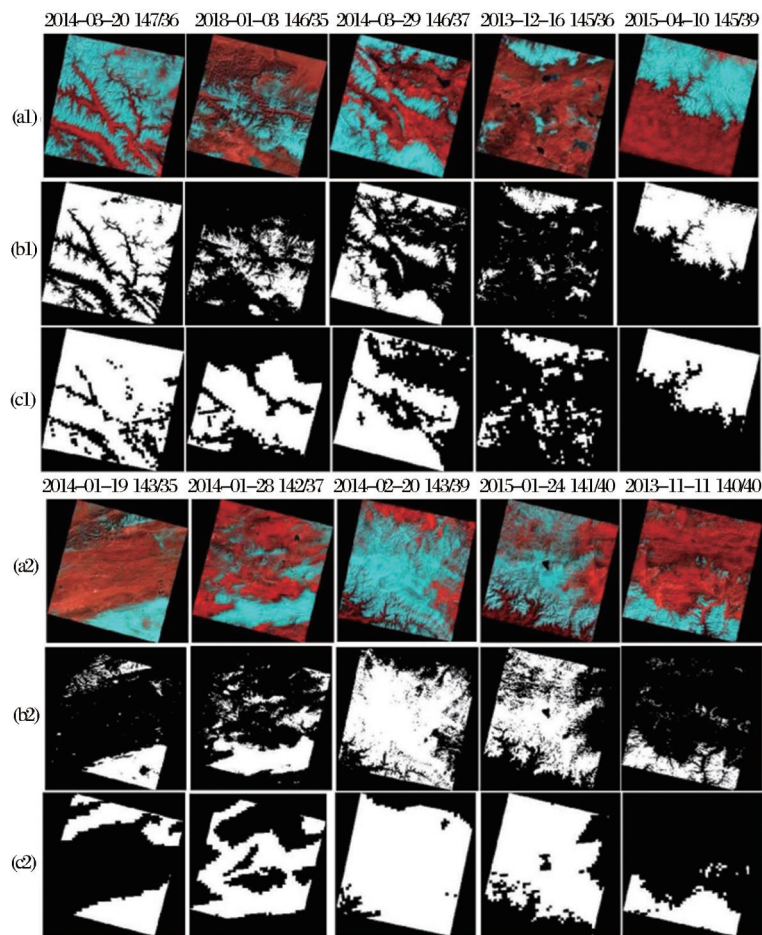
Table 2 Results of accuracy assessment of IMS 4 km products based on Landsat-8 OLI images											
图幅 序号	成像 日期	轨道 列号	轨道 行号	积雪像元所 占比例/%	漏测率 /%	多测率 /%	无雪分类 精度/%	用户 精度/%	制图 精度/%	总体 精度/%	Kappa 系数
L 1	2014/3/20	147	36	72.7	5.9	56.6	73.6	81.6	94.1	80.3	0.430 9
L 2	2018/1/3	146	35	24.7	9.3	43.1	94.9	40.9	90.7	65.3	0.338 2
L 3	2014/3/29	146	37	47.1	15.7	37.1	81.8	66.9	84.3	73.0	0.465 6
L 4	2013/12/16	145	36	14.6	21.6	13.8	95.9	49.3	78.4	85.1	0.519 2
L 5	2015/4/10	145	39	45.7	4.4	7.7	96.2	91.3	95.6	93.8	0.876 3
L 6	2014/1/19	143	35	19.4	5.5	20.2	98.4	52.9	94.5	82.7	0.572 1
L 7	2014/1/28	142	37	30.3	21.8	42.2	85.9	44.6	78.2	64.0	0.297 0
L 8	2014/2/20	143	39	74.2	1.2	75.0	88.2	79.1	98.8	79.8	0.310 7
L 9	2015/1/24	141	40	57.2	7.6	49.9	83.1	71.2	92.4	74.3	0.447 0
L 10	2013/11/11	140	40	17.7	13.1	9.7	97.0	65.9	86.9	89.7	0.686 3
L 11	2019/2/13	140	37	15.6	31.1	30.0	92.4	29.7	68.9	69.8	0.252 7
L 12	2017/1/6	140	35	68.4	3.8	77.6	73.2	72.8	96.2	72.9	0.228 7
L 13	2017/1/1	137	34	16.0	10.8	21.6	97.5	43.9	89.2	80.1	0.476 9
L 14	2017/1/1	137	37	65.3	4.1	73.3	77.8	70.8	95.9	71.7	0.266 0
L 15	2014/12/18	138	38	95.1	2.3	78.8	31.8	96.0	97.7	93.9	0.223 9
L 16	2017/1/8	138	39	19.6	17.1	20.3	95.0	49.9	82.9	80.3	0.500 8
L 17	2014/3/16	135	40	23.4	27.8	16.0	90.8	58.0	72.2	81.3	0.517 9
L 18	2018/4/3	136	39	65.7	10.4	71.3	62.4	67.6	89.6	66.7	0.205 1
L 19	2015/1/21	136	38	69.4	5.9	67.7	70.6	75.9	94.1	75.2	0.311 2
L 20	2017/2/4	135	38	31.0	13.5	34.8	91.5	52.7	86.5	71.8	0.439 2
L 21	2018/1/8	133	38	27.0	46.5	23.1	81.7	46.2	53.5	70.6	0.290 0
L 22	2017/1/12	134	37	83.5	0.5	82.1	87.5	86.0	99.5	86.0	0.255 5
L 23	2017/1/19	135	36	45.7	1.6	82.9	92.8	50.0	98.4	54.3	0.144 0
L 24	2017/1/5	133	36	35.0	3.2	32.7	97.5	61.4	96.8	77.6	0.565 1
L 25	2018/2/11	131	38	45.5	6.9	68.3	84.7	53.2	93.1	59.6	0.233 8
平均				44.4	11.7	45.4	84.9	62.3	88.3	76.0	0.394 2

