* 1

光学积雪遥感研究进展

黄晓东1,郝晓华2,杨永顺3,王玮1,梁天刚1

(1.草地农业生态系统国家重点实验室 兰州大学草地农业科技学院,甘肃 兰州 730020;2.中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,甘肃 兰州 730000; 3.青海省环境监测中心站,青海 西宁 810007)

摘要:积雪在全球水文和气候变化中扮演着十分重要的角色。利用遥感技术进行积雪监测已有 40 多年的研究历 史,在雪盖制图、雪深反演、冰雪反照率等方面发展了一系列的算法及产品。其中,光学遥感以其高时空分辨率 的特点在积雪监测中得到了非常广泛的应用。随着对地观测系统(Earth Observation System, EOS)的发展,以及 国产环境卫星的陆续升空,越来越多的遥感数据被应用于积雪监测,遥感技术势必在积雪监测领域发挥更加重要 的作用,为模拟地球辐射平衡、地表水文研究、全球变化等提供丰富的数据资料。

关键词:光学遥感;积雪制图;研究进展

中图分类号:S812-05;S127 文献标识码:A

文章编号:1001-0629(2012)01-0035-09

雪是地球表面最为活跃的自然要素之一,其特征(如积雪面积、积雪分布、雪深等)是全球能量平衡、气候、水文以及生态模型中的重要输入参数^[1]。就全球和大陆尺度范畴而言,大范围积雪影响气候的变化、地表辐射平衡与能量交换、水资源的利用等;就局部和流域范畴而言,积雪影响天气、工农业和生活用水资源、环境、寒区工程等一系列与人类活动有关的要素。积雪作为重要的环境参数受到了普遍的重视,人们对积雪的研究越来越深入,同时也为模拟地球辐射平衡、地表水文研究、全球变化研究等提供了丰富的数据资料。

1 光学积雪遥感研究综述

目前积雪观测主要通过地面台站及遥感两种手 段。地面台站观测可以获取长时间序列的积雪信 息,但是由于观测台站大多位于地势平坦的城镇周 边及河谷地区,空间连续性较差,一些偏远地区以及 高寒高海拔地区无法对积雪进行观测,不能及时、全 面、准确地反映积雪分布状况。随着空间和信息技 术的快速发展,卫星遥感技术逐渐成为一种有效的 积雪观测手段。遥感,特别是卫星遥感资料在综合 观测系统中的作用越来越大,遥感技术以其宏观、快 速、周期性、多尺度、多层次、多谱段、多时相等优势, 在积雪动态监测中发挥着重要作用,它能以一种比 较高的时空分辨率对全球的雪盖进行反复观测,不 仅比陆地常规观测更加及时有效的获得大范围乃至 全球的积雪覆盖信息,而且有能力监测到更多的雪 盖信息,例如雪深、雪水当量、积雪状态(是否出现融 化)、积雪反照率以及雪盖下面的地表状态,弥补了 常规观测资料水平分辨率较低以及投入较大等不 足。

积雪在波长为 0.5 µm 左右有较高的反射率, 而在 1.6 µm 处发射率较低,通常在可见光范围内 纯净新雪表面反射率在 0.8 以上[2]。光学遥感雪盖 信息提取主要依据积雪的这种反射特性,通过一定 的数字图像技术获取雪盖信息。但是,相对于其他 环境遥感监测,积雪遥感监测又有其特殊的复杂性。 积雪对太阳的反射和自身的辐射特性,不仅与积雪 表面状态有关,如光洁程度,尤其是黑碳污染会对积 雪反射率产生很大的影响[3],而且与积雪的内部结 构,如雪深、液态水含量、粒径等有很大关系,这给利 用光学传感器提取积雪信息造成了一定的困难[4] (图 1)。由于积雪和云在可见光波段具有相似的反 射特性,光学传感器在云和积雪的判识方面存在一 定的问题。另外,地形特征、地表植被特征,尤其是 林地,都会对积雪信息提取造成影响。所以,如何有 效解决这些不利因素仍然是积雪遥感监测中的主要 技术问题。

自20世纪60年代初在加拿大东部第一次用

^{*} 收稿日期:2011-11-18 接受日期:2011-12-31

基金项目:国家自然科学基金项目(41101337、41001197);"西部博士资助项目"(29Y128861)

作者简介:黄晓东(1980-),男,河南新蔡人,讲师,博士,研究方向为草地遥感与地理信息系统。E-mail:huangxd@lzu.edu.cn



Fig. 1 Spectral reflectance curves for snow in different formation stages^[4]

