

天山典型林带积雪的多角度遥感识别

汪凌霄, 肖鹏峰, 冯学智

南京大学 地理信息科学系, 江苏 南京 210093

摘要: 天山中段的山地针叶林带很大程度上影响了该地区整体卫星雪盖的识别精度, 多角度卫星遥感技术的发展为林区积雪识别提供了新的途径。本文选取了2000年4月至2001年6月, 10个时段研究区内无云覆盖的(Multi-angle Imaging SpectroRadiometer)MISR多角度数据, 首先对红光波段不同角度观测结果组成的角度谱图像进行非监督分类, 以确定天山林带的分布区域, 然后在玛纳斯河中下游与那拉提山东部选取典型像元, 分析这些像元红光波段各角度反射率在林区不同积雪覆盖状况下的表现差异。研究发现, 若林区存在积雪, 0° , $\pm 26.1^\circ$, $\pm 45.6^\circ$ 五个观测角度反射率的平均值大于0.1, 在部分降雪月份, 后向 45.6° 观测的反射率大于天顶方向观测的2.5倍。根据这一结论, 给出基于MISR数据的研究区不同时间段的积雪识别结果。结果表明, MISR红光波段对林区积雪反应敏感, 不同角度观测的反射率在林区有雪和无雪时差异较大, 故可利用多角度遥感信息进行林区积雪识别。

关键词: MISR, 多角度遥感, 天山林带, 积雪识别

中图分类号: TP79

文献标志码: A

引用格式: 汪凌霄, 肖鹏峰, 冯学智. 2012. 天山典型林带积雪的多角度遥感识别. 遥感学报, 16(5): 1035-1053

Wang L X, Xiao P F and Feng X Z. 2012. Retrieving snow information in typical forest zone of Tianshan mountains from multi-angle imaging spectroradiometer data. Journal of Remote Sensing, 16(5): 1035-1053

1 引言

积雪是地表覆盖的重要组成部分, 具有高反射率、强热辐射和高绝热性的特点, 影响着地表的辐射平衡和气候变化, 对区域气候、自然环境和人类活动等具有不可忽视的作用。天山山区是中国3大积雪覆盖区之一, 其积雪分布情况对该地区的水资源合理利用、气候与环境变化等研究具有重要的意义。卫星雪盖制图是当前冰雪遥感的主要技术手段, 近年来已得到快速发展和广泛应用, 尤其在气象资料不足、气候条件恶劣的山区, 卫星遥感是唯一能够客观地反映大范围积雪覆盖状况和变化的手段。

归一化差值积雪指数NDSI(Dozier, 1989) 是进行大范围积雪监测简单有效且使用广泛的指标, 研究表明, 当下垫面为植被时, 应用NDSI积雪识别

精度低, 尤其是在茂密的林区, 漏测误差增大(仲桂新, 2010; Hall 等, 1998)。在天山北坡海拔1400—2800 m的中山带和亚高山带下部, 山地针叶林呈条块状分布于阴坡和半阴坡, 建群种为雪岭云杉(俗称天山松)(陈曦 等, 2008; 胡汝骥, 2004), 很大程度上影响了该地区的卫星雪盖识别精度。由于林区植被结构复杂, 通过单纯降低NDSI阈值的方法无法从根本上解决树冠阴影、植被类型和地形因素等对积雪识别造成的影响。

林区积雪识别一直是光学卫星遥感雪盖制图中具有挑战性的问题(陈贤章 等, 1996)。目前已有的研究多是在平原或者地形起伏差异不明显的地区进行, 利用天顶方向观测的数据根据光谱混合模型估算像元内积雪所占比例(Vikhamar 等, 2003a, 2003b; Metsämäki 等, 2005), 但是这种方法很难应用中

收稿日期: 2011-04-25; 修订日期: 2012-02-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(编号: 2011CB952001); 干旱区水循环与水利用新疆自治区重点实验室开放课题(编号: XJYS0907-2009-04)

第一作者简介: 汪凌霄(1988—), 女, 南京大学地图学与地理信息系统专业硕士研究生, 主要研究方向为资源环境遥感。E-mail: rebecciao@gmail.com。

通信作者简介: 肖鹏峰(1979—), 男, 副教授。主要研究方向为遥感数字图像处理与资源环境遥感。E-mail: xiaopf@gmail.com。

国天山地区,一方面由于天山地区地形起伏剧烈,另一方面由于天山松生长非常茂密,在陡峭阴坡和阴湿坡上,林木郁闭度很大,常可达0.5—0.7(胡汝骥, 2004),树木生长尤为茂密的森林使得林区积雪识别更加困难(Foster 等, 1991)。由于林冠对积雪信息的部分屏蔽效应,使得线性光谱混合模型在茂密林区很难达到较高的精度。

多角度遥感技术的发展,为林区积雪的识别提供了新的途径。搭载在Terra卫星上的MISR可以同时提供9个观测角度的数据。充分利用MISR,可获得更为丰富的林区信息(Pinty 等, 2002; Gobron 等, 2002; Nolin, 2004; Canisiusy, 2007; Pisek, 2009; Liesenberg, 2007)。根据几何光学模型,每个像元的反射为光照冠层、光照背景、阴影冠层和阴影背景4个分量的面积加权(Liang, 2004)。不同角度观测的各组分比例不同,若林区有雪覆盖,由于雪不同于植被的高反射特性,不同角度观测的反射率会有明显的差异,因此可以利用MISR各角度反射率的变化差异,获得林区的积雪信息。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

研究区位于 $84^{\circ}13'2''\text{E}$ — $86^{\circ}27'22''\text{E}$, $42^{\circ}53'59''\text{N}$ — $44^{\circ}39'38''\text{N}$ 之间,高程为317—5212 m。区内有依连哈比尔尕山、那拉提山、阿吾拉勒山和天格尔山等山脉及尤尔都斯盆地,从西到东依次分布着奎屯河、八音沟河、金沟河、玛纳斯河、清水河、塔西河和呼图壁河(胡汝骥, 2004)。图1为研究区示意图,白色方框显示了研究区位置,可发现天山松茂密地生长于阴坡,其余山坡少林木、灌丛,有大片草原(胡汝骥, 2004)。

