

基于 MOD10A1 和 AMSR-E 的北疆 牧区积雪动态监测研究

冯琦胜, 张学通, 梁天刚*

(兰州大学草地农业科技学院 农业部草地农业生态系统学重点实验室, 甘肃 兰州 730020)

摘要:准确监测牧区积雪覆盖范围,对有效防灾减灾和牧区畜牧业持续发展具有特别重要的意义。利用积雪产品和气象台站的观测资料,对比分析了北疆地区 2002 年 11 月 1 日—2005 年 3 月 31 日三个积雪季的 AMSR-E 每日雪水当量产品及其与 MOD10A1 每日积雪分类产品合成的图像 MODAE1 的积雪识别精度。结果表明,1)AMSR-E 每日雪水当量产品的积雪识别率为 66.59%,总精度为 69.49%;2)利用用户自定义的合成算法计算的合成图像 MODAE1,结合了 AMSR-E 雪水当量产品不受天气影响和 MOD10A1 每日积雪产品较高空间分辨率的优点,积雪识别率达 76.43%;3)雪深和土地覆盖对合成图像 MODAE1 的积雪识别率具有重要的影响。在雪深为 1~40 cm 时,合成图像的积雪识别精度随雪深的增加而增大;在雪深为 31~40 cm 时,积雪识别率可达 90.19%;在雪深大于 40 cm 时,积雪识别率开始下降。在牧区合成图像的积雪识别率可达 77.6%,而在开阔的灌丛区积雪识别率略有下降,为 72.7%。

关键词:MODIS;AMSR-E;雪水当量;积雪合成产品;精度分析

中图分类号:S127;T979 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-5759(2009)01-0125-09

* 积雪是地表覆盖的重要组成部分,积雪的反射率比土壤、植被的反射率高得多。积雪严重影响地表的辐射平衡和天气气候的变化,而且积雪融水也是干旱、半干旱地区生态系统的重要水源^[1]。在我国新疆牧区,冬春季大量的积雪经常造成家畜死亡,产生灾害,严重制约着当地草地畜牧业的可持续发展。由于积雪的重要性及其对畜牧业的危害性,准确监测其覆盖范围和动态变化就成为地球系统科学的一项重要研究目标,尤其对频繁发生雪灾的新疆牧区的积雪进行深入研究,对防灾减灾具有极其重要的意义^[2~9]。

美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration,NASA)自 2000 年和 2002 年分别开始接收和分发 MODIS/TERRA 和 AMSR-E/AQUA 卫星数据产品以来,对 MODIS 和 AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System)积雪产品的精度评价及应用研究便成为全球从事冰雪圈的科研工作者关注的热点问题^[10~16]。作为美国国家海洋大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration,NOAA)系列气象卫星的后续卫星,当前正在运行的 2 颗对地观测卫星 TERRA (上午星)和 AQUA (下午星)都搭载了中分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer,MODIS)。此外,AQUA 卫星上还搭载了 AMSR-E 被动微波辐射计。该辐射计在 AMSR 传感器的基础上进行了多项改进。在 6.9~89.0 GHz 内有 6 个频段,都具有双极化方式,比以往的扫描多通道微波辐射计(scanning multichannel microwave radiometer,SMMR)、微波成像辐射计(special sensor microwave/imager,SSM/I)等被动微波辐射计提供了更高空间分辨率和更多微波波段的信息。毛克彪等^[17]研究了 AMSR-E 微波极化指数与 MODIS 植被指数的关系,发现二者呈指数关系;乔平林等^[18]利用 AMSR-E 微波遥感数据反演土壤湿度;孙之文等^[19]利用 AMSR-E 雪水当量产品建立了新疆雪深反演和雪水当量的半经验算法;延昊^[1]对比分析了 MODIS 和微波辐射计 AMSR-E 识别积雪范围的方法,发现由于云层的影响,MODIS 资料划分的积雪面积比实际分布小,AMSR-E 识别的积雪边界线轮廓不清晰。但是,迄今为止在利用 MODIS 和 AMSR-E 雪水当量的合成产品监测积雪动态变化方面的研究还

