

文章编号: 1004-8227(2010)05-0566-06

# 基于 MODIS 与 HJ-1B 数据的 雪盖率反演及其相关因子分析

张旭<sup>1,2</sup>, 唐宏<sup>3</sup>, 赵祥<sup>3</sup>, 周廷刚<sup>1,2\*</sup>

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715;  
3. 北京师范大学减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

**摘要:** 随着空间信息技术的发展及社会经济对雪盖监测产品的需求, 亚像元雪盖制图逐渐成为积雪监测研究的重点。以环境与减灾卫星(HJ-1B)数据作为地面真值计算 MODIS 数据中每个像元的积雪覆盖率, 并与归一化雪被指数(NDSI)建立回归模型, 从亚像元尺度反演 MODIS 数据的积雪覆盖率。以青海省玉树州作为研究区, 实验结果表明该算法反演的雪覆盖率平均绝对误差均在 0.2 以内, 在可接受的误差范围之内, 说明该算法具有较强的稳定性和实用性。此外, 在积雪覆盖率反演基础上, 提出了与积雪覆盖率相关的另外两个相关因子: 地表温度(LST)和植被指数(NDSI), 分析表明: 这两个因子与积雪覆盖率均存在明显的负相关关系, 为基于多因子的雪盖率反演奠定了基础。

**关键词:** 雪覆盖率; 雪被指数; 地表温度; 植被指数; MODIS; HJ-1B  
**文献标识码:** A

雪盖信息提取对研究全球水资源的供给和管理具有重要的科学意义。目前, 遥感技术已经广泛应用于雪盖制图研究, 其中, NOAA/AVHRR 和 NASA/MODIS 是两个在雪盖监测领域中应用最为广泛的光学传感器<sup>[1]</sup>。虽然 MODIS 500 m 分辨率的雪产品能提供全球的雪盖分布信息, 但对于流域尺度研究, 这样的数据仍然很难满足精度要求。例如, 基于栅格单元的流域融雪径流模型需要输入每个像元的积雪覆盖度<sup>[2]</sup>。因此, 国内外不少学者开始从亚像元的尺度, 研究像元内的雪盖率, 目前主要有两种研究方法<sup>[3]</sup>: 一是统计回归的方法, 二是混合像元分解方法。Kaufman 运用雪像元和非雪像元在 2.1  $\mu\text{m}$  和 0.66  $\mu\text{m}$  的光谱特性建立了雪盖率的反演算法<sup>[4]</sup>, Barton 和 Salomonson<sup>[5,6]</sup> 利用雪盖率和 NDSI 之间的关系建立了雪盖率的回归模型, 均取得了较高的精度。也有一些学者研究基于混合像元分解模型的雪盖率反演算法, 该方法虽然在精度上有所提高, 但其模型建立时端元选取的复杂性影响了其业务化的推广<sup>[3,7]</sup>。鉴于以上分析, 本文在

Salomonson 模型基础上, 以青海省玉树州为研究区, 采用 MODIS 数据与 HJ-1B 数据, 对算法中的参数进行估计, 完成了研究区亚像元雪盖制图, 并分别讨论了雪盖率(FRA)与其两个相关因子地表温度(LST)以及植被指数(NDVI)之间的相关关系, 提出了基于多因子的雪盖率反演的构想。

## 1 研究区和数据集

### 1.1 研究区概况和数据集描述

本文选取青海省玉树藏族自治州的 3 个区域为研究区, 分别编号为 1、2、3, 地理位置处于东经 89°27' ~ 97°39', 北纬 31°45' ~ 36°10'。研究区地形复杂, 高差较大, 平均海拔在 4 200 m 以上。受地理环境影响, 该区域常年气候变化无常, 终年霜雪不断。参考全国 2000 年土地利用/覆盖数据可知, 区域的地表覆盖类型以高寒草甸、高寒灌丛、裸岩、零星湖泊为主。

本文采用的数据集包括 2008 年 10 月 29 日与

收稿日期: 2009-05-15; 修回日期: 2009-10-26

基金项目: 863 项目高效能机载 SAR 系统减灾救灾应用示范(2007AA120306); 863 项目多源遥感数据分析与减灾救灾应用示范(2007AA120205); 中美国际合作(2007DFA20640)