A、B为感兴趣像元所在位置。A为那拉提山东部,那拉提地区是国家森林公园,成片集中分布着雪岭云杉,是天山森林的精华。B为玛纳斯河中下游,玛纳斯河流域位于天山北坡中西部,高大的山体能够截获大量来自大西洋和北冰洋的湿润气流,致使降雨量丰富,水热条件适宜,针叶林带上、下限高度分别为2690 m和1460 m,林带垂直宽度达1230 m(陈曦 等, 2008)。

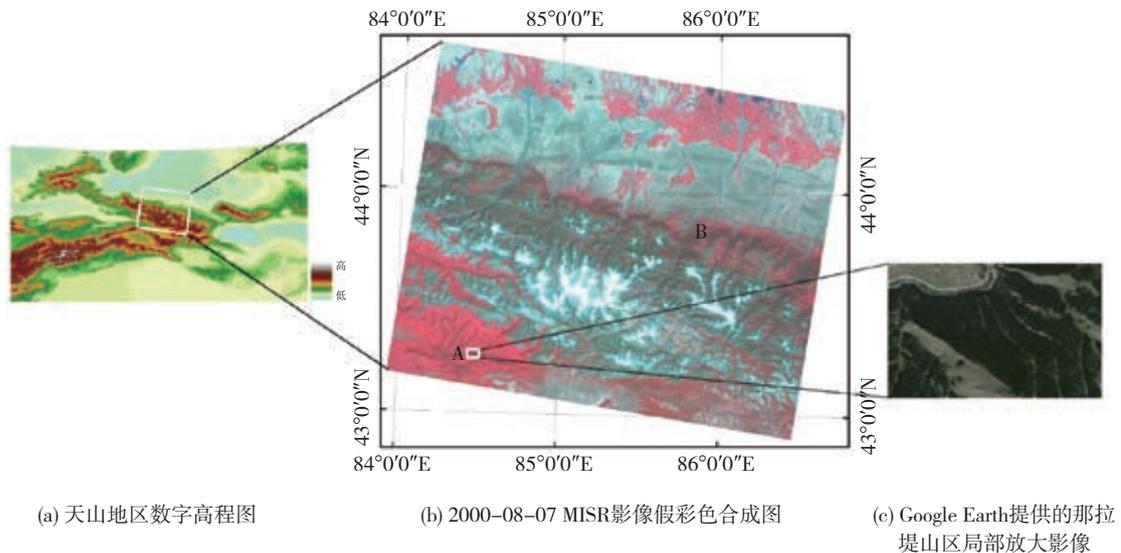


图1 研究区示意图

2.2 数据资料

2.2.1 MISR数据

MISR搭载在1999年12月发射的Terra卫星上,可从9个方向、分4个波段观测地球。9个观测天顶角分别为 -70.5° (Da)、 -60.0° (Ca)、 -45.6° (Ba)、 -26.1° (Aa)、 0° (An)、 26.1° (Af)、 45.6° (Bf)、 60.0° (Cf)和 70.5° (Df); 4个波段依次为蓝(446 nm)、绿(558 nm)、

红(672 nm)和近红外(866 nm)波段(Diner 等, 1998)。MISR Level1B2为经过辐射校正与几何校正后的辐射值产品,投影方式为SOM(Space Oblique Mercator),采用HDF-EOS格式存储(Bothwell 等, 2002; 万华伟 等, 2007)。由于MISR数据增加了角度维数据(MISR数据一般为4维或5维,高于常见的3维),常用的遥感软件不能灵活处理,因此本文采用IDL(interactive data language)读取并计算MISR数据。

本文选取MI1B2T(MISR Level-1B2 Global Mode Terrain-projected Radiance)红光波段数据进行林带积雪识别研究。红光波段是植被的敏感波段, 植被在该波段反射率很低, 呈现出一个明显的谷值, 当植被有雪覆盖时, 该波段反射率变化明显; 仅使用一个波段, 也可避免由于不同波段反射率与入射角余弦相关性不同产生的影响。L1B2T红光波段辐射值的空间分辨率为275 m, 与数据中存储的BRF 转换因子相乘后可以得到空间分辨率为275 m 的BRF (Bull, 2010)。

MISR分辨率较低, 无法看出范围较小的云, 很难直接筛选数据, 搭载ETM+传感器的Landsat卫星轨道与搭载MISR传感器的Terra卫星轨道基本一致, 两者当地过境时间仅相差15 min, 因此可通过比照较高分辨率的Landsat ETM+影像, 选取研究区内无云覆盖高质量的MISR数据。2000年—2001年Landsat ETM+影像较多, 且数据质量较高, 通过对比成像时间相近的Landsat ETM+影像, 选取了2000年4月至2001年6月10个时段的MISR数据。2000-09、2000-11和2001-04的Landsat ETM+影像缺失或者数据质量太低, 无法根据Landsat ETM+影像了解研究区的状况。相应地, 2002-09、2002-11和2003-04 Landsat ETM+影像质量较高, 所以9月、11月、4月这3个时相的MISR数据也选用2002-09、2002-11和2003-04的MISR数据。林带不同积雪覆盖状况根据同时时间的Landsat ETM+影像得到, 观察MISR影像中各角度反射率在林区不同积雪覆盖状况下的表现差异。表1为MISR数据列表, 从每个轨道的数据中选取55-56 Block, 经过裁剪得到研究区影像。图2是10个时段MISR影像的观测几何示意图, 点代表当日太阳位置, 直线代表MISR 9个相机的观测位置。

表1 MISR影像数据简况

轨道	日期	太阳天顶角/(°)	太阳方位角/(°)
1527	4月: 2000-04-01	39.3	161.2
2925	7月: 2000-07-06	22.3	149.2
3391	8月: 2000-08-07	28.4	153.8
14575	9月: 2002-09-14	40.9	159.3
15274	11月: 2002-11-01	57.7	168.0
5255	12月: 2000-12-13	66.4	169.7
5954	1月: 2001-01-30	61.8	163.6
6653	3月: 2001-03-19	44.9	159.8
17604	4月: 2003-04-10	37.2	154.9
7818	6月: 2001-06-07	22.3	149.0

