

不同积雪深度与面积对积雪覆盖遥感反演的影响

蒋洪波, 秦其明*, 张 宁, 董 恒, 陈 超

北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871

摘 要 针对利用多源遥感数据进行积雪覆盖监测的需要, 在分析不同深度与面积的积雪实测光谱基础上, 探讨了在利用 NDSI 方法进行积雪覆盖遥感监测时, 不同积雪深度对其的影响, 并以 HJ-1B 卫星以及 MODIS 卫星为例, 研究了不同积雪面积对遥感积雪反演的影响。结果表明, 积雪深度几乎对遥感积雪覆盖监测的结果没有影响, 而在积雪面积方面, 受所使用的遥感影像空间分辨率的制约, 对遥感积雪监测的结果有一定影响。

关键词 积雪深度; 积雪面积; 积雪覆盖; 遥感反演

中图分类号: P237 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)12-3342-05

引 言

积雪覆盖是全球气候变化过程中的一个重要因素, 积雪覆盖的变化对地表反照率、全球和地区能量平衡以及水文循环系统都有重要影响^[1-5]。在过去近 30 年中, 随着全球地表温度以每十年超过 0.3° 的趋势增加, 全球积雪覆盖变化显著, 从 20 世纪 80 年代开始, 在北半球的中高纬度地区的积雪覆盖面积缩减超过 10%^[6,7]。遥感技术的发展使得快速、大面积的积雪覆盖监测成为可能, 利用遥感数据进行积雪覆盖监测已有大量研究^[8-10]。针对光学遥感而言, 不仅积雪深度差异使得雪面反射率不同, 而且不同的积雪性质也能造成雪面反射率差异^[11]。另外, 雪的新旧程度, 干湿程度, 密度等的不同, 以及正在融化的雪与冻结的雪等, 都可以造成积雪粒子的物理结构差异, 使得积雪在可见光、近红外以及短波红外波段的反射特性上存在一定的差异, 从而导致反射率的差异^[12,13]。这些种种, 都可能对光学遥感数据的积雪覆盖监测带来影响。同时, 因为云层、下垫面差异以及降雪时间、降雪量等的影响, 使得仅利用单一传感器数据进行积雪覆盖制图存在很大的不确定性。为尽可能的降低云覆盖的影响, 比如 MODIS 的全球积雪覆盖产品仅提供 7 个观测日的镶嵌图像。但是在某些情况下, 比如积雪灾害监测、公路路面监测等, 我们需要及时的积雪覆盖监测产品, 对此, 就需要利用不同传感器、不同分辨率的遥感图像。但是目前仅针对

不同积雪深度情况, 利用单一传感器数据进行积雪监测有较多研究, 而积雪面积差异对利用不同空间分辨率的遥感数据进行积雪覆盖反演的影响研究较少。基于此, 为达到综合利用多种传感器进行积雪覆盖监测的目的, 本文在分析不同积雪深度、下垫面状况以及积雪面积的积雪实测光谱的基础上, 利用归一化差分积雪指数进行积雪覆盖识别, 以我国环境与减灾卫星数据以及 MODIS 数据为例, 主要探讨了利用光学遥感数据进行积雪覆盖监测时不同积雪深度与面积对遥感积雪监测的影响。

1 实测积雪光谱分析

为深入理解不同面积以及深度的积雪对太阳光谱反射率的差异, 本文对不同状况的积雪进行了实地测量, 测量地区为新疆天山, 测量时间为 2008 年 11 月。实测数据包括各种类型的光谱反射光谱值、雪深观测记录等。针对不同积雪面积, 本文将其区分为积雪零覆盖(土壤)、积雪半覆盖(土壤积雪混合)以及积雪全覆盖, 在积雪半覆盖状况下, 又分为零散积雪覆盖和连续积雪覆盖两种类型, 如图 1 所示。在图 1 中, (a) 为积雪全覆盖, (b) 为连续积雪半覆盖, (c) 为零散积雪半覆盖, (d) 为积雪零覆盖。针对不同积雪厚度, 本文主要包括 10 cm、5 cm、4 cm 以及 3 cm 的积雪, 而且所有深度下都是积雪全覆盖状况。不同深度的积雪光谱曲线测量结果如图 2 所示, 不同面积的积雪光谱测量结果如图 3 所示。