低于 75%，且 IMS 表现为高估积雪覆盖 50% 以上。地面积雪更为稀疏的地方，IMS 监测精度更差，而且积雪覆盖高估更为明显。此外，混合像元，特别是在复杂地形地区，由于 IMS 4 km 较粗的空间分辨率，其积雪判识精度更是问题。尤其是地面斑块状积雪，很难利用 4 km 像元尺度产品来识别。从表 2 中可以看出，制图精度大于总体精度，其最小值 53.5%，最大值为 99.5%，平均 88.3%。用户精度范围在 29.7%~96.0%，平均为 62.3%，均低于制图精度和总体精度。IMS 4 km 产品的无雪分类精度很高，范围在 31.8%~98.4%，平均达 84.9%。

在以上精度评价的基础上，对 IMS 雪冰产品的青藏高原积雪判识误差进行了分析(图 4)。漏测率表明 IMS 没有正确监测到对应 Landsat 8 图上的积雪，积雪监测出现了漏判现象。IMS 4 km 积雪产品的最低漏测率为 0.5%，出现在 2017 年 1 月 12 日，其次是 2014 年 2 月 20 日，漏测率为 1.2%，之后是 2017

年 1 月 19 日的 IMS 积雪图像，漏测率为 1.6%，以上为 3 个漏测率小于 2% 的积雪监测结果，表明这 3 幅图像的积雪基本被 IMS 有效地监测到了。最大漏测率为 46.5%，出现在 2018 年 1 月 8 日，表明接近一半的积雪覆盖区域出现了漏判现象，其后漏测率较大的依次是 31.1% 和 27.8%，即大约图像中的三分之一和四分之一出现了漏判现象，平均漏测率为 11.7%。IMS 4 km 的多测率要明显大于漏测率，最低多测率出现在 2015 年 4 月 10 日，为 7.7%，其次是 9.7%，出现在 2013 年 11 月 11 日，其余的多测率均大于 10%。多测率最大值为 82.9%，出现在 2017 年 1 月 19 日的积雪图像上，其后是 2017 年 1 月 12 日，为 82.1%，其余的多测率均小于 80%。IMS 4 km 雪冰产品的平均多测率为 45.4%，比平均漏测率高出 33.7%。

除了以上的精度指标之外，Kappa 系数是用来评价两个图像之间一致性的常用综合指标之一。



(Landsat 8 图像接收日期及图幅行列号显示在图像上方)

图 2 前 10 个 Landsat 8 band 6-3-2 合成图 (a) 及对应的 1 km 分辨率 Landsat 8 (b) 和 IMS (c) 积雪覆盖图

Fig.2 First 10 Landsat 8 band 6-3-2 composite images (a) , and corresponding snow cover maps at 1 km spatial resolution of Landsat 8 (b) and IMS (c)

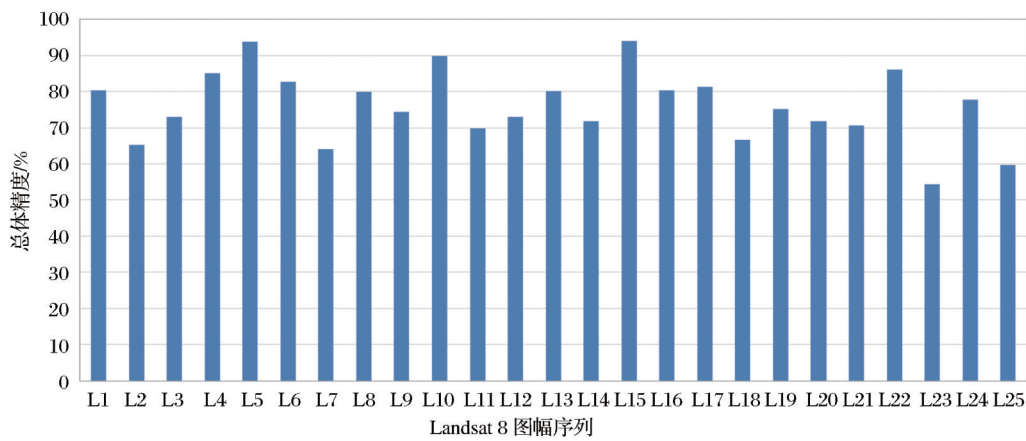


图 3 基于 Landsat-8 OLI 的青藏高原 IMS 4 km 总体精度

Fig.3 Overall accuracy of IMS 4 km product on the TP based on Landsat 8 images

由表 2 可知,IMS 雪冰产品与同期 Landsat-8 OLI 积雪覆盖图像之间的 Kappa 系数最低值是 0.144 0,也是唯一一个 Kappa 系数小于 0.2 的验证结果,其余均大于 0.2, Kappa 系数小于 0.4 的共有 13 对图像,而其余 12 对图像的 Kappa 系数大于 0.4,两者大约各占一半。最大 Kappa 系数为 0.876 3,其次是 0.686 3,也是 Kappa 系数大于 0.6 的两对图像。25 幅图像对平均 Kappa 系数为 0.394 2,表明 IMS 4 km 雪冰产