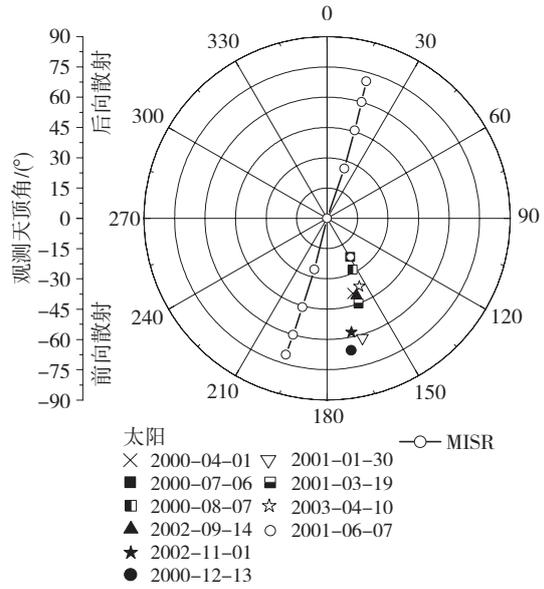


图2 10个时段MISR影像观测几何示意图

2.2.2 其他资料

使用DEM数据辅助验证天山林带提取结果是否准确, 并提供感兴趣像元的坡向坡度信息。DEM数据采用ASTER GDEM数字高程模型。为了与MISR数据匹配, 将其重投影至SOM坐标系下, 并以275 m分辨率重采样。此外, 利用Landsat ETM+以及Google Earth提供的高分辨率影像辅助判断林带积雪覆盖状况。

3 研究方法

3.1 山区林带的识别

进行林带积雪识别首先需要在遥感图像上得到天山林带的分布范围, 将其与草地、裸地及稀疏植被区分开来。MISR提供了不同观测角度的反射率图像, 考虑到森林与草地植被结构不同, 反射率随角度变化不同, 而森林与裸土的表现也不同, 因此可以利用不同角度观测结果组成的角度谱图像进行分类。红光波段是植被的敏感波段, 将0°, ±26.1°, ±45.6°五个角度观测的红光波段数据组合, 得到275 m空间分辨率的红光波段角度谱图像。在天山地形复杂的地区, 经过正射校正后, 后向60.0°和70.5°的数据通常会缺失, 且多角度高光谱CHRIS/PROBA数据的研究表明, 随着倾斜观测视角的加大, 得到的林下信息减少 (Rautiainen 等, 2008), 倾斜角过

大的观测数据对本文研究贡献不大，因此文中只选择5个角度构成角度谱图像。正射校正后损失像元的数量与影像获取当日的太阳高度角及太阳方位角有关。在那拉提山森林地区，由于山体起伏不大，受到的影响很少。在天山北坡中西部起伏特别剧烈的地区， -45.6° 观测方向无值，但是天山松多生长在河流的中下游，不属于地形起伏特别剧烈的地区，受到影响有限。

观察角度谱图像发现，尽管山体阴影区不同地物的反射率都很低，但是随着观测角度不同，不同地物的反射率变化情况不同，可以将林地与其他地物区分开来。图3给出了阳坡草地、阴坡荒漠和阴坡森林3类地物的角度谱曲线，可以看出A区森林与B区森林5个角度反射率构成的曲线形状相似，与阳坡草地、阴坡荒漠5个角度反射率构成的曲线形状不同；此外，同处于阴坡的荒漠在红光波段各个角度的反射率都要比森林高出许多。

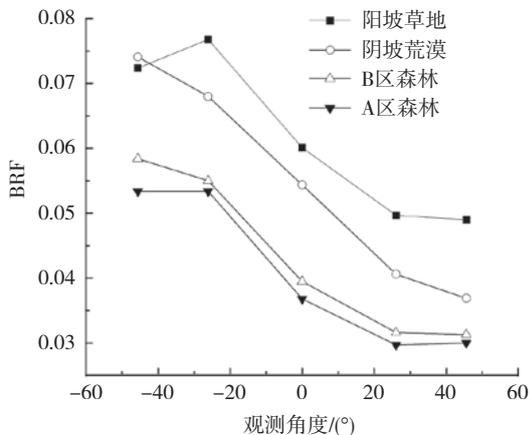


图3 不同地物角度谱曲线

首先应用夏季(2000-08-07) MISR图像的NDVI建立掩膜得到植被覆盖区域，为了保证掩膜后的区域包括所有林带，NDVI阈值设定较低，为0.2。对植被覆盖区域的角度谱图像应用ISODATA非监督分类以区分森林与其他地物。

图4为研究区角度谱图像应用非监督分类得到的分类结果，对结果目视分析并比照Google Earth提供的相同时段高分辨率影像，发现其可以很好地区分阴坡的森林与阴影区的草地、裸地和稀疏植被。提取的林带高程范围与文献中描述的天山松分布海拔范围(陈曦等, 2008)差异不大；对提取的森林根据DEM

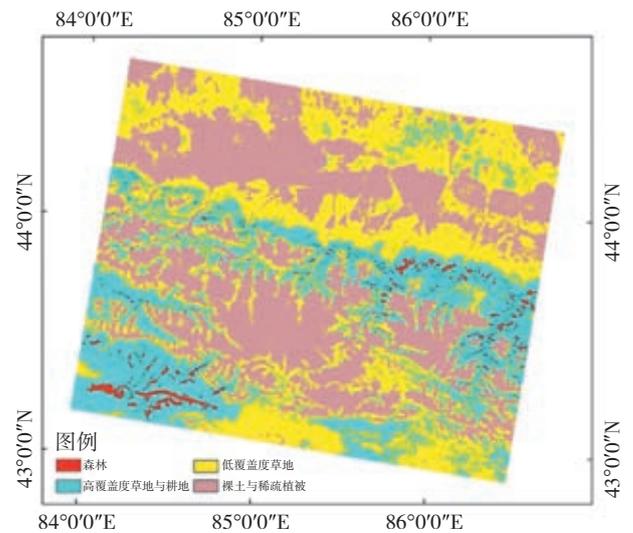


图4 植被分类结果

做坡向统计，北、西北和东北3个坡向的像元数占林地全部像元数的74.9%，与天山松的生长区域一致，这也证实了结果可靠。

此外，尝试对天顶方向观测的多波段影像应用ISODATA非监督分类，并对两种数据的分类结果进行精度评价。以1995年新疆地区1:25万土地利用数据，作为真实地类参考，对红光波段角度谱图像非监督分类结果及天顶方向观测的多波段影像非监督分类结果分别进行精度评估，为保证森林类有足够数量的样本，能够对该类的分类精度进行评价，采用分层、层内随机采样的方式布置335个采样点，各类样本数量、分类结果与参考图之间对比的混淆矩阵和Kappa系数如表2、表3所示。