* 收稿日期:2008-03-24;改回日期:2008-04-14

基金项目:国家自然科学基金项目(30571316)资助。

作者简介:冯琦胜(1983-),男,甘肃镇原人,在读硕士。E-mail:fengqsh06@lzu.cn

* 通讯作者。E-mail:tgliang@lzu.edu.cn

较少。

本研究结合地理信息系统技术,通过对新疆北部地区(以下简称“北疆地区”)MODIS 积雪分类产品和被动微波辐射计 AMSR-E 雪水当量产品进行合成处理与分析,探索研究了 MODIS 每日积雪分类产品 MOD10A1 与 AMSR-E 每日雪水当量产品 AMSR-E SWE 的合成算法及精度,以期为进一步改善北疆牧区积雪遥感监测提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北疆地区位于北纬 $42^{\circ}\sim 50^{\circ}$,东经 $79^{\circ}\sim 92^{\circ}$ 。境内有山地、平原和沙漠 3 个大的地貌单元。受西伯利亚气流影响,常在 10 月一次年 4 月发生雪灾天气,1 月份极端最低气温达 -40°C ,积雪期长达 120 d 左右,积雪最大厚度 60 cm,山区达 1.2 m。全区共有 11 种草地类型,草地面积 2 864.27 万 hm^2 ,占新疆草地总面积的 50.02%,可利用草地面积 2 367.52 万 hm^2 ,占新疆可利用草地总面积的 49.32%。北疆地区是我国 3 大积雪分布中心之一,也是新疆主要的畜牧业基地。由于区内地形复杂,海拔高、气候寒冷潮湿,冬、春季雪灾频繁,大批牲畜因雪灾而死亡,积雪灾害成为主要的自然灾害之一,严重影响着草地畜牧业的可持续发展^[4,20~22]。

1.2 研究材料

本研究主要利用了以下数据,1)MODIS 遥感图像:利用美国国家冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)网站^[23]下载 MODIS/TERRA 每日积雪分类产品 MOD10A1,时间范围为 2002 年 11 月 1 日—2005 年 3 月 31 日的 3 个积雪季,每日涉及的图像有 2 幅,编码为 h23v04 和 h24v04。研究区 3 个积雪季的 MOD10A1 产品,共计 888 幅。2002—2004 年 MODIS 年土地覆盖数据 MOD12Q1 产品,每年 2 幅,编码为 h23v04 和 h24v04,共计 6 幅。2)AMSR-E 每日雪水当量产品^[24]:通过 NSIDC 网站订购下载 AMSR-E/AQUA 的雪水当量(snow water equivalent, SWE)产品 AMSR-E SWE,时间范围与 MODIS 数据相同,数字图像的格式为 HDF-EOS。覆盖范围为北半球,投影格式为 EASE-Grid_north。研究区 3 个积雪季 AMSR-E 雪水当量产品共 448 幅。3)气象资料:北疆地区 20 个地面气象观测站测量的日降雪量、积雪深度等资料。4)辅助数据库:主要有北疆地区地、州、市和县级行政分区、积雪定位观测站点空间分布。

1.3 研究方法

利用 ENVI 4.2 和 ArcGIS 9.1 软件,对 MODIS 每日积雪分类产品 MOD10A1 图像和 AQUA 雷达的 AMSR-E SWE 每日雪水当量产品进行处理,具体步骤如下,1)MOD10A1 每日积雪分类产品图像拼接与坐标变换:利用 MODIS 数据处理工具软件 MRT(MODIS reprojection tool),对北疆地区的 MODIS/TERRA 每日积雪分类产品 MOD10A1 进行接边和坐标变换处理。同时,将正弦曲线投影转换为地理坐标,椭球体选为 WGS84,重采样方法选用最邻近法,图像文件转换为 GeoTIFF 格式。2)AMSR-E 每日雪水当量产品处理:在 ENVI 4.2 下导入 HDF 数据,打开 SWE_NorthernPentad,将影像保存为 img 格式,并定义投影为 EASE-Grid_north,在 ENVI 下将 image 数据转为 GeoTIFF 格式;在 ArcCatalog 9.1 下将 GeoTIFF 格式的图像投影定义为 EASE-Grid_north。3)图像格式及投影转换:采用 ArcGIS 工作站版的宏语言工具,将 MOD10A1 每日积雪分类产品和 AMSR-E 雪水当量产品的 GeoTIFF 格式的图像转换为 GRID 格式,格网分辨率分别设置为 500 和 25 000 m。采用 ArcMap 中的 Project Raster 投影转换工具将其投影转为 Albers 等积圆锥投影。将 AMSR-E 雪水当量产品进行重采样,格网大小定义为 500 m。4)MOD10A1 每日积雪分类产品与 AMSR-E 每日雪水当量产品的合成算法:利用 ArcGIS 9.1 软件下 ArcToolBox 中的工具建模,将 AMSR-E 每日雪水当量产品和 MOD10A1 每日积雪分类产品合成新的积雪产品,记作 MODAE1。除在 MOD10A1 或 AMSR-E SWE 无数据的情况下未进行合成图像外,研究区共合成 438 幅 MODAE1 合成图像。

图像合成的目的在于结合 AMSR-E 每日雪水当量产品不受云干扰和 MOD10A1 每日积雪分类产品空间分辨率和无云状况下积雪分类精度高的特点,尽可能地消除 MOD10A1 每日积雪分类产品中云对积雪分类的影响,从而更准确地反映积雪分布范围。经过反复试验,每日合成图像 MODAE1 的第 i 行第 j 列的像元 T_{ij} 合成和赋值的规则总结如下,1)合成图像数值统一采用 MOD10A1 的地类编码值^[12],像素空间分辨率规定为 500 m。