TIROS-1 (Television Infrared Observation Satellite)气象卫星观测积雪以来^[5],利用遥感技术进行 积雪制图和监测已有 40 多年的研究历史,随着不同 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,发展了一系列的雪盖制图算 法及产品,如 Landsat 和 SPOT^[6]、AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)^[7], VEGETATION^[8-10], MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradimeter) 雪盖产品^[11]及 SMMR (Scanning Microwave Multiband Radiometer), SSM/I(Special Sensor Microwave Imager)^[12-13]和 AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer)^[14-15]等微波积雪产品,在积雪动态变化监测等 领域取得了一系列的成果。受光谱和时间分辨率的 限制,大部分卫星源都不适合对全球的积雪分布进 行实时动态监测。NOAA 等卫星的覆盖范围大,时 间分辨率高,但光谱分辨率低,对大气干扰等因素所 做的校正极为有限,且难以区分云和积雪^[7];Landsat 和 SPOT 卫星的覆盖范围小,时间分辨率低,难 以对雪情进行大范围的快速监测[16]。目前研究最 深入、应用最广泛的是 TERRA 和 AQUA 卫星所 携带的中分辨率成像光谱仪 MODIS^[17]。该传感器 是当前世界上新一代"图谱合一"的光学遥感仪器, 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的综合性研究具有非常 重要的意义,为雪盖遥感监测的深入探索研究提供 了一个极其重要的有利条件^[18-19]。由 NASA 陆地

产品组生产的标准雪盖产品已经在世界范围内得到 验证及应用^[20-24],它提供的每日及多日合成积雪产 品,空间分辨率为500m,并且能够有效识别云层。

2 光学积雪遥感研究现状分析

2.1 雪盖制图研究进展 目前发展成熟的雪盖 产品,大多是利用积雪网格对积雪进行"无积雪"或 "全覆盖"两极简化处理,因此,其精度仅适合大陆尺 度,不适合做区域性尺度的研究。MODIS 逐日雪盖 产品属于二值图像,其空间分辨率为500m,由于积 雪的空间异质性,传感器观测到的一个像元可能是 积雪、岩石、土壤、植被的混合体,为了减少混合像元 造成的误差,需要确切地知道一个像元内包含的积 雪覆盖率。尤其在山区,积雪深度较浅且地形影响 使雪盖分布支离破碎,空间破碎化比较严重。单纯 的"无积雪"或"全覆盖"的两极简化处理,是山区积 雪面积监测精度较低的最主要原因之一。许多气候 模型、水文模型对积雪覆盖面积参数精度的要求日 益提高[25-28],传统意义的二值雪盖图像已经难以满 足应用,而积雪亚像元制图则可以很好地弥补山区 雪盖面积监测精度较差的缺点。国外许多学者对于 积雪亚像元分解都进行了广泛的研究,并发展了许 多雪覆盖比例图算法。目前亚像元制图主要有线性 光谱混合模型和统计两种方法。线性光谱混合模型 法通过确定不同地物类型在混合像元中的类比例或 类丰富度来确定混合像元的类型。国外学者通过在 训练样区手工选择组分,将组分光谱反射率平均值 作为组分的光谱,利用线性分解法制作了 AVIRIS (Airborne Visible Infra-Red Imaging Spectrometer)^[29]、Landsat-TM^[30]的积雪比例覆盖图。Painter 等[31-32]研究认为,利用高光谱影像 AVIRIS 采用 线性光谱混合像元分解技术制作雪覆盖比例图时, 不同雪粒径对反演精度有一定影响,利用线性光谱 混合像元分解模型,选择不同粒径积雪、土壤、岩石、 植被和湖冰作为基本组分,通过最优化算法得到雪 覆盖比例图。线性光谱分解法虽然准确,但是由于 该方法需要了解研究区的组分和各组分光谱特性, 获取难度大且操作起来比较复杂。同时针对较大数 据量遥感影像光谱线性分解模型的计算量很大,制 作大尺度的雪覆盖比例图有一定的困难。统计法是 基于雪被指数与雪覆盖比例存在着某种统计关系 (一般来说雪被指数越高则雪覆盖比例也越大),利 用高分辨率的影像对低分辨率影像叠合分析,建立

