

# 用气象卫星资料监测积雪\*

刘玉洁 袁秀卿 张 红

(国家气象局卫星气象中心)

1991 年 3 月 20 日收稿

## 摘 要

本文简要叙述了利用气象卫星资料进行积雪监测的可行性和复杂性;以改进的甚高分辨率扫描辐射仪(AVHRR)资料为例综述了遥感监测积雪的原理、方法和资料处理过程;分析了计算结果,并探讨了未来积雪监测的发展。

**关键词** 卫星遥感 积雪监测 AVHRR 资料

## 一、引 言

积雪覆盖着地球表面相当大的部分,其变化与特征是气候研究、天气预报和水分收支的重要参数。因此,研究积雪的分布,监测积雪随时间、空间的变化特征,对气象、水文、农业生产和国民经济建设等均有重要意义。尤其是我国青藏高原的积雪,更是世界上广大气象和气候工作者都感兴趣的研究课题。

目前,我国的积雪资料主要来源于气象台站的定时观测,但由于条件和环境所限,地面气象台站分布很不均匀;特别是青藏高原及新疆、内蒙古地区,气象台站稀少,对边远环境恶劣的高寒地区的雪情了解甚少,不能满足积雪监测和气象研究等方面的需要,给水资源管理带来了很大困难。

空间科学、遥感和计算机技术的不断发展,促进了遥感监测积雪的研究。近年来,国内外在遥感监测积雪方面做了大量的探讨和应用研究工作。图像判读、模式识别、积雪监测计算实验和卫星资料的积累,充分显示了气象卫星资料在积雪监测方面的观测能力和应用潜力,为积雪变化的定量监测奠定了基础。

## 二、遥感监测积雪的可行性和复杂性

气象卫星资料具有观测范围广、时次高、获取资料周期短等特点,为积雪的连续监测提供了方便。目前,正在运行的美国第三代极轨业务气象卫星系列 TIROS-N/NOAA 所携带的改进型甚高分辨率扫描辐射仪,是一种 4 或 5 个光谱波段的扫描辐射仪,其波段范围如表 1 所示。扫描速率为 360 rpm,星下点分辨率 1.1 km。主要用于感应可见光和近红外的反射太阳辐射,中红外和远红外窗区的地球及大气的放射辐射,获取气象、海洋、水

\* 本课题为国家气象局气象科学基金资助项目。

文及陆地表面特征等信息,是进行积雪监测的理想资料。此卫星系列,目前双星运行昼夜各过顶两次,非常有利于积雪变化的动态监测。

就观测资料而言,在可见光和近红外波段,积雪有其明显的光谱特征。积雪在可见光波段(0.40—0.75  $\mu\text{m}$ )的反射率较高,新雪可达 95% 以上;其它地物的反射率则偏低。如图 1 所示,积雪的反射率随观测波段的增大而降低,新雪和旧雪在两个波段的反射率有明显差异。由此可见积雪的反射率是随着新雪的降落、融化、积雪的逐渐被污染而变化的。这些光谱特性均是判读积雪的重要依据,也是卫星遥感监测积雪的理论基础。

表 1 TIROS-N/NOAA AVHRR 仪器的光谱特性

Table 1 Spectral Characteristics of the TIROS-N/NOAA AVHRR Instruments.

通道序号	光谱波段 ( $\mu\text{m}$ )	
	4 通道 AVHRR	5 通道 AVHRR
1	0.58—0.68	0.58—0.68
2	0.725—1.10	0.725—1.10
3	3.55—3.93	3.55—3.93
4	10.5—11.5	10.3—11.3
5		11.5—12.5