收稿日期: 2011-01-15, 修订日期: 2011-04-20

基金项目: 国家(863 计划)项目(2009AA12Z128, 2008AA121806)和国家自然科学基金项目(40771148)资助

作者简介: 蒋洪波, 1981 年生, 北京大学遥感与地理信息系统研究所博士研究生 e-mail: jhb810912@163.com

* 通讯联系人 e-mail: qmqinpk@163.com

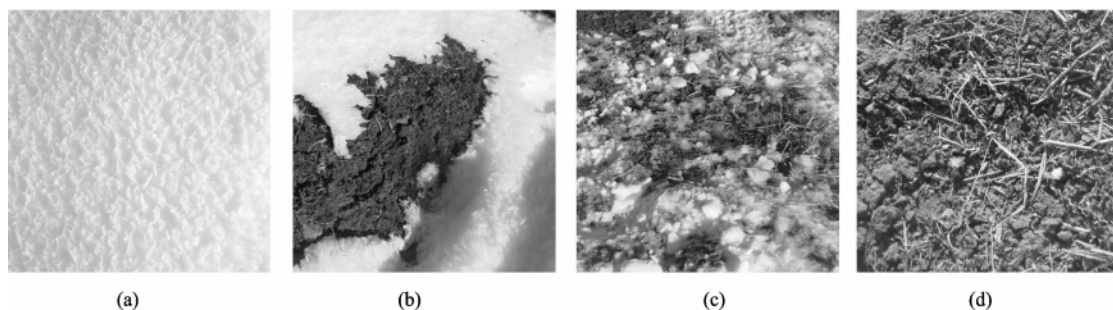


Fig 1 Schematic diagram of the different snow area

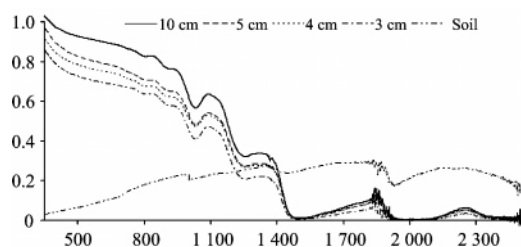


Fig 2 Spectral reflectance curves of different snow depth

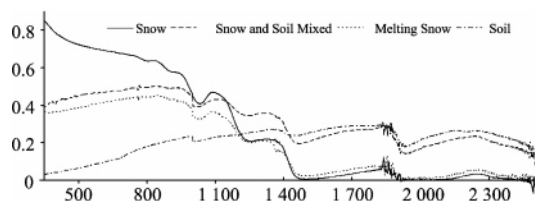


Fig 3 Spectral reflectance curves of different snow area

从图 2 可以看出, 积雪的反射率随波长的增加逐渐减小, 在 $1000 \mu\text{m}$ 附件存在一个小的吸收谷。积雪全覆盖状况下, 在可见光波段积雪的反射率都在 0.7 以上, 并且随积雪深度的增加, 反射率也随之增大。从近红外到 $1.4 \mu\text{m}$, 积雪反射率从 0.7 逐渐降低到 0.2 左右 (3 cm 积雪深度), 而在 $1.4 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 波长范围内, 积雪的反射率从 0.2 急剧降低到接近于全吸收状态, 在此范围内, 不同积雪深度的反射率差别不大; $1.6 \mu\text{m}$ 以后, 积雪反射率稍微有所增大, 但增加幅度不大, 一直到 $2.0 \mu\text{m}$, 基本上一直是处于弱反射状态。同时从图 2 可以看出, 积雪深度与可见光波段的反射率之间有着较好的线性关系, 积雪深度的增加导致雪面的反照率增加。在短红外波段, 积雪深度的变化对短波红外波段的反射率影响则不如可见光波段明显, 但同样也有一定的相关关系。这种雪深和可见光、近红外以及短波红外波段反射率的变化主要来自雪盖厚度与积雪面积两方面。