如果某天无 MOD10A1 或 AMSR-E SWE 数据,则不生成该天的合成图像。2)当 MODIS 每日积雪分类产品 MOD10A1 图像的一个像素无有效数值(如 0,1,4,11,254 或 255)而相应的 AQUA 雷达 AMSR-E SWE 每日产品的像素为任一地类值时,合成图像取 AMSR-E SWE 在该点的地类值。3)当 MODIS 每日积雪产品 MOD10A1 图像的一个像素为陆地而 AMSR-E SWE 每日产品判断为水体、陆地或无数据时,合成结果赋为陆地。当 MOD10A1 图像判断为陆地而 AMSR-E SWE 图像为雪,并且在该 MOD10A1 图像像素及其周围 8 个像素中出现频率最大的数 ≥ 50 (如 50,100 或 200)时,即该像素周围分布有较多的云、积雪覆盖的湖冰或雪时,则合成结果赋为雪;否则,若在该像素及其周围 8 个像素中出现频率最大的数 < 50 (如 0,25,37)时,认为在该像素周围没有雪分布,合成结果取陆地。4)当 MOD10A1 图像的一个像素判断为云时,若 AMSR-E SWE 图像判断为陆地,则赋以陆地;若 AMSR-E SWE 图像判断为水体,则赋为水体;若 AMSR-E SWE 图像无数据,则赋为云;若 AMSR-E SWE 图像判断为雪而 MOD10A1 图像判断为云,并且在该像素及其周围 8 个像素中出现频率最大的数 ≥ 50 时,则合成结果赋为雪;否则,合成结果取该像素及其周围 8 个像素内出现频率最大的数所对应的地类。5)当 MOD10A1 图像的一个像素判断为水体、积雪或积雪覆盖的湖冰,而 AMSR-E SWE 图像判断为任一地类时,合成结果赋以 MOD10A1 图像相应地类的代码(表 1)。

表 1 合成图像 MODAE1 赋值规则
Table 1 Compositing rules of MODAE1 image

MOD10A1 代码(意义) Code (Mean)	AMSR-E SWE			
	0 陆地 Land	0~240 积雪 Snow	254 水体 Water	255 无数据 No data
0\1\4\11\254\255 (无意义 No data)	25	200	37	0
25 (陆地 Land)	25	$200, k \geq 200; 25, k < 25$	25	25
37 (水体 Water)	37	37	37	37
50 (云 Cloud)	25	$200, k \geq 200; 25, k < 25$	37	50
100 (积雪覆盖的湖冰 Snow-covered lake ice)	100	100	100	100
200 (积雪 Snow)	200	200	200	200

注: k 表示 MOD10A1 图像的 3×3 像素块中出现频率最大的数值。

Note: k means the majority number of 3×3 pixels that correspond to MOD10A1 image.

2 结果与分析

2.1 AMSR-E 每日雪水当量产品精度分析

北疆地区 2002 年 11 月 1 日—2005 年 3 月 31 日的 3 个积雪季期间,共有 448 个时相的 AMSR-E 每日雪水当量产品,除去每日图像无数据区域(轨道裂隙)的地面气象台站观测的样本数外,共计有 7 758 对观测值。统计分析每个气象台站对应的 AMSR-E SWE 产品像元的积雪识别状况^[12],结果表明,AMSR-E 每日雪水当量产品分类总精度为 69.49%,积雪识别精度为 66.59%。在 3 个积雪季中,分类总精度介于 66.42%~71.06%,多测误差为 15.2%~30.2%,漏测误差为 32.4%~34.4%。其中,2003 年 11 月—2004 年 3 月积雪季的积雪识别精度最低,多测误差和漏测误差都最高(表 2)。对各观测站数据的对比分析表明,AMSR-E 每日雪水当量产品分类的多测误差较低,仅为 5.01%,但漏测误差较高,达 25.49%。在部分地面台站,积雪精度低于 40%,如北塔山、哈巴河和阿勒泰(表 3)。导致积雪识别精度低的主要原因是台站积雪厚度低于 0.5 cm 的天数较多,从而引起较高的漏测误差。另外,AMSR-E 每日雪水当量产品的空间分辨率为 25 km,1 个格网单元代表地面上 625 km² 的范围,只区分为陆地(SWE=0)或积雪(SWE=0~240)2 种类型,而气象台站的观测数据精确到某一个站点上,两者在空间尺度上存在的较大差异也是引起积雪识别精度低的重要原因。因此,AMSR-E 雪水当量产品可在较大尺度范围内研究积雪的时空分布,但在区域积雪分布动态研究中受精度低和空间分辨率小的双重制约。

