

卫星反演积雪信息的研究进展

吴 杨^{1,2} 张佳华² 徐海明¹ 何金海¹

(1. 南京信息工程大学, 210044; 2. 中国气象科学研究院)

提 要: 综合分析了积雪信息反演的主要遥感信息源和提取方法。在光学遥感方面,应用较广的主要是改进型甚高分辨率扫描辐射仪(AVHRR)资料和中分辨率成像光谱仪(MODIS)资料;提取积雪信息大多是根据积雪在可见光波段的高反射率和近红外波段的低反射率,并通过建立回归模型反演积雪面积和深度。由于传感器的改进,MODIS 卫星资料在空间分辨率、积雪反演算法等方面明显优于 AVHRR 资料。光学仪器受云层和大气的影 响很大,由于云和积雪在可见光和近红外波段上都具有高反射率。并且由于云层的遮挡,云下的地表信息不能被光学遥感仪器所接收到。微波遥感方面,被动微波遥感仪如微波辐射计成像仪(SSM/I)、高级微波扫描辐射计(AMSR-E)等可以全天候穿过云层进行监测,具有光学仪器所没有的优势,并通过提取地表的亮温差,建立雪深反演模型得到积雪深度。被动微波传感器存在分辨率低,无法监测浅雪区信息等问题。另外影响地表微波亮温的因素很多,这些都在一定程度上影响了反演结果的精确度。主动微波遥感仪如合成孔径雷达、微波散射计等利用积雪与其它地物的后向散射系数的不同来识别积雪,但也同样存在分辨率低等问题。最后探讨了卫星反演积雪信息中仍然存在的问题和进一步发展的方向。

关键词: 积雪 遥感信息 AVHRR MODIS 微波遥感

Advances in Study of Snow-cover from Remote Sensing Data

Wu Yang^{1,2} Zhang Jiahua² Xu Haiming¹ He Jinhai¹

(1. Nanjing University of Information Science & Technology, 210044;
2. Chinese Academy of Meteorological Sciences)

Abstract: The main sources of remote sensing data and data processing methods of snow information retrieval are introduced. For the optical remote sensing, the AVHRR and MODIS data were widely used to distinguish the snow cover from other land cover types mostly according to the high

资助项目: 科技部社会公益项目(2003DIB4J144), 中国气象局沙漠气象基金“利用多元遥感信息对北疆积雪监测方法的研究”, 中国气象局成都高原气象基金资助。

收稿日期: 2007 年 2 月 12 日; 修定稿日期: 2007 年 3 月 26 日

reflectance of snow in the visible band and low in the near infrared band; and the snow cover area and depth also can be obtained by regression equations. With advanced sensors, the data from MODIS is obviously superior to that from AVHRR in algorithms and resolution to derive the snow information. For the microwave remote sensing; passive microwave remote sensing has all-weather and day-night data acquisition capability, the earth surface information can be obtained in whole day. So it is more useful to detect the snow depth than optical remote sensing. The snow cover was detected through retrieving the brightness temperature of snow. Active microwave remote sensing can estimate snow cover by different backscattering coefficient. Finally, the main problem and development trends of snow information retrieval technique by using satellite remote sensing data are discussed.

Key Words: snow cover remote sensing information NOAA/AVHRR MODIS microwave sensing

引 言

积雪是气候变化的一个重要影响因子,在可见光波段积雪具有很高的反射率,而植被和土壤等其他地表覆盖物的反射率则低得多,因而积雪的存在对地—气系统的辐射平衡影响很大,其变化进而又影响了天气和气候变化,所以积雪一直是气象界关注较多的问题^[1-5]。2000 年成立的气候与冰冻圈计划(CliC)也把积雪研究作为核心内容之一。就中国而言,1970 年代叶笃正提出的长期预报的一些物理因子中就包括青藏高原的异常雪盖作用^[6],而后许多学者的研究表明北半球积雪特别是青藏高原雪盖对中国的降水、大气环流、气温均产生深刻的影响^[7-11];此外,中国西部和北部冬春季节雪灾发生频繁,严重影响了当地的人民生活 and 经济发展^[12],因而积雪研究尤为重要。