表2 研究区红光波段角度谱图像非监督分类精度分析

类别	地面参考				总计	用户精度/%
	森林	高覆盖度草地与耕地	低覆盖度草地	裸土与稀疏植被		
森林	50	15	0	0	65	76.9
高覆盖度草地与耕地	12	69	0	9	90	76.7
低覆盖度草地	2	56	13	19	90	14.4
裸土与稀疏植被	3	3	12	72	90	80.0
总计	67	143	25	100	335	
制图精度/%	74.6	48.3	52.0	72.0		
总体精度=60.9% Kappa系数=47.6%						

表3 研究区天顶方向观测的多波段影像非监督分类精度分析

类别	地面参考				总计	用户精度/%
	森林	高覆盖度草地与耕地	低覆盖度草地	裸土与稀疏植被		
森林	13	43	1	3	60	21.7
高覆盖度草地与耕地	12	69	9	7	97	71.1
低覆盖度草地	39	23	2	11	75	2.7
裸土与稀疏植被	3	8	13	79	103	76.7
总计	67	143	25	100	335	
制图精度/%	19.4	48.3	8.0	79.0		
总体精度=48.7% Kappa系数=29.9%						

从表2、表3看出,利用红光波段角度谱图像非监督分类结果要比天顶方向观测的多波段影像非监督分类结果精度更高,仅看森林类别,前者的制图精度与用户精度(74.6%、76.9%)高于后者(19.4%、21.7%)。但利用角度谱图像非监督分类在森林区域仍存在漏分现象,一方面可能由于混合像元的影响,另一方面可能由于根据角度谱影像只能识别出那些郁闭度高的茂密林地,不能识别疏林地。

3.2 山区林带多角度的反射率特征

由于树木冠层内树冠间的相互遮蔽作用,森林通常表现出很强的后向散射特性(Hapke等,1996);雪具有前向散射特性(Steffen,1987),雪的各向异性随着太阳高度角减少与雪粒径的增加而增大。Hall等人(1993)对美国蒙大拿州国家冰川公园积雪覆盖的混交林使用机载ASAS观测发现,前向与后向都能观察到散射,这可能是雪与树木的综合作用造成的。

尽管MISR传感器的观测方向不在太阳主平面上,观测到的各向异性信息有所减弱,但是不垂直于太阳主平面(图2),所以仍能提供部分雪与植被的各向异性信息。在林区不同角度观测得到的反射率变化,主要是由于雪与林的混合作用,不同角度观测的雪与林比例不同;另一方面,随着MISR传感器的方位角减小,向太阳主平面靠拢,或者太阳天顶角增加,也会使得观测到的各向异性信息增大(Liesenberg等,2007)。

3.2.1 典型像元选取

在那拉提山东部(A区)与玛纳斯河中下游(B区)的茂密林带分别选取55个像元,观察其不同角度反射率

在林区不同积雪覆盖条件下的变化差异。选择的像元分布于天山松生长茂密的阴坡或者半阴坡,90%以上的像元坡度都在30°以下。由2000-08-07天顶方向观测的影像计算A、B两区选取像元点的NDVI,A区像元NDVI平均值0.74,最大值0.80,B区像元NDVI平均值0.59,最大值0.69,都属于茂密的林带。

3.2.2 山区林带积雪分布的空间差异

在分析不同观测角度反射率随着林带不同积雪分布状况变化之前,首先需要了解各个月份森林中的积雪状况。参考Landsat ETM+与Google Earth提供的高分辨率影像可以看出,2001-06-07、2000-07-06和2000-08-07 3个日期A区与B区完全无雪,2002-09-14根据Landsat ETM+影像目视解译没有积雪,但是据当日Google Earth提供的高分辨率影像,那拉提山区(A区)某些林下有极少量积雪。在玛纳斯河中下游区域(B区),由于地形结构复杂,某些日期太阳高度角很低,天山松生长于阴坡,处在地形阴影之中,根据Landsat ETM+影像也无法直接看出林下是否有雪,在没有更高分辨率辅助的情形下,做了一些推测:若森林周围及相应南坡存在积雪,则推测林区有雪;若相应的南坡积雪消融,则推测林区可能也有部分消融;若森林周围大范围地表都被积雪覆盖,则推测该地刚有过一场降雪。表4列出了根据Landsat ETM+或者更高分辨率影像推断出的各月份林带积雪状况。

表4 各个月份的林带积雪分布状况

日期	A区	B区
2000-04-01	根据Landsat ETM+影像推测有积雪,部分地区可能消融	根据Landsat ETM+影像无法推测
2000-07-06	确定无雪	确定无雪
2000-08-07	确定无雪	确定无雪
2002-09-14	根据Landsat ETM+影像目视解译没有积雪,但是据Digital Globe影像,某些像元林下有少量的积雪	根据Landsat ETM+影像目视解译没有积雪
2002-11-01	根据Landsat ETM+影像推测有雪,部分地区可能消融	根据Landsat ETM+推测有少量积雪
2000-12-13	有雪,且根据Landsat ETM+影像推断该地区刚有过一场降雪	根据Landsat ETM+推测有雪
2001-01-30	有雪,且根据Landsat ETM+影像推断该地区刚有过一场降雪	根据Landsat ETM+影像无法判断
2001-03-19	根据Landsat ETM+影像推测有雪,部分地区可能消融	根据Landsat ETM+影像无法判断
2003-04-10	根据Landsat ETM+影像推测有雪,部分地区可能消融	根据Landsat ETM+影像无法判断
2001-06-07	确定无雪	确定无雪