雪被指数与雪覆盖比例之间的回归曲线,从而获取 雪覆盖比例图,该方法简单迅捷,具有很强的操作 性,适合发展大尺度遥感资料雪覆盖比例图^[28,33-35]。 目前,美国国家宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)国家雪冰数据中心 (National Snow and Ice Data Center, NSIDC)发布 的 MODIS 雪盖产品从 V005 版本以后, MODIS 逐 日雪盖图中除雪盖二值图外,也包含了雪覆盖比例 图。该亚像元雪盖产品是基于 Salomonson(2004) 发展的统计模型建立的^[28]。但是,和 MODIS 雪盖 产品算法类似,该模型算法是在阿拉斯加、加拿大和 俄罗斯积雪区发展的,代表了不同类型的积雪,包括 冰川、平坦积雪及泰加森林积雪,这些地区积雪覆盖 范围较大,雪深较厚,而我国大部分地区积雪较薄, 空间破碎性较大,积雪特性有明显不同,该模型是否 适合还有待进一步研究。国内也有部分学者开始了 积雪亚像元制图研究。延昊和张国平[36-37]利用 NOAA16-AVHRR 的多光谱数据进行像元分解提 取积雪盖度和积雪边界线,发现像元分解法是提取 积雪盖度和积雪边界参数的有效方法。曹云刚和刘 闯^[38]利用 MODIS 影像和 TM 匹配,建立 NDSI (Normalized Difference Snow Index), NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)及雪覆盖比例 之间的回归曲线,制作了青藏高原雪覆盖比例图,但 是这种统计关系物理基础薄弱,因此还需要进一步 验证。金翠等^[39]在东北地区利用 MODIS 雪盖产品 和中巴卫星得到的雪盖图进行匹配,建立了 NDSI 与雪覆盖比例的回归曲线,获取了雪覆盖比例图,但 其制图精度并未验证。周强等^[40]利用 MODIS 资料 发展了一套改进的基于统计模型的 MODIS 亚像元 积雪覆盖率提取方法,并利用 Landsat-ETM+数据 对模型估算结果进行了验证,表明分段模型可以有 效提取亚像元尺度的信息,并且对 NDSI 高值区的 雪盖率反演有一定的改善。陈晓娜^[41] 通过线性光 谱混合模型对天山中段 MODIS 影像进行像元分 解,从中提取积雪面积信息,并进行精度评价,发现 线性光谱混合模型的分类精度较高,具有较强的适 用性。

2.2 雪盖制图去云算法 由于积雪和云的反射 光谱特性,使用光学遥感资料监测积雪受天气状况 的限制极大。自 1999 年美国发射 Terra 和 Aqua 卫星以来,国内外针对 MODIS 和 AMSR-E 的积 雪分类及融合算法等消除云污染研究方面,研发出 一系列算法和专利产品^[41-44]。AMSR-E 被动微波 积雪产品不受天气状况的影响,但空间分辨率低,主 要用于全球雪深、积雪覆盖范围和雪水当量的研究, 在区域性的积雪动态监测中还存在较大偏差。虽然 对光学积雪产品进行多日合成可以有效去除大部分 云的污染,合成周期越长,去云效果越明显,但是时 间分辨率也随之降低,难以满足对积雪区进行实时 动态监测的需要;光学积雪产品与被动微波数据的 合成可以完全消除云的污染,但是微波数据空间分 辨率太低,造成合成积雪产品雪盖面积监测精度降 低。SNOWL(Snowline)去云算法是基于高程对云 像素重新分类,以期达到去云效果的新算法[45](图 2)。经过重分类,云像素被定义成积雪、非积雪和片 雪,但是被分类成片雪的像素具有一定的不确定性, 无法对雪盖面积进行有效统计。依据微波数据不受 云干扰的特点,可以对合成后的 MODIS 积雪资料 片雪区和被动微波数据 AMSR-E 每日雪水当量产 品进行对比分析,利用被动微波数据提供的信息,对 片雪区进行判断,从而生成每日无云积雪图像,可以 有效提高积雪面积监测精度。

2.3 雪粒径反演 雪粒径是指征积雪反照率变化 的主要参数,如新雪的反照率接近1.00,而粒雪的 反照率为0.43~0.69^[46]。因此,雪粒径的准确获取 对于反照率计算进而对雪场表面能量平衡模拟具有 重要意义[47-48]。由于雪颗粒形状各异,变化性强,人 工监测困难、耗时,因此遥感手段是监测雪粒径的最 佳途径。高光谱传感器,使雪粒径反演从最初的定 性阶段走到定量阶段。诸如 AVIRIS、Hyperion 等 传感器,其覆盖了可见光和近红外(0.4~2.5 μm) 200 多个波段,光谱分辨率达到 10 nm。利用高光 谱数据也发展了许多雪粒径反演方法。如 Nolin 和 Dozier^[49]结合 DISORT 和 AVIRIS 数据,选择 1.04 μm 波段作为判别波段,对美国马莫斯山区雪粒径 进行分类。2000年 Nolin 和 Dozier^[50]又对该方法 做了改进,使用 0.96~1.08 µm 的 13 个波段,利用 波段积分面积法判别积雪粒径。相比单波段方法, 多波段反演精度有了很大提高。郝晓华[51]利用 Hyperion 影像结合 DISORT 模型,在祁连山冰沟 流域比较了 Nolin 提出的 3 种雪粒径反演方法,并 通过实测雪粒径对反演结果进行验证。结果表明,3 种方法对于我国山区雪粒径反演精度都不高,这说



奥地利,2003年1月23日[45]

Fig. 2 Example of the SNOWL mapping approach on January 23, 2003, Austria^[45]

注:(a) Terra/MODIS 每日积雪图像(云量为 85%);(b) SNOWL 去云算法消除所有的云像素;(c)地面观测台站雪 深空间分布。

Note: The top panel (a) shows the original MODIS/Terra image, the middle panel (b) a replacement of cloud pixels by the SNOWL mapping approach, and the bottom panel (c) the snow depth observations at the climate stations. Cloud coverage is approximately 85%.