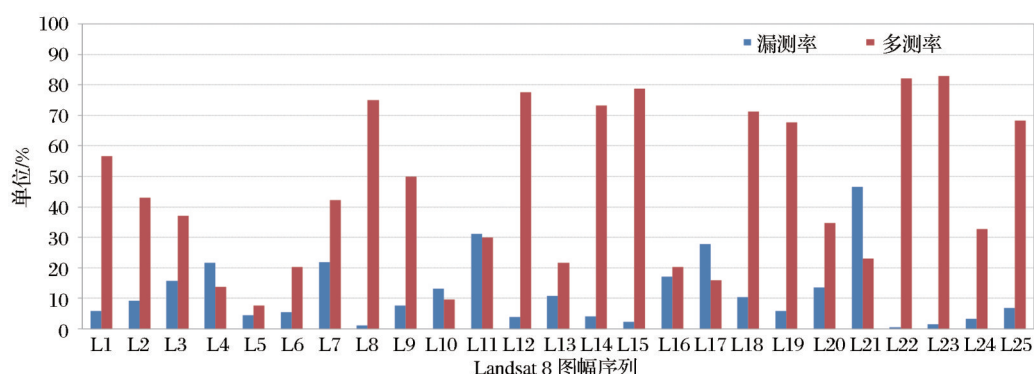


图4 基于 Landsat-8 OLI 的青藏高原 IMS 4 km 产品积雪判识误差

Fig.4 Omission and commission errors of IMS 4 km product on the TP based on Landsat 8 images

品与对应的 Landsat-8 OLI 参考积雪覆盖图像之间的一致性一般。

IMS 4 km 积雪监测误差主要体现在平均多测率要明显大于漏测率,前者为 45.4%,而后者为 11.7%,两者相差 33.7%,IMS 4 km 产品高估了实际积雪面。IMS 4 km 产品的总体精度和制图精度较高,但是 Kappa 系数较低,主要是由 IMS 4 km 产品较高的误判率引起的。通过青藏高原地区 IMS 4 km 雪冰产品与同时相 MODIS 积雪产品对比分析发现,IMS 相对地高估了实际积雪面积,其主要原因是 IMS 的分辨率较低,对零碎积雪的识别能力不足,误判率比漏判率高,进而高估了真实的积雪面积<sup>[30,49-50]</sup>。Brubaker 等<sup>[51-52]</sup>研究指出,IMS 雪冰产品的分辨率较低,高估了实际的积雪面积,误判率应比漏判率要高,这同本研究的分析结论一致。此外,尽管采用多源数据和人工制图相结合的方式,IMS 雪冰产品的精度在厚云条件下依然存在不确定性。当云遮蔽地面时,IMS 是修改前一天的地面积雪信息后制作生成当前的积雪覆盖状况,其结果是在一些地方 IMS 过高估计地面积雪覆盖<sup>[42]</sup>。

#### 4.2 积雪面积比例对精度评价的影响

表 2 的第 5 列给出了利用 Landsat-8 NDSI 计算的积雪面积(积雪像元)占图像面积(所有像元)的百分比,25 幅图像的积雪面积占比在 14.6%~95.1%。为了分析图像中积雪覆盖范围大小对 IMS 精度评价的影响,积雪面积比例与精度评价指标之间进行了线性相关分析,结果见表 3。积雪面积比例与用户精度和多测率之间存在极为显著的正线性关系,与漏测率之间具有非常显著的负线性关系,与制图精度的正相关性显著,表明 Landsat 8 图像中积雪覆盖范围越大,IMS 的积雪判识能力越高,同时出现误判的概率就越大,而漏判的概率就

越低。Landsat 8 图像中积雪覆盖范围或面积越大,意味着地面积雪分布更为连续,更有利于 IMS 有效监测到地面积雪,同时地面的积雪出现误判的情况就越多,相反出现漏判的情况就相应越少。积雪面积比例与漏测率和多测率之间存在非常显著的负线性和正线性相关,表明 Landsat 8 图像中积雪覆盖面积越大,漏测率就越小,而多测率就越高,也就是图像中积雪比例越高,IMS 监测地面积雪的漏判几率越低,而误判的几率也就越大。积雪面积比例与无雪分类精度指标之间极为显著的负线性关系说明,参考图像中积雪所占比例越高,IMS 产品对非积雪类型的监测精度就越低。相比以上这些明显的线性关系,积雪面积比例与总体精度之间不存在显著的线性相关性,说明 Landsat 8 参考图像中的积雪面积比例对 IMS 的总体监测精度没有明显影响。所以,考虑到参考图像中积雪覆盖面积大小对精度评价结果的影响,利用高分辨率遥感积雪图像对中低分辨率遥感积雪产品进行精度检验时,选取晴空条件下积雪和非积雪地表相对平均分布的典型区域图像作为参考数据尤为重要。

#### 4.3 精度评价指标之间的关系

表 3 给出了 7 个精度评价指标相互之间的线性关系。可以看出,Kappa 系数与总体精度和多测率之间存在极为显著的正线性和负线性关系,表明 Kappa 系数越高意味着 IMS 4 km 的积雪监测总体精度越高,而多测率就越小。从表 3 中同样可以看出,在 7 个精度评价指标中,总体精度与用户精度之间存在非常显著的正线性关系,与多测率之间的负线性关系明显,表明总体精度越高意味着用户精度越高,IMS 积雪产品的误判率越低。制图精度与多测率和漏测率之间呈显著的正负线性关系,与用户精度之间的线性关系显著,即制图精度越高,IMS 积雪产品的漏判率越低,误判率就越高。用户精度