研究积雪的影响作用,首先必须获取较为真实准确的资料,但常规的地面站资料由于测站空间分布不均匀,很难满足研究需要,遥感技术的应用弥补了这一缺陷,使得大范围的积雪监测成为现实,所以非常适合从卫星遥感资料中提取积雪信息,特别是在地面

站较少的地区。随着遥感技术的发展,近年来各种性能优越的星载传感器的应用,利用遥感资料提取积雪信息的方法已成为积雪研究的一个重要课题。

1 积雪信息反演的遥感源

目前全球已发射的气象卫星主要有美国的 NOAA 系列、TIROS 系列、中国的 FY 系列、日本的 GMS 等上百颗卫星^[13]。NOAA 是美国国家海洋大气局的第三代实用气象观测卫星,第一代是 TIROS 系列,第二代称为 ITOS/NOAA 系列,其后运行的第三代称为 TIROS-N/NOAA 系列,TIROS-N/NOAA 系列卫星上搭载的改进型甚高分辨率扫描辐射仪(AVHRR)是一种 4 或 5 通道的扫描辐射仪,提取积雪主要是利用其 1、2、4 通道,空间分辨率为 1.1km,而最新的 NOAA16, NOAA17, NOAA18 卫星上搭载的 AVHRR 做了改进,它们的第 3 通道白天时改为 1.57~1.78 μm ,这个波段主要用于进行积雪识别。1999 年发射的地球观测系统(EOS)上午星 TERRA 和下午星 AQUA 每天分别覆盖地球两次,其上搭载的中分辨率成像光谱仪(MODIS)具有 36 个光谱通道,分布在 0.4~14.5 μm 之间,其 4、6、

7、13、16、20、26、31 波段可用来提取积雪信息^[14];美国国家宇航局的雨云-7 号卫星上所搭载的多通道微波扫描辐射仪(SMMR)和美国国防气象卫星上搭载的微波辐射计成像仪(SSM/I)均通过测取地表微波亮度温度,得到全球的积雪信息,空间分辨率为 25km。另外,对于各类机载和星载的合成孔径雷达(SAR)系统,主要利用其 C、L、X 波段研究积雪。随着技术的进步,可供使用的遥感资料越来越多,并且数据的时空分辨率也在不断提高。文章主要讨论了目前应用较广的基于 AVHRR、MODIS 资料的积雪信息的提取方法,并分析了基于微波遥感资料的积雪反演。

2 基于光学遥感资料的积雪信息提取

2.1 基于 NOAA/AVHRR 资料的积雪信息提取

传统的 NOAA 卫星主要是利用积雪在可见光波段的高反射率来区分积雪与土壤、植被、水体等大多数自然表面,但由于云和积雪在可见光和近红外波段上都具有高反射率,云的干扰成为积雪识别的一个难题,由此出现了许多区分云雪的方法。在传统的目测中,使用纹理法、地标法等方法,但这种人为的判断不够精确,误差较大。王世杰^[15]提出了将降雪前后的多幅资料在数字图像处理系统中叠加,依据云、雪的边缘差异和地形特征得到积雪的影像图。如积雪覆盖时,湖泊等地表,地形的纹理特征、山脉的走向等均明显可见,但云覆盖时不可见。根据单通道的红外图像上(CH₃、CH₄、CH₅)雪和云的亮度不同,并确定了积雪在可见光和近红外波段的反射率阈值,周咏梅等^[16]利用多光谱识别法将云与雪分开,认为其识别精度在 80% 以上。Simpson 等^[17]根据冷高云、暖低云在 CH₃、CH₄ 的亮温差,CH₄ 的亮温值与积雪的区别提出了将冷高云、暖低云从积雪中区

分出来的标准。而现在 NOAA16、NOAA17 卫星上增加了 1.57~1.78 μm 的近红外波段,雪的反射率很低,而云的反射率仍然很高,这就可以很容易的将云雪分开^[18],并且识别精度很高,这将成为今后一段时间内云雪区分的重要方法。

在中国的积雪监测业务中,刘玉洁等^[19]根据我国及周边地区的实际情况建立了多光谱阈值结合多时次合成法的积雪监测方法,后来又逐步作了改进,提出了概率结合阈值的判识法^[20]。