作者简介: 张旭(1984~), 女, 四川省乐山人, 硕士研究生, 主要从事遥感与地理信息系统的研究。E-mail: zhangxucherry@163.com

\* 通讯作者, E-mail: zhoutg@swu.edu.cn

2008年11月14日MODIS 500 m分辨率的1B数据, 2景同时期的MODIS 500 m分辨率的8天合成雪盖产品(MOD10A2), 2景MODIS 1000 m分辨率的每日地表温度数据产品(MOD11A1), 2景MODIS 500 m/1000 m分辨率的8天合成植被指数产品(MOD13A1/MOD13A2), 以及作为“真值”验证数据的4景HJ-1B影像数据。本文所选研究区的数据均是晴朗无云的天气下获得的, 因此不考虑云的影响。图1为MODIS 6、4、2波段合成的研究区影像, 蓝色为雪覆盖区。表1为HJ-1B星的参数信息。

表1 HJ-1B数据信息

Tab. 1 Data Information of HJ-1B

区域	传感器	成像日期	行列	太阳高度角	太阳方位角
1, 2	HJ-1B/CCD1	2008-11-14	26 75	36.523	342.171
	HJ-1B/IRS	2008-11-14	29 73	34.468	340.761
3	HJ-1B/CCD2	2008-10-29	27 77	40.73	335.28
	HJ-1B/IRS	2008-10-29	25 78	42.23	336.84

## 1.2 数据预处理

### 1.2.1 HJ-1B数据

2008年9月6日, 我国发射了环境与灾害监测预报小卫星A、B星(HJ-1A/B), 其中, HJ-1B星上载有两台CCD相机, 一台红外相机, 空间分辨率分别为30和150 m, A、B双星在同一轨道面内组网飞行, 可形成对国土2d的重访能力。

对可见光波段, 使用绝对定标系数将HJ-1B的反射波段DN值转换为大气顶层的表现反射率, 其公式为:

$$\rho = \frac{\pi \times (offset_i + DN/gain_i) \times d^2}{esun_i \times \cos(\theta)} \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为第*i*波段大气顶层的表现反射率;  $d$  为日地距离;  $esun_i$  为第*i*波段太阳平均辐射强度;  $\theta$  为太阳天顶角;  $gain_i$  和  $offset_i$  分别为第*i*波段的增益和偏移。

对于红外波段, 根据(2)式计算辐亮度:

$$l_i = \frac{DN - radiance\_offset_i}{radiance\_gain_i} \quad (2)$$

式中:  $l_i$  为第*i*波段的辐亮度;  $radiance\_gain_i$  和  $radiance\_offset_i$  分别为对应波段的增益和偏移。

将HJ-1B数据利用经验的阈值分类方法得到30 m分辨率的雪盖二值图像, 雪像元赋值为1, 非雪像元赋值为0。

### 1.2.2 MODIS 1B数据

在ENVI4.4软件中, 使用MODIS Tools下的

Georeference data命令对MODIS 1B数据进行几何精校正, 为方便与“真值”影像对比, 将其投影转化为UTM, 数据重采样为480 m分辨率, 同时去除影像的“蝴蝶结”效应。然后以HJ-1B为参考影像, 将MODIS影像与其配准。MODIS辐射定标原理同“HJ-1B”数据。

利用MODIS第4波段(0.545~0.565  $\mu\text{m}$ )和第6波段(1.628~1.652  $\mu\text{m}$ )计算雪被归一化指数(NDSI), 其公式如下:

$$NDSI = \frac{band4 - band6}{band4 + band6} \quad (3)$$

## 2 研究方法

### 2.1 反演算法建立

经重采样后的MODIS数据的分辨率为480 m, 作为地面雪盖率验证“真值”的HJ-1B数据的分辨率为30 m, 因此每个MODIS像元对应HJ-1B数据的16×16个像元。统计每个MODIS像元中包含的积雪像元数(即HJ-1B数据的像素值为1), 利用下述公式计算MODIS像元的雪盖率FRA:

$$FRA = \frac{n_{snow}}{N} \quad (4)$$

其中:  $n_{snow}$  是每个MODIS像元中包含的积雪像元个数;  $N$  是每个MODIS像元中包含的积雪二值分类图中总的像元个数(本文中取值为256)。