表 3 精度评价指标及积雪面积比例相互之间的线性相关系数矩阵

	漏测率	多测率	无雪分类精度	用户精度	制图精度	总体精度	Kappa 系数	积雪面积比例
漏测率	1.00							
多测率	-0.56 <sup>b</sup>	1.00						
无雪分类精度	0.18	-0.60 <sup>b</sup>	1.00					
用户精度	-0.60 <sup>b</sup>	0.42 <sup>c</sup>	-0.55 <sup>b</sup>	1.00				
制图精度	-1.00 <sup>a</sup>	0.56 <sup>b</sup>	-0.18	0.60 <sup>b</sup>	1.00			
总体精度	-0.14	-0.36	-0.09	0.56 <sup>b</sup>	0.14	1.00		
Kappa 系数	0.02	-0.80 <sup>a</sup>	0.51 <sup>b</sup>	0.11	-0.02	0.63 <sup>a</sup>	1.00	
积雪面积比例	-0.59 <sup>b</sup>	0.83 <sup>a</sup>	-0.75 <sup>a</sup>	0.83 <sup>a</sup>	0.59 <sup>b</sup>	0.11	-0.45 <sup>c</sup>	1.00

注:上标 c 表示  $P<0.05$ ; b 表示  $P<0.01$ ; a 表示  $P<0.001$

与总体精度、制图精度呈显著的线性关系,与多测率和漏测率具有明显的正负线性关系,说明用户精度越高,IMS 积雪产品的漏判率越低,误判率就越高。无雪分类精度与多测率之间相关性显著,表明无雪分类精度高意味着 IMS 产品的误判几率就越低。此外,漏测率和多测率之间也存在非常显著的负相关,表明 IMS 雪冰产品监测地面积雪时相对于参考图像 Landsat-8 OLI 积雪图像而言,总体上存在漏测率越高多测率就越低,反之亦然的现象。

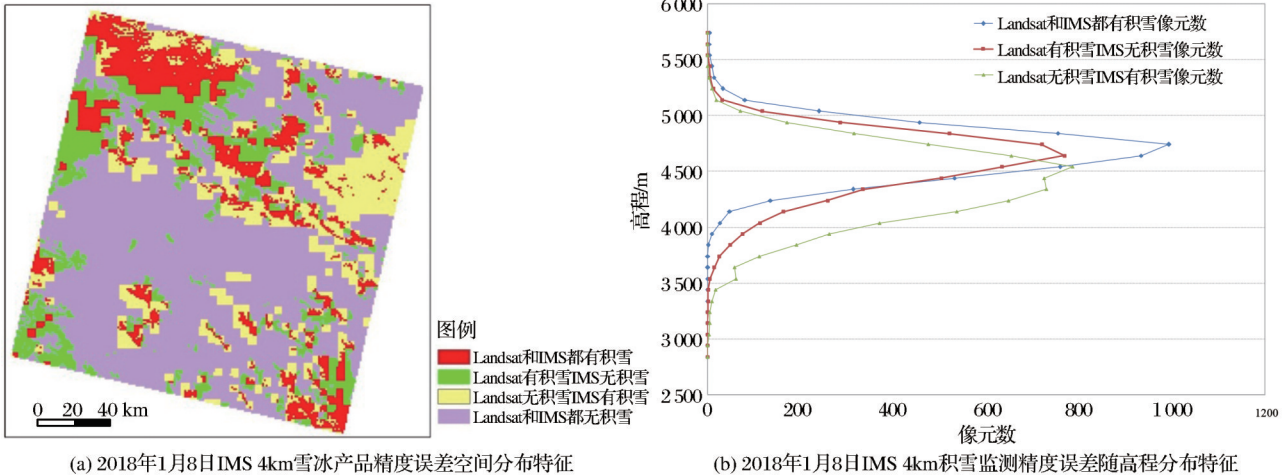
选择合适的精度评价指标是反映积雪遥感产品总体特征和监测精度的基础,对改进产品的精度同样具有重要意义。从以上的分析可以得出,利用高分辨率遥感数据对中小分辨率积雪遥感产品监测精度进行检验时,基于参考图像的精度和制图精度能够较好地反映积雪遥感产品的总体监测精度。

4.4 精度误差空间分布及主要原因

基于 Landsat-8 OLI 图像的 IMS 4 km 青藏高原精度评价分析表明,IMS 4 km 产品总体上多测率

要大于漏测率,前者平均 45.4%,后者为 11.7%,平均多测率比漏测率高 33.7%。然而,IMS 4 km 雪冰产品在青藏高原不同区域的监测精度差异较大,最小漏测率仅 0.5%,最大值为 46.5%,同样,多测率最小值为 7.7%,最大值达 82.9%。为了定量分析 IMS4 km 雪冰产品在青藏高原不同区域误差的空间分布特点及其产生原因,从 25 幅 Landsat 8 图像对应的 IMS 雪冰产品中选取多测率和漏测率最大的 2 幅图像,结合数字高程模型对误差空间分布特点及产生的原因进行了分析。数字高程模型采用了美国地质调查局地球资源观测与科学中心 (USGS EROS) 发布的 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) DEM 高程数据,其空间分辨率是 90 m,重采样至与 IMS 4 km 雪冰产品和 NDSI 积雪图一致的 1 km 空间分辨率。

在 25 幅图像中,以 2018 年 1 月 8 日 Landsat 8 为参考图像的 IMS 4 km 雪冰产品漏测率最大,为 46.5%,多测率为 23.1%,制图精度在所有图像中最低。图 5(a)给出了其精度评价结果的空间分布特