2.2 基于 MODIS 资料的积雪信息提取

MODIS 可以提供每日的及合成的积雪产品,跟 AVHRR 相比具有波谱宽、通道窄的优点^[21],这一点很好地解决了因新雪的反射率很高而引起的 AVHRR 传感器饱和问题^[22],且在空间分辨率上优于 AVHRR,使得其应用范围也更广,它的数据处理原理与 AVHRR 相似,都是根据雪在可见光波段的高反射率及它在近红外波段的高吸收率来识别的。目前主要采用归一化差分积雪指数(NDSI)来判断积雪区^[22],NDSI 采用多波段比值的阈值法,简化了计算,并可以进一步消除部分云层和地形阴影等影响^[23]:

$$NDSI = (R_4 - R_6) / (R_4 + R_6) \quad (1)$$

其中 R_i 为像元在第 i 波段的反照率。当 NDSI 值 ≥ 0.4 , 而且 $R_2 > 0.11$ 、 $R_4 < 0.11$ 则判定该像元为雪。Salomonson^[24]用 NDSI 阈值分别来判断北美的 3 个区域的积雪区并与 30m 分辨率的 Landsat 卫星上专题制图仪(TM)的资料相比较,证明结果基本可信。另外对于云与雪的区分,Key 等^[25]提出一种判定标准,利用 MODIS 第 31 和 32 波段来获取地面土壤温度,像元温度大于 277K,则认为非雪。MODIS 第 26 波段(1.36~1.39 μm)可以有效区分积雪和卷云,卷云在此波段上吸收率高,可以利用这一特

性分开积雪与卷云^[26]。在林区,由于积雪被植被覆盖而模糊不清,使用常规的阈值不能准确地反映积雪信息,Klein 等^[27]经过试验证实了在林区,应把归一化差分植被指数(NDVI)与 NDSI 结合起来使用,NDVI 较高的地区应该降低 NDSI 的判定阈值。曾严等^[28]也提出了同样的看法,并提出以下的积雪判定方法:森林覆盖区: $R_{26} < 0.02$ 且 $NDSI \geq 0.2$, $NDVI \geq 0.2$; 非森林覆盖区: $R_{26} < 0.02$ 且 $NDSI \geq 0.3$ 。由于 Aqua 上搭载的 MODIS 第 6 波段出现问题,无法计算 NDSI 值,所以延昊^[29]提出用一个修改过的归一化差分积雪指数(MNDSI)用来替代 NDSI:

$$MNDSI = (R_1 - R_7) / (R_1 + R_7) \quad (2)$$

式中: R_i 为第 i 波段的反射率,当 $MNDSI > 0.62$ 、 $R_2 > 0.11$ 、 $R_4 > 0.1$ 、 $R_{26} > 0.1$ 同时满足,就判定该像元为积雪。结果证明 MNDSI 识别方法对 Terra 和 Aqua 卫星上的 MODIS 数据都适用。

光学仪器受云层和大气的影 响很大,由于云和积雪在可见光和近红外波段上都具有高反射率,云的干扰是积雪识别时的难题。并且由于云层的遮挡,云下的地表信息不能被光学遥感仪器所接收到,某些薄卷云能部分反映云下的信息,用 NDSI 法辨别时容易将其划分为积雪,所以应将光学遥感与微波遥感结合起来使用,在有云的区域,利用微波遥感的穿透功能来提取积雪信息。

3 基于光学遥感的积雪面积和深度提取

3.1 积雪面积提取

在利用卫星遥感资料准确识别积雪信息的基础上,许多学者都提出了积雪面积提取的方法,在麦卡托投影下首先算出每个积雪像元面积:

$$A = (R \cos \theta d\lambda)(R d\phi) \quad (3)$$

其中, R 为地球赤道半径, $d\lambda$ 和 $d\phi$ 分别为每

个像元的经纬度, ϕ 为像元的纬度坐标,然后将每个像元面积相加来求取积雪面积^[16]。

在 Albers 等面积投影下,计算单个像元的面积,然后乘以像元总数,即得积雪面积^[17]。王世杰^[15]利用积雪灰度值的层次差统计像元总数,再乘以单个像元所对应的面积求得积雪总面积。以上算法均是以纯像元为前提,即一个像元只对应一种地物类型,而不考虑像元内覆盖物的多样性,实际应用中如果用 AVHRR 资料来计算,因为其空间分辨率很粗,在大范围区域内效果较好,而不适用于小区域范围。MODIS 的空间分辨率较高,其反演结果优于 AVHRR 资料。