但是,与其它环境监测相比,积雪的遥感监测又有其特殊的复杂性。首先就积雪的光谱特性而言,尽管在可见光和近红外波段积雪有其明显的光谱特征,但是,积雪对太阳光的反射和自身的辐射,不仅与雪面状态,即雪表面光滑程度、纯洁程度有关,而且与雪晶大小和形状有关,还与积雪内部的垂直结构,如积雪深度、积雪中液态水含量和积雪的层结状态以及观测时太阳的入射角度有关。这些因素,虽然有助于积雪监测的应用分析,但也给积雪的准确判读带来了困难。其次,积雪场下垫面的不同即地形特征和地表植被特征也给遥感监测积雪造成一定的影响。例如,高山与谷地的积雪、阳坡与阴坡的积雪、森林与灌木丛中的积雪等,其光谱响应均有差别,这些都是影响积雪判读的重要因素。另外,最重要的则是云、尤其是低云的影响,是利用 AVHRR 资料监测积雪的最大障碍。由于云与雪在可见光和近红外波段具有类似的光谱特性,因此,在遥感监测积雪中如何区分云与雪,如何消除云和大气的影是一个关键问题。

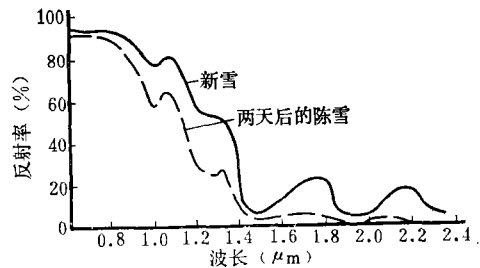


图 1 雪的反射光谱特性曲线<sup>[1]</sup>

Fig. 1 Characteristic Curves of Reflectance Spectrum of Snow Cover.

### 三、计算方法

为了克服上述困难并充分利用气象卫星资料连续观测的优点,本文采用两种方法分

析提取积雪信息：一种是由于大范围积雪监测的多时相合成阈值判读法；另一种是小范围流域积雪监测分析判读法。其计算流程如图 2 所示。

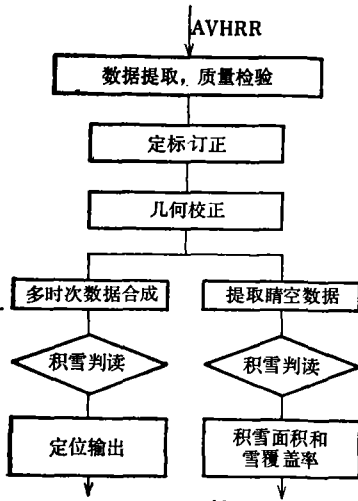


图 2 积雪监测流程图

Fig. 2 The General Flow of Snow Cover Monitoring

### (一) 多时相合成阈值判读法

此方法的主要目的是在大尺度范围内，采用多时相观测数据合成的方法，消除云的影响，从卫星所观测的地-气系统的综合效应中提取地面信息，分析判读积雪。使用的卫星资料是经过数据预处理后的、附有定标系数和定位信息的 AVHRR 1、4 波段的观测数据<sup>[2]</sup>。计算过程大致可分为以下几部分。

#### 1. 观测数据的定标与订正

为了将连续几天的数据做合成处理，首先需对卫星观测数据做定标、订正等计算。

定标的目的是将卫星上 AVHRR 观测输出的计数值转换为所观测的物理量<sup>[3]</sup>。对于可

见光和近红外通道，转换为反射率；红外通道的观测数据转换为辐射值，其计算公式为

$$E_i = G_i \cdot X_i + I_i \quad (i = 1, 2, \dots, 5) \quad (1)$$

式中， $E_i$  为各光谱通道观测的物理量； $G_i$ ， $I_i$  为各通道的定标系数即斜率与截距； $X_i$  为 AVHRR 各通道观测的计数值。

数据订正，包括可见光和近红外数据的太阳天顶角订正和红外数据的临边变暗订正。太阳天顶角订正，主要是为了消除卫星观测时太阳的不同入射角度对观测值产生的影响，将各观测数据订正到相当于太阳位于天顶时的反射率。其订正公式为

$$E = E(Z_s) / \cos(Z_s) \quad (2)$$

其中， $E$  为订正后的反射率， $E(Z_s)$  为定标后的反射率， $Z_s$  为观测点的太阳天顶角。临边变暗订正，是为了消除地球曲率和大气衰减效应对红外观测值的影响，这里采用比较简单的温度订正法：

$$T_c = T_B + \Delta T \quad (3)$$

首先，根据普朗克定律，将定标后的辐射值  $E$  换算成亮度温度  $T_B$ ，即

$$T_B = \frac{C_2 \gamma}{\ln(C_1 \gamma^3 / E + 1)} \quad (4)$$

式中， $C_1$  和  $C_2$  为常数， $\gamma$  是观测光谱通道的中心波数。

温度订正值  $\Delta T$  由经验公式计算：

$$\Delta T = (e^{0.00012 \times \theta^2} - 1) \times (0.1072 \times T_B - 26.81) \quad (5)$$