单从积雪厚度方面, 与土壤的反射光谱曲线对比不难发现, 因为雪粒间空隙的存在, 使得太阳的入射辐射到达雪面时除了被雪粒吸收和反射以外, 还有一部分太阳辐射被雪粒间隙折射到下垫面而被其部分吸收, 同时折射到下垫面的另一部分又通过雪粒间隙反射出雪面, 从而卫星传感器接收到的雪盖反射辐射, 不仅包含了雪粒本身的反射, 也包含了下垫面(土壤)反射部分^[12]。这样, 随着雪盖厚度的增加, 通过

雪粒间隙折射到下垫面的太阳辐射入射减小, 下垫面的反射也减小, 使得大部分入射能量被雪面直接反射回太空而被传感器接收, 因而反射率越高。而当积雪达到一定深度时, 太阳辐射不能通过雪粒间隙折射到下垫面, 则卫星接收到的来自下垫面的反射贡献为零, 这种情况下, 卫星传感器接收到的信号主要为雪粒本身的反射, 因此雪盖到达一定深度时, 反射趋于饱和, 反射率与积雪厚度的线性相关性消失^[13]。

从积雪面积方面来看, 如图 3 所示, 积雪全覆盖状况下的积雪反射率较积雪半覆盖以及积雪零覆盖都有明显差别。如前文所述, 在 $1.0 \mu\text{m}$ 波长区间内, 积雪全覆盖状况下的积雪反射率基本大于 0.6, 而在积雪半覆盖状况, 其反射率处于 0.3~0.5 的区间, 同时连续积雪状况[图 1(b)]较零散积雪状况[图 1(c)]的反射率略高。从 $1.0 \sim 1.2 \mu\text{m}$, 积雪全覆盖、连续积雪半覆盖以及零散积雪半覆盖的积雪反射光谱曲线差别不再明显, 但是积雪全覆盖以及连续积雪半覆盖的反射率依旧略高于零散积雪半覆盖状况。图 3 也显示, 从 $1.2 \mu\text{m}$ 开始, 积雪全覆盖以及连续积雪半覆盖状况的积雪反射率呈明显下降趋势, 而与之相反的是, 零散积雪半覆盖状况的积雪反射率降低并不很明显, 而且从 $1.4 \mu\text{m}$ 开始, 其几乎与积雪零覆盖(土壤)的反射率保持一致。其原因是所土壤反射率在 $1.1 \mu\text{m}$ 后大于积雪反射率的影响, 在积雪未全覆盖地表的情况下, 太阳入射辐射除了上述被雪粒吸收、反射以及被下垫面吸收、反射外, 还有一部分被未被雪面覆盖的物体(土壤)吸收、反射, 此时卫星接收到的信号则主要包括积雪的反射信息、下垫面的反射信息以及未被雪盖的土壤的反射等。随着雪深降低到微量时, 雪对地面的覆盖度减小, 积雪的反射减小, 下垫面的反射增加, 未被雪覆盖区域增大, 该区域对传感器的贡献也相应增大。

2 不同积雪深度对遥感积雪覆盖反演的影响

基于以上积雪实测光谱的分析, 本文首先考察了不同积雪深度对遥感积雪覆盖反演的影响。本文利用归一化积雪差分指数(NDSI)进行积雪覆盖遥感反演, NDSI 的算法公式如式(1)所示^[14]

$$\text{NDSI} = \frac{\rho_{\text{Green}} - \rho_{\text{SIR}}}{\rho_{\text{Green}} + \rho_{\text{SIR}}} \quad (1)$$