3.2 积雪深度提取

一些学者在实际工作中发现,积雪深度与它的反射率存在一定关系,周咏梅^[16]提出 AVHRR 的通道 1、2 反照率差与雪深呈正相关,通道 4 的亮温温度与雪深呈负相关,据此建立回归方程计算青海省青南高原的积雪深度。干雪期的雪深与经纬度、海拔高度、AVHRR1、2 通道的灰度值,3、4、5 通道的亮温值之间有一定的相关关系。在新疆北部地区,梁天刚^[30]利用这些相关关系建立的雪深反演模型,回归系数达到 0.87。延昊^[18]利用积雪在 AVHRR 的可见光波段和近红外波段反射率的差值来提取积雪深度,建立了拟合方程如下:

$$SD = 2.33e^{3.98 \times (R_1 - R_{3a})} \quad (4)$$

其中: SD 为积雪深度(cm), R_1 为可见光波段的反射率; R_{3a} 为近红外波段的反射率,拟合方程的 R^2 为 0.69。同样该方法使用时有一定地域限制,且对于 15cm 以下的积雪效果好。以上对于雪深的反演都是在特定的区域内,且主要采用统计方法得出,不能在地形复杂的大范围内适用,且当积雪超过一定深度后,它的反射率不随雪深变化而变化^[18],所以 AVHRR 资料不适用于雪深地区的深

度反演。MODIS 资料也可以用同样的原理来计算积雪深度,但同样也仅适合于浅雪地区^[31]。

4 基于微波遥感资料的积雪信息提取

光学仪器受天气的影响较大,且难以提取被云覆盖的区域的积雪信息,微波遥感则不存在这个问题,它可以全天候穿越云层提取地表信息,这一点解决了有云时和夜晚 MODIS 和 AVHRR 所面临的难题,根据传感器自身是否发射电磁波能量,微波遥感可分为被动微波遥感和主动微波遥感。

4.1 被动微波遥感资料的积雪信息提取

被动微波遥感通过测量地表亮温提供较可靠的雪深信息^[32]。传感器的能量来自于大气、雪盖、雪盖下的地表,雪盖对微波辐射主要是散射作用,地表雪越深,到达传感器的能量被散射的越多,微波传感器所接受到的辐射能量用亮度温度来表示,因此在雪深的地区微波亮度温度低,而雪浅区的微波亮度温度高^[33-34]。此外,在同一极化方式下,亮温随观测频率的升高而降低^[35]。目前用于积雪研究的被动微波辐射仪主要有 SMMR、SSM/I、AMSR-E 等。

1970 年代,Chang^[36]在假设雪密度为 $0.3\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,雪粒径为 0.35mm 的情况下,通过回归分析,得出雪深反演公式:

$$SD = 1.59(T_{18h} - T_{37h}) \quad (5)$$

式中, SD 为雪深(cm), T_{18h} 和 T_{37h} 是 SMMR 的 18 和 37GHz 的水平极化亮度温度数据。SMMR 是 SSM/I 之前的一个重要的被动微波遥感仪器,用 SSM/I 数据时用 19GHz 代替 18GHz。该算法是应用 SMMR 和 SSM/I 数据反演雪深的基本算法,但在具体应用时影响积雪精度的因子很多,如雪的密度、粒径、雪水含量等,所以某些地区的反演结果与

