

引用格式:Zhang Wenbo,Xiao Pengfeng,Feng Xuezh. A Study on Snow Cover Variability Using MODIS in the Typical Area of Tianshan Mountains,China[J]. Remote Sensing Technology and Application,2012,27(5):746-753. [张文博,肖鹏峰,冯学智. 基于 MODIS 数据的我国天山典型区积雪特征研究[J]. 遥感技术与应用,2012,27(5):746-753.]

基于 MODIS 数据的我国天山 典型区积雪特征研究

张文博,肖鹏峰,冯学智

(南京大学地理信息科学系,江苏 南京 210093)

摘要:准确监测天山地区积雪面积和积雪日数对合理利用水资源及分析区域气候变化有重要意义。MODIS 每日积雪产品可以为大面积快速积雪制图与监测提供依据,但因云量较高成为其应用的瓶颈。利用结合 MODIS 产品的时间与空间信息有效地减少了云对 MODIS 积雪产品的影响,并利用改进的 MODIS 积雪数据和 DEM 分析 2002~2009 年天山地区积雪面积和积雪日数的变化特征。结果表明:积雪频率总体上随着海拔升高而增大;不同坡向积雪面积差异明显,西北坡积雪覆盖率最高,北坡、西坡和东北坡次之,南坡和东南坡的积雪覆盖率最低;2006~2008 年研究区积雪面积出现低值,年内最大积雪面积呈逐年减少的趋势;随着海拔下降,积雪日数逐渐变小,天山南部地区积雪日数仅为 40 d 以下;积雪日数大的区域年际积雪日数变化相对稳定,积雪日数少于 40 d 的区域积雪日数的变异系数最大,年际积雪日数变化不稳定。

关 键 词:MODIS 积雪数据;去云;积雪面积;积雪日数;天山

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2012)05-0746-08

1 引 言

山区冰川与积雪是重要的淡水资源之一。在我国西北干旱半干旱地区,积雪融水形成的春汛,对农业灌溉有重要意义^[1-2]。天山地区冬季降雪丰沛,夏季少雨,融雪径流成为该地区主要的水资源。因此有效地监测天山地区积雪面积和积雪日数对模拟山区融雪径流、合理调度水资源、对抗冬季牧区雪灾及春夏洪涝灾害等方面有指导意义。

近年来遥感技术不断发展,成为监测积雪的重要手段。MODIS 数据以高时间分辨率和 500 m 的空间分辨率,逐渐成为大尺度积雪动态监测的重要数据源^[3-6]。许多国内外学者对 MODIS 积雪产品的识别精度进行了研究^[7-11],证明其在晴天下积雪识别精度很高,整体精度达到 90% 以上,并可用于分析新疆天山地区积雪的时空分布特征^[10]。然而,

大部分每日 MODIS 积雪数据的含云量很高,成为很多应用分析中的难题。目前,多数研究利用结合两个 MODIS 积雪产品(MOD10A1 和 MOD10A2)进行去云处理^[12-14],因为同一天两个积雪产品的时间间隔为 3 h,其间云会移动使云量发生变化。另一种去云的方法为不定天数的最大积雪合成方法,它可以得到最大积雪像元数,同时使云量减为最少,达到去云的目的^[14-16]。MODIS 积雪 8 d 合成数据产品(MOD10A2)是最大积雪合成方法的一个代表,其去云效果显著、数据获取方便,成为很多学者分析积雪变化特征的数据源^[5-6,17],但 8 d 的时间分辨率不能满足研究积雪日数的要求。

本文通过结合 MODIS/Terra 积雪产品(MOD10A1)和 MODIS/Aqua 积雪产品(MYD10A1)、相邻时间填补、空间滤波及相邻时间最大合成 4 个步骤对 MODIS 积雪产品进行去云处理,并利用改进后的积

雪数据和 DEM 对我国天山地区积雪面积和积雪日数的时空分布特征进行分析,为天山地区水资源的合理利用提供科学依据。

2 研究区概况及数据源

2.1 研究区概况

天山是亚洲最大山系之一,呈纬向展布。我国境内天山东西长 1 700 km,南北宽 250~350 km。天山是新疆三大山系中降雪最多的山区,也是我国陆地积雪的一个主要区域。