其中, ρ_{Green} 为绿光波段的反射率; ρ_{SIR} 为短波红外波段的反射率。

本文以我国环境与灾害监测小卫星 B 星(HJ-1B)的传感器通道为例,利用野外不同深度类别的积雪实测光谱,研究不同积雪深度对遥感积雪覆盖反演的影响。针对 HJ-1B 卫星数据,(1)式中的绿光波段对应其 CCD 传感器的第 2 波段,短波红外波段对应其红外相机(IS)的第 2 波段。对于野外实测光谱,本文利用公式(2)计算得到对应 HJ-1B 绿光波段以及短波红外波段的反射率^[15],计算结果如图 4、图 5 所示。

$$\rho_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) \times R_i(\lambda) d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_i(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

其中, $\rho(\lambda)$ 为对应的 λ 波长的反射率; $R_i(\lambda)$ 为 HJ-1B 卫星对应波段的光谱响应函数。

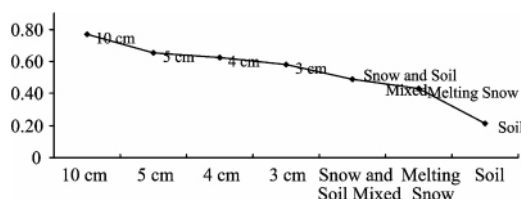


Fig 4 Reflectance of different snow depth and area for HJ-1B CCD2

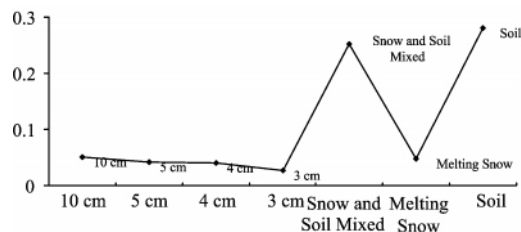


Fig 5 Reflectance of different snow depth and area for HJ-1B IS2

在图 4 和图 5 中,主要包括了不同积雪深度(10, 5, 4 和 3 cm)以及积雪面积(连续积雪半覆盖、零散积雪半覆盖、积雪零覆盖)七种类型。其中,图 4 为各类型在 HJ-1BCCD 传感器绿光波段反射率,图 5 为各类型 HJ-1BIS 传感器短波红外波段反射率。从图 4 可以看出,积雪全覆盖状况下不同积雪深度在绿光波段的反射率都较高,对 HJ-1BCCD 传感器而言,与图 2 一致,其在绿光波段的反射率随积雪深度的减小而降低,并且降低程度明显;在积雪半覆盖状况下,反射率小于积雪全覆盖,连续积雪半覆盖的反射率比零散积雪半覆盖反射率大 0.1;而在积雪零覆盖时候(土壤),在绿光波段的反射率迅速下降到 0.2。相反的,在 HJ-1B 星 IS 传感器的短波红外波段,积雪全覆盖状况下的反射率很低,处于 0.05 附件,而且随积雪深度的变化期反射率的变化不大;而在积雪半覆盖状况下,连续积雪半覆盖于零散积雪半覆盖的发射率差别很大,零散积雪半覆盖的反射率与积雪零覆盖的反射率差不多,在 0.25 以上,而连续积雪半覆盖的反射率却与积雪全覆盖的反射率差不多,在 0.05 左右。这一点,对于遥感积雪覆盖监测来说,无疑是混合像元积雪识别误差的主要来源之一。

本文在本节主要讨论的是不同积雪深度状况对使用归一化差分积雪指数进行积雪遥感监测产生的影响,所以,根据

图 4、图 5 的结果,本文以式(1)的算法计算了不同深度与面积类型的 NDSI 值,如图 6 所示。在上文的讨论中,我们知道,不同的积雪深度无论是在绿光波段还是在短波红外波段,其反射率值都有一定的差异,只是在绿光波段的差异绝对值较大,而在短波红外波段的较小。但是从图 6 可以看出,不同积雪深度的 NDSI 值的差异几乎可以忽略不计,都处于 0.9 左右。在实际的遥感监测中,虽然我们还必须考虑程辐射对图像像元 NDSI 值的影响,但是一般情况下,因为计算方法的原因,其影响已在很大程度上被减弱,这就是在使用归一化差分积雪指数进行积雪覆盖遥感监测时候,缺少大气数据也是可行的原因^[14]。故由此不难看出,积雪深度对积雪覆盖遥感提取精度的影响几乎可以忽略。