实际相差较大,仍没有一个雪深反演算法可以在全球范围内普遍适用^[37],很多学者在实际应用中都根据实际情况对它进行了修正,应用于中国西部时,曹梅盛等^[38]把西部地形分为高山、高原、低山、丘陵、盆地 5 个地貌单元,分别用统计方法建立了反演公式。柏延臣等^[39]用曹梅盛修正的公式对青藏高原的雪深进行了反演,并作出评价,认为该公式基本能反映青藏高原的雪深,但局部地区误差较大,反演雪深值过大。在青藏高原积雪监测的初步试验性的应用^[40]中,根据曹梅盛的算法又进行了修正,但结果表明仍存在很多问题,如积雪范围估计过大,雪深过深等,这些主要是由于 SSM/I 的空间分辨率过粗引起的,在纯像元的前提下,监测结果会误差较大,所以应发展混合像元的研究。小于 5 厘米的积雪发出的微波很微弱,微波传感器也存在无法监测浅雪区信息等问题。另外影响地表微波亮温的因素很多,如雪的密度、粒径、雪水含量、植被、冻土等,这些都在一定程度上影响了反演结果的精确度。随着高分辨的 AMSR-E 的应用,积雪反演产品的质量将会得以改进。

4.2 主动微波遥感资料的积雪信息提取

目前用于积雪研究的主动微波遥感主要是高分辨的 SAR,它根据雪的介电常数、粗糙度等与其它地物的不同^[41]划分积雪区,虽然在积雪研究方面比被动微波遥感起步晚,但它可以进一步将干雪与湿雪分开,并能估算雪的某些物理特性,如密度、湿度等,为地表气候与水文研究提供了不可缺少的积雪参数。Shi 等^[42]提出的多极化 C 波段机载 SAR 图像可较好的区分湿雪,不能将干雪有效的识别出来,且选取的试验区较小,区域地表覆盖类型简单,不具有普遍性。李震等^[43]选取了加利福尼亚州 Mammoth 山区的一部分作试验区,用机载成像雷达(SIR-C)获取

多波段、多极化 SAR 数据,进行雪盖信息提取,证明 SAR 数据的 C 波段、L 波段不同的交叉极化方法在区别干雪、湿雪、岩石方面各有优势,所以认为多波段、多极化 SAR 进行积雪区分较好。Shi 等^[44]也发展了两种分类器,在有地形信息和无地形信息的情况下分别用多波段多极化的技术判别积雪。另外,他们还用“C 波段计划 SAR”图像建立了雪的湿度的反演算法,经检验在区域和局部规模上都可信^[45]。复杂的地形如高山等也可导致 SAR 图像的几何变形,这就要求应用高质量的数值高程模型(DEM)进行几何纠正^[46]。现有的大多数的主动微波遥感的雪盖分类方法都是建立在监督分类的基础上的,需要对训练区有一定的先验知识,区域内的环境,地表覆盖物不同使得需要的算法和结果的精度各不相同。

5 卫星反演积雪信息中存在的问题及进一步发展方向

综上所述,目前积雪的区域、积雪面积、积雪深度等各类参数均可从遥感资料中提取,各种反演模型也在实际应用的过程中修正得越来越精确,这些成果为提取真实准确的积雪信息做出了贡献,但仍然存在很多问题需要继续研究。

(1) 传统的绝大多数算法都建立在纯像元的基础上,当遥感资料的空间分辨率较低时,精确度会降低,所以近年来混合像元的问题被提了出来,目前在这个方面已经有一些研究^[47-48],利用 AVHRR 的 1、2 通道的线性组合建立的线性混合光谱模式,可有效计算每个像元中的积雪面积比^[30],从而提高积雪面积计算的精确度,并可有效提取积雪的边界线^[49],充分利用混合像元提取积雪信息,可大大提高反演的精确度。但这些方法存在着计算量大,自动化程度低等问题,所以仍然难以在实际业务中应用。

(2) 微波遥感的优越性在实际应用中逐步显现出来,微波传感器的性能也在不断提高,但是仍存在分辨率不高,无法监测浅雪区信息等问题。另外影响地表微波亮温的因素很多,如雪的密度、粒径、雪水含量、植被、冻土等,这些都在一定程度上影响了反演结果的精确度。

(3) 任何一种遥感资料都有其各自的优缺点,在实际应用的过程中,结合几种资料共同使用,扬长避短,将会大幅度提高结果的精确性。

(4) 遥感和地理信息系统的复合可以提高遥感资料的精确度和应用范围的广度,地理信息系统可为遥感资料反演提供有用的信息和参照,通过对大量的遥感资料的分析,从而为积雪反演模型提供参数,在积雪信息提取方面有很好的应用前景。