3.2.3 山区林带多角度反射率的变化差异

将10个月份5个角度的BRF逐个像元输出, 统计后制图如图5所示。横坐标为观测角度, 纵坐标代表红光波段反射率, A代表那拉提地区, B代表玛纳斯河地区, 10条曲线是每个月份所有典型像元的平均值。

从图5可以看出, 林区BRF在不同积雪覆盖状况下差异很大, 在夏季无雪情况下, 5个观测角度的反射率都偏低, 低于0.1; 冬季林区, 由于存在积雪, 各角度反射率增加, 在12月份与1月份, Ba(-45.6°)方向反射率明显高于其他观测方向。图5(b)中10条角度一反射率曲线的变化情况没有图5(a)显著, 冬季B区林带反射率整体偏低, 可能是由于B区山体遮挡严重且地形复杂, 而A区山体相对较小, 受地形影响较小。

对图5进一步分析发现:

(1)在林区无雪状况(6月、7月和8月)下, A区与B区不同角度观测得到的反射率都小于0.1, 曲线形状较平缓, 但也体现了森林的后向散射特性。9月份后向观测所得反射率明显偏大, 一方面是因为MISR传感器向太阳主平面靠拢, 太阳天顶角增加, 观测到的各向异性信息增大 (Liesenberg 等, 2007), 另一方面是因为某些像元的林下有少量的积雪。

(2)根据图5(a), 在林区存在积雪, 且极有可能该地区刚有过一场降雪情况(2000-12-13和2001-01-30)下, 后向观测得到的反射率偏大, Ba(-45.6°)方向反射率在0.3以上。1月份与12月份的曲线形状比较类似, 都表现为Ba(-45.6°)观测方向得到的反射率是An(0°)观测结果的2倍多。根据图5(b), 1月份与12月份各角度的反射率都偏大, 但是从Ba(-45.6°)至An(0°)方向, 反射率降低剧烈, 减少了0.1, 从An(0°)到Bf(45.6°)方向, 反射率变化缓慢, 基本上只增加了0.03。这可能由于林区刚有过降雪, 积雪覆于树冠, 根据几何光学模型, 后向观测到的林冠比例较大, 所以Ba(-45.6°)远高于天顶方向反射率。

Pinty等人(2002)根据蒙特卡罗光线追踪模型, Canisius和Chen (2007)根据几何光学模型曾推导出: 在垂直主平面观测, 当森林下垫面为亮背景(如雪或者亮土壤), 若森林密度比较高, 则二向反射率随观测角变化曲线为钟形(天顶方向最大, 二向反射率对称); 若森林密度非常稀疏或者形成密闭的林冠, 则二向反射率随观测角变化曲线为碗形(天顶方向最小)。在冬季的天山林区很难有这样理想的形状, 一方面由于MISR观测平面不垂直于太阳主平面, 如图2所示; 另一方面, 模型只考虑了林下背景为雪的情况, 忽略了积雪悬于树冠的情况。研究区冬季林区所

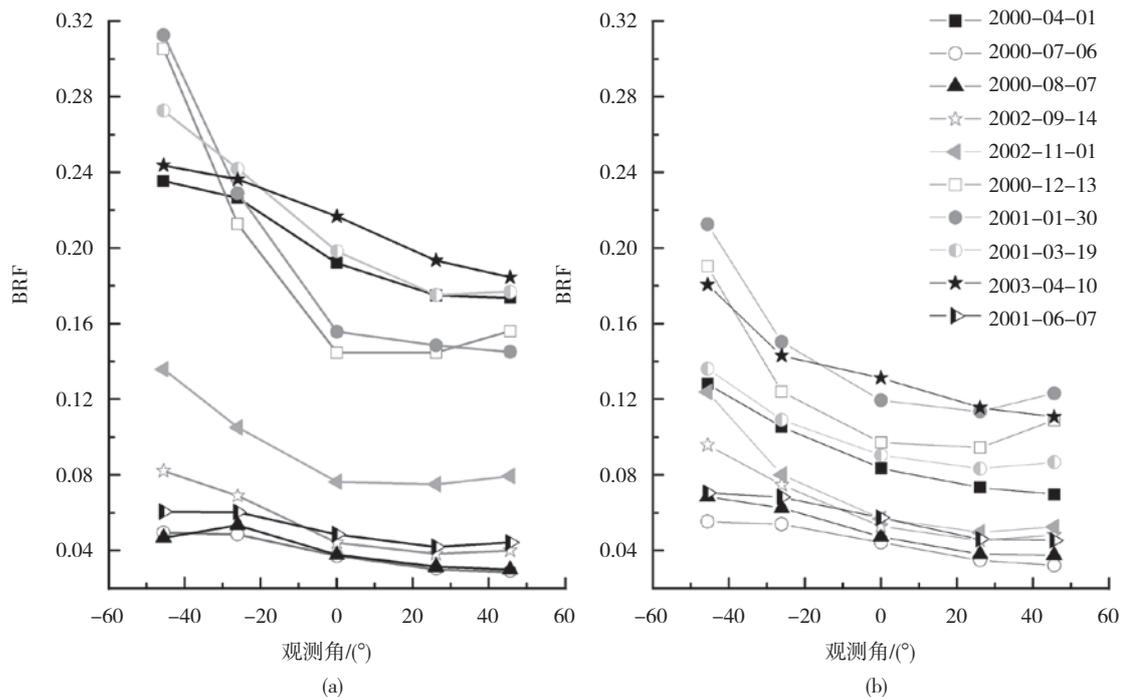


图5 A、B区域像元10个月份红光波段各角度平均反射率

得到的曲线形状与Nolin(2004)在美国寒地实验区的观测, 当森林密度为99%, 树种为冷杉、云杉时, 得到的角度-反射率曲线形状相似。

(3)在A区, 2000-04-01、2003-04-10和2001-03-19三个时段根据Landsat ETM+影像推测林区有雪, MISR 5个角度反射率都在0.15以上, 其中Ba(-45.6°)与Aa(26.1°)两个方向反射率大于0.2, 后向与天顶观测方向上的差异逐渐减小。2000-03-19后向反射率明显高于前向反射率, 可能是因为当日MISR传感器的向太阳主平面靠拢, 观测到的各向异性信息增大。此外, 林冠上残留积雪没有融化也会使后向反射率偏高。在B区, 2000-04-01与2001-03-19两条曲线较为相似, 其中Ba(-45.6°)、Aa(26.1°)方向反射率高于0.1, 前向与天顶观测方向低于0.1。