明原来的反演方法并不适合我国积雪粒径反演。此外,Painter 等^[52]利用 AVIRIS 影像结合 DISORT 模型,并考虑了积雪亚像元对雪粒径反演的影响,发展了 MEMSCAG(Multiple Endmember Snow-Covered Area and Grain Size)模型同步反演雪覆盖比例和雪粒径,取得了较好的效果(图 3)。这些反演 方法都忽视了积雪颗粒形状,利用 Grenfell 和 Warren^[53]、Nolin 等^[54]发展的雪等效粒径简化方法,将 积雪单个颗粒等效为球体。而球体散射特性可以利 用米散射理论模拟,进而使用 DISORT 模型模拟不 同积雪粒径反射率。球形简化方法不考虑单个粒子 的散射向函数分布,虽然能较好地模拟半球辐射特 性,但对于单个粒子方向性反射率特征并不能很好 模拟。此外,这些方法也缺少了对影响雪粒径反演 的诸如积雪污染物、积雪液态水含量、积雪表面粗糙 度等积雪参数的观测信息。准确观测积雪属性对积 雪光谱的影响,揭示雪粒径反演的制约因素,提高积 雪反射模型的模拟精度是雪粒径的反演精度提高的 重要途径。Kokhanovsky 和 Zege^[55]比较了实地测 量和使用 Mishchenko 模型模拟的积雪反射率。 Xie 等^[56]利用不同的辐射传输模型算法模拟了 5 种 不同形状的雪粒径光谱反射率。这些研究都表明, 在模拟积雪二向反射特性特别是雪粒径敏感的近红 外波段时,不能忽略积雪颗粒形状。此外,目前雪粒 径反演常用的DISORT模型将雪层粒径、形状认为



图 3 基于 MEMSCAG 模型的 AVIRIS 积雪 覆盖范围及雪粒径^[52]

Fig. 3 MEMSCAG snow-covered area and grain size for the AVIRIS acquisition on March 29, 1996^[52]

39

是垂直同性的,并没有考虑积雪分层。Li 等^[57]和 Stamnes^[58]研究表明,在近红外波段随着雪粒径的 变化,积雪辐射穿透深度可达1~8 cm,在这个深度 范围内,雪层表层粒径和下层颗粒形状大小可能对 反演结果产生影响。Jin 等^[59]利用发展的双层积雪 辐射传输模型(CDISORT)模拟积雪反射特征,结果 表明,考虑积雪分层的辐射传输模型更符合实际情 况。

2.4 冰雪反照率研究 反射率(Reflectivity)是 某一物体对某一波长反射量与入射量的比值,各波 长反射率的积分就是反照率(Albedo)^[60]。由于冰 雪对太阳辐射具有较高的反射率,是入射的太阳辐 射能量仅有很少部分被冰雪覆盖区域吸收,而地球 表面反照率的细微变化,都会影响到地一气系统的 能量平衡,进而引起气候变化[61]。冰雪反照率变化 已被认为是引起气候变化的重要原因之一。冰雪反 照率不仅是影响冰雪物质消融过程的关键因素,而 且是冰雪与气候之间关系紧密耦合的关键反馈因 素。随着不同区域气候环境的差异以及气候环境的 变化,冰雪反照率值存在巨大差异,比如高海拔地区 的新降干雪反照率接近于 1.0, 湿雪为 0.66~0.88, 粒雪为 0.43~0.69, 干净的冰川冰为 0.34~0.51, 轻微污化冰为 0.26~0.33,冰碛覆盖冰为 0.10~ 0.15^[62]。相对于地球其他下垫面而言,冰雪反照率 值要大得多,其微小的变化会对能量平衡状况产生 重要影响,从而导致冰雪消融状况和气候的重大变 化。