其中， $\theta$  为卫星天顶角。

#### 2. 几何校正

几何校正的目的是为了消除地球曲率引起的观测数据的图像边缘畸变，以便于将不

同时相的数据做合成计算。本文采用坐标转换方法,将订正后的卫星观测数据按某种地图投影方式重新排列。这里选用与天气图一致的极射赤面投影,目前投影图的比例尺为 1:1500 万,也可以根据需要任意选择。其计算公式为

$$\begin{aligned} I &= I' - S_c \cdot D \cdot \operatorname{tg} \varphi \sin \lambda \\ J &= J' \pm S_c \cdot D \cdot \operatorname{tg} \varphi \cos \lambda \quad (\text{北半球为+ , 南半球为-}) \\ \varphi &= \frac{1}{2} (90^\circ - |\varphi_n|); \quad \lambda = \lambda_0 - \lambda_n \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $I'$ ,  $J'$  分别为北半球投影图中心点坐标,  $S_c$  为投影图中单位长度可存放的像素点数,  $I'$ ,  $J'$  和  $S_c$  可根据投影图的分辨率任取;  $D$  为投影图中从极点到赤道的距离;  $\lambda_0$  为投影图的主经度;  $\lambda_n, \varphi_n$  分别为卫星观测点  $N$  的地理经纬度。

按上述公式将 AVHRR 各光谱波段的观测数据,按其经纬度做相应的坐标转换和计算处理,便可消除地球曲率所引起的几何畸变。

### 3. 消除云的影响

卫星是从太空观测地球大气的,所得到的资料不仅有来自地球的信息,也有来自大气和云的影响。因此,利用 AVHRR 资料监测积雪时,最大的困难是如何消除大气和云的干扰。本计算方法,利用积雪的光谱特性以及云与积雪的主要差别,即云不断运动,观测值随时间变化大,而积雪相对固定,短时间内变化不大。同时根据地表面上空有云时,反射率增大、亮度温度值减小的特征,采用多时相观测资料相互补充的方法,对同一位置不同时相的观测数据做统计比较,保留较稳定的地面信息,消除随时间而变化的云与大气的影 响。一般以连续七天的数据为基础,将投影变换后的可见光和红外观测数据分别做最小亮度和最高温度合成计算,去掉反射率较大、亮度温度值较低的数据;而保留 7 天内较稳定的、反射率最小,亮度温度值最高的观测数据,即:

$$\begin{aligned} R_N &= \operatorname{Min}(R_1, R_2, \dots, R_7) \\ T_N &= \operatorname{Max}(T_1, T_2, \dots, T_7) \end{aligned} \quad (7)$$

其中,  $R_1, R_2, \dots, R_7, T_1, T_2, \dots, T_7$  分别为具有相同地理位置的连续 7 个观测时相的反射率和亮度温度值。

将每日的卫星观测数据都做上述计算处理,就可以基本消除云的影响,得到大范围卫星所观测的地面信息。

### 4. 分析确定积雪区

积雪监测中,准确分析判读积雪是非常重要的。这里采用阈值判读法,将每一点的数据与选定的阈值比较,若  $R_N > R_{th}, T_N < T_{th}$  即为积雪。积雪阈值按下式确定:

$$\begin{aligned} R_{th} &= R_0 + \Delta R \\ T_{th} &= T_0 + \Delta T \end{aligned} \quad (8)$$

式中,  $R_{th}$  和  $T_{th}$  分别为积雪反射率和亮度温度阈值;  $R_0$  和  $T_0$  为通用阈值,  $\Delta R$  和  $\Delta T$  为修正阈值。