根据统计分析的方法建立MODIS雪盖率和NDSI之间的线性回归方程, 其方程有两种形式, 分别为:

$$FRA = \alpha_1 \times NDSI + b_1 \quad (\text{算法一})$$

$$NDSI = \alpha_2 \times FRA + B_2 \quad (\text{算法二})$$

对于算法二, 因最终要通过NDSI反演FRA, 所以还需对其进行反解。通过回归得到的雪盖率可能存在大于1或小于0的情况, 本文在处理的时候将大于1的雪盖率取值为1, 小于0的雪盖率取值为0。两种算法的优缺点将在后文予以讨论。

### 2.2 模型验证方案及分析

考虑到三个研究区空间位置上的差异性, 本文分别用算法一和算法二对研究区1和3建立雪盖率反演模型并进行相互验证, 为了增强模型的通用性, 再分别用两个模型系数的平均值建立通用模型计算研究区2的雪盖率, 具体模型见表2。由图2和图3可知, NDSI和积雪覆盖率之间存在很强的相关性, 两幅图的相关系数分别为0.834和0.821, 其中虚线

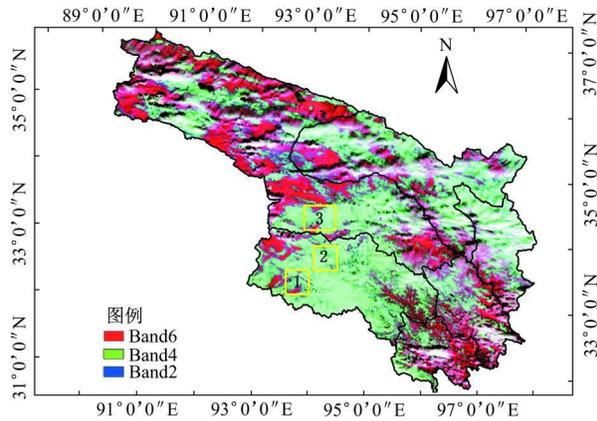


图 1 研究区

Fig. 1 Study Area

表 2 研究区雪盖率反演回归算法、验证算法及误差分析

Tab. 2 Regression Relationships of Extracting Snow Cover Information Developed for Three Study Areas and Error Analysis

研究区	回归算法	验证算法	HJ-1B 平均 雪盖率	反演雪盖率	绝对平均 误差	均方根误差
1	$FRA = 1.697 \times NDSI - 0.173$ (一)	$FRA = 1.138 \times NDSI - 0.099$	0.66	0.68	0.19	0.23
	$FRA = 2.439 \times NDSI - 0.538$ (二)	$FRA = 1.696 \times NDSI - 0.103$	0.66	0.71	0.14	0.22
2		$FRA = 1.417 \times NDSI - 0.037$	0.72	0.70	0.13	0.21
		$FRA = 2.068 \times NDSI - 0.321$	0.72	0.73	0.11	0.20
3	$FRA = 1.138 \times NDSI - 0.099$ (一)	$FRA = 1.697 \times NDSI - 0.173$	0.51	0.52	0.14	0.228
	$FRA = 1.696 \times NDSI - 0.103$ (二)	$FRA = 2.439 \times NDSI - 0.538$	0.51	0.50	0.13	0.225

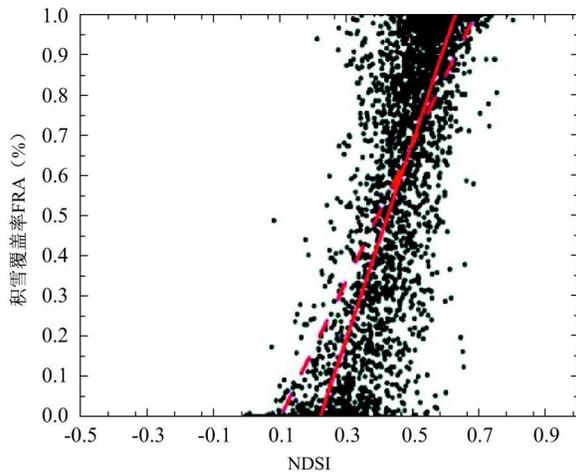


图 2 NDSI-FRA 散点图(研究区 1)