本文所选的天山典型区为位于 41°~46°N、80°~89°E 之间的天山区域。区内分布有博洛霍罗山、依连哈比尔尕山、阿吾拉勒山、乌孙山、那拉提山、哈尔克他乌山、艾尔宾山、科克铁克山、霍罗山等山脉,以及伊犁谷地、特克斯谷地、大小尤尔都斯盆地等,地处内陆中纬度西风带。由于巨大的高度和有利的地理位置以及独特的山地走势,冬季山区降雪丰富,成为众多河流、湖泊的发源地。河流汇集雪冰融水与雨水,成为灌溉山间盆地和谷地以及山前平原农田和牧场的主要水源。

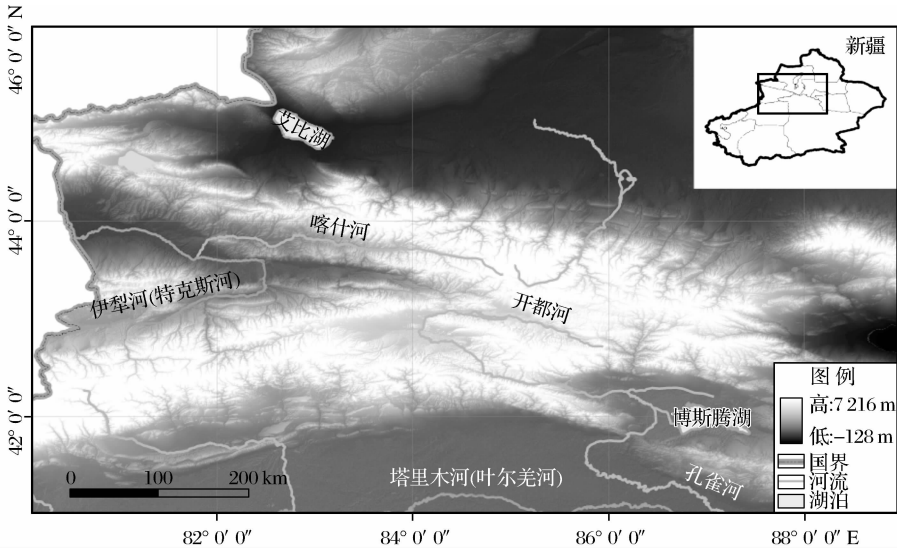


图 1 研究区示意图
Fig. 1 Study area in the Tianshan mountains

2.2 数据及预处理

本研究所采用的积雪数据资料来源于美国国家雪冰数据中心(NSIDC)提供的 MODIS/Terra 每日积雪产品(MOD10A1)和 MODIS/Aqua 每日积雪产品(MYD10A1)。天山地理环境复杂,为验证 MODIS 积雪产品用于天山地区的可信度,本研究参照更高分辨率的 Landsat TM/ETM+影像数据提取的积雪范围对 MODIS 产品进行评价(表 1),可以看出 MODIS 积雪产品的正确率均比较高,平均正确率可达 91.02%,因此可以用于天山地区的积雪特征研究。

由于本研究区内稳定积雪区 9 月份积雪已经开始,且可持续到次年 4 月甚至 5 月,因此,本研究选取 9 月至次年 5 月作为一个积雪年来分析积雪的变化特征,并且“年”均以“年度”为单位,即 2002 年代表 2002 年 9 月 1 日至 2003 年 5 月 31 日,依此类推。覆盖研究区的影像有两幅,编码分别为 h23v04 和 h24v04,本研究下载了 2002~2009 年所有可用

表 1 MODIS 积雪产品与 Landsat TM/ETM+影像
对比评价表

Table 1 The accuracy of MODIS snow cover products compared with Landsat TM/ETM+ snow cover		
日期	MODIS 产品含云量/%	正确率/%
2003 年 1 月 4 日	19.05	88.22
2003 年 1 月 20 日	27.38	88.71
2003 年 3 月 25 日	66.19	90.53
2003 年 4 月 10 日	14.22	88.95
2006 年 9 月 17 日	1.88	87.18
2006 年 10 月 3 日	34.59	95.75
2007 年 5 月 15 日	0.08	92.91
2007 年 5 月 31 日	1.89	92.78
2007 年 9 月 4 日	38.70	95.50
2007 年 9 月 20 日	79.71	95.53
2009 年 5 月 20 日	80.62	88.73
2009 年 11 月 12 日	69.83	93.25
2009 年 12 月 14 日	46.71	85.15
平均值	36.99	91.02

