

利用 MODIS 数据判识祁连山区积雪方法研究

王兴^{1,2}, 张强², 郭锐², 蔡迪花²

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 对祁连山区积雪、云和各种下垫面进行光谱分析, 利用 2003 年 7 月至 2005 年 3 月的 MODIS 数据资料, 在前人所做研究工作的基础上提出利用归一化差值积雪指数 NDSI (Normalized Difference Snow Index) 和中分辨率成像光谱仪 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 的 band 18 和 band 31 的结合, 采用逐步逼近法去除大部分云、盐湖、冰面、沙漠、戈壁等对积雪判识的干扰, 从而判识出祁连山区积雪。由结果分析和检验显示, 利用本文方法可以比较有效识别出祁连山区积雪。

关键词: 祁连山; 积雪; NDSI; 亮温; 逐步逼近法

中图分类号: P407.8

文献标识码: A

引言

积雪是地表覆盖的重要部分, 具有很高的反射率及强热辐射和高绝热性, 直接影响着地面和大气温度、地表反射率和土壤湿度, 进而影响地—气系统的辐射平衡, 是气候系统的重要因子。祁连山是我国青藏高原东北部一个巨大的边缘山系, 位于甘肃、青海 2 省交界地, 由一系列近似西北—东南走向的平行山岭和山间盆地组成, 海拔 2 500 ~ 5 000 m, 年降水量 150 ~ 750 mm, 气候寒冷^[1-2]。祁连山积雪资源丰富, 它孕育了黑河、石羊河、疏勒河等多条内陆河流, 为干旱的河西走廊绿洲灌溉区农业提供了大量的水资源, 是河西人民赖以生存的命脉, 所以及时了解祁连山积雪状况不仅具有科学意义, 还有重要的现实意义。

祁连山积雪分布广阔, 大量积雪分布在气候条件恶劣、人迹罕至的地区; 而且积雪的时空变化很大。气象台站观测的积雪资料, 由于受站点密度的限制, 难以有效地反映积雪的空间分布及其变化, 远远不能满足有关研究和业务工作的要求。近年来卫星遥感技术发展迅速, 卫星遥感资料具有覆盖范围大、分辨率高、不受气候和地理条件的限制、客观真

实地反映地物信息等优点, 是监测全球和区域积雪的有效手段^[3-4], 近年来在积雪监测方面发挥了重要作用。目前应用于积雪遥感监测的卫星资料有 FY-1D、NOAA-AVHRR 和 TERRA、AQUA 卫星的 MODIS 资料等。MODIS 数据是全世界均可免费接收的中分辨率成像光谱仪数据。有 36 个光谱通道, 光谱范围为 0.4 ~ 14.4 μm ; 其空间分辨率有 2 个通道高达 250 m, 5 个通道 500 m, 其它为 1 000 m。可每天覆盖全球 2 次。MODIS 数据这些特点, 是 FY-1D 数据和 NOAA 卫星资料不可比拟的, 从而成为研究积雪光谱特性的首选数据, 被越来越广泛地应用在地球科学研究领域。

准确识别积雪是提取积雪定量参数的基础工作。沙依然^[5]等利用 FY-1D 的 5 通道信息, 应用逐步逼近法提取积雪信息; 史培军^[6]采用可见光波段最小亮度法提取积雪; 周咏梅^[7]借助 NOAA-AVHRR 红外波段采用多光谱资料识别积雪和云, 认为积雪识别精度在 80% 以上; 延昊^[8-9]利用 NOAA16 卫星采用可见光波段 B₁ 和红外波段 B_{3a} 的组合来识别积雪; 郭锐等利用云和雪在中短波红外波段的特性区分云和雪^[10-12]; 宋小宁和盛夏等利用 MODIS 资料检测云, 为云雪判识提供依据^[13-14]。

收稿日期: 2007-03-20; 改回日期: 2007-05-14

基金项目: “西北开发科技行动” 重大项目“祁连山空中水资源开发利用研究”(2004BA901A16) 及中国气象局兰州干旱气象研究所“利用 ASAR 和 MODIS 数据监测研究祁连山区积雪资源”项目资助