Fig. 2 Scatter Plots of NDSI Versus  
FRA for NO. 1 Study Area

从图中散点的分布情况可以看出,散点在  $FRA < 0.1$  和  $FRA > 0.8$  时,分布比较集中。其中,积雪覆盖率小于 0.1 的点过于集中主要是由于研究区的地形地貌决定的,研究区处于高山地带,山体阴影比较严重,而且植被覆盖率较高,因此被阴影或植被遮挡的雪像元被误判成非雪像元的可能性较大,另一方面,MODIS 数据与 HJ-1B 数据在配准时引入的

是算法一的拟合结果,实线是算法二的拟合结果。从视觉上分析,算法二线性拟合的效果更好,随后的实验也证明了这一点,这与 Salomonson 的研究结论也一致<sup>[8]</sup>。分析原因如下:(1)从 HJ-1B 数据中估算的积雪覆盖率 FRA 比从 MODIS 数据中获得的 NDSI 具有更高的可信度,更适宜做自变量;(2)用普通最小二乘法估算回归模型参数时,算法二是在 FRA 的值在(0, 1) 区间变化时取 NDSI 残差平方和最小,而对于算法一,当 FRA 的残差平方和最小时,FRA 的取值可能大于 1 或小于 0,这与实际情况是不相符的。但无论是算法一还是算法二,在低值区都高估了积雪覆盖率,而在高值区都低估了积雪覆盖率。

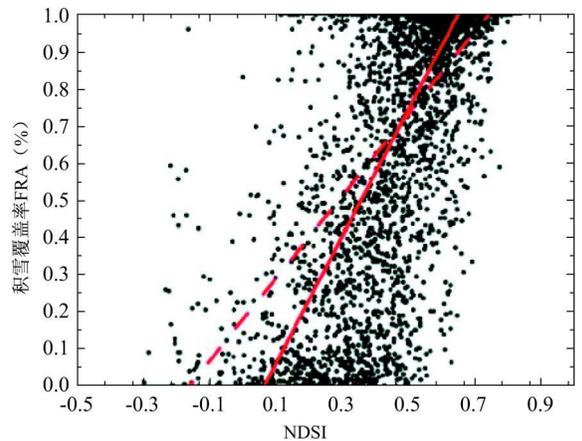


图 3 NDSI-FRA 散点图(研究区 3)

Fig. 3 Scatter Plots of NDSI Versus  
FRA for NO. 3 Study Area

误差也可能导致最终的计算误差;而积雪覆盖率大于 0.8 的点过于集中,则是由于研究区本身存在大量的雪像元分布。

通过表 2 对各模型算法的误差分析,可以发现:通过 MODIS 数据 NDSI 反演的雪盖率与从 HJ-1B 数据中提取的“真值”雪盖率非常接近,用研究区 1 建立的算法模型与研究区 3 建立的算法模型相互验证时,绝对平均误差与均方根误差的波动非常小,说

明该模型具有较强的稳定性,受空间位置的约束较小。而用研究区1和3模型系数的平均值验证研究区2时,绝对平均误差和均方根误差更小,这表明:由几个研究区建立的通用模型比单一研究区建立的模型具有更强的健壮性。这种反演误差主要来源于以下几个方面:一是积雪粒径大小引起雪粒反射光谱特性的差异;二是传感器观测角和太阳高度角的差异所造成的雪表面反射率的差异;三是大气的影 响。Painter<sup>[9]</sup>研究了雪粒大小对雪的反照率引起的变化,雪粒径越大,雪表面反射率越低。同时,雪粒径大小与反射率关系还受太阳高度角的控制,雪粒径大小一定时,太阳高度角越大,反射率越低,尤其当太阳高度角大于 $30^\circ$ 时,这种影响更加明显。本文选取的遥感影像太阳高度角均在 $30^\circ$ 以上,反射率随太阳高度角的增大而减小,由此NDSI偏小,反演的积雪覆盖率也偏小。当积雪覆盖率超过一定值后,影响NDSI的主要因素不是积雪的比例,而是积雪的性质<sup>[10]</sup>,这也在一定程度上解释了在积雪覆盖高值区低估了积雪值的原因。