的 MODIS/Terra 和 MODIS/Aqua 积雪产品(表 2),其中,缺失数据的日期只用一个传感器的积雪产品,如 2003 年 2 月 1 日 Terra 积雪产品缺失,则该日只利用 Aqua 积雪产品进行去云计算。积雪产品空间分辨率为 500 m,文件为 hdf 格式,投影为 In-

tergrized Sinosoidal GRID。利用 MODIS 网站提供的 MRT 软件将所有影像转换为通用横轴墨卡托投影(UTM),按照经纬度范围裁剪到本文研究区,得到 GeoTIFF 格式的积雪影像。

将MODIS积雪产品中的类型按照以下规则重

表 2 本研究使用的 MODIS 积雪产品信息表
Table 2 MODIS snow cover images used in this study

影像时段	Terra(MOD10A1)		Aqua(MYD10A1)	
	影像数/景	缺失	影像数/景	缺失
2002. 9. 1~2003. 5. 31	544	2003. 2. 1	542	2002. 9. 13,2002. 9. 14
2003. 9. 1~2004. 5. 31	530	2003. 12. 17~12. 24,2004. 2. 19	546	2004. 2. 7
2004. 9. 1~2005. 5. 31	546		546	
2005. 9. 1~2006. 5. 31	546		546	
2006. 9. 1~2007. 5. 31	546		546	
2007. 9. 1~2008. 5. 31	548		546	2007. 12. 2
2008. 9. 1~2009. 5. 31	538	2008. 12. 20~12. 23	546	
2009. 9. 1~2010. 5. 31	544	2010. 2. 1	546	
合计	4 342	30	4 364	8

新分成 3 类:原有的积雪(snow)和湖冰(lake ice)归类成积雪(snow);无雪(no snow)、湖泊(lake)和海洋(ocean)归为无雪(no snow);云(cloud)和其他类(missing sensor data, no decision, night, detector saturated, fill)归为云(cloud)。然后将这 3 类分别编码为 200、50 和 25,用于后续分析。

本研究采用的 DEM 数据为 ASTER GDEM 数据,空间分辨率 30 m,数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://dat-amirror.csdb.cn/>)。为了与积雪产品匹配,将其空间分辨率重采样为 500 m。研究区的坡向数据由 DEM 得到,按照方位角将研究区分为 8 个坡向:北坡(0°~22.5°及 337.5°~360°)、东北坡(22.5°~67.5°)、东坡(67.5°~112.5°)、东南坡(112.5°~157.5°)、南坡(157.5°~202.5°)、西南坡(202.5°~247.5°)、西坡(247.5°~292.5°)以及西北坡(292.5°~337.5°)。

3 去云方法

本研究根据结合影像不同空间和时间信息的算法^[12-15],利用 4 个步骤对 MODIS 积雪产品进行去云处理,得到不定天数的积雪产品。最后积雪数据的时间分辨率平均为 2~3 d,每一步的输出影像都是下一步的输入影像,所有的步骤都在 IDL 语言中编程实现。

3.1 Terra-Aqua 积雪影像合成

同一天的 MODIS/Terra 积雪产品(MOD10A1)

和 MODIS/Aqua 积雪产品(MYD10A1)成像时间相差 3 h 左右,这段时间内云会移动产生云量变化。这样,如果两个积雪产品中任意一个产品的像元类型为雪,就将该像元类型定义为雪;如果一个数据产品中的像元类型为非雪,另一个数据产品中的像元类型为非雪或云,则其结果定义为非雪;如果两个数据产品中像元类型均为云,其类型仍为云。因为雪(200)、非雪(50)和云(25)的编码为降序排列,所以此步骤可以概括为求两个数据产品中的最大值,公式如式(1):

$$S'_{i,j} = \max(T'_{i,j}, A'_{i,j}) \tag{1}$$

其中: i 和 j 为影像中的行列号, t 为影像对应的日期, S 、 T 和 A 分别对应 MODIS Terra 积雪产品、Aqua 积雪产品和输出影像的像元值。

3.2 相邻时间填补

该步骤中,如果一个像元类型为云,那么利用该像元之前一天和之后一天的类型来确定当日像元的真实地表覆盖类型。如果一个像元被判定为云,并且其前后两天积雪类型相同且非云,则当日该像元类型应该确定为其前后两天像元的类型。也就是说,如果一个像元的类型为云,前后两天均为积雪,则该像元当日被定义为雪;如果一个像元前后两天均为非雪,则该像元当日被定义为非雪;其余情况该像元类型保持不变,仍然为云。