由于卫星遥感测得的积雪反射率和亮度温度受积雪本身的结构状况和周围环境的影响很强,因此,积雪阈值必须按不同地区、不同季节对卫星和地面观测数据做大量统计、比较、验证后才能较准确地选定。目前计算中,仅用了较粗的通用阈值,根据我们对积雪的

判读经验暂取  $T_0 = -9^{\circ}\text{C}$ ,  $R_0 = 25\%$  (旧雪),  $R_0 = 50\%$  (新雪);  $\Delta R$ ,  $\Delta T$  按不同区域做直方图统计分析后选取。

### 5. 叠加地理标记定位

将计算后的数据,按其坐标位置叠加河流、国界线和经纬度网格等标记;并以数值打印、图像显示和多通道彩色合成等方式输出,供分析使用。

## (二) 流域积雪监测

河流流域积雪深度,雪盖面积和雪覆盖率是融雪径流预报中的主要参数。由于 AVHRR 光谱通道所限,无法直接测量与计算积雪深度和积雪中液态水含量,但可用于计算积雪覆盖面积和雪盖率,并可连续监测随时间和季节的变化。

### 1. 建立流域图

流域图即流域范围,是提取流域内卫星观测资料的基础。开展某一流域的积雪监测,首先必须准确计算和建立流域图。

计算流域图需考虑两个因素,即地图投影方式和投影图的分辨率,此分辨率必须与卫星观测数据相匹配。本文按极射赤面投影方式计算、建立了黄河上游流域图(图 3),地面分辨率为  $5\text{ km}^2$ , 根据需要其分辨率可以调整。

### 2. 卫星观测资料的提取和计算

为了避免云的干扰,首先利用人机交互设备判别所研究的流域是否是晴空区;然后按上述计算公式,对晴空卫星观测数据做定标、订正和几何畸变校正等计算处理,最后以流域图为准,提取流域内的卫星观测数据。若定位有误差,可根据流域内地形特征做适当的校准。

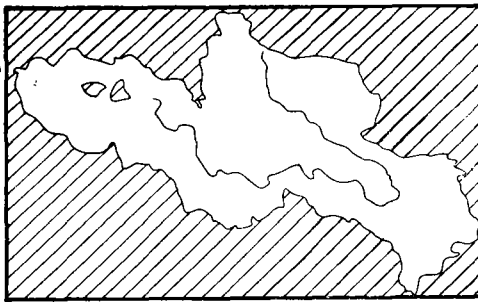


图 3 黄河上游流域图

Fig. 3 Basin Scheme Map of the upper Reaches of the Yellow River

### 3. 雪盖面积和雪覆盖率

雪盖面积为流域内积雪覆盖界线范围内的雪区面积,雪覆盖率定义为雪盖面积与流域总面积之比。从 AVHRR 资料中提取雪盖面积和雪覆盖率的关键在于积雪的判读与鉴别。根据积雪的光谱特征,我们采用多光谱阈值分析法,取反射率  $45\%$ ,亮度温度值  $-9^{\circ}\text{C}$  为阈值,对流域内的卫星数据逐点比较,判读积雪,并赋特征值。最后,统计特征值,计算流域雪盖面积和积雪覆盖率,为融雪径流预报模式提供参数。