(a) 2018年1月8日IMS 4km雪冰产品精度误差空间分布特征

(b) 2018年1月8日IMS 4km积雪监测精度误差随高程分布特征

图 5 IMS 4 km 雪冰产品精度误差空间分布特征和积雪监测精度误差随高程分布特征

Fig.5 Spatial elevation dependence of accuracy errors of IMS 4 km product on January 8, 2018



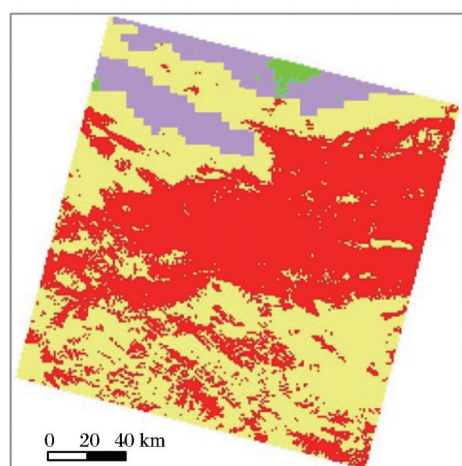
征,Landsat和IMS两者均为积雪的正确判识像元共计5 357个,Landsat有积雪而IMS无积雪的漏判像元共计4 652个,Landsat无积雪而IMS有积雪的误判像元有6 242个,Landsat和IMS均无积雪的正确判识像元有20 815个。根据图5(a)给出的精度评价结果空间分布特征,结合DEM分析表明,Landsat和IMS两者均为积雪的像元多数位于图像北部和东南角海拔较高的区域,而Landsat有积雪但是IMS无积雪的漏测像元数多数位于两者一致为积雪像元的周边区域,Landsat无积雪而IMS有积雪的多测像元数主要分布在北部和南部海拔较低的地区。两者都无积雪的区域主要分布在海拔较低的中部广大区域。图5(b)给出的积雪监测精度误差随100 m间隔高程的定量结果表明,两者均为积雪像元的最低海拔高度为3 638 m,最高为5 728 m,平均海拔高度达4 625 m,多数像元位于海拔4 500 m以上区域,占有两者同为积雪像元的50.1%。Landsat有积雪而IMS无积雪的像元最低分布海拔高度为3 236 m,最高点为5 480 m,平均分布海拔高度4 520 m,海拔4 500 m以上区域占有像元的37.0%。Landsat无积雪而IMS有积雪的像元分布海拔最低为2 981 m,最高点5 425 m,平均分布海拔高度为4 332 m,海拔4 500 m以上区域占有像元的16.1%。Landsat和IMS都无积雪的像元分布海拔最低点为2 786 m,最高点为5 333 m,平均分布海拔高度为4 144 m,海拔4 500 m以上区域占有像元的5.0%。

可见,Landsat和IMS都有积雪的像元平均分布海拔最高,其次是Landsat有积雪而IMS无积雪的像

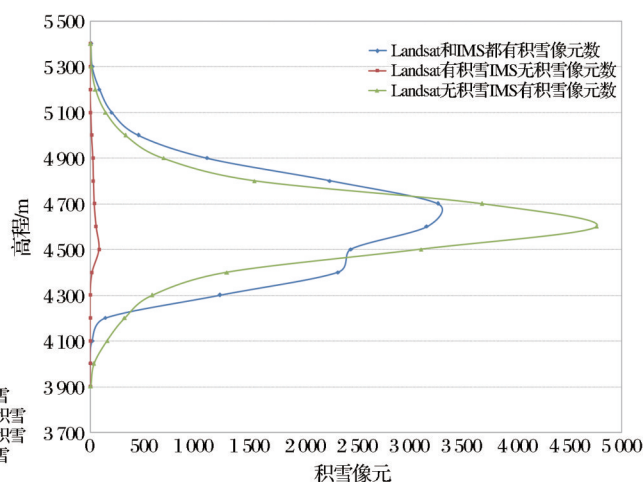
元,Landsat和IMS都无积雪的像元平均分布海拔高度最低,其主要原因是海拔较高的地段不仅有利于降雪,而且海拔越高气温越低,积雪覆盖相对稳定,破碎化程度低,有利于IMS等遥感积雪产品的监测,而海拔越低,气温越高,积雪容易融化而导致其破碎化分布,从而IMS等积雪产品监测更容易出现漏判或误判现象,从而降低积雪的监测精度。

在25幅图像中,2017年1月19日的IMS 4 km图像积雪监测多测率最大,达82.9%,而漏测率仅为1.6%,其总体精度和Kappa系数在所有图像中最低,分别为54.3%和0.144 0。利用数字高程模型分析了该图积雪监测误差的空间分布特点及产生的主要原因。根据图6(a)给出的精度评价结果空间分布特征,结合DEM分析表明,Landsat和IMS两者均为积雪的正确判识积雪像元数共计16 711个,绝大多数位于图像中部区域;IMS产品未能有效监测到参考图像Landsat上积雪的漏测像元数仅265个,且集中位于图像北部中间小块区域;Landsat无积雪而IMS有积雪的误判像元数分布面积较大,主要位于图像北部和南部区域,共计16 714个像元,由此产生的多测率在25个图像中最大;Landsat 8和IMS均无积雪的正确判识像元共计3 437个,分布在图像北部的两块区域。

图6(b)定量给出了IMS 4 km积雪监测误差随间隔为100 m海拔高度的分布特点,可以看出,两者均为积雪像元的最低海拔高度为4 014 m,最高为5 399 m,平均海拔高度达4 570 m,多数像元位于海拔4 500 m以上区域,占有两者同为积雪像元的63.3%。Landsat有积雪而IMS无积雪的像元最低