参考文献

- [1] 李培基. 高亚洲积雪分布[J]. 冰川冻土, 1995, 17(4): 292-298.
- [2] Wu Tongwen, Qian Zheng'an. The relation between the Tibetan winter snow and the Asian summer monsoon and rainfall. An observational investigation[J]. J Climate, 2003, 16(12): 2038-2051.
- [3] Groisman P. Y., Karl T. R., Knight R. W. Observed impact of snow cover on the heat balance and the rise of continental spring temperatures[J]. Science, 1994, 263: 198-200.
- [4] 李维京. 1998 年大气环流异常及其对中国气候异常的影响[J]. 气象, 1999, 25(4): 20-25.
- [5] Chen Wen, Grag H. F., Huang Ronghui. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2000, 17(1): 48-60.
- [6] 叶笃正. 长期预报的一些物理因子[J]. 气象, 1975, 3, 10-12.
- [7] 王光宇, 曾群柱. 北半球异常雪盖对应的我国环流特征[J]. 冰川冻土, 1994, 16(4): 342-345.
- [8] 孙林海, 宋文玲. 冬季积雪对我国夏季降水预测的评估分析[J]. 气象, 2001, 27(8): 24-35.

- [9] 宋文玲,袁景凤,陈兴芳. 冬季高原积雪异常与1998年长江洪水关系的分析[J]. 气象, 2000, 26(2): 11-14.
- [10] 柯长青,李培基,王采平. 青藏高原积雪变化趋势及其与气温和降水的关系[J]. 冰川冻土, 1997, 19(4): 289-294.
- [11] 陈乾金,高波,李维京,等. 青藏高原冬季积雪异常和长江中下游主汛期旱涝及其环流关系的研究[J]. 气象学报, 2000, 58(5): 582-595.
- [12] 郝露,王静爱. 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): 42-48.
- [13] 张佳华,徐祥德,延晓冬,等. 多圈层陆面过程参数化研究中遥感信息应用的进展和方向[J]. 应用气象学报, 2003, 14(6): 745-755.
- [14] 刘玉洁,杨忠东,等. MODIS 遥感信息处理原理与算法. 北京:科学出版社.
- [15] 王世杰. 利用 NOAA/AVHRR 影像资料估算积雪量的方法探讨[J]. 冰川冻土, 1998, 20(1): 68-73.
- [16] 周咏梅,贾生海,刘萍. 利用 NOAA-AVHRR 资料估算积雪参量[J]. 气象科学, 2001, 21(1): 117-121.
- [17] Simpson J. J., Stitt J. R., Sienko M. Improved estimates of the areal extent of snow cover from AVHRR data[J]. Journal of Hydrology. 1998, 204(1-4): 1-23.
- [18] 延昊. NOAA16 卫星积雪识别和参数提取[J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 367-373.
- [19] 刘玉洁,郑照军,王丽波. 我国西部地区冬季雪盖遥感和变化分析[J]. 气候与环境遥感, 2003, 8(1): 114-123.
- [20] 郑照军,刘玉洁,张炳川. 中国地区冬季积雪遥感监测方法改进[J]. 应用气象学报, 2004, 15(增刊): 75-84.
- [21] 王建,陈子丹,李文君,等. 中分辨率成像光谱仪图像积雪反射特性的初步分析研究[J]. 冰川冻土, 2000, 22(2): 165-170.
- [22] Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V. V. Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data[J]. Remote sensing of Environment, 1995, 54(2): 127-140.
- [23] 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.
- [24] Salomonson V. V., Appel I. Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index[J]. Remote sensing of Environment 2004, 89(3): 351-360.
- [25] Key J. R., Collins J. B., Fowler C. et al. High-latitude surface temperature estimates from thermal satellite data[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 16(2): 302-309.
- [26] Gao B. C., Goetz A. F. H., Wiscombe W. J. Cirrus cloud detection from airborne imaging spectrometer data using the 1.38 mm water vapor band[J]. Geophysical Research Letters. 1993, 20(4): 301-304.
- [27] Klein A. G., Hall D. K., Riggs G. A. Improving snow-cover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model[J]. Hydrological Processes, 1998, 12(10-11): 1723-1744.
- [28] 曾严,鄢俊洁. MODIS 数据在积雪检测中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2005, 28(6): 97-99.
- [29] 延昊. 利用 MODIS 和 AMSR-E 进行积雪制图的比较分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(4): 515-519.
- [30] 梁天刚,吴彩霞,陈全功,等. 北疆牧区积雪图像分类与雪深反演模型的研究[J]. 冰川冻土, 2004, 26(2): 160-165.
- [31] 刘艳,张璞,李杨,等. 基于 MODIS 数据的雪深反演——以天山北坡经济带为例[J]. 地理与地理信息科学, 2005, 21(6): 41-44.
- [32] Lucas R. M., Harrison A. R. Snow observation by satellite: A review[J]. Remote Sensing Reviews, 1990, 4(2): 285-348.
- [33] Matzler C. Applications of the interaction of microwaves with the natural snow cover[J]. Remote Sensing Reviews, 1987, 2: 259-391.
- [34] Foster J. L., Chang A. T. C., Hall D. K. et al. Derivation of snow water equivalent in boreal forests using microwave radiometry[J]. Arctic, 1991, 44: 147-152.
- [35] 李晓静,刘玉洁,朱小祥,等. 利用 SSM/I 数据判识我国及周边地区雪盖[J]. 应用气象学报, 2007, 18(1): 12-20.
- [36] Chang A. T. C., Foster J. L., Hall D. K. Nimbus-7 SMMR Derived Global Snow Cover Parameters[J]. Annals of Glaciology, 1987, 9: 39-44.
- [37] Foster J. L., Chang A. T. C., Hall D. K. Comparison of Snow Mass Estimates from a Prototype Passive Microwave Snow Algorithm, a Revised Algorithm and a Snow Depth Climatology[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 62: 132-142.