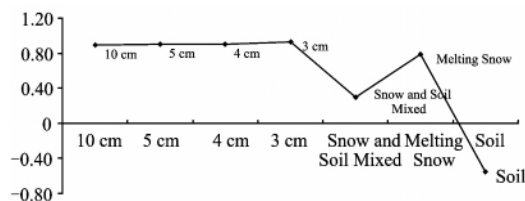


Fig 6 NDSI of different snow depth and area for HJ-1B

3 不同积雪面积对遥感积雪覆盖反演的影响

对积雪覆盖遥感监测来说,不同的积雪面积反映到遥感图像上就简化为纯像元还是混合像元的问题。由于不同传感器空间分辨率的差异,在高分辨率图像上的纯像元,在相对低分辨率图像上则可能表现为混合像元了。所以,不同积雪面积导致的遥感积雪覆盖反演的影响,则可以通过研究不同空间分辨率遥感积雪反演的差异来实现。基于上述思想,本文主要选取了 HJ-1B 卫星数据以及 MODIS 数据进行探讨,其成像时间都在 2008 年 10 月 16 日,成像区域为我国新疆天山地区,图像云覆盖小于 3%。HJ-1B 以及 MODIS 影像都采用 UTM 投影到 WGS84 坐标系统,并进行辐射校正和几何纠正以及影响配准,其配准精度在一个像元内,所有影像的 DN 值转换为大气表观辐射率。另外,因为 HJ-1B 卫星 CCD 数据分辨率为 30 m,而 IS 数据分辨率为 150 米,所以 CCD 数据重采样到 150 m。在此基础上,根据式(1)的算法,在计算各图像 NDSI 以及排除水体干扰的基础上,得到积雪覆盖遥感监测结果,如图 7 所示。这里需要指出的是,在计算 NDSI 时,对于 HJ-1B 卫星,绿光波段为 CCD 的第 2 波段,短波红外波段为 IS 的第 2 波段;对于 MODIS 数据,绿光波段为第 4 波段,短波红外波段为第 6 波段。

从图 7(1)可以看出,基于 HJ-1B 和 MODIS 数据分别生成的积雪覆盖区域在总体轮廓上保持高度一致,但在部分区域存在一定的差异,主要表现在一些零散积雪区域, HJ-1B 的反演结果有积雪覆盖而 MODIS 的反演结果没有,同时,在积雪覆盖比较集中的地区,MODIS 反演结果为全覆盖时, HJ-1B 却存在一些空隙。存在这种差异的原因,则主要是因为积雪面积的影响,在积雪面积较小时,因为 HJ-1B 卫星空间分辨率较大,其将识别为积雪,而 MODIS 卫星空间分辨率较小,则一些小单元的积雪不能被识别为雪覆盖。从两个

反演结果的统计结果也显示, HJ-1B 卫星反演的积雪覆盖率比 MODIS 反演的积雪覆盖率少 5.8% 左右。其原因是: (1) 针对连续性积雪区域来说, 非均匀地表(这里指雪盖区域和非雪盖区域的混合像元)在低空间分辨率影像上一般的表现均为均匀地表, 从而使得从 MODIS 影像上得到的积雪面积比 HJ-1B 影像上得到的多, 积雪图像上的表现为 MODIS 积雪

图像比 HJ-1B 积雪图像更有质感, 更具有连续性。(2) 针对较小面积的积雪区域来说(一般情况下可认为小于 MODIS 分辨率的一半, 即 250 m), 高分辨率影像更真实的表达了小面积积雪区域, 特别是一些微小区域, 高分辨率影像上的“雪毛斑”很多。如图 7(1)中(a)图比(b)图的“雪毛斑”更多。