(4)2003-04-10天顶观测方向的反射率在A区与B区都是10条曲线中最大的, 由于当日传感器方位角相比冬季其他月份更接近太阳主垂面, 在天顶方向观测到最大的林下背景(积雪)信息, 所以An(0°)观测方向的反射率在10条曲线中最大, 同时推测林区内树冠仍挂有积雪, 所以Ba(-45.6°)方向反射率仍然偏大。

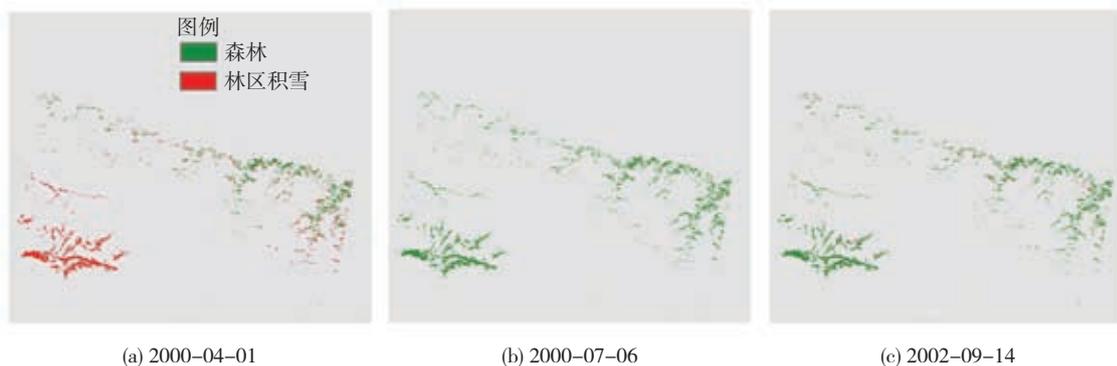
3.3 山区林带积雪信息的提取

从上述分析中可以看出, 当林带有雪时, 通常表现有以下特征: (1)红光波段5个角度的反射率都普遍增高。3月份那拉提地区(A区)统计的5个角度平均反射率高于0.2, 而7月、8月份该地只有0.04。观察A区、B区域夏季6月、7月和8月份不同角度的反射率曲线, 当林带完全没有积雪覆盖时, 仅仅观测到植被的特征, 红光5个角度的反射率都低于0.09。而当林带存在积雪时, 各角度反射率均有所增加, 不少角度反射率高于0.12, 5个角度的平均反射率大于0.1。(2)某个角度的反射率可能会突然增大, 在不少降雪月

份(如2000-12-13与2001-01-30), Ba(-45.6°)观测方向的反射率甚至大于天顶观测方向的2.5倍。这是由于林区刚有过降雪, 积雪覆于树冠, 根据几何光学模型, 后向观测到的林冠比例较大。如果林区没有积雪, 仅仅由于树木的遮蔽阴影, 观察到的各向异性不可能有如此大的差异, 根据图5, 夏季角度-反射率曲线形状平缓。此外2002-09-14那拉提地区根据Landsat ETM+影像目视解译没有积雪, 但是据高分辨率影像, 某些像元林下有少量的积雪, Ba(-45.6°)观测方向统计的平均反射率为0.082, An(0°)观测方向统计的平均反射率为0.044, 通过观察发现某些像元Ba(-45.6°)观测方向反射率是An(0°)观测方向的2.5倍以上。

根据以上分析, 在天山山地针叶林带进行积雪识别时, 设定条件如下: 当5个观测角度的平均反射率大于0.1时可以判断林下有雪; 若平均反射率不大于0.1, 但是Ba(-45.6°)观测方向的反射率大于An(0°)观测方向反射率的2.5倍, 也可认为林区有雪。

根据如上判定条件, 对研究区2000年4月份至2001年6月根据MISR影像进行积雪识别的结果如图6所示。从图6中可以明显看出林带积雪在不同月份的分布差异。由于很少有文献对A区、B区域的林带积雪消融时间进行描述, 在山区也没有地面观测台站信息的支持, 且山区降雪与融雪都为瞬时, Google Earth没有相同时期的高分辨率影像做参考。为验证文中实验结果, 将MISR影像积雪识别结果对比同时刻的Landsat ETM+影像林带积雪目视推测结果, 证实林带积雪识别结果可靠。图7为2002-11-01由MISR数据得到的林带积雪识别结果与相同日期的Landsat ETM+影像对比。Landsat ETM+影像色调很暗, 从天顶方向只能观察到呈暗红色的天山松特征, 很难得到林带积雪信息, 而根据图7(b)MISR影像积雪识别结果, 可以发现部分林带存在积雪。