作者简介: 王兴(1982-), 女, 在读硕士生, 主要从事积雪遥感方面研究。E-mail: shatha@sina.com

Dorothy K. Hall^[15-16]等人提出归一化差值积雪指数 NDSI 并以此作为指标判识积雪,此方法已经得到广泛应用。但是大量研究和试验发现,在判识积雪的过程中,利用此方法仍然出现了很多误判。

本文在分析以往积雪判识方法局限性的基础上,对祁连山区云、雪和其它下垫面的光谱进行了细致分析,研究出利用 MODIS 的 18 和 31 波段与 NDSI 相结合采用逐步逼近法判识祁连山区的积雪,取得了较好的效果。

1 资料和判识方法

1.1 资料和处理方法

采用中国气象局兰州干旱气象研究所 MODIS 接收站接收的 MODIS 资料,时间从 2003 年 7 月至 2005 年 3 月,范围覆盖整个祁连山区。选择 MODIS 图像上同时存在云与雪的情况。根据对 MODIS 资料各波段的对比综合分析以及经验判断,首先把祁连山的下垫面大致分成雪(按深浅再细分成深雪、中深雪、薄雪)、云(按厚薄再细分成厚云、中厚云、薄云)、云阴影、戈壁、沙漠、盐碱地、盐湖、无冰湖面、有冰湖面、大型水库(龙羊峡)、无雪地表等 11 种。对所用资料中这几种下垫面类型不同时间的信息分别采样,然后把相同下垫面类型在不同时间的采样点综合起来分析各种下垫面类型的光谱特征。

1.2 运用 NDSI 判识积雪的原理

图 1 显示由地物光谱仪测定的云、雪和几种其他地物的光谱曲线。波长从 0.4 μm 到 2.5 μm ,包括了 MODIS 的所有反射波段。由图 1 可以看出在 0.555 μm (band 4 可见光)波段,雪的反射率很高,

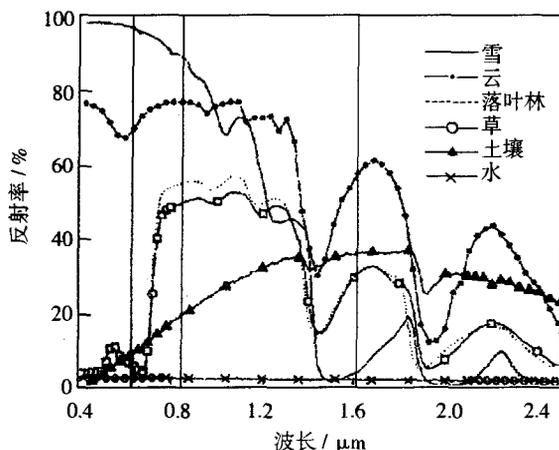


图 1 地物和云的光谱

Fig. 1 Spectrum of different land covers and cloud

而其他地物反射率很低。在 0.858 μm (band 2 近红外)波段,雪的反射率仍然很高,而林和草的反射率增加。在 1.64 μm (band 6 短波红外)波段,雪的反射率很低,而云的反射率高出雪很多。水在整个 0.4 到 2.5 μm 的反射率一直很低,易于识别。

显然,在无云情况下,利用 MODIS 的 band 2 和 band 4 可以很好地区分雪和其它地物。而在有云的情况下,需要利用 band 6 区分云雪。鉴于 band 4 和 band 6 云、雪反射率的巨大差别,采用 band 4 和 band 6 的结合,参照 Hall 等^[8]得到的归一化差值积雪指数 NDSI(Normalized Difference Snow Index),计算公式如下:

$$NDSI = \frac{\alpha_4 - \alpha_6}{\alpha_4 + \alpha_6}$$

其中 α_4 和 α_6 分别是 4 波段与 6 波段的反射率。

1.3 以往判雪指标的局限性

Hall 等人利用 NDSI 和 MODIS 第 2、4 波段的组合,将同时满足 $NDSI \geq 0.4$, $\alpha_2 > 11\%$, $\alpha_4 > 10\%$ 等 3 个条件的下垫面判识为积雪^[6]。在祁连山区积雪识别中应用此方法,出现了较多误判。以 2004 年 3 月 28 日的祁连山积雪判识为例,由祁连山区 2004 年 3 月 28 日的 MODIS 1、4、3 波段合成图(图 2a)和利用 Dorothy K. Hall 等人的方法判识出的祁连山区 2004 年 3 月 28 日的积雪(图 2b)的人工目视对比可以看出,此方法不仅把很多厚云误判成积雪,而且还把湖冰判为积雪。运用此方法进行祁连山积雪的多次判识,都发现此类误判现象。此方法的问题主要是第 2 波段 $\alpha_2 > 11\%$ 及 4 波段 $\alpha_4 > 10\%$, 这 2 个阈值不适合祁连山地区,由图 1 所示这 2 个波段积雪反射率很高且 4 波段反射率高于 2 波段,从而导致 Hall 所用方法不适合祁连山区。

根据目视判读及多波段图像对比分析之后判定图 2a 中靠右侧的 3 个白框中都是云,而对比图 2b 可以明显地看出这些云被错误地判识为积雪。图 2a 中中间偏左下方的白框中是鄂陵湖和扎陵湖,根据遥感资料可目视得出此 2 湖在当时是结冰状态,而对比图 2b 可以看出湖冰也被误判成积雪。

通过图 2a 与图 2b 的比较结果表明利用 Hall 等人所提出的积雪判识方法并不能对祁连山区的积雪进行有效地判识。

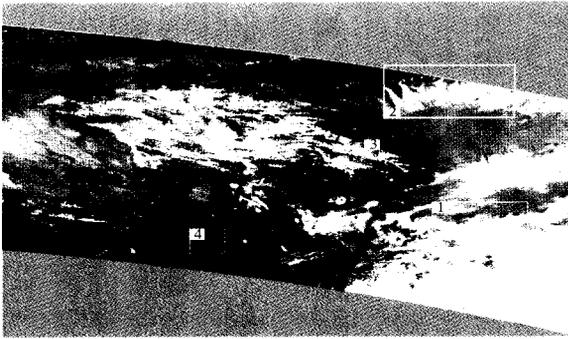


图 2a 祁连山区 2004 年 3 月 28 日的 MODIS 1,4,3 波段合成图

Fig. 2a The compound map of band 1, band 4 and band 3 of MODIS over the Qilian Mountain on March 28, 2004

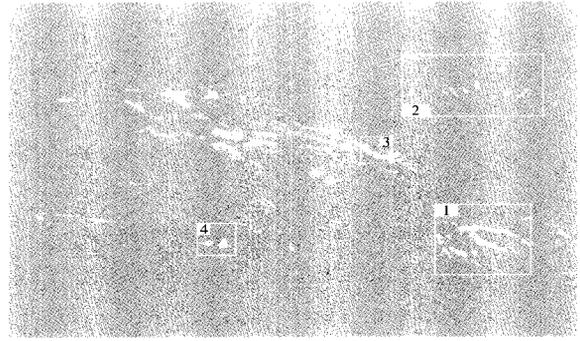


图 2b 利用 Hall 等人的方法判识出的祁连山区 2004 年 3 月 28 日的积雪(白色部分为积雪)

Fig. 2b Snow map discriminated by Dorothy K. Hall's method over the Qilian Mountain on March 28, 2004 (white parts represent snow)