(a) 2017年1月19日IMS 4 km雪冰产品精度误差空间分布特征



(b) 2017年1月19日IMS 4 km积雪监测误差随高程分布

图6 IMS 4 km雪冰产品精度误差空间分布与积雪监测误差随高程分布

Fig.6 Spatial distribution of accuracy errors of IMS 4 km product with elevation on January 19, 2017

分布海拔高度为 4 244 m,最高点为 5 150 m,平均分布海拔高度 4 600 m,海拔 4 500 m 以上区域占有像元的 61.9%。Landsat 无积雪而 IMS 有积雪的像元分布海拔最低为 3 892 m,最高点 5 389 m,平均分布海拔高度为 4 560 m,海拔 4 500 m 以上区域占有像元的 67.3%。Landsat 和 IMS 都无积雪的像元分布海拔最低点为 4 167 m,最高点为 5 176 m,平均分布海拔高度为 4 482 m,海拔 4 500 m 以上区域占有像元的 40.9%。

由此可见,IMS 雪冰产品和 Landsat 都为积雪像元的正确判识所发生的平均海拔最高,分布的最高海拔也在几个精度评价指标中最高,其次是 IMS 4 km 产品多测率和漏测率发生的平均海拔高度,而 Landsat 和 IMS 均无积雪的正确无雪判识像元分布海拔高度在几个精度评价指标中最低。可见,在青藏高原,海拔高度是影响 IMS 积雪监测精度的重要因素之一,总体上海拔越高积雪的监测精度越高,而海拔越低无雪判识精度越高。海拔越高气温越低,越有利于积雪的维持、空间分布的完整性及空间覆盖的稳定性,进而越有利于积雪的卫星遥感监测,而在海拔较低的地区,较高的气温容易引起积雪的消融而使积雪空间分布呈破碎化,导致卫星遥感监测地面积雪的漏判率和误判率增加,而在海拔更低的区域,气温较高导致积雪的快速融化,主要表现为地面没有积雪分布,进而基本以无雪判识精度形式表现。

总之,海拔较高的区域总体上积雪判识精度较高,而海拔较低的地区,积雪的破碎化分布容易导致积雪漏判率和误判率增加。IMS 4 km 积雪监测精度总体上呈现海拔较高地段积雪的判识精度较高,随着海拔降低地面积雪分布呈破碎化,导致积雪监测的漏判和误判增加的趋势。

## 5 结 论

本研究利用 30 m 分辨率的 Landsat-8 OLI 积雪覆盖数据对 IMS 4 km 分辨率产品在青藏高原积雪监测中的精度进行了评估验证,分析了误差的空间分布特点及产生的主要原因。得出的主要结论如下:

(1) IMS 4 km 雪冰产品的总体精度较高,最低为 54.3%,最高达 93.9%,平均 76.0%,平均制图精度和无雪分类精度分别是 88.3% 和 84.9%,利用 IMS 4 km 雪冰产品监测青藏高原积雪具有较高的

精度,可以用于青藏高原大尺度积雪覆盖监测。

(2) IMS 4 km 雪冰产品平均多测率为 45.4%,平均漏测率 11.7%,在青藏高原高估了实际积雪面积,且存在漏测率越高多测率就越低,反之亦然的现象。选择合适的精度评价指标是反映积雪遥感产品总体特征和监测精度的基础,对改进产品的精度同样具有重要意义。基于高分辨率积雪遥感产品的监测精度检验而言,以参考图像为准的总体精度和制图精度能够较好地反映遥感积雪产品的总体监测精度。

(3) 参考图像中积雪覆盖面积比例对精度评价结果有一定的影响。参考图像中积雪面积比例越高,IMS 的积雪判识能力越高,IMS 监测地面积雪的漏判几率越低,而误判的几率就越高。所以,利用高分辨率遥感积雪图像对中低分辨率遥感积雪产品进行精度检验时选取晴空条件下积雪和非积雪地表相对平均分布的典型区域图像作为参考数据,对分析结果尤为重要。

(4) 海拔高度是影响青藏高原 IMS 积雪监测精度的重要因素之一。IMS 4 km 积雪监测精度在青藏高原总体上呈现海拔较高地段积雪的制图精度较高,随着海拔的降低积雪监测的漏测率和多测率呈增加趋势。

(5) 目前 IMS 雪冰产品的空间分辨率已提高到 1 km,但是青藏高原积雪具有斑块化和快速变化的特点,加之混合像元的影响,利用 IMS 4 km 和 1 km 空间分辨率的二值积雪产品仍带来一定误差和不确定性,而用积雪覆盖度产品能够更加准确地表示地表积雪的实际覆盖状况。因此,需要利用时空分辨率更高的积雪覆盖和覆盖度产品,开展青藏高原积雪覆盖状况和动态变化研究,从而更好地揭示青藏高原积雪的空间分布和时间演变特征。

## 参考文献 (References):

- [1] Ke Changqing, Li Peiji. Spatial and temporal characteristics of snow cover over the Tibetan Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 1998, 53(3): 209-215.[柯长青,李培基. 青藏高原积雪分布与变化特征[J]. 地理学报, 1998, 53(3): 209-215.]
- [2] 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, 1884, 37:3-22.
- [3] Wu G X, Liu Y M, He B, et al. Thermal controls on the Asian summer monsoon[J]. Scientific Reports, 2012, 2(404): DOI:10.1038/srep00404.
- [4] Zhu Yuxiang, Ding Yihui, Xu Huaigang. The decadal rela-