## 四、结果分析

按上述计算方法,我们分别开展了全国范围和黄河上游阿尼玛卿山地区卫星遥感监测积雪的试验研究工作,取得了一些经验,并积累了多年的卫星观测资料。

图版 I 图 4 是 1987 年 2 月红外通道的 7 天合成图像。从图像可以看出,经多时相资

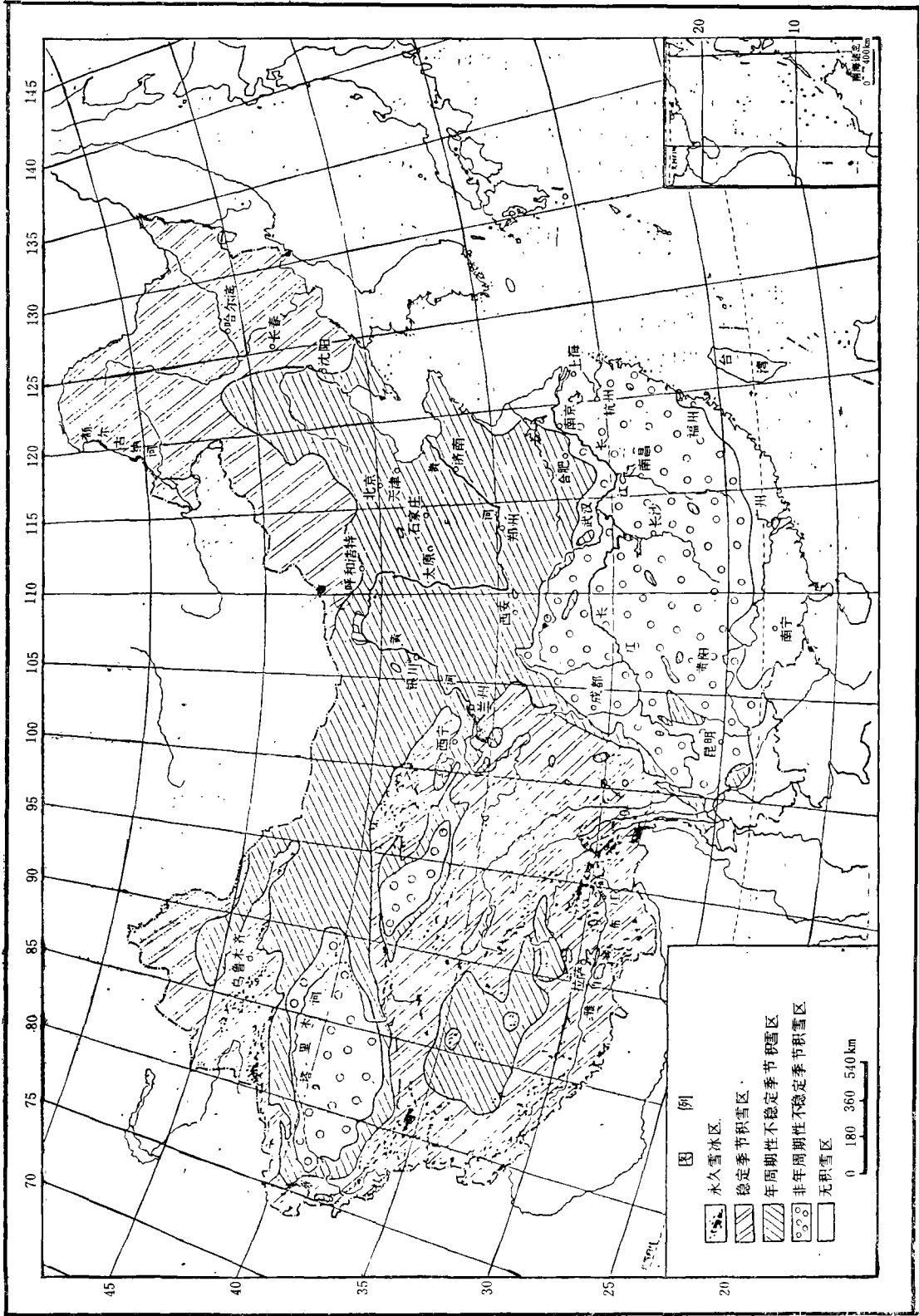


图 5 中国积雪区域类型图  
Fig. 5 Regional Classification of Snow Cover in China

料合成后的卫星观测数据,基本消除了云的影响。天山、祁连山及青藏高原上的积雪分布特征明显;横断山脉、塔里木盆地、柴达木盆地和河套地区等地形特征突出,青藏高原、长江中下游大小湖泊、我国漫长的海岸线以及台湾、海南岛等清晰可见。其积雪分布特征与中国积雪区域类型图(图 5)非常相似<sup>[4]</sup>。由此可见,多时相合成图像是积雪和地形特征分析研究不可缺少的资料。