尽管已经有了比较成熟的利用卫星遥感反演冰 雪表面及其他地表反照率的方法^[63],但其结果目前 还不能直接应用于陆面过程模式^[64]。地面反照率 的卫星反演结果与实测值之间往往存在差异。对冰 岛 Vatnajökull 冰帽分别用 AVHRR(高级甚高分辨 率辐射仪, Advanced VeryHigh Resolution Radiometer)和 TM(专题成像仪, Thematic Mapper)卫 星资料反演该冰帽的地表反照率,发现即使使用分 辨率较高的 TM(30 m×30 m)资料,其反演结果也 与地面实测值存在差异^[65-66]。因此,对积雪和冰川 进行光谱反射率的长期监测,可对积雪和冰川的卫 星遥感提供必要的地物光谱信息和反照率遥感反演 算法所需要的丰富的地面实测验证数据。为了提高 遥感反演的精度和业务化水平以便今后将反照率产 品直接引入模式,提高陆面模式和气候模式的性能, 还需要对不同区域冰雪表面反照率变化进行长期监 测与研究。而以往对冰雪反照率的观测,大多局限 于太阳短波波段一个总的宽波段范围内,即使是采 用波段划分很细的地物光谱仪,其得到的冰雪光谱 反射率曲线也是在一个时间较短的有限时段内的测 量结果[66]。而冰雪反照率的变化取决于冰雪面反 射属性本身(如积雪的粒径、含水量及黑碳污化等) 的改变和入射辐射量及光谱分布的改变两个方面, 这两个方面都有其自身的日变化、季节变化规律,它 们本身就是动态变化的。同时,冰雪反照率在可见 光和近红外波段之间存在着很大的差别。研究表 明,黑碳引起的雪冰反照率的变化(北极区变化 1.5%、北半球陆地地区变化 3.0%) 所导致的气候 强迫效应在北半球可达 0.3 W·m⁻²,其引起的地 表增温效果约占观测到的全球变暖的1/4左右,而 它的气候强迫效率大约为2,即在一给定的气候强 迫下,其引起的全球地表温度变化的效率是 CO_2 的 2倍[67]。系统开展冰雪反照率变化及其影响研究应 是我国冰雪研究的重要趋势之一,这不仅关系到我 国冰冻圈科学研究成果的国际地位与影响,而且对 评价未来气候环境变化对西部冰雪融水径流的影响 具有重要意义。

3 国产卫星在积雪监测中应用现状

国产卫星源可用于积雪大面积实时动态监测的 主要包括风云系列卫星、中巴资源卫星及环境小卫 星。目前,在北极地区,利用风云系列卫星提取积雪 已经有了成熟的算法^[68]。如李三妹等^[69]利用 FY-2C资料,在阈值法基础上,结合辅助因子函数积雪 判识方法,提取了北半球积雪信息,验证精度达到 85%,具有较好的积雪判识效果。我国于 2008 年 9 月6日,通过一箭双星的方式成功发射了环境减灾 卫星 HJ21A、1B 卫星,两颗卫星上都只搭载了 3 种 主要载荷,其中 HJ21A 星搭载 2 台 CCD 相机和 1 台超光谱成像仪(HSI),HJ21B 星搭载 2 台 CCD 相 机和1台红外相机(IRS)^[70]。由于红外相机白天和 晚上都能成像,因此,对于提高全天时获取数据的能 力具有重要意义^[71]。HJ21B星红外相机主要具有 以下几个方面的特点和应用能力:成像幅宽达到 720 km,基本能满足较大自然灾害一次成像覆盖的 需求;星下点地面像元分辨率热红外通道 300 m,其 他 3 个通道达到 150 m,特别是中红外通道,相对于 千米级分辨率的中分辨率成像光谱仪 MODIS 和风

云(FY)卫星数据,较高的空间分辨率以及热红外、 中红外和近红外合理的通道设置对于积雪判识有重 要意义。目前,利用国产环境减灾卫星,在积雪谣感 制图方面仍处在探索研究阶段,还需要进一步研究 相关算法及产品。国家减灾中心利用环境减灾卫星 热红外通道反演的亮度温度,结合红外相机近红外 波段反射特性开展进行云、雪和其他地物分离,提取 出积雪覆盖范围[72],但缺乏验证研究及相关产品的 研发。宋珍等^[73]将 NDSI 引入到 HJ-1A/1B 卫星 中,得到了基于 CCD 和 IRS 两个传感器数据的 HJ-NDSI 积雪识别方法,为了避免由于幅宽、扫描区域 等因素的差异引起的两种不同传感器同时相数据难 获取的问题,对 HJ-NDSI 方法进行了改进,提出了 一种仅利用 IRS 传感器数据的 HJ-MNDSI 积雪识 别方法,并对两种积雪识别方法得到的结果进行了 验证,结果表明两种方法积雪识别精度都在95%左 右。借鉴当前已经成熟的积雪分类算法,探讨基于 国产卫星且适合我国雪情的积雪遥感监测方法,对 推进我国自主研发卫星在积雪遥感领域的应用具有 重要意义。

4 讨论

国内外的研究表明,遥感技术用于积雪监测具 有极大的潜力。随着对地观测系统(Earth Observation System, EOS)的发展,以及国产卫星数据越 来越多地应用于积雪监测,为我国乃至全球的雪盖 制图应用提供了良好的条件。目前, MODIS 全球雪 盖制图算法在山区和林区反演精度较差的问题还没 有得到完全解决,同时,国产卫星积雪制图还没有一 套成熟的算法及相应产品的开发。因此有必要对国 产卫星积雪制图进行深入研究,综合前人的研究基 础,发展一套精度较高的雪盖制图算法,获取更加准 确的我国及全球雪盖数据集。总之,积雪制图的发 展应包括以下内容:建立更加完善的光学反射传输 模型,模拟积雪与不同地表覆盖组合情况下光的反 射传输状况,从而提高对积雪像元的识别精度;发展 针对多种传感器数据的合成雪盖制图算法、可见光 与微波遥感数据的融合以及信息提取技术。可以预 见,使用多源遥感数据进行雪盖制图是今后发展的 方向,随着一些新型传感器数据的使用(如 MODIS、 FY-3、HJ21A/B、AMSR-E、AMSU 等),遥感雪盖 制图的精度必将进一步提高,为水文、气象模型提供 更准确的输入因子,对于整个冰雪圈的研究也将进