### 3 应用分析

#### 3.1 积雪覆盖率制图

为了进一步验证2.3节中建立的通用算法模型的稳定性,用该算法对青海省玉树州进行雪盖率反演,如图4所示。将反演结果与MODIS 8d合成的最大积雪覆盖产品MOD10A2(图5)作比较分析。通过对比分析,证明该算法能够较准确地提取出雪像元,而且反演的结果能提供更丰富的积雪信息,图4中,用圆圈出来的区域能反映不同的雪盖率信息,而图5只能简单地反映出雪和非雪的信息,因此亚像元积雪覆盖率更能反映降雪 的强度,为进一步研究雪灾风险强度划分奠定了基础。

#### 3.2 FRA-LST关系描述

下垫面是大气中大部分热量的源地,不同的地表覆盖类型其热力性质存在明显差异。参考全国2000年土地利用/覆盖数据,将3个研究区作为实验区,定量分析积雪覆盖率与地表温度之间的关系。利用3.1节反演的雪盖率分别对三个研究区的积雪覆盖率数据与同一天的MODIS地表温度产品数据(MOD11A1)作线性回归,结果表明:积雪覆盖率与地表温度存在明显的负相关关系,相关系数均在 $-0.65$ 以上,见表3。图6为研究区1积雪覆盖率与地表温度的散点分布图。随着积雪覆盖率的增加,

地表温度呈下降趋势。当积雪覆盖率大于 $0.65$ 时,像元雪面温度绝大部分在 $0^\circ\text{C}$ ( $273.16\text{K}$ )以下。当积雪覆盖率小于 $0.6$ 时,雪面温度变化幅度比较大,部分像元温度在 $0^\circ\text{C}$ 以上,这种现象与数据的分辨率有很大关系,可以用积雪混合像元的热力性质进行解释<sup>[11]</sup>。另有少部分像元的积雪覆盖率接近 $1$ ,而温度却在 $0$ 摄氏度左右,造成这种情况的原因可能是积雪正处于融化阶段<sup>[12]</sup>。

表3 研究区FRA与LST, FRA与NDVI相关分析结果

Tab. 3 Results of Correlation Analysis Between FRA and LST, FRA and NDVI

研究区	研究区像元个数	FRA与LST相关系数	FRA与NDVI相关系数
1	8788	-0.723	-0.717
2	6756	-0.704	-0.731
3	12145	-0.687	-0.711

#### 3.3 FRA与NDVI关系描述

归一化差分植被指数(NDVI)反映了地表植被空间分布密度,积雪覆盖率反映了地表积雪空间分布密度。研究积雪覆盖率与植被指数之间的关系,对于研究植被覆盖区积雪的分布有重要意义, Vikhamar和Price等学者在研究中发现植被会影响积雪的状态和融化模式<sup>[13,14]</sup>。在 $1\text{km}$ 的空间尺度下,分别对3个研究区的积雪覆盖率数据与MODIS 8d合成的植被数据产品(MOD13A2)作相关分析,结果表明,二者具有显著的负相关关系,相关系数均在 $-0.7$ 以上,见表3。图7为研究区1积雪覆盖率与NDVI空间散点分布图,从图中可知,散点主要集中在两个区域,一个是 $\text{FRA} > 0.7, \text{NDVI} < 0.05$ ;另一个是 $\text{FRA} < 0.2, \text{NDVI} > 0.1$ ,而且NDVI值偏低,这与实际情况比较相符,积雪覆盖率越高,植被指数越低,而且该研究区裸岩地形较多,成像时间又处于冬季,因此即使积雪覆盖率很低,NDVI值也很小。而当FRA在 $0.2 \sim 0.7$ 区间时,散点图分布比较凌乱,而且还出现了一些积雪覆盖率偏高,NDVI值也偏高的异常点,这可能是数据在配准处理上出现的问题。

### 4 讨论

本文以HJ-1B为真值数据,研究并验证了MODIS亚像元尺度下积雪覆盖率与NDSI之间的线性关系,总体上看,雪盖率与NDSI之间的相关性比较显著,但在雪盖率较低或较高的情况下,这种相