1.4 改进的积雪判识方法

由于美国 Dorothy K. Hall 等人所提出的积雪判识方法的局限性,有必要对积雪判识方法进行改进。

本文采用逐步逼近法对积雪判识方法进行改进。

如图 3 所示,图中粗实线表示 NDSI 值等于 0.28,由图 3 可以明显地看出积雪的 NDSI 值几乎都

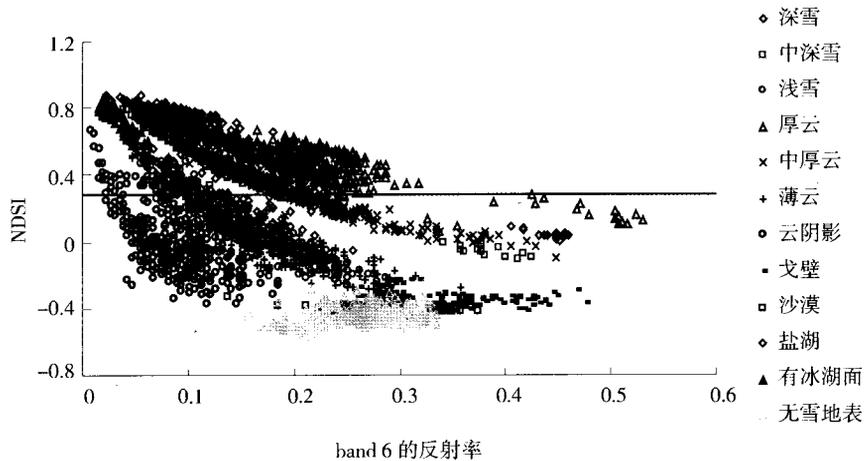


图 3 云、雪和其他下垫面的 NDSI 值变化的散点图

Fig. 3 NDSI change plots of cloud, snow and other kinds of land surface

在此线的上方,而大部分薄云、50%左右的中厚云、一部分盐湖和无冰湖、几乎全部云阴影、戈壁、沙漠、无雪地表的 NDSI 值 < 0.28 。于是得到第 1 个指标: $NDSI > 0.28$ 。经过这个指标检验之后还余下的除积雪之外的下垫面信息有:厚云、50%左右的中厚云、少量的薄云、有冰湖、龙羊峡、30%左右的无冰湖、极少量的云阴影。从上述结果中可以看出,区别出厚云和 50%左右的中厚云是改进积雪判识方法

的关键。

绘制用第 1 个指标判别之后剩下的云、雪和其他下垫面在 MODIS 反射率波段的光谱曲线。如图 4 所示,盐湖的光谱曲线的变化与云、雪的很相似,所以利用反射率波段很难把盐湖对积雪识别的干扰排除。但是在 band 18(中心波长为 $0.936 \mu\text{m}$)有冰湖、无冰湖、龙羊峡和云阴影与云、雪、盐湖的反射差别很大,云、雪和盐湖在 band 18 的反射率都在 15%

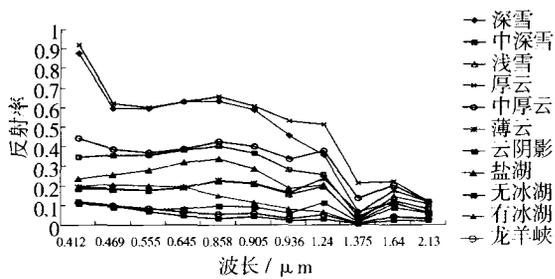


图 4 云、雪和各下垫面的光谱曲线

Fig. 4 Spectrum curves of cloud, snow and other types of land surface

之上,而有冰湖、无冰湖、龙羊峡和云阴影的反射率都在 15% 之下。于是利用 band 18 就可以排除有冰湖、无冰湖、龙羊峡和云阴影对积雪判识的干扰。得到第 2 个指标: $R_{18} > 0.15$ (R_{18} 代表 band 18 的反射率),应用这个指标判识之后,余下的影响积雪判识的因素只有:厚云、50% 左右的中厚云、少量的薄云和一部分盐湖。

由云、雪和盐湖亮温值的变化图(图 5a)可见云、雪和盐湖在 Band 31(中心波段为 $11.03 \mu\text{m}$) 辐射亮温的差别较大,同时结合云、雪、盐湖在 band 31 的散点图(图 5b),在图 5b 中上下 2 条粗实线分别代表 $-9.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 。可以看出几乎全部的厚云和中厚云的亮温在 $-9.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下,而积雪的亮温一般 $< 15 \text{ }^\circ\text{C}$ 。于是利用 $-9.5 \text{ }^\circ\text{C} < T_{31} < 15 \text{ }^\circ\text{C}$ (T_{31} 代表 band 31 的亮温)可以有效地排除祁连山区厚云和中厚云对积雪判识的干扰,同时又降低了一部分薄云和盐湖对积雪判识的影响。于是得到第 3 个指标: $-9.5 \text{ }^\circ\text{C} < T_{31} < 15 \text{ }^\circ\text{C}$ 。经过第 3 个指标判识之后只剩下积雪和一些薄云及部分盐湖的信息。