3.3 空间滤波

如果一个像元的类型为云,而其周围 8 个像元中绝大多数(大于 5 个)像元类型为雪,那么该像元

类型定义为雪;同样,如果该像元周围绝大多数像元类型为非雪,则该像元的类型被定义为非雪。

3.4 相邻时间最大合成

该步骤和 MODIS 积雪 8 d 最大合成数据产品的方法类似,对于连续两天的数据来说,只要有一个数据中的像元为雪,该像元就判定为雪。得到的为不定天数的积雪产品数据,整个步骤的终止条件为

云量少于 10%,或者合成天数超过 8 d。
通过上述 4 个步骤得到的遥感影像的含云量极大降低,可以有效减少云的影响。图 2 为 2002 年 9 月 15 日两个 MODIS 每日积雪产品分别通过上述 4 个步骤得到的结果影像图,最后得到连续 3 d 的积雪产品,其云量由原来积雪产品中的 56.86%和 63.09%减少到最终的 0.57%。

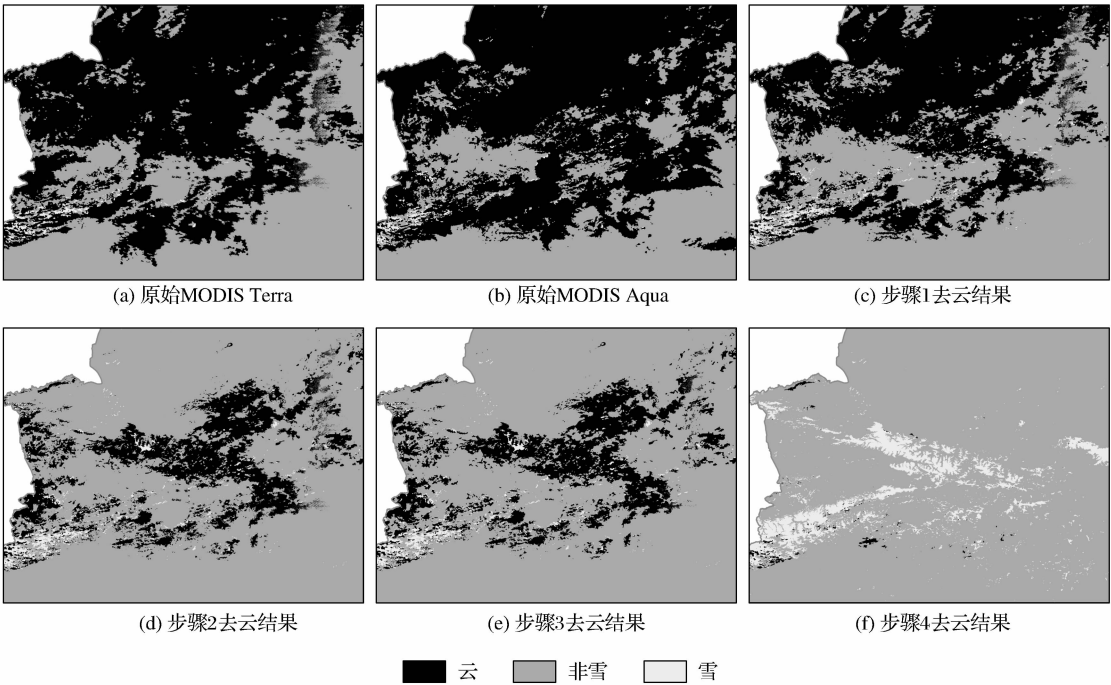


图 2 2002 年 9 月 15 日去云过程影像图
Fig.2 Cloud cover for 15 Sep. 2002

4 积雪面积的变化特征

4.1 积雪面积随海拔变化特征

天山地区地形复杂,区域内高山阻隔水汽的输送,造成积雪面积分布不均匀。积雪面积的分布与地形因子密切相关,海拔高度不同会影响气温和降水特征,从而影响积雪的分布状况。为了分析积雪频率随高度变化情况,将研究区划分为 7 个高程带:梭梭荒漠带(800 m 以下)、草原至半灌木过渡带(800 ~ 1 200 m)、山地草甸草原带(1 200 ~ 1 600 m)、云杉林带(1 600 ~ 2 700 m)、高山蒿草草原带(2 700 ~ 3 000 m)、高山垫状植被带(3 000 ~ 3 800 m)以及冰雪带(3 800 m 以上)^[17]。利用去云之后的积雪影像计算出每个像元 8 a 的平均积雪频率,得到每个高度带不同积雪频率的直方图(图 3),不同积雪频率的像元数代表该高度带不同积雪频率的积雪面积。由图 3 可以看出各个高度带积雪频率