- [38] 曹梅盛,李培基. 中国西部积雪微波遥感监测[J]. 山地研究,1994,12(4): 230-234
- [39] 柏延臣,冯学智,李新,等. 基于被动微波遥感的青藏高原雪深反演及其结果评价[J]. 遥感学报, 2001,5(3):161-165.
- [40] 高峰,李新, Armstrong R. L., 等. 被动微波遥感在青藏高原积雪业务监测中的初步应用[J]. 遥感技术与应用,2003,18(6): 360-363.
- [41] 李震,曾群柱. 合成孔径雷达影像提取雪盖信息研究[J]. 环境遥感,1996,11(3): 200-205.
- [42] Shi Jiachen, Dozier J. , Rott H. Snow mapping in alpine regines with synthetic aperture radar. IEEE Transaction on Geoscience and Remote sensing, 1994,32(1): 152-158.
- [43] 李震,郭华东,李新武,等. SAR 干涉测量的相干性特征分析及积雪划分[J]. 遥感学报, 2002, 6(5): 334-338.
- [44] Shi Jiachen, Dozier J. Mapping seasonal snow with SIR-C/X-SAR in mountainous areas [J]. Remote sensing of Environment,1997,59(2): 294-307.
- [45] Shi Jiachen, Dozier J. Inferring snow wetness using C-band data from SIR-C's polarimetric synthetic aperture radar. IEEE Transaction on Geoscience and Remote sensing, 1995,33(4): 905-914.
- [46] Jens P. ,Holecz F. , Haefner H. Snow cover Monitoring Using Multitemporal ERS-1 SAR data. Proceedings of IEEE Transaction on Geoscience and Remote sensing Symposium. Florence, 1995, 1750-1752.
- [47] 杨贵军,张继贤. 利用灰色相关分解混合像元方法研究[J]. 测绘通报,2004,10:1-3.
- [48] 延昊,张国平. 混合像元分解法提取积雪盖度[J]. 应用气象学报,2004,15(6): 665-671.
- [49] 唐世浩,朱启疆,李小文,等. 高光谱与多角度数据联合进行混合像元分解研究[J]. 遥感学报,2003,7(3): 182-189.