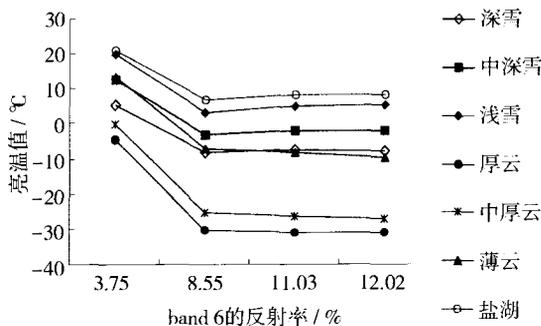


图 5a 云、雪和盐湖亮温值的变化

Fig. 5a Brightness temperature changes of cloud, snow and saline

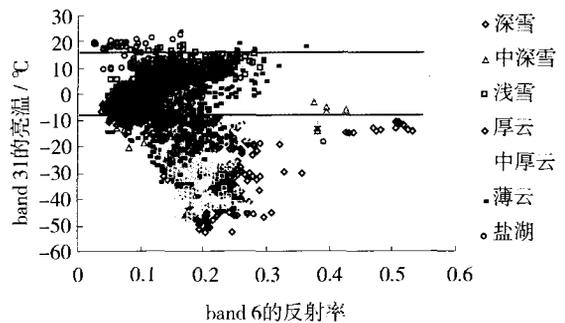


图 5b 云、雪和盐湖在 band 31 波段亮温值变化的散点图

Fig. 5b Brightness temperature change plots of cloud, snow and saline at band 31

由于薄云与浅雪在反射率波段的波谱曲线相似,所以很难利用反射率的差值来区分薄云和浅雪,只有在远红外的几个波段两者的亮温值有很大的区别,但此时薄云与厚雪和中厚雪的亮温值又有一部分重叠,所以还是不能用亮温波段把薄云对积雪信息的干扰完全排除,排除薄云对积雪判识的干扰只能用 NDSI 和亮温差别排除一部分。

而盐湖与积雪的信息在可见光、近红外、中红外波段都非常相似,只有在远红外的亮温有一些差别,同时也存在一部分重叠,导致部分盐湖被误判为积雪。

本文就是通过改变 NDSI 的阈值,同时采用 MODIS 的第 18 波段和第 31 波段来改进积雪判识方法的。

利用此方法判识祁连山区 2004 年 3 月 28 日的积雪(图 6),并且把判识结果与真实遥感图像(图 2a)及 Dorothy K. Hall 等人的积雪结果(图 2b)作比较。

如图 2a 所示,2004 年 3 月 28 日这一天的靠图像右侧的 3 个白色框中几乎都是云,而应用 Dorothy K. Hall 等人方法被判识为积雪,出现明显的误判,造成误判的原因可能是由于这 3 个部分的云较厚,反射率很高,与雪相似,于是被误判为雪。应用本文方法这些较厚的云都没被判识为积雪,可见此方法消除了厚云和中厚云对积雪判识的影响。图 2a 中间偏左下方的方框中为鄂陵湖和扎陵湖,根据对遥感图像的目视判读可知此 2 湖当时处于结冰状态,而被 Dorothy K. Hall 等人方法误判为积雪(图 2b),应用本文方法判识消除了湖冰对积雪判识的干扰(图 6)。

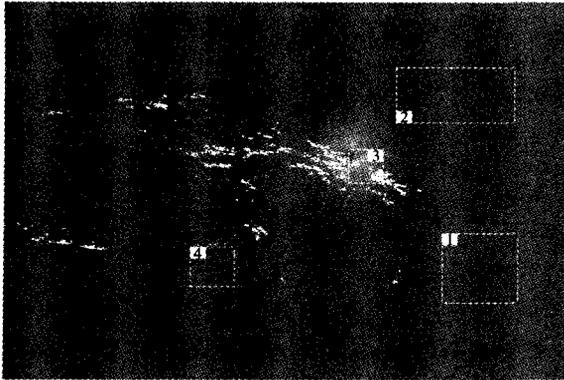


图 6 应用本文积雪判识方法得到的积雪图
(白色区域为积雪)