的像元数差异明显,总体上,随着海拔增加,像元的积雪频率逐渐升高。800 m 以下以及 800 ~ 1 200 m 两个高度带积雪像元的积雪频率多集中在 20% 以下;1 200 ~ 1 600 m 高度带积雪频率超过 20% 的像元数量开始增多;1 600 ~ 2 700 m 高度带像元的积雪频率增大,但是大部分积雪像元的积雪频率仍然比较低,在 35% 以下;2 700 ~ 3 800 m 两个高度带像元的积雪频率大于 40% 的像元数量明显增多;3 800 m 以上为永久积雪区,像元的积雪频率集中在 60% 以上,峰值移动到 80% 左右。

4.2 积雪面积随坡向变化特征

水汽来源和持续低温是积雪形成并得以维持的必要条件。迎风坡水汽来源丰富,积雪面积比背风坡大;阳坡所接受的太阳辐射比阴坡多,积雪面积将比阴坡少。图 4 为不同坡向与积雪覆盖率(年平均积雪面积与该坡度总面积的比值)分布图,可以看出,研究区范围内,不同坡向的积雪覆盖率差异明

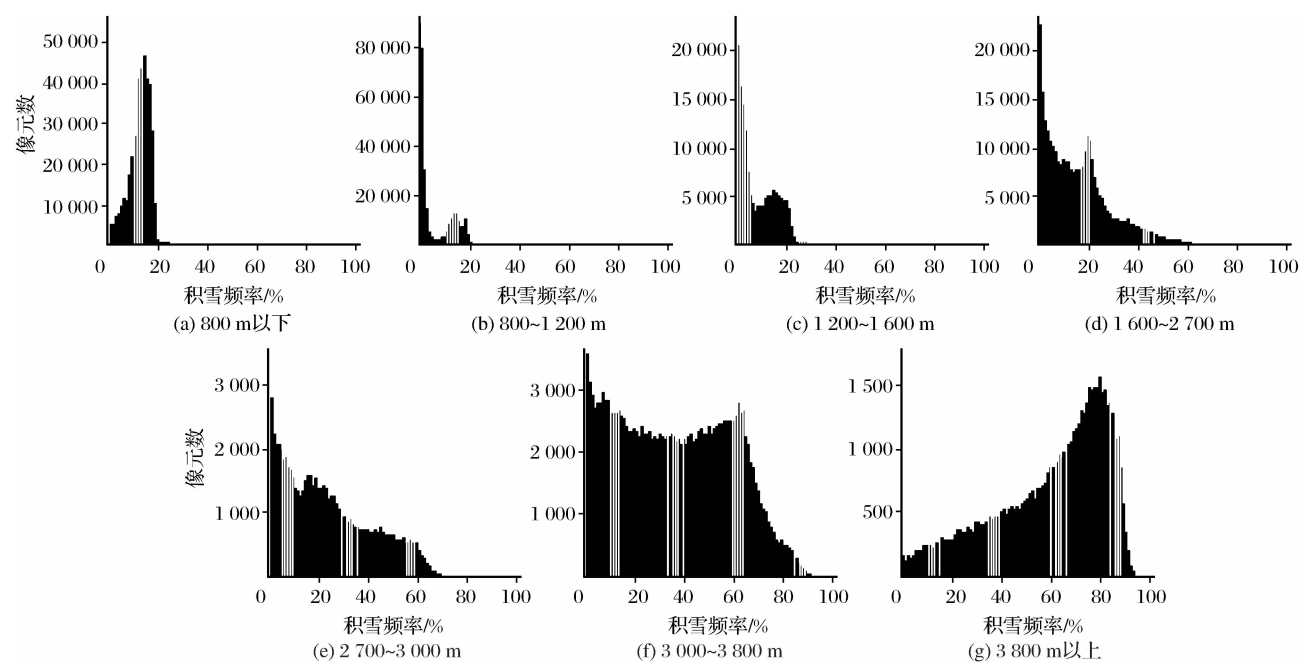


图 3 不同高度带积雪频率直方图

Fig. 3 Snow cover distribution at different altitudes

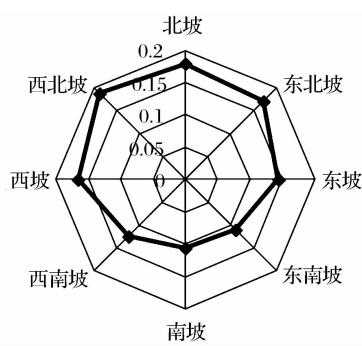


图 4 积雪覆盖率随坡向分布图

Fig. 4 Snow cover distribution at different aspects

显。北坡、东北破、西坡和西北坡的积雪覆盖率均在 0.15 以上,而南坡和东南坡积雪覆盖率仅为 0.1 左右。这是因为,冬季研究区主要受极地西北冷空气南下影响,这一冷空气带来强风带,通过阿拉山风口和额敏风口进入新疆天山地区带来大量降雪。该风带呈西北—东南走向,造成西北向和东南向的雪盖差异。南坡处于阳坡,得到的太阳辐射多,积雪易融化,导致南坡的积雪覆盖率下降。因此,受水汽和热量的共同影响,北坡、东北坡、西坡以及西北坡积雪覆盖率相对较高,而南坡和东南坡的积雪覆盖率相对较低。