- tionship 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.]
- [5] Zhu Yuxiang, Ding Yihui. Influences of snow cover over Tibetan Plateau on weather and climate: advances and problems [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2007, 35(1): 1-8.[朱玉祥, 丁一汇. 青藏高原积雪对气候影响的研究进展和问题[J]. 气象科技, 2007, 35(1): 1-8.]
- [6] Yang Xiuchun, Cao Yungang, Xu Bin, *et al.* Remote sensing monitoring of grassland snow in China: from October 2007 to March 2008[J]. *Geographical Research*, 2008, 27(5): 1109-1117.[杨秀春, 曹云刚, 徐斌, 等. 中国北方草原区积雪遥感监测: 2007.10~2008.3 期间[J], 地理研究, 2008, 27(5): 1109-1117.]
- [7] Andrew G K, Dorothy K H, George A R. Improving snow-cover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model [J]. *Hydrological Processes*, 1998, 12: 1723-1744.
- [8] Chang A T C, Foster J L, Owe M, *et al.* Passive and active microwave studies of wet snow pack properties[J]. *Nordic Hydrology*, 1985, 16: 57-66.
- [9] Feng Xuezhi, Li Wenjun, Bo Yancheng. Research on the methods of obtaining satellite snow cover information[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2000, 5(10): 836-839.[冯学智, 李文君, 柏延臣. 雪盖卫星遥感信息的提取方法探讨[J]. 中国图象图形学报, 2000, 5(10): 836-839.]
- [10] Feng Xuezhi, Lu Anxin, Zeng Zhuqun. Study on snow disaster monitoring and assessment using remote sensing in the main Pastoral areas of China[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(2): 129-134.[冯学智, 鲁安新, 曾群柱. 中国主要牧区雪灾遥感监测评估模型研究[J]. 遥感学报, 1997, 1(2): 129-134.]
- [11] Liang Tiangang, Liu Xingyuan, Guo Zhenggang. Evaluation approach to snow disasters in pastoral areas based on 3S technologies [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2006, 15 (4): 122-128.[梁天刚, 刘兴元, 郭正刚. 基于3S技术的牧区雪灾评价方法[J]. 草业学报, 2006, 15(4): 122-128.]
- [12] Liu Xingyuan, Chen Quangong, Liang Tiangang, *et al.* Establishment of snow disaster remote sensing monitoring and damage estimation systems in Altai pastoral region of Xinjiang [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(2): 215-220.[刘兴元, 陈全功, 梁天刚, 等. 新疆阿勒泰牧区雪灾遥感监测体系构建与灾害评价系统研究[J]. 应用生态学报, 2006, 17(2): 215-220.]
- [13] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V. Theoretical Basic Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms[R], 2001, NASA.
- [14] Cao Yungang, Liu Chuang. The development of snow-cover mapping from AVHRR to MODIS [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2005, 21(5): 15-19.[曹云刚, 刘闯. 从AVHRR到MODIS的雪盖制图研究进展[J]. 地理与地理信息科学, 2005, 21(5): 15-19.]
- [15] Huang Xiaodong, Hao Xiaohua, Yang Yongshun, *et al.* Advances in snow-cover monitoring using optical remote sensing [J]. *Pratacultural Science*, 2012, 29(1): 35-43.[黄晓东, 郝晓华, 杨永顺, 等. 光学积雪遥感研究进展[J]. 草业科学, 2012, 29(1): 35-43.]
- [16] Rutger D, Steven M, De J. Monitoring snow cover dynamics in Northern Fennoscandia with SPOT vegetation images [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(15): 2933-2949.
- [17] Xiao X, Zhang Q, Boles S, *et al.* Mapping snow cover in the Pan-Arctic zone, using multi-year (1998~2001) images from optical Vegetation sensor [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(24): 5731-5744.
- [18] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V, *et al.* MODIS snow-cover products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1-2): 181-194.
- [19] 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.]
- [20] Che Tao, Li Xin. Spatial distribution and temporal variation of snow water resources in China during 1993~2002 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(1): 64-67.[车涛, 李新. 1993~2002年中国积雪水资源时空分布与变化特征[J]. 冰川冻土, 2005, 27(1): 64-67.]
- [21] Feng Qisheng, Zhang Xuotong, Liang Tiangang. Dynamic monitoring of snow cover based on MOD10A1 and AMSR-E in the north of Xinjiang Province, China [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(1): 125-133.[冯琦胜, 张学通, 梁天刚. 基于MOD10A1和AMSR-E的北疆牧区积雪动态监测研究[J]. 草业学报, 2009, 18(1): 125-133.]
- [22] Yu Hui, Feng Qisheng, Zhang Xuotong, *et al.* An approach for monitoring snow depth based on AMSR-E data in the pastoral area of Northern Xinjiang [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(4): 210-216.[于慧, 冯琦胜, 张学通, 等. 基于AMSR-E信息的北疆牧区雪深遥感监测模型方法初探[J]. 草业学报, 2009, 18(4): 210-216.]
- [23] Liang T G, Zhang X T, Xie H J, *et al.* Toward improved daily snow cover mapping with advanced combination of MODIS and AMSR-E measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 3750-3761.
- [24] Huang Xiaodong, Li Xubing, Liu Changyu, *et al.* Remote sensing inversion of snow cover extent and snow depth/snow water equivalent on the Qinghai-Tibet Plateau: advance and challenge [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(5): 1138-1149.[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.]
- [25] Liu Yujie, Yang Zhongdong. Processing principle and algorithm of MODIS data[M]. Beijing: Science Press, 2001: 187-192.[刘玉洁, 杨忠东. MODIS 遥感信息处理原理与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 187-192.]
- [26] Gao Y, Xie H, Lu N, *et al.* Toward advanced daily cloud-free snow cover and snow water equivalent products from Terra - Aqua MODIS and Aqua AMSR-E measurements[J]. Journal of Hydrology, 2010, 385: 23-35.
- [27] Dietz A J, Kuenzer C, Gessner U, *et al.* Remote sensing of snow - a review of available methods[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33: 4094-4134.
- [28] Frei A, Tedesco M, Lee S, *et al.* A review of global satellite-derived snow products[J]. Advances in Space Research, 2012, 50(8): 1007-1029.
- [29] Choi G, Robinson D A, Kang S. Changing Northern Hemisphere snow seasons[J]. Journal of Climate, 2010, 23: 5305-5310.
- [30] 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.]
- [31] 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.]
- [32] Wu T, Han L, Liu Q. A novel algorithm for differentiating cloud from snow sheets using Landsat-8 OLI imagery[J]. Advances in Space Research, 2019, 64(1): 79-87.
- [33] Berman E E, Bolton D K, Coops N C, *et al.* Daily estimates of Landsat fractional snow cover driven by MODIS and dynamic time-warping[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 216: 635-646.
- [34] Zhu Z, Wang S, Woodcock C E. Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4-7, 8, and Sentinel-2 images[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 159: 269-277.
- [35] Guo S, Du P, Xia J, *et al.* Spatiotemporal changes of glacier and seasonal snow fluctuations over the Namcha Barwa - Gyalaperi massif using object-based classification from Landsat time series[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 177: 21-37.
- [36] Revuelto J, Alonso-González E, Gascoin S, *et al.* Spatial downscaling of MODIS snow cover observations using Sentinel-2 snow products[J]. Remote Sensing, 2021, 13(22): 4513. DOI.org/10.3390/rs13224513.
- [37] 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.
- [38] Chen X, Jiang L, Yang J, *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. DOI: 10.1117/1.JRS.8.084680.
- [39] Chu Duo. Snow Atlas of Tibetan Plateau[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2018.[除多. 青藏高原积雪图集[M]. 北京: 气象出版社, 2018.]
- [40] 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.]
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] Ramsay B H. The interactive multisensor snow and ice mapping system[J]. Hydrological Processes, 1998, 12: 1537-1546.
- [44] Chang A T C, Foster J L, Hall D K. Effects of forest on the snow parameters derived from microwave measurements during the BOREAS winter field campaign[J]. Hydrological Processes, 1996, 10: 1565-1574.
- [45] Masek J G, Wulder M A, Markham B. Landsat 9: Empowering open science and applications through continuity[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 248. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111968.
- [46] 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.
- [47] Congalton R G, Green K. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices[M]. Boca Raton FL, USA., 2019.
- [48] 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.]
- [49] Yu Xiaoqi, Qiu Yubao, Ruan Yongjian, *et al.* Validation and comparison of binary cloudless snow products in High Asia[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(1): 37-48.[于小淇, 邱玉宝, 阮永俭, 等. 高亚洲地区无云积雪遥感二值产品对比和精度验证分析[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(1): 37-48.]
- [50] Qiu Yubao, Zhang Huan, Chu Duo, *et al.* Cloud removing algorithm for the daily cloud free MODIS-based snow cover product over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(3): 515-526.[邱玉宝, 张欢, 除多, 等. 基于 MODIS 的青藏高原逐日无云积雪产品算法[J].