一步深入。

在当前气候模式的陆面过程中,地表反照率是 其主要参数之一。尽管已经有了比较成熟的利用卫 星遥感反演雪冰反照率的方法,但其结果目前还不 能直接应用于陆面过程模式。为了提高遥感反演的 精度和业务化水平以便今后将遥感反照率产品直接 引入模型,提高陆面模式和气候模式的性能,还需要 对不同区域冰雪表面反照率变化进行长期监测与研 究。关于雪冰黑碳的研究在我国刚刚起步,基础薄 弱。如何定量分析雪冰黑碳对雪冰反照率的影响, 进一步加强中国雪冰黑碳光谱反照率及其气候效应 的研究,对于预测中国冰川进退,模拟区域水循环、 大气环境和区域气候变化,补充全球雪冰反照率数 据库,加深对全球变暖的理解以及制定相应的减缓 对策等方面具有重要意义。

参考文献

- [1] Ault T W, Czajkowsky K P, Benko T, et al. Validation of the MODIS snow product and cloud mask using student and NWS cooperative station observations in the Lower Great Lakes Region[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 105, 341-353.
- [2] 冯学智,李文君,伯延臣.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.
- [3] Painter T H, Jeef D, Dar A R, et al. Retrieval of subpixel snow covered area and grain size from imaging sspectrometer [J]. Remote Sensing of Envionment, 2003,85:64-77.
- [4] 王建,陈子丹,李文君,等.中分辨率成像光谱仪图象积 雪反射特性的初步分析研究[J].冰川冻土,2000, 22(2):165-170.
- [5] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V. Algorithm theoretical basic document (ATBD) for the MODIS snow and sea Ice-mapping algorithms[R]. NASA,2001.
- [6] Rutger Dankers, Steven M, De Jong. Monitoring snowcover dynamics in Northern Fennoscandia with SPOT VEGETATION images [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(15):2933-2949.
- [7] Hartman R K, Rost A A, Anderson D M. Operational processing of multi-source snow data[A]. In: Proceedings of the 63rd Annual Western Snow Conference [C]. Sparks, Nevada, 1995:147-151.
- [8] Xiao X, Shen Z, Qin X. Assessing the potential of VEGE-

TATION sensor data for mapping snow and ice cover: a Normalized Difference Snow and Ice Index[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(13): 2479-2487.

- [9] 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.
- [10] Xiao X, Moore III B, Qin X, et al. Large-scale observations of alpine snow and ice cover in Asia: Using multi-temporal VEGETATION sensor data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23 (11): 2213-2228.
- [11] Hall D K,Riggs G A,Salomonson V V, et al. MODIS snow-cover products[J]. Remote Sensing of Environment,2002,83:181-194.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- 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.
- [17] 伯延臣,冯学智.积雪遥感动态研究现状及展望[J]. 遥感技术与应用,1997,12(2):59-65.
- [18] 刘闯,陈圣波, Mo D,等. EOS-MODIS 数据在青藏高 原冰雪季节性变化信息自动提取中的应用研究[J].
 遥感信息,2001(4):30-31.
- [19] Riggs G A, Hall D K, Salomonson V V. MODIS snow products user guide to collection 5[EB/OL]. Available online at: http://nsidc. org/data/docs/daac/modis_v5/ dorothy_snow_doc.pdf.
- [20] Huang X D, Liang T G, Zhang X T, et al. Guo ZG. Monitoring snow cover area utilizing MODIS snow products during the 2001-2005 snow seasons over

northern Xinjiang, China[J]. International Journal of Remote Sensing, DOI:10.1080/01431160903439924.