4.3 积雪面积随时间变化特征

图 5 为研究区连续 8 a 的积雪面积变化图。积雪的年内变化显著(图 5(a)),9 月份研究区含有少量积雪,积雪主要分布在高海拔永久积雪区域。11 月份积雪面积迅速扩大,研究区大部分地区进入积

雪期。随着降雪不断增加,1 月中旬研究区积雪面积达到最大,积雪持续到 3 月份,在 3 月末大部分低海拔地区,包括新疆南部靠近沙漠的地区积雪开始融化,积雪面积大量减少,直至 5 月末,积雪面积减少到 5 万 km^2 以下,积雪主要分布在永久积雪区,整个年内积雪过程积雪面积呈现中间多、两端

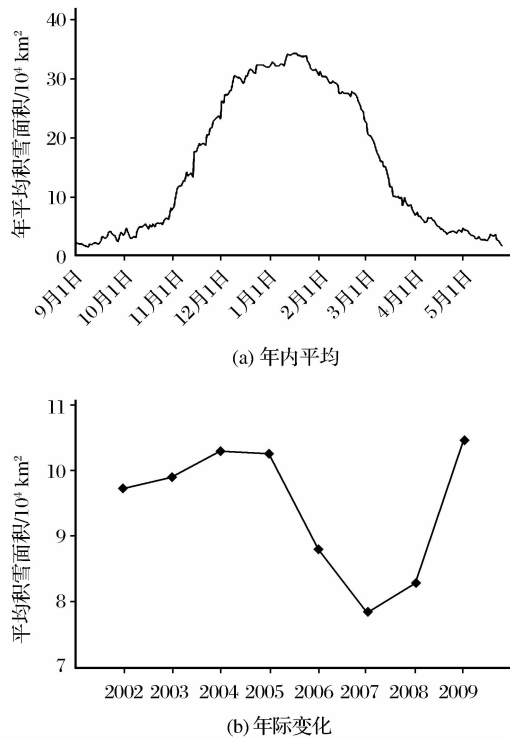


图 5 2002~2009 年积雪面积变化图

Fig. 5 Snow cover extent from 2002 to 2009

少的形状。由图 5(b)可以看出,积雪面积的年际差异很大,研究区前 4 a 年均积雪面积在 10 万 km² 左右变化,2006 年平均积雪面积明显减少,2006~2008 年连续 3 a 平均积雪面积出现低值,仅为 8 万 km² 左右。

最大积雪面积代表了年内积雪面积的峰值,其数量大小及发生时间对研究区年平均积雪面积有重要的影响,图 6 为积雪最大面积和最大积雪日逐年变化图,最大积雪面积的分布状况和年平均积雪面积的分布状况相对一致。2002~2006 年的最大积雪面积均为 40 万 km² 左右,而 2008 年的最大积雪面积下降到 30 万 km² 左右,整体上最大积雪面积呈逐年减少的趋势($R^2=0.685$)。对最大积雪日的分析可以看出,前 5 a 最大积雪面积主要出现在 12 月中旬到 1 月中旬,而后 3 a 最大积雪出现的时间推迟到了 1 月中旬或者 2 月初。2008 年的年平均积雪面积和年内最大积雪面积均较低,综合来看,其为典型的少雪年。