- 冰川冻土, 2017, 39(3): 515-526.]
- [51] 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 Hydro-meteorology*, 2005, 6:1002-1017.
- [52] 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. DOI:10.3390/rs4051134.

## Accuracy Assessment of IMS 4 km Snow and Ice Products on the Tibetan Plateau based on Landsat-8 OLI Images

Chu Duo<sup>1,2</sup>, Zheng Zhaojun<sup>3,4</sup>, Laba Zhuoma<sup>1,2</sup>, Cidan Yuzhen<sup>1,2</sup>

(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;*

3. *National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China;*

4. *Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)*

**Abstract:** NOAA IMS (Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System) is a blended snow and ice product based on active and passive satellite sensors, ground observation and other auxiliary information, and it is most widely used for large-scale snow cover detection and relevant climate research, providing daily cloud-free snow cover extent in the northern hemisphere and having promising application prospects in snow cover monitoring and research in the Tibetan Plateau (TP). In this study, Landsat-8 OLI images are used to evaluate and validate the accuracy of IMS 4km-resolution snow and ice product in snow cover monitoring on the TP. The results show that (1) average overall accuracy of IMS 4km snow and ice products is 76.0% and average produce's accuracy is 88.3%, which presents that IMS 4 km snow-ice product has good accuracy in snow cover monitoring and can be used for large-scale snow cover detection on the TP. (2) The average commission rate is 45.4% and omission rate is 11.7%, which shows that IMS 4 km products overestimate the actual snow area, and the higher the proportion of snow-covered area, the lower the probability of omission rate and the higher the probability of commission rate. (3) The mapping accuracy of IMS 4 km snow cover on the TP generally is higher in the high altitudes, and the commission and omission errors of snow cover monitoring increase with the decrease of elevation. (4) Compared with less regional representativeness of ground observation data, the spatial characteristics of snow cover based on high-resolution remote sensing data are much more detailed, and more accurate verification results can be obtained. The study also shows that overall accuracy and produce's accuracy based on the reference image instead of classified image can better reflect the overall monitoring accuracy of IMS 4km snow-cover product on the TP in comparison with other assessment indicators.

**Key words:** IMS product; Landsat-8 OLI; Accuracy assessment; Tibetan Plateau