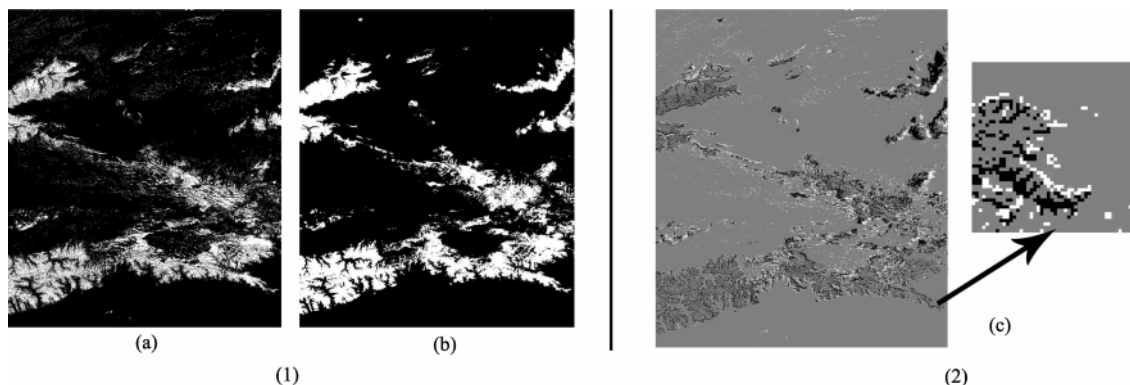


Fig 7 (1) is the results of snow cover retrieval, the left (a) is of HJ-1B, the right (b) is of MODIS; (2) is the differences of snow cover retrieval

为了更细致的比较两种反演结果的差异, 本文对两个反演结果进行差值运算, 得到积雪覆盖差值图像(DSC)。因为 HJ-1B 积雪反演结果的空间分辨率为 150 m, 而 MODIS 的为 500 m, 所以在做差值运算之前, 将 HJ-1B 的结果重采样到 500 m, 并将其与 MODIS 的反演结果图像进行严格配置。运算算法如式(4)所示

$$DSC = SC_{HJ-1B} - SC_{MODIS} \quad (4)$$

从式(4)不难看出, DSC 图像存在三种取值, 即 -1, 0, 1。显然, DSC 上的正值像元(+1)表示 HJ-1B 图像识别为雪像元而 MODIS 图像未识别为积雪的像元; 反之, 负值像元(-1)表示 MODIS 图像识别为雪像元而 HJ-1B 图像未识别为积雪的像元; 零值像元则表示 HJ-1B 和 MODIS 图像识别一致的类别。运算结果如图 7(2)所示, 图 7(2)的左图为局部放大的结果图。在图 7(2)中, 白色表示正值像元(+1), 黑色表示负值像元(-1), 灰色表示 0 值像元。图 8 的统计结果显示, 正值像元所占比例为 6.882%, 负值像元所占比例为 3.454%, 0 值像元所占比例为 89.664%。从统计结果可以看出, 受积雪面积大小的影响, 高空间分辨率遥感影像上的积雪全覆盖在低空间分辨率影像上可能表现为积雪半覆盖或者零覆盖, 这正是正值像元出现的原因; 另一方面, 因为在低空间分辨率影像上的一个像元在高空间分辨率影像上则是多个像元, 所以 MODIS 识别出的雪像元在 HJ-1B 影像被分解为多个像元, 存在某些像元不是雪像元, 从而产生差值图像上的负值像元。基于以上分析, 不难看出, 积雪面积对遥感积雪监测的影响, 主要表现在相对遥感影像空间分辨率来说的积雪半覆盖情况下所导致, 前文所述, 在积雪半覆盖状

况, NDSI 的差别较大, 从而对遥感积雪信息提取将有较大影响。主要表现在, 因为遥感影像是以像元为单位识别积雪或者非积雪, 所以在此状态, 对于零散的积雪半覆盖像元, 因为其 NDSI 较大的原因, 将被识别为雪像元; 对应的, 对于连续积雪半覆盖, 因为其 NDSI 较小, 则有可能被识别为非积雪覆盖。而在积雪零覆盖状况下, NDSI 值小于 0, 不会被识别为积雪, 从而也不会影响遥感积雪信息提取。