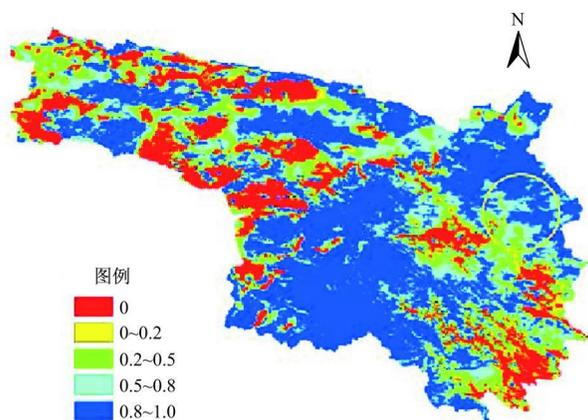


图 4 玉树州亚像元雪盖率制图

Fig. 4 Spatial Distribution of Snow Coverage for Yushu Region

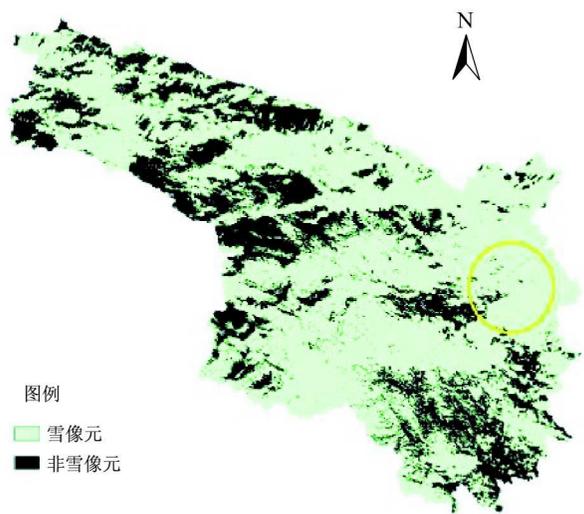


图 5 MOD10A2 产品

Fig. 5 MOD10A2 Production

关性减弱,导致雪盖率估算误差增大,由此可见,基于 NDSI 单因子的积雪覆盖率反演研究存在一定的不足。研究表明,积雪覆盖率不仅与 NDSI 存在明显的相关关系,而且还与地表温度以及植被指数均存在显著的负相关关系,因此,在今后的积雪覆盖反演研究中可考虑建立雪盖率与多因子之间的相关关系,进一步提高雪盖信息反演的精度。

基于 MODIS 与 HJ-1B 数据的雪盖率反演,关键技术之一是要解决二者之间的配准问题。由于 MODIS 数据与 HJ-1B 数据的分辨率相差较大,因此在数据配准上会存在一定的误差。对积雪覆盖度高的区域,配准误差对结果造成的影响较小,对积雪覆盖度低的区域,配准误差对积雪的反演精度可能影响较大,因而该方法在应用时会有一定的局限性。

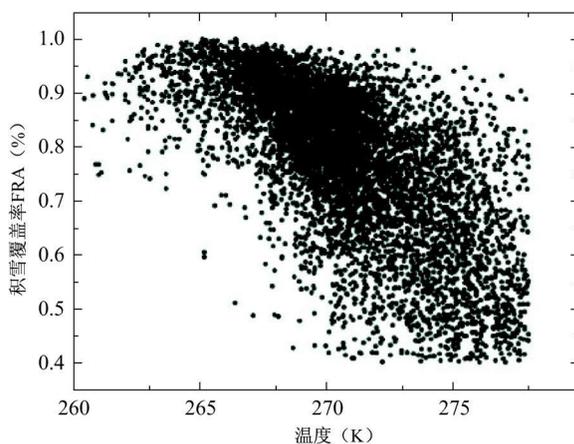


图 6 FRA-LST 散点图(研究区 1)

Fig. 6 Scatter Plots of FRA-LST for NO. 1 Region

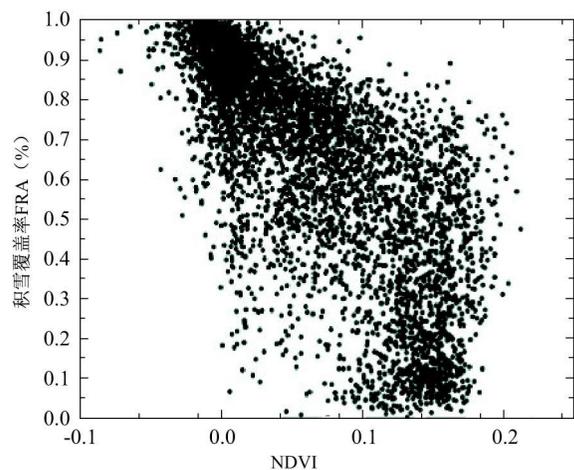


图 7 FRA-NDVI 散点图(研究区 1)