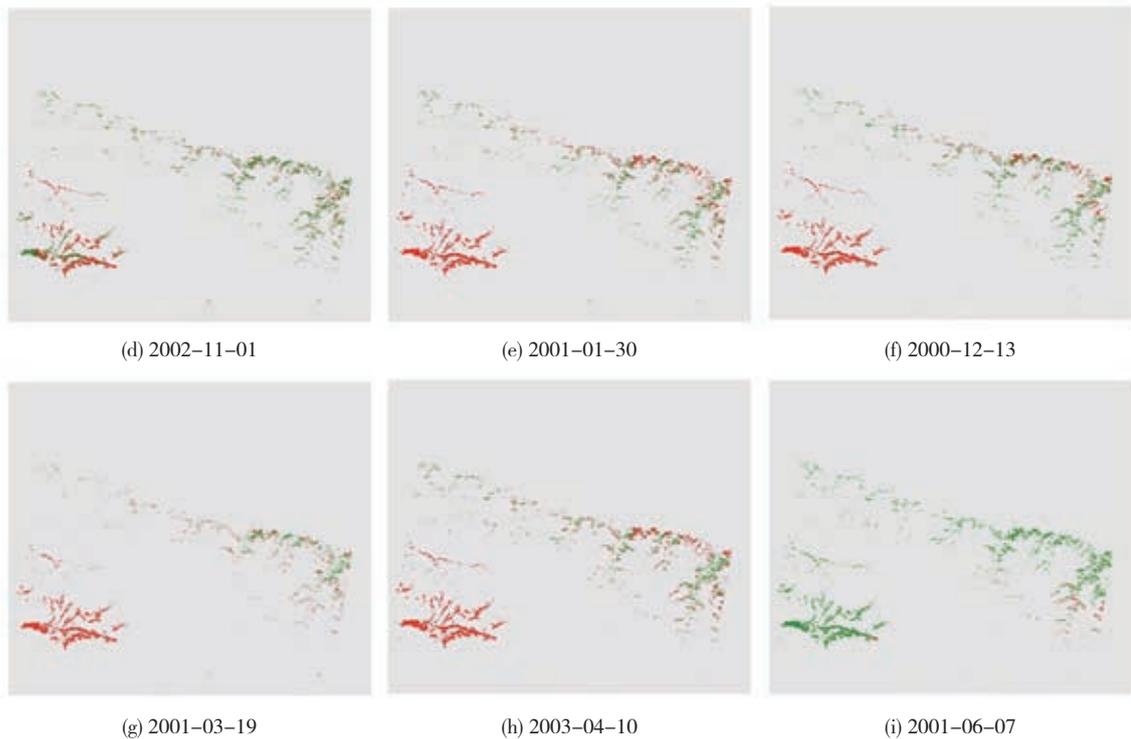


图6 林带积雪识别结果

为验证文中的判定条件是否具有通用性，另外选取了2000-10-10 MISR数据与相应日期的Landsat ETM+数据，图8(a)为2000-10-10那拉提地区(A区) Landsat ETM+ 影像假彩色合成，图8(b)为相同地区相同时相的MISR影像林带积雪识别结果。尽管从Landsat ETM+ 影像上观察那拉提山区的阴坡，看到的大多数是天山松特征，但是在山脚及森林稀疏的地区可以看出有积雪覆盖，且阳坡的积雪大多也没消融，推断阴坡的林带内存在积雪，Landsat ETM+影像的人工判读结果与图8(b)的MISR数据林带积雪识别结果一致。

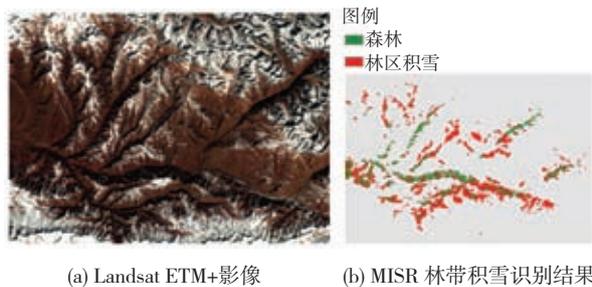


图7 2002-11-01 Landsat ETM+影像与同时相MISR影像林带积雪识别结果比较

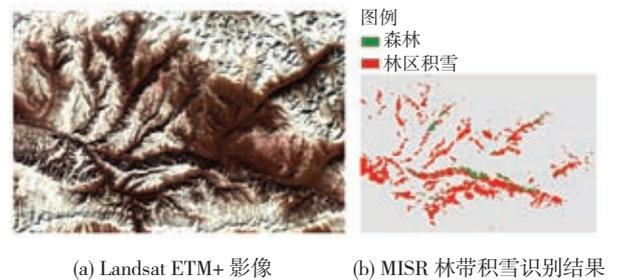


图8 2000-10-10 Landsat ETM+影像与同时相MISR影像林带积雪识别结果比较

4 结论与讨论

本文收集了研究区10个时段的MISR多角度数据及Landsat ETM+数据。根据Landsat ETM+数据及Google Earth提供的更高分辨率影像推测林区积雪状况，分析MISR各个角度反射率在不同积雪覆盖状况下的变化差异，结论如下：

(1) MISR红光波段对林区积雪反应敏感，不同角度观测的反射率随着积雪覆盖差异变化很大。夏季林区的红光波段5个角度反射率平均值在0.05以下，而冬季很多月份5个角度的平均反射率都高于0.15，甚

至在3月份有些区域的平均反射率高于0.2。在不少降雪月份, Ba(-45.6°)观测的反射率大于天顶观测方向的2.5倍。而在没有积雪的夏季, 仅仅由于树冠间的相互遮蔽作用, 观察到的各向异性没有如此大的差异。因此可以尝试利用冬季与夏季多角度信息的强烈差异在林区进行积雪识别。此外, 林区天山松冬、夏季的平均叶面积体密度或叶面积指数不同也会造成红光波段反射率的变化, 文中尚未考虑此影响, 在以后的工作中还需进一步完善。

(2)MISR红光波段角度谱数据可以用来区分林地与其他不同结构类型的地物, 比如草地和裸地。本文利用角度谱图像采用非监督分类的方法获取天山林带, 并对分类结果进行精度评估, 分类结果基本满足后续分析需要, 但在森林区域仍存在漏分现象。

(3)文中的积雪识别条件是根据不同角度反射率变化差异对照林区积雪覆盖差异进行分析得出, 阈值并不能很好地确定。此外, 各向异性信息并不仅仅由积雪与林地的观测比例而定, 传感器方位角以及太阳天顶角共同影响了观测结果(Liesenberg 等, 2007), 研究区地形复杂, 也进一步增加了分析的难度。如果能够结合冠层辐射传输模型与积雪辐射传输模型, 则可以对所观测到的结果更好地进行分析。GORT模型对平原地区的针叶林有很好的适应性, 若应用在天山地区, 许多工作还有待进一步开展, 例如如何消除地形的影响以及正确建立天山云杉的几何形态参数等。总体来说, MISR数据为处理林区积雪问题拓展出新的方法, 若有实地调查资料, 并将观测数据结合辐射传输模型, 相信能够对多角度数据进行定量分析。