- Liang T G, Huang X D, Wu C X, et al. An application of MODIS data to snow cover monitoring in a pastoral area: A case study in Northern Xinjiang, China [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112: 1514-1526.
- [22] 张学通,黄晓东,梁天刚,等.新疆北部地区 MODIS 积雪遥感数据 MOD10A1 的精度分析[J].草业学报, 2008,17(2):110-117.
- [23] 黄晓东,张学通,梁天刚. 北疆牧区 MODIS 积雪产品 MOD10A1 和 MOD10A2 的精度分析与评价[J]. 冰 川冻土,2007,29(5):721-729.
- [24] 郝晓华,张璞,王建,等. MODIS 和 VEGETATION 雪 盖产品在北疆的验证及比较[J]. 遥感技术与应用, 2009,24(5):603-610.
- [25] Liston G E. Local advection of momentum, heat, and moisture during the melt of patchy snow covers[J]. Journal of Applied Meteorology, 1995, 34:1705-1715.
- Liston G E. Interrelationships among snow distribution, snowmelt, and snow cover depletion: Implications for atmospheric, hydrologic, and ecologic modeling
 [J]. Journal of Applied Meteorology, 1999, 38: 1474-1487.
- [27] Roesch A, Wild M, Gilgen H, et al. A new snow cover fraction parameterization for the ECHAM4 GCM[J]. Climate Dynamics, 2001, 17(2):933-946.
- [28] Salomonson V V, Appel I. Estimating the fractional snow covering using the normalized difference snow index[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89: 351-360.
- [29] Nolin A W, Dozier J, Mertes L A K. Mappingalpine snow using a spectral mixturemodeling technique[J]. Ann. Glaciol, 1993, 17:121-124.
- [30] Rosenthal W, Dozier J. Automated mapping of montane snow cover at subpixel resolution from the Landsat Thematic Mapper[J]. Water Resources Research, 1996,32(1):115-130.
- [31] Painter T H,Robert D A,Green R O,et al. The effect of grain size on spectral mixture analysis of snow-covered area from AVIRIS data[J]. Remote Sensing of Environment,1998,65(3):320-332.
- [32] Painter T H, Dozier J, Roberts D A, et al. Retrieval of subpixel snow-covered area and grain size from ima-

ging spectrometer data[J]. Remote Sensing of Environment,2003,85(1):64-77.

- [33] Barton J S, Hall D, Riggs G A. Remote sensing of fractional snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data[A]. Proceedings of the 57 Eastern Snow Conference[C]. NY, USA,2000;171-183.
- [34] Kaufman Y J,Kleidman R G,Hall D K,et al. Remote sensing of subpixel snow cover using 0. 66 and 2. 1 μm channels[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(16):1781-1784.
- [35] Rosenthal W, Dozier J. Automated mapping of montane snow cover at subpixel resolution from the Landsat Thematic Mapper[J]. Water Resources Research, 1996,32(1):115-130.
- [36] 延昊,张国平.像元分解法提取积雪边界线[J].山地 学报,2004,22(1):110-115.
- [37] 延昊,张国平.混合像元分解法提取积雪雪盖[J].应 用气象学报,2004,15(6):665-671.
- [38] 曹云刚,刘闯. 一种简化的 MODIS 亚像元积雪信息 提取方法[J]. 冰川冻土,2006,28(4):562-567.
- [39] 金翠,张柏,刘殿伟,等.东北地区 MODIS 亚像元积 雪覆盖率反演及验证[J].遥感技术与应用,2008, 23(2):195-202.
- [40] 周强,王世新,周艺,等. MODIS 亚像元积雪覆盖率提 取方法[J]. 中国科学院研究生院学报,2009,26(3): 383-388.
- [41] 陈晓娜,包安明,张红利,等.基于混合像元分解的 MODIS 积雪面积信息提取及其精度评价——以天山 中段为例[J].资源科学,2010,32(9):1761-1768.
- [42] Wang X, Xie H, Liang T, et al. Comparison and Validation of MODIS Standard and New Combination of Terra and Aqua Snow Cover Products in Northern Xinjiang, China[J]. Hydrological Processes, 2008, 23: 419-429.
- 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.
- [44] Wang X W, Hong J. New methods for studying the spatiotemporal variation of snow cover based on combination products of MODIS Terra and Aqua[J]. Journal of Hydrology,2009,371:192-200.

- [45] Parajka J, Pepe M, Rampini A, et al. A regional snowline method for estimating snow cover from MODIS during cloud cover[J]. Journal of Hydrology, 2010, 381:203-212.
- [46] Wiscombe W J, Warren S G. A model for the spectral albedo of snow I. : Pure snow[J]. Journal of the. Atmos pheric Sciences, 1980, 37:2712-2733.
- [47] Dozier J, Painter T H. Multispectral and hyperspectral remote sensing of alpine snow properties[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2004, 32: 465-494.
- [48] 曹梅盛,李新,陈贤章,等.冰冻圈遥感[M].北京:科 学出版社,2006,72-73.
- [49] Nolin A W, Dozier J. Estimating snow grain size using AVIRIS data [J]. Remote Sensing of Environment, 1993,44(2/3):231-238.
- [50] Nolin A W, Dozier J. A hyperspectral method for remotely sensing the grain size of snow [J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 74(2):207-216.
- [51] 郝晓华.山区雪盖面积和雪粒径光学遥感反演研究 [D].北京:中国科学院研究生院,2009.
- [52] Painter T H, Dozier J, Roberts D A, et al. Retrieval of subpixel snow-covered area and grain size from imaging spectrometer data[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 85(1):64-77.
- [53] Grenfell T C, Warren S G. Representation of a nonsperical ice particle by a collection of independent spheres for scattering and absorption of radiation[J]. Journed of Geophysical Research, 1999, 104:31697-31709.
- [54] Nolin A W, Shi J, Dozier J. Characterization of snow grain size in the near-infrared and microwave wavelengths[A]. Combined Optical-Microwave Earth and Atmosphere Sensing[C]. IEEE, 1993:51-54.
- [55] Kokhanovsky A A, Zege E P. Scattering optics of snow [J]. Applied Optics, 2004, 43: 1589-1602.
- [56] Xie Y, Yang P, Gao B C, et al. Effect of ice crystal shape and effective size on snow bidirectional reflectance[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2006, 100:457-469.
- [57] Li W, Stamnes K, Chen B, et al. Retrieval of the depth dependence of snow grain size from near-infrared radiances at multiple wavelengths [J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28:1699-1702.
- [58] Stamnes K, Li W, Eide H, et al. ADEOS-II/GLI snow/