Fig. 6 Snow map discriminated by the the method in this article (white parts represent snow)

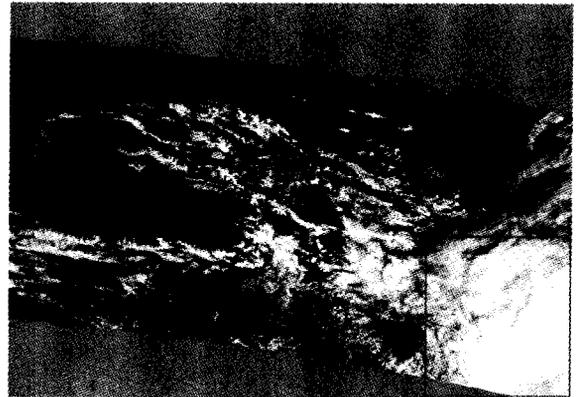


图 7a 祁连山区 2005 年 5 月 20 日
MODIS 的 1,4,3 合成图

Fig. 7a Compound map of band 1, band 4 and band 3 of MODIS over the Qilian Mountain on May 20, 2005

利用本文方法提取积雪的流程如下:

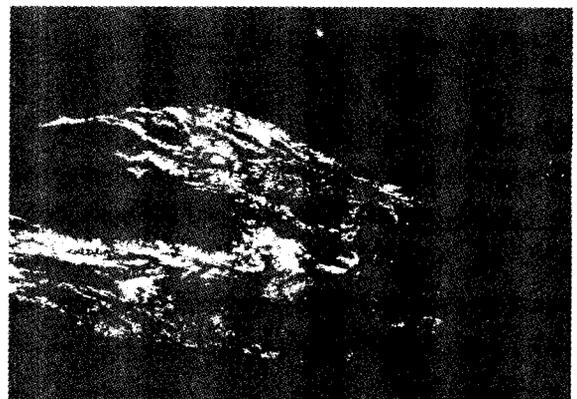
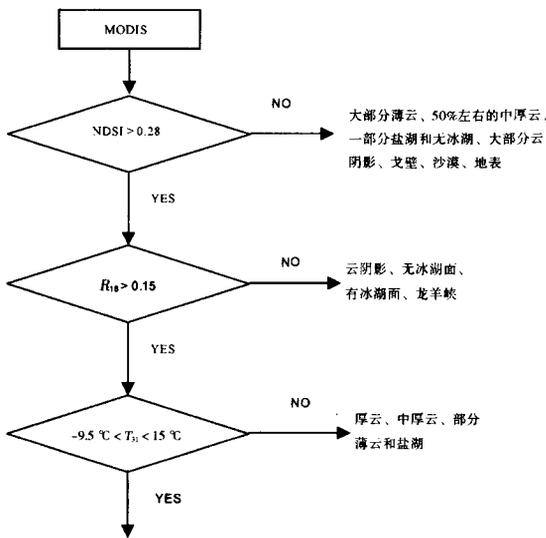


图 7b 本文方法得到的图 7a 的积雪信息
(白色区为积雪)

Fig. 7b Snow map discriminated by the method in this article
(white parts represent snow)

2 结果检验

利用本文方法判识 2005 年 5 月 20 日祁连山区积雪作为对此方法的检验(图 7)。

从图 7a 和图 7b 的对比中可以清楚地看出图 7b 能较准确地反映图 7a 的积雪信息,图 7a 中方框中为云,对比图 7b 得知,应用本文方法这一块较厚云的干扰被剔除。说明运用本文方法可以比较有效地提取出祁连山区的积雪信息,为下一步祁连山区的积雪研究如计算积雪深度和面积等工作奠定了基础。

3 结论和讨论

在用遥感分析研究积雪分布特征研究方面,准确地识别积雪是所有工作的基础。

(1) 目前通用的判识积雪的方法即利用 $NDSI \geq 0.4$ 提取积雪信息的方法在以祁连山区为例的积雪判识中验证还存在很多不足。

(2) 在改进的积雪判识方法中,改变 $NDSI$ 值的同时又新增了 MODIS 的第 18 和 31 波段,得到了一个新的积雪判识方法,即采用 $NDSI > 0.28, R_{18} > 0.15, -9.5 \text{ °C} < T_{31} < 15 \text{ °C}$ 的逐步逼近法。