图版 I 图 6 是 1988 年冬、春季东北地区 1 月份的积雪分布图。从图中可以看出,内蒙古高原和东北平原季节性积雪的特征,由于森林的影响,东北三省的积雪明显分为两大部分,部分无雪区主要是大小兴安岭森林所致。

图版 I 图 7 是由 AVHRR 资料计算的黄河上游阿尼玛卿山地区的积雪图。由于流域面积和流域内卫星像元点数已知,因此可以准确计算流域内雪盖面积和雪覆盖率,为黄河上游融雪径流预报和龙羊峡、刘家峡水库的用水调配提供依据。

图版 I 图 8 是利用我国 FY-1B 卫星观测资料计算的天山地区和藏北高原地形地貌图。图中天山积雪边缘光滑,呈树枝状结构;藏北高原上的永久积雪区以及塔里木盆地的和田河特征明显。

由以上分析可见,由 AVHRR 资料计算提取的积雪信息,可用于监测我国积雪的分布和变化规律,尤其适合于我国年周期性稳定和不稳定季节积雪的监测与研究,对非年周期性不稳定季节积雪的监测存在一定的局限性。

## 五、积雪遥感的未来发展

随着遥感技术的不断发展,近年来,美国、挪威和加拿大等国在利用卫星资料进行大范围积雪监测和融雪径流预报方面,均作了大量工作。美国利用极轨气象卫星资料制作的河流流域雪盖图和北半球雪覆盖变化图<sup>[4]</sup>均取得了明显的经济效益,促进了气候和天气变化趋势的监测研究。在我国,尽管利用气象卫星资料开展积雪遥感监测的工作起步较晚,但我们在定性的图像判读监测积雪方面做了大量的试验研究和应用工作,积累了丰富的经验,取得了较好的效果。尤其是我国气象卫星的发射及先进的卫星资料接收、传输和处理系统的建立,大大加快了积雪遥感的步伐。

90 年代我国将发射静止气象卫星。美国计划于 1993 年发射的 NOAA-K, L, M 卫星上将携带经过改进的 AVHRR 辐射仪,在通道 3 的位置上增加 1.55—1.75  $\mu\text{m}$  的近红外波段,使其可昼夜连续提供两种波段的观测数据,供火灾和积雪监测使用。1995 年以后美国将把具有多光谱、高分辨率、全天候、高性能的组合型探测仪搬上极地轨道平台,实现对地综合观测任务。由此可见,90 年代气象卫星的遥感和应用将出现新的飞跃,我国的积雪遥感研究也将进入一个新的阶段。在这一阶段,积雪遥感监测将有较大的进展,在监测手段上,随着遥感技术的飞速发展,将由可见光、近红外和红外窗区遥感逐步发展到 1.6  $\mu\text{m}$  波段和全天候微波遥感监测;由单一的遥感资料判读发展到多种资料相互补充配合使用。在监测内容上,将由积雪面积计算,发展到积雪深度、积雪水当量及融雪径流预报研究。在监测方式上,将由静态图像判读发展到定量计算、动态监测、计算机自动判读以及积雪资料库建立的研究。在研究项目上,将由积雪资源调查发展到多学科相互作用、逐

步开展积雪与气候、积雪与大气环流、积雪与辐射平衡以及积雪与水资源管理等方面的研究。

### 参 考 文 献

- [1] 王 建, 祁连山河域积雪分布, 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊, 第 6 号, 科学出版社, 1988 年。
- [2] 范天锡, AVHRR 1B 数据集生成, 卫星气象, 第 62—76 页, 1986。
- [3] Walter G. Planet, Data Extraction and Calibration of TIROS-N/NOAA Radiometers. NOAA TM NESS 107, Washington, D. C. November, 1979.
- [4] 李培基, 米德生, 中国积雪的分布, 冰川冻土, 5(4), 1983。
- [5] Burt J. Morse, Chester F. Ropelewski, Spatial and Temporal Distribution of Northern Hemisphere Snow Cover. NOAA Technical Report NESDIS 6, Washington, D. C. October 1983.