表 2 不同积雪季 AMSR-E 雪水当量产品的积雪精度及误差

Table 2 Errors and accuracy of AMSR-E SWE products in the different snow cover seasons

起止时间 Time (年-月-日 Year-month-day)	气象台站 Climate station	AMSR-E		
		积雪 Snow	无积雪 No snow	总计 Total
2002-11-01—2003-03-31	积雪 Snow	1 316(66.6%)	661(33.4%)	1 977
	无积雪 No snow	98(15.2%)	548(84.8%)	646
	总计 Total	1 414	1 209	2 623
	总精度 Overall accuracy	71.06%		
2003-11-01—2004-03-31	积雪 Snow	1 373(65.7%)	717(34.3%)	2 090
	无积雪 No snow	136(30.2%)	314(69.8%)	450
	总计 Total	1 509	1 031	2 540
	总精度 Overall accuracy	66.42%		
2004-11-01—2005-03-31	积雪 Snow	1 254(67.6%)	600(32.4%)	1 854
	无积雪 No snow	155(20.9%)	586(79.1%)	741
	总计 Total	1 409	1 186	2 595
	总精度 Overall accuracy	70.91%		
2002-11-01—2005-03-31	积雪 Snow	3 943(66.6%)	1 978(33.4%)	5 921
	无积雪 No snow	389(21.2%)	1 448(78.8%)	1 837
	总计 Total	4 332	3 426	7 758
	总精度 Overall accuracy	69.49%		

表 3 不同台站 AMSR-E 雪水当量产品的积雪精度及误差

Table 3 Errors and accuracy of AMSR-E SWE products in the different stations

编号 Code	气象台站名称 Climate station name	土地覆盖类型 Land cover type	AMSR-E 雪水当量数据 AMSR-E SWE				记录天数 Days in record (d)	总精度 Overall accuracy (%)	积雪精度 Snow accuracy (%)
			一致性 Agreement		非一致性 Disagreement				
			积雪 Snow	无积雪 No snow	多测 Extra	漏测 Missed			
1	哈巴河 Habahe	农田 Croplands	49	57	0	300	406	26.11	14.04
2	吉木乃 Jimunai	草地 Grasslands	293	36	10	58	397	82.87	83.48
3	福海 Fuhai	草地 Grasslands	292	57	25	41	415	84.10	87.69
4	阿勒泰 Aletai	草地 Grasslands	122	38	0	246	406	39.41	33.15
5	富蕴 Fuyun	草地 Grasslands	283	38	27	44	392	81.89	86.54
6	塔城 Tacheng	草地 Grasslands	148	82	13	148	391	58.82	50.00
7	和布克赛尔 Hebukesai'er	开阔的灌丛 Open shrub lands	192	90	18	91	391	72.12	67.84
8	青河 Qinghe	草地 Grasslands	345	28	7	32	412	90.53	91.51
9	阿拉山口 Alashankou	城市建筑用地 Urban and built-up	139	103	99	56	397	60.96	71.28
10	托里 Tuoli	草地 Grasslands	276	48	45	16	385	84.16	94.52
11	北塔山 Beitashan	草地 Grasslands	34	60	34	262	390	24.10	11.49
12	温泉 Wenquan	草地 Grasslands	234	82	3	71	390	81.03	76.72
13	精河 Jinghe	农田 Croplands	86	181	7	116	390	68.46	42.57
14	石河子 Shihezi Urumchi	城市建筑用地 Urban and built-up	210	87	11	70	378	78.57	75.00
15	蔡家湖 Caijiahu	草地 Grasslands	246	91	5	35	377	89.39	87.54
16	奇台 Qitai	草地 Grasslands	199	73	0	91	363	74.93	68.62
17	伊宁 Yining	农田 Croplands	218	98	37	32	385	82.08	87.20
18	昭苏 Zhaosu	农田 Croplands	179	61	0	123	363	66.12	59.27
19	乌鲁木齐 Urumchi	城市建筑用地 Urban and built-up	162	75	3	127	367	64.58	56.06
20	乌苏 Wusu	草地 Grasslands	236	63	45	19	363	82.37	92.55
总计 Total			3 943	1 448	389	1 978	7 758	69.49	66.59
百分比 Percentage of total (%)			50.82	18.66	5.01	25.49			