Fig. 7 Scatter Plots of FRA-NDVI for NO. 1 Region

本文在用 HJ-1B 真值数据建立 MODIS 积雪覆盖率的关系时还发现,对于积雪覆盖率相同的像元而言,其空间分布形态也各不相同,有聚集的,有离散的,也有均匀分布的。目前,基于栅格单元的融雪模型主要考虑每个像元雪量的大小,尚未考虑其空间分布形态对融雪径流的影响,随着时空分布式融雪模型的进一步发展,有必要在研究像元雪盖率的基础上进一步研究亚像元定位的问题。

## 参考文献:

- [1] 曹梅盛,李新,陈贤章,等.冰冻圈遥感[M].北京:科学出版社,2006:58.
- [2] 裴欢,房世峰,刘志辉,等.分布式融雪径流模型的设计及应用[J].资源科学,2008,30(3):454~459.
- [3] 许丽娜.青藏高原雪盖面积变化分析研究[D].中科院遥感应用研究所,2006.

- [4] KAUFMAN Y J, LEIDMAN R G, MARTINS J V. Remote sensing of subpixel snow cover using 0.66 and 2.1  $\mu\text{m}$  channel [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(16): 96~97.
- [5] BARTON J S, HALL D K, RIGGS G A. Remote sensing of fractional snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) data[C]. *Proceeding of the 57th Eastern Snow Conference*, Syracuse, NY, 2000: 171~183.
- [6] SALOMONSON V V, APPEL I. Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89: 351~360.
- [7] 张洪恩. 青藏高原中分辨率亚像元雪填图算法研究[D]. 中科院遥感应用研究所, 2004.
- [8] SALOMONSON V V, APPEL I. Development of the Aqua MODIS NDSI Fractional Snow Cover Algorithm and Validation Results [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(7): 1747~1756.
- [9] PAINTER T H, RITTGER K, MCKENZIE C, et al. Retrieval of subpixel snow covered area, grain size, and albedo from modis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: 868~879.
- [10] 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.
- [11] 周 纪, 陈云浩, 李 京, 等. 基于 MODIS 数据的雪面温度遥感反演[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2007, 32(8): 671~675.
- [12] OESCH D, WUNDERLE S, HAUSER A. Snow surface temperature from AVHRR as a proxy from snowmelt in the alps [C]. *Proceedings of EARTH ELLISIG Workshop Observing our Cryosphere from Space*, Bern, 2002.
- [13] VIKHAMAR D, SOLBERG R. Subpixel mapping of snow cover in forests by optical remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 84: 69~82.
- [14] PRICE A G. Prediction of snowmelt rates in a boreal forest [J]. *Journal of Hydrology*, 1988, 101(1~4): 145~157.

## SUB-PIXEL SNOW COVERAGE AND CORRELATION FACTORS ANALYSIS BASED ON MODIS AND HJ-1B DATA

ZHANG Xu<sup>1,2</sup>, TANG Hong<sup>3</sup>, ZHAO Xiang<sup>3</sup>, ZHOU Ting-gang<sup>1,2</sup>

(1. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), Chongqing 400715, China;

3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Using HJ-1B 30-m observation as “ground truth” to calculate the percentage of snow cover for MODIS 480-m cells, this paper present an algorithm for MODIS data to obtain sub-pixel snow cover information based on a regression relationship between MODIS 480-m NDSI observation and fractional snow cover. The application of this method is tested in three regions located in Yushu, Qinghai province. The overall results indicate that the relationship between fractional snow cover and NDSI is reasonably robust with a mean absolute error less than 0.2. Finally, based on snow cover information, this paper puts forward the land surface temperature (LST) and normalized difference vegetation index (NDVI) as the two correlation factors related to percentage of snow cover. The analysis indicates that there is a significant negative correlation between them. Therefore, the results lays a foundation for extracting snow cover information based on multi-factor.

**Key words:** snow coverage; normalized difference snow index (NDSI); land surface temperature (LST); normalized difference vegetation index (NDVI); MODIS; HJ-1B