4 讨论与结论

本文主要通过不同深度以及面积的积雪实测光谱, 分析了各积雪类型反射光谱的差异, 探讨了在应用归一化差分积雪指数进研积雪覆盖遥感监测时积雪深度对其的影响; 在此基础上, 以 HJ-1B 卫星以及 MODIS 卫星为例, 研究了不同积雪面积对遥感积雪反演的影响。本文的研究表明, 在积雪全覆盖的状况下, 积雪深度几乎对遥感积雪监测的结果没有影响, 而在积雪面积方面, 受所使用的遥感影像空间分辨率的制约, 其对遥感积雪监测的结果有约 10% 的影响, 主要表现为在高空间分辨率遥感反演结果上, 一些小面积的积雪被识别, 而在积雪集中的地区, 不是均匀的识别为雪覆盖, 存在一定的空隙。当然, 积雪反射光谱的变化是复杂的, 其不仅受积雪面积以及深度的影响, 而且还因为积雪的新旧程度、积雪颗粒的大小、下垫面状态以及积雪地貌地形等的影响, 而这些影响又进一步影响到积雪厚度以及面积的变化, 使得积雪遥感监测结果产生变化, 这些, 都是有待进一步研究的问题。

References

- [1] Gao Yang, Xie Hongjie, Yao Tandong, et al. Remote Sensing of Environment, 2010, 114: 1662.
- [2] Parajka J, Blöschl G. Water Resource Research, 2008, 44: W03406.
- [3] Grayson R B, Blöschl G, Western A W, et al. Advances Water Resource, 2002, 25: 1313.
- [4] Sauter T, Weitzenkamp B, Schneider C. International Journal of Climatology, 2010, 30(15): 2330.
- [5] Mott R, Schirmer M, Bavay M, et al. Cryosphere, 2010, 4(4): 545.
- [6] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007) Climate Change. The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [7] Dye D G. Hydrological Processes, 2002, 16: 3065.
- [8] Xu X L, Liang D, Tsang L, et al. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2010, 3(4): 689.
- [9] WU Yang, ZHANG Jia-hua, XU Hai-ming, et al. (吴 杨, 张佳华, 徐海明, 等). Meteorological Monthly(气象), 2007, 33(6): 3.
- [10] Hall D K, Riggs G A. Hydrological Processes, 2007, 21, 1534.
- [11] Che Tao, Li Xin, Gao Feng. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(3): 363.
- [12] Wang Jian, Chen Zidan, Li Wenjun, et al. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(2): 165.
- [13] Wei Wenshou, Qin Dahe, Liu Mingzhe. Arid Land Geography, 2001, 24(4): 310.
- [14] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V. Remote Sensing of Environment, 1995, 54: 127.
- [15] Li X Y. In Flight Radiometric Calibration and Pixel Based Calibration for CCD Camera and WFI Imager on CBERS-02. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2006.

Effect of Different Snow Depth and Area on the Snow Cover Retrieval Using Remote Sensing Data

JIANG Hong-bo, QIN Qi-ming*, ZHANG Ning, DONG Heng, CHEN Chao
School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract For the needs of snow cover monitoring using multi-source remote sensing data, in the present article, based on the spectrum analysis of different depth and area of snow, the effect of snow depth on the results of snow cover retrieval using normalized difference snow index (NDSI) is discussed. Meanwhile, taking the HJ-1B and MODIS remote sensing data as an example, the snow area effect on the snow cover monitoring is also studied. The results show that: the difference of snow depth does not contribute to the retrieval results, while the snow area affects the results of retrieval to some extents because of the constraints of spatial resolution.

Keywords Snow depth; Snow area; Snow cover; Remote sensing retrieval

(Received Jan. 15, 2011; accepted Apr. 20, 2011)

* Corresponding author