2.2 合成图像 MODAE1 精度分析

在北疆地区 3 个积雪季期间,共合成 438 个时相的 MODAE1 图像,对应的地面气象台站观测的样本数共计 8 028 对。对合成图像单个像元同气象台站观测数据的分台站对比分析表明,MODAE1 图像的总分类精度为 76.36%,积雪识别精度达 76.43%(表 4)。对比 AMSR-E 雪水当量产品,各个台站的积雪识别精度都有所提高,其中变化幅度最大的为哈巴河站点,积雪识别精度从 14.04%提高到 75.56%。MODAE1 比 AMSR-E SWE 图像的积雪识别精度提高 10%。比较积雪季分析合成图像的分类精度可以发现,3 个积雪季的总精度介于 74.96%~79.96%,积雪分类精度为 76.2%~76.7%,多测误差为 18.3%~31.0%,漏测误差为 23.3%~23.8%,其中,2003 年 11 月—2004 年 3 月积雪季的积雪识别精度最低(表 5)。对比 AMSR-E 雪水当量产品,多测误差稍有上升,漏测误差减小幅度超过 10%。

2.3 土地利用类型对合成图像精度的影响

对比分析北疆地区 3 个积雪季期间 4 种不同土地覆盖类型的合成图像数据表明,在农田、草原、开阔的灌丛和城市建筑用地上,合成图像的积雪识别精度分别为 74.4%,77.6%,72.7%和 75.1%,总精度分别达 78.12%,76.58%,73.77%和 75.65%,多测误差分别为 12.9%,27.5%,23.4%和 28.4%(表 6)。合成图像在牧区的积雪识别精度最高,城市建筑用地和农田次之,开阔灌丛的积雪识别精度最低。合成图像在城市建筑用地上的多测误差最大,在开阔灌丛上的漏测误差最大。

表 4 不同台站合成图像的积雪精度及误差

Table 4 Errors and accuracy of composite image MODAE1 in the different stations

编号 Code	气象台站名称 Climate station name	合成图像 MODAE1				记录天数 Days in record (d)	总精度 Overall accuracy (%)	积雪精度 Snow accuracy (%)
		一致性 Agreement		非一致性 Disagreement				
		积雪 Snow	无积雪 No snow	多测 Extra	漏测 Missed			
1	哈巴河 Habahe	272	61	2	88	423	78.72	75.56
2	吉木乃 Jimunai	331	30	15	34	410	88.05	90.68
3	福海 Fuhai	305	60	25	32	422	86.49	90.50
4	阿勒泰 Aletai	218	39	0	157	414	62.08	58.13
5	富蕴 Fuyun	316	41	28	27	412	86.65	92.13
6	塔城 Tacheng	162	92	14	142	410	61.95	53.29
7	和布克赛尔 Hebuke-saier	216	85	26	81	408	73.77	72.73
8	清河 Qinghe	346	28	8	25	407	91.89	93.26
9	阿拉山口 Alashankou	175	122	95	20	412	72.09	89.74
10	托里 Tuoli	292	35	64	12	403	81.14	96.05
11	北塔山 Beitashan	54	47	48	241	390	25.90	18.31
12	温泉 Wenquan	249	85	4	64	402	83.08	79.55
13	精河 Jinghe	130	184	11	71	396	79.29	64.68
14	石河子 Shihezi	232	96	11	63	402	81.59	78.64
15	蔡家湖 Caijiahu	249	89	10	33	381	88.71	88.30
16	奇台 Qitai	229	75	3	75	382	79.58	75.33
17	伊宁 Yining	234	101	45	23	403	83.13	91.05
18	昭苏 Zhaosu	222	67	3	113	405	71.36	66.27
19	乌鲁木齐 Urumchi	179	72	9	111	371	67.65	61.72
20	乌苏 Wusu	240	70	43	22	375	82.67	91.60
总计 Total		4 651	1 479	464	1 434	8 028	76.36	76.43
百分比 Percentage of total (%)		57.9	18.4	5.8	17.9			

表 5 不同积雪季合成图像的积雪精度及误差

Table 5 Errors and accuracy of composite image MODAE1 in the different snow cover seasons

起止时间 Time (年-月-日 Year-month-day)	气象台站 Climate station	MODAE1		
		积雪 Snow	无积雪 No snow	总计 Total
2002-11-01—2003-03-31	积雪 Snow	1 595(76.7%)	4 842(23.3%)	2 079
	无积雪 No snow	124(18.3%)	555(81.7%)	679
	总计 Total	1 719	1 039	2 758
	总精度 Overall accuracy	77.96%		
2003-11-01—2004-03-31	积雪 Snow	1 572(76.3%)	487(23.7%)	2 059
	无积雪 No snow	149(31.0%)	332(69.0%)	481
	总计 Total	1 721	819	2 540
	总精度 Overall accuracy	74.96%		
2004-11-01—2005-03-31	积雪 Snow	1 484(76.2%)	463(23.8%)	1 947
	无积雪 No snow	191(24.4%)	592(75.6%)	783
	总计 Total	1 675	1 055	2 730
	总精度 Overall accuracy	76.04%		
2002-11-01—2005-03-31	积雪 Snow	4 651(76.4%)	1 434(23.6%)	6 085
	无积雪 No snow	464(23.9%)	1 479(76.1%)	1 943
	总计 Total	5 115	2 913	8 028
	总精度 Overall accuracy	76.35%		