(3)利用这个改进的积雪识别方法对祁连山区积雪进行判识,效果很好,此方法能有效地剔出厚云和中厚云及其它下垫面对积雪判识的影响,获取较准确的积雪分布信息。

(4)此判识方法所用的资料时间序列较短,在亮温判据上的应用时没有区分具体四季的积雪亮温差别,只是用平均值代替,有不妥之处,在以后的研究中会加入更长时间的数据并分析四季积雪的不同特性使研究有更强的代表性。

(5)此方法中没有考虑新雪和陈雪的具体光谱特征,在雪的区分上只是利用反照率高低进行区分,关于这一点还会在以后的研究中有所涉及。

(6)这种方法还不够完善,它不能将薄云和盐湖对积雪的干扰有效地排除,所以如何剔除薄云和盐湖的影响还需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] 李国昌,陈乾,陈添宇,等. 祁连山区地形降水的气候特征[J]. 地球科学进展,2005,20(特刊):167-176.
- [2] 张小明,魏锋,陆燕. 祁连山近45a年降水异常的气候特征[J]. 干旱气象,2006,24(3):35-41.
- [3] 王世杰. 利用NOAA/AVHRR影响资料估算积雪量的方法探讨[J]. 冰川冻土,1998,20(1):68-73.
- [4] 徐兴奎,田国良. 中国地表积雪动态分布及反照率的变化[J]. 遥感学报,2000,4(3):178-182.
- [5] 沙依然,王茂新. 气象卫星遥感资料在积雪监测中的应用[J]. 气象,2004,30(4):33-36.
- [6] 史培军,陈晋. RS与GIS支持下的草地雪灾监测试验研究[J]. 地理学报,1996,51(4):296-305.
- [7] 周咏梅,贾生海,刘萍. 利用NOAA-AVHRR资料估算积雪参量[J]. 气象科技,2001,21(1):117-121.
- [8] 延昊. NOAA卫星积雪识别和参数提取[J]. 冰川冻土,2004,26(3):369-373.
- [9] 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.
- [10] 郭锐,倾继祖. 气象卫星资料对积雪的检测和分析[J]. 遥感技术与应用,2000,15(4):237-240.
- [11] 郭锐,杨兰芳,李民轩. 利用气象卫星资料研究祁连山区植被和积雪变化[J]. 应用气象学报,2003,14(6):700-707.
- [12] 郭锐,梁芸. 利用MODIS资料定量判识沙尘暴方法研究[J]. 干旱气象,2006,24(1):1-6.
- [13] 宋小宁,赵英时. MODIS图像的云检测及分析[J]. 中国图像图形学报,2003,8(A9):1079-1083.
- [14] 盛夏,孔龙祥,郑庆梅. 利用MODIS数据进行云检测[J]. 解放军理工大学学报,2004,5(4):98-102.
- [15] Dorothy K Hall, George A Riggs, Vincent V Salomonson, et al. MODIS snow-cover products[J]. Remote Sensing of Environment,2002(83):181-194.
- [16] 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.

Method for Discriminating Snow in Qilian Mountain Region Based on MODIS Data

WANG Xing^{1,2}, ZHANG Qiang², GUO Ni², CAI Dihua²

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, CMA, Beijing 100081, China;

2. Institute of Arid Meteorology, CMA, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of CMA, Lanzhou 730020, China)

Abstract: By analyzing spectrum characteristics of snow, clouds and different land covers in the Qilian Mountain region based on MODIS data from July 2003 to March 2005, a new method for snow discrimination is presented on the basis of former researches, which combined NDSI (Normalized Difference Snow Index) and band 18, band 31 of MODIS to discriminate snow from clouds, saline, ice, desert, etc. with a step-by-step approach. Both result analysis and examination show that snow in the Qilian Mountain region can be effectively discriminated by the method of this article.

Key words: the Qilian Mountain; snow; NDSI; brightness temperature; step-by-step approach