研究中选择的MISR数据都是质量较高的无云影像, 故对有云的情况没有讨论。在山体起伏剧烈的地区, MISR数据经过正射校正, 有部分像元没有值, 也一定程度上影响了非监督分类结果。若能取得更为详尽的天山森林分布资料, 会更加方便对林带积雪状况进行分析。

参考文献(References)

- Bothwell G W, Hansen E G, Vargo R E and Miller K C. 2002. The Multi-angle imaging spectroradiometer science data system, its products, tools, and performance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(7): 1467-1476 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.801152]
- Bull M, Matthews J, McDonald D, Menzies A, Moroney C, Mueller K, Paradise S and Smyth M. 2010. MISR Data Products Specifications[OL]. <http://eosweb.larc.nasa.gov/PRODOCS/misr/DPS/>
- Canisius F and Chen J M. 2007. Retrieving forest background reflectance in a boreal region from Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) data. *Remote Sensing of Environment*, 107(1-2): 312-321 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.07.023]
- 陈贤章, 李新, 鲁安新, 李文君. 1996. 积雪量化遥感研究进展. *遥感技术与应用*, 11(4): 46-52
- 陈曦, 许文强, 罗格平, 蔺卿, 肖鲁湘. 2008. 天山北坡不同环境条件下雪岭云杉 (*Picea schrenkiana*) 林限土壤属性. *生态学报*, 28(1): 53-61
- Diner D J, Beckert J C, Reilly T H, Bruegge C J, Conel J E, Kahn R A, Martonchik J V, Ackerman T P, Davies R, Gerstl S A W, Gordon H R, Muller J P, Myneni R B, Sellers P J, Pinty B and Verstraete M M. 1998. Multi-angle imaging spectro radiometer (MISR) instrument description and experiment overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4): 1072-1087 [DOI: 10.1109/36.700992]
- Dozier J. 1989. Spectral Signature of Alpine Snow Cover from the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*, 28: 9-22 [DOI: 10.1016/0034-4257(89)90101-6]
- Foster J L, Chang A T C, Hall D K and Rango A. 1991. Derivation of Snow Water Equivalent in Boreal Forests Using Microwave Radiometry. *Arctic*, 44(1): 147-152
- Gobron N, Pinty B, Verstraete M M, Widlowski J and Diner D J. 2002. Uniqueness of Multiangular Measurements. II: Joint Retrieval of Vegetation Structure and Photosynthetic Activity From MISR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(7): 1574-1592 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.801147]
- Hall D K, Foster J L, Irons J R and Dabney P W. 1993. Airborne bidirectional radiances of snow-covered surfaces in Montana, USA. *Annals of Glaciology*, 17: 35-40
- Hall D K, Foster J L, Verbyla D L, Klein A G and Benson C S. 1998. Assessment of Snow-Cover Mapping Accuracy in a Variety of Vegetation-Cover Densities in Central Alaska. *Remote Sensing of Environment*, 66(2): 129-137 [DOI: 10.1016/S0034-4257-(98)00051-0]
- Hapke B, Dimucci D, Nelson R and Smythe W. 1996. The cause of the hot spot in vegetation canopies and soils: shadow-hiding versus coherent backscatter. *Remote Sensing of Environment*, 58(1): 63-68 [DOI: 10.1016/0034-4257(95)00257-X]
- 胡汝骥. 2004. 中国天山自然地理. 北京: 中国环境科学出版社: 40-42, 348-349, 384-385
- Liang S L. 2004. *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. New York: John Wiley and Sons
- Liesenberg V, Galvão L S and Ponzoni F J. 2007. Variations in reflectance with seasonality and viewing geometry: Implications for classification of Brazilian savanna physiognomies with MISR/Terra data. *Remote Sensing of Environment*, 107(1-2): 276-286 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.07.023]

- 10.1016/j.rse.2006.03.018]
- Metsämäki S J, Anttila S T, Markus H J and Vepsäläinen J M. 2005. A feasible method for fractional snow cover mapping in boreal zone based on a reflectance model. *Remote Sensing of Environment*, 95(1): 77–95 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.11.013]
- Nolin A W. 2004. Towards retrieval of forest cover density over snow from the Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR). *Hydrological Processes*, 18(18): 3623–3636 [DOI: 10.1002/hyp.5803]
- Pinty B, Widlowski J, Gobron N, Verstraete M M and Diner D J. 2002. Uniqueness of Multiangular Measurements—Part I: An Indicator of Subpixel Surface Heterogeneity From MISR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(7): 1560–1573 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.801148]
- Pisek J and Chen J M. 2009. Mapping forest background reflectivity over North America with Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) data. *Remote Sensing of Environment*, 113(11): 2412–2423 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.07.003]
- Rautiainen M, Lang M, Mottus M, Kuusk A, Nilson T, Kuusk J and Lukk T. 2008. Multi-angular reflectance properties of a hemiboreal forest: An analysis using CHRIS PROBA data. *Remote Sensing of Environment*, 112(5): 2627–2642 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.12.005]
- Steffen K. 1987. Bidirectional reflectance of snow at 500–600 nm. Large scale effects of seasonal snowcover. IAHS Publication, 166: 415–425
- Vikhamar D and Solberg R. 2003a. Snow-cover mapping in forests by constrained linear spectral unmixing of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 88(3): 309–323 [DOI: 10.1016/j.rse.2003.06.004]
- Vikhamar D and Solberg R. 2003b. Subpixel mapping of snow cover in forests by optical remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 84(1): 69–82 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00098-6]
- 万华伟, 王锦地, 肖志强, 林皓波, 王镭森. 2007. MISR多角度遥感数据的组件库处理方法及数据分析. *遥感信息*, (4): 16–19
- 仲桂新. 2010. 土地覆盖类型对MODIS积雪识别的精度影响分析. 长春: 东北师范大学: 14–31