表 6 在不同土地利用条件下合成图像的积雪精度和误差

Table 6 Errors and accuracy of composite image MODAE1 under the different land cover conditions

土地覆盖类型 Land cover type	气象台站 Climate station	MODAE1		总计 Total
		积雪 Snow	无积雪 No snow	
农田 Croplands	积雪 Snow	858(74.4%)	295(25.6%)	1 153
	无积雪 No snow	61(12.9%)	413(87.1%)	474
	总计 Total	919	708	1 627
	总精度 Overall accuracy	78.12%		
草地 Grasslands	积雪 Snow	2 991(77.6%)	864(22.4%)	3 855
	无积雪 No snow	262(27.5%)	691(72.5%)	953
	总计 Total	3 253	1 555	4 808
	总精度 Overall accuracy	76.58%		
开阔的灌丛 Open shrub lands	积雪 Snow	216(72.7%)	81(27.3%)	297
	无积雪 No snow	26(23.4%)	85(76.6%)	111
	总计 Total	242	166	408
	总精度 Overall accuracy	73.77%		
城市建筑用地 Urban and built-up	积雪 Snow	586(75.1%)	194(24.9%)	780
	无积雪 No snow	115(28.4%)	290(71.6%)	405
	总计 Total	701	484	1 185
	总精度 Overall accuracy	75.65%		

2.4 积雪深度对合成图像积雪识别精度的影响

对北疆地区 3 个积雪季期间 20 个地面台站观测的雪深与相应的合成图像分类结果比较表明,在雪深低于 40 cm 时,积雪深度越深合成图像积雪识别率越高。积雪深度为 1~10 cm 时,合成图像 MODAE1 的积雪识别精度为 60.66%;当雪深为 31~40 cm 时,积雪识别精度达到 90.19%,当积雪深度大于 41 cm 时,积雪识别精度开始下降(表 7),这可能是由样本数过少导致的结果。从理论上而言,雪深越大积雪识别精度应该越高。

表 7 不同雪深条件下合成图像的积雪精度和误差

Table 7 Errors and accuracy of composite image MODAE1 under the different snow depth conditions

台站雪深 Station snow depth (cm)	一致性 Agreement		非一致性 Disagreement		记录天数 Days in record (d)	积雪精度 Snow accuracy (%)
	积雪 Snow	无积雪 No snow	多测 Extra	漏测 Missed		
0	0	1 479	464	0	1 943	—
1~10	1 152	0	0	747	1 899	60.66
11~20	1 815	0	0	378	2 193	82.76
21~30	1 128	0	0	226	1 354	83.31
31~40	432	0	0	47	479	90.19
41~50	101	0	0	23	124	81.45
51~60	23	0	0	13	36	63.89
总计 Total	4 651	1 479	464	1 434	8 028	76.43

通过对北疆地区 MOD10A1 每日积雪分类产品、AMSR-E 每日雪水当量产品以及二者的合成图像 MODAE1 的对比分析发现,除 AMSR-E 每日雪水当量产品为无数据(255)的区域外,合成图像可以很好地消除云的影响,较准确地反映积雪最大覆盖范围。由于 AMSR-E 每日雪水当量产品的空间分辨率为 25 km,同一个像素内通常包含多种地物,在 MOD10A1 每日积雪分类产品有大范围云覆盖的区域,合成图像对应的像素块一般会产生方格子状的陆地或雪的分布区域(图 1)。这是本研究提出的合成算法需要进一步研究和改进的问题。

3 结论

北疆地区 AMSR-E 雪水当量产品的平均积雪识别精度为 66.59%,总的分类精度为 69.49%。由于 AMSR-E 雪水当量产品空间分辨率较低,同一个像素内通常包括多种地物,对雪深小于 0.5 cm 的积雪识别能力差,因此