ice products—Part I:Scientific basis[J]. Remote Sensing of Environment,2007,111:258-273.

- [59] Jin Z H, Thomas P, Charlock, et al. Snow optical properties for different particle shapes with application to snow grain size retrieval and MODIS/CERES radiance comparison over Antarctica [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112;2563-3581.
- [60] 蒋熹.冰雪反照率研究进展[J].冰川冻土,2006, 28(5):128-738.
- [61] Bloch M R. Dust-induced albedo changes of polar ice sheets and glacierizaiton [J]. Journal of Glaciology, 1964,5(38):241-244.
- [62] Paterson W S B. The Physics of Glaciers[M]. England:Elsevier Science Ltd., 1994:53-77.
- [63] Roesch A, Roeckner E. Assessment of snow cover and surface albedo in the ECHAM5 general circulation model[J]. Journal of Climate, 2006, 19 (16): 3828-3843.
- [64] 王介民,高峰.关于地表反照率遥感反演的几个问题 [J].遥感技术与应用,2004,19,(5):295-300.
- [65] Stroeve J C, Box J E, Fowler C, et al. Inter-comparison between in situ and AVHRR polar pathfinder-derived surface albedo over Greenland[J]. Remote Sens-

ing of Environment, 2001, 75: 360-374.

- [66] Reijmer C H, Knap W H, Oerlemans J. The surface albedo of the Vatnajökull Ice Cap, Iceland: a comparison between satellite-derived and ground-based measurements[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1999, 92 (1):123-143.
- [67] Hansen J, Nazarenko L. Soot climate forcing via snow and ice albedos[J]. PNAS, 2004, 101(2):432-428.
- [68] 谢小萍,刘玉洁,杜秉玉.用 FY-1D 全球数据监测北 极冰雪覆盖[J].北京气象学院学报,2007,30(1): 57-62.
- [69] 李三妹,闫华,刘诚.FY-2C积雪判识方法研究[J].遥 感学报,2007,11(3):406-413.
- [70] 贾福娟,吴雁林,黄颖,等.环境减灾21A、1B卫星款 覆盖多光谱CCD相机技术[J]. 航天器工程,2009, 18(6):37-42.
- [71] 刘银年,王建宇,薛咏琪.环境减灾 21B 卫星红外相机 研制[J]. 航天器工程,2009,18(6):50-56.
- [72] 刘三超,杨思全.环境减灾 21B 卫星红外相机数据减 灾应用研究[J]. 航天器工程,2010,19(4):110-104.
- [73] 宋珍,陈晓玲,刘海,等.基于 HJ-1A/1B 卫星遥感数 据的积雪识别方法研究[J].长江流域资源与环境, 2011,20(5):553-558.

Advances in snow-cover monitoring using optical remote sensing

HUANG Xiao-dong¹, HAO Xiao-hua², YANG Yong-shun³, WANG Wei¹, LIANG Tian-gang¹

(1. State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems College of Pastoral Agriculture

Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China;

2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,

Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. Qinghai Environmental Monitoring Center, Xining 840007, China)

Abstract: Snow plays a very important role in global hydrology and climate change. Using remote sensing technology in snow cover monitoring has a history of more than 40 years. A series of algorithm and products were developed in the snow cover mapping, snow deeps inversion and snow-ice albedo. Among them, the optical remote sensing data were used widely in snow cover monitoring because of their high resolution in time and space. As the earth observation system (EOS) developed and domestic environmental satellite launched in succession, more and more remote sensing data will be used in the snow monitoring field, and provide abundant data source for earth radiation balance simulation, surface hydrologic, and global change researches.

Key words: optical remote sensing; snow mapping; advance

Corresponding author: HUANG Xiao-dong E-mail:huangxd@lzu.edu.cn