## Snow Cover Monitoring Using Meteorological Satellite Data

Liu Yujie Yuan XiouQin Zhang Hong

(Satellite Meteorological Center, State Meteorological Administration)

### Abstract

Snow cover is an important resource of the earth. It is very useful for climate research, agriculture and water resources management to investigate and monitor the distribution of snow cover in a large area and river basins using remote sensing technology.

In this paper, we discussed the feasibility and complexity of snow cover dynamic monitoring using meteorological satellite data, and described the theory, method and the data processing procedure of snow cover monitoring using the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) data.

We used two methods for snow cover monitoring, one is weekly (or ten days) data compositing and threshold testing for large area snow cover detection in order to reduce the effects of cloud and other atmospheric contamination, the other is an algorithm to used cloud-free data over local area of river basins. According to these, we have done a lot of the testing research work over China and several local areas such as Anyemaqen Shan area in the upper reaches of the yellow river. We found that AVHRR/HRPT data is very useful to do snow cover monitoring and to calculate the extent of snow cover. Although it can not be used to measure the snow depth directly, it can be used to estimate the snow cover area and the percent of snow cover. And also it can be used to monitor the changes of snow cover. Finally, we summarized the analysis of the results and snow cover monitoring in the future.

**Key words** Satellite remote sensing Snow cover monitoring AVHRR data



图 4 1987年2月红外  
通道7天合成图像

图 6 1988年1月  
东北地区积雪图



图 7 1990年4月  
上游黄河上游  
流域7天合成  
积雪图

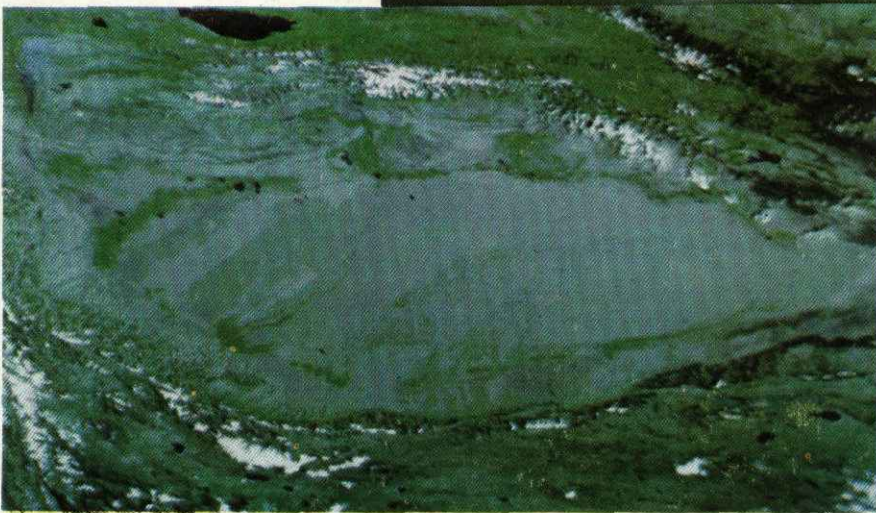
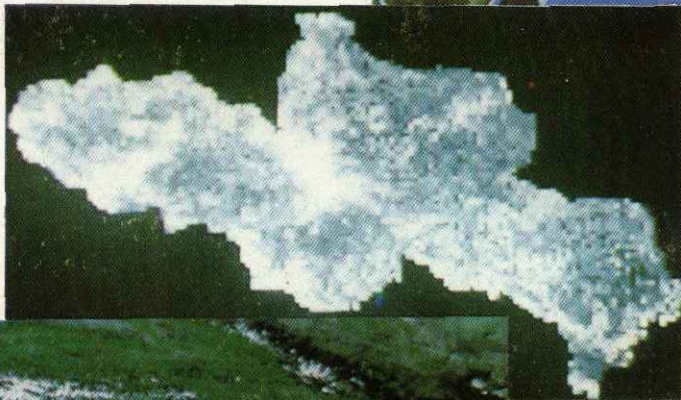


图 8 1990年  
10月9日FY  
-1B 卫星观  
测的天山和藏  
北高原地形  
地貌图