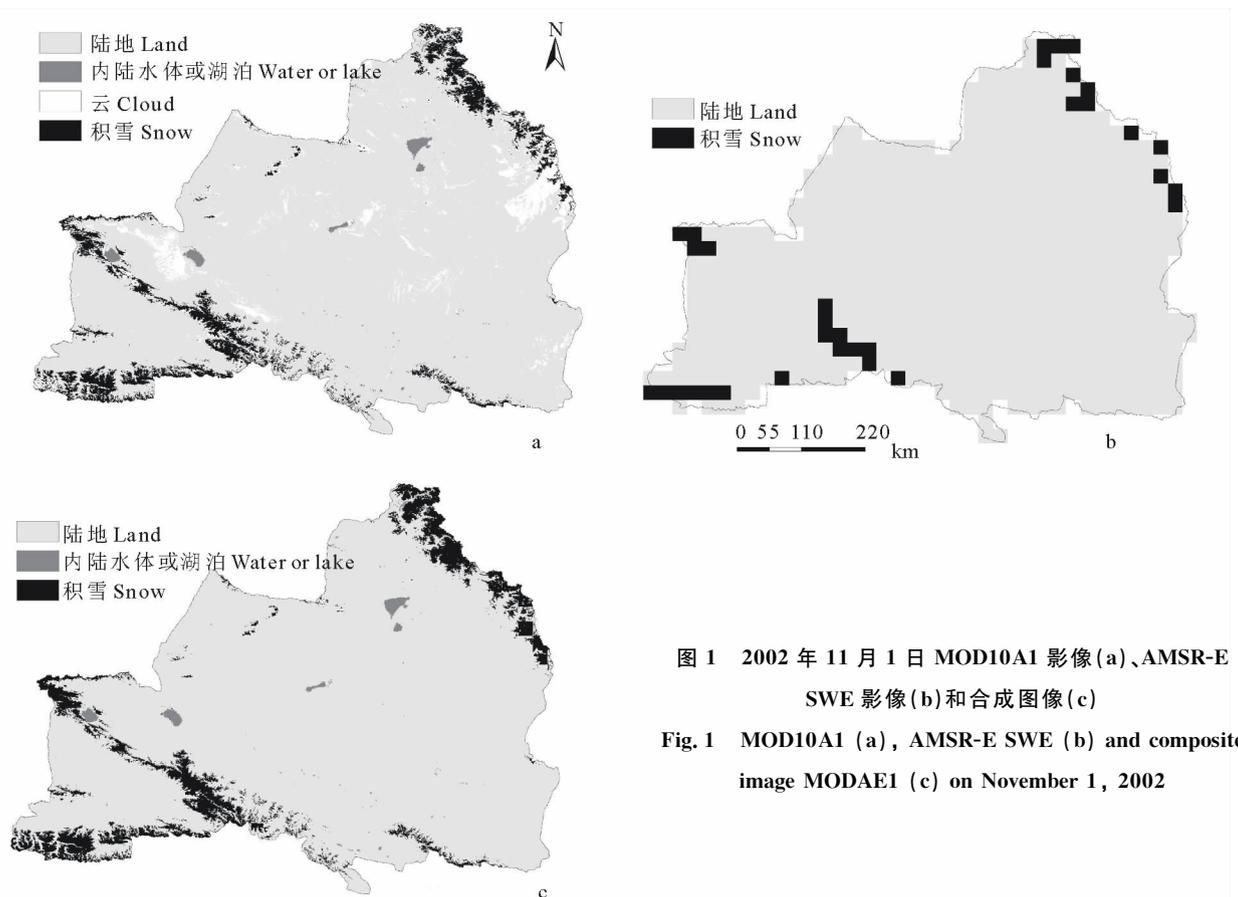


图 1 2002 年 11 月 1 日 MOD10A1 影像(a)、AMSR-E SWE 影像(b)和合成图像(c)

Fig. 1 MOD10A1 (a), AMSR-E SWE (b) and composite image MODAE1 (c) on November 1, 2002

积雪的识别精度较低,不适合牧区雪灾期间每日积雪分布范围的动态监测。依据本研究提出的算法,合成图像 MODAE1 可以结合 MODIS 较高的空间分辨率和 AMSR-E 每日雪水当量产品不受云干扰的优点,将全天候积雪动态监测的精度提高到 76.4%。

合成图像的积雪识别精度受土地利用类型和雪深的影响。在开阔的灌丛地区,积雪识别精度只有 72.7%,在雪深为 40 cm 以上的地区,积雪识别精度降低。另外,合成图像在消除云的影响和保证积雪面积最大的同时,增大了多测误差。尽管如此,由于合成图像具有较高的时间分辨率,可以最大限度地消除云对积雪识别的干扰,有效地降低漏测误差,因此可广泛地应用于研究区每日积雪最大覆盖范围的动态监测,在牧区雪灾研究中具有重要的应用价值。

参考文献:

- [1] 延昊. 利用 MODIS 和 AMSR-E 进行积雪制图比较分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(4): 515-519.
- [2] 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.
- [3] 郝璐, 王静爱, 满苏尔, 等. 中国雪灾时空变化及畜牧业脆弱性分析[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 43-48.
- [4] 高卫东, 刘明哲, 魏文寿, 等. 新疆精(河)一伊(宁)铁路沿线雪害形成机制及其防治工程措施[J]. 山地学报, 2005, 23(1): 43-52.
- [5] 周陆生, 李海红, 王青春. 青藏高原东部牧区大一暴雪过程及雪灾分布的基本特征[J]. 高原气象, 2000, 19(4): 450-458.
- [6] 周陆生, 王青春, 李海红, 等. 青藏高原东部牧区大一暴雪过程雪灾灾情实时评估方法的研究[J]. 自然灾害学报, 2001, 10(2): 58-65.
- [7] 刘兴元, 梁天刚, 郭正刚, 等. 阿勒泰地区草地畜牧业雪灾的遥感监测与评价[J]. 草业学报, 2003, 12(6): 115-120.
- [8] 赵雪雁. 高寒牧区草地退化的人文因素研究——以甘南牧区玛曲县为例[J]. 草业学报, 2007, 16(6): 113-120.
- [9] 赵慧颖, 王广生, 魏学占. GIS 支持下的天然牧草产草量区域预报模型研究[J]. 草业学报, 2007, 16(4): 100-106.
- [10] Maurer E P, Rhoads J D, Dubayah R O, *et al.* Evaluation of the snow-covered area data product from MODIS[J]. Hydrological Processes, 2003, 17: 59-71.
- [11] Klein A G, Barnett A C. Validation of daily MODIS snow cover maps of the upper Rio Grande River Basin for the 2000—2001 snow year[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86: 162-176.
- [12] Lampkin D J, Yool S R. Monitoring mountain snow pack evolution using near-surface optical and thermal properties[J]. Hydrological Process, 2004, 18: 3527-3542.
- [13] Simic A, Fernandes R, Brown R, *et al.* Validation of vegetation, MODIS, and GOES+SSM/I snow-cover products over Canada based on surface snow depth observations[J]. Hydrological Process, 2004, 18: 1089-1104.
- [14] 梁天刚, 高新华, 黄晓东, 等. 新疆北部 MODIS 积雪制图算法的分类精度[J]. 干旱区研究, 2007, 24(4): 446-452.
- [15] 崔霞, 冯琦胜, 梁天刚. 基于遥感技术的植被净初级生产力研究进展[J]. 草业科学, 2007, 24(10): 36-42.
- [16] 李霞, 崔霞, 黄晓东, 等. 北疆不同草地类型 MODIS 植被指数的时空变化研究[J]. 草业科学, 2007, 24(9): 5-11.
- [17] 毛克彪, 唐华俊, 周清波, 等. AMSR-E 微波极化指数与 MODIS 植被指数关系研究[J]. 国土资源遥感, 2007, 3(1): 27-31.
- [18] 乔平林, 张继贤, 王翠华. 应用 AMSR-E 微波遥感数据进行土壤湿度反演[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(1): 262-265.
- [19] 孙之文, 施建成, 蒋玲梅, 等. 被动微波遥感反演中国西部地区雪深、雪水当量算法初步研究[J]. 地球科学进展, 2006, 21(12): 1363-1369.
- [20] 许鹏, 阿里木江, 王博, 等. 新疆草地资源及其利用[M]. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1993. 213-215.
- [21] 杨莲梅, 杨涛, 贾丽红, 等. 新疆大一暴雪气候特征及其水汽分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 389-396.
- [22] 鲁为华, 于磊, 蒋惠. 新疆昭苏县沙尔套山天然草地植物群落数量分类与排序[J]. 草业学报, 2008, 17(1): 135-139.
- [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] 毛克彪, 覃志豪, 李满春, 等. AMS 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.

**Dynamic monitoring of snow cover based on MOD10A1 and AMSR-E
in the north of Xinjiang Province, China**

FENG Qi-sheng, ZHANG Xue-tong, LIANG Tian-gang

(College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University; Key Laboratory of
Grassland Agro-ecology System, Ministry of Agriculture, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Accurate monitoring of snow-covered areas plays a significant role in dynamic studies and prevention of snow-caused disasters and of sustainable development in pastoral areas. Using snow cover products and climatic station data, the snow classification accuracy was analyzed for AMSR-E daily SWE (snow water equivalent) products and composite images using AMSR-E SWE and MOD10A1 daily snow cover products in the three snow seasons of November 1 to March 31 from 2002 to 2005 in the north of Xinjiang Province. Results suggested that the snow classification accuracy for AMSR-E daily SWE products is 66.59% and the overall accuracy is 69.49%. The composite images (denoted MODAE1), calculated by the user-defined composite algorithm, combined the advantages of AMSR-E SWE products that are not affected by weather and of MOD10A1 daily snow cover products with higher spatial resolution so that the snow classification accuracy reached 76.43%. The snow depth and land cover have an important effect on the accuracy of snow classification for the MODAE1 composite images. The snow classification accuracy for the composite images increased when the snow depth (SD) was between 1 and 40 cm, reached 90.19% when SD was 31–40 cm; but started to decrease when SD was more than 40 cm. The snow classification accuracy in the pastoral areas reached 77.6%, but declined to 72.7% in open shrub land areas.

Key words: MODIS; AMSR-E; snow water equivalent; snow composite product; accuracy analysis