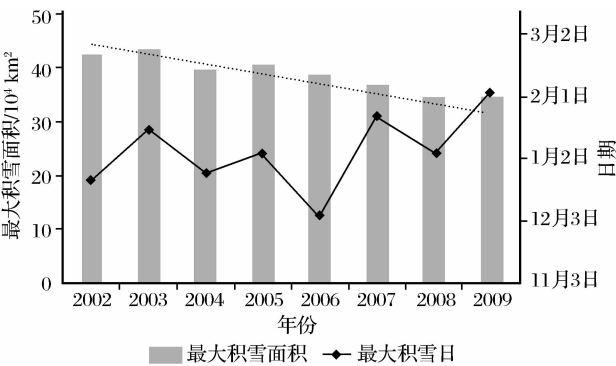


图 6 最大积雪面积和最大积雪日逐年变化图
Fig. 6 Maximum snow cover extent and day of maximum snow cover

5 积雪日数的变化特征

5.1 积雪日数的空间分布特征

本研究利用去云的 MODIS 积雪数据,每个像元在一个积雪季节(9 月 1 日至次年 5 月 31 日)内的积雪日数计算方法如式(2):

$$SD = \sum_{i=1}^N D_i \tag{2}$$

其中:SD 为每个像元的积雪日数,N 为每个积雪季节内影像数据个数, D_i 为第 i 景影像的积雪日数。例如,如果一个影像为 2 d 合成影像,则该影像中像元值为 200 的像元 D_i 值赋为 2,否则赋为 0。这样得到每年的积雪期数据,多年平均得到研究区积雪分布图(图 7)。

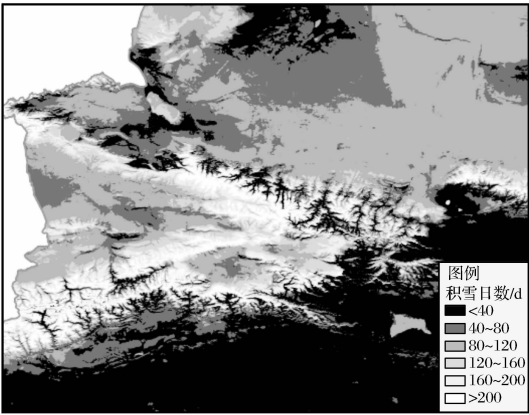


图 7 研究区积雪日数分布图
Fig. 7 Average snow cover duration of the study area

天山地区地形复杂,冬季天山南部由于高山阻隔西北方向输送的水汽的影响,积雪较晚。且其地处沙漠地区,昼夜温差大,积雪易融化,积雪的终止日期较早,导致年积雪日数较小。对照图 1 研究区 DEM 数据可以发现,积雪日数和高程分布有着密切关系,在 9 月 1 日至次年 5 月 31 日的积雪季节里,积雪日数超过 200 d 的区域主要分布在那拉提山、依连哈比尔尕山、巴里坤山等海拔高于 3 500 m 的山顶地区;积雪日数在 160~200 d 和 120~160 d 的区域主要分布在 2 700~3 500 m 海拔范围内;积雪日数为 40~120 d 的区域对应为海拔 1 500 m 和部分 1 000 m 左右的海拔高度;积雪日数在 40 d 之内的像元则主要分布在低海拔河谷地区和天山南部沙漠地区。

5.2 积雪日数的年际变化特征

近年来,受冬季降水和冬季平均气温影响,研究区积雪日数的年际变化明显^[18-20]。为了分析积雪日数的年际变化情况,利用每年的积雪日数计算变异系数,得到研究区积雪日数的变异系数分布图(图 8)。变异系数越大,说明积雪日数的年际变化越明显。由图 8 可以看出,积雪日数变异系数的分布和积雪日数的分布基本相同,只是趋势相反。积雪日数较长的区域积雪日数的变异系数较小,年均积雪日数为 200 d 以上的高海拔地区以及天山中段地区积雪日数的变异系数均在 0.3 以内,高海拔地区常年低温,天山中段每年西北冷空气带来的水汽充足、降雪丰沛,因此这些地区积雪日数大且年际变化稳定;而积雪日数较小的天山南部以及部分区域的河谷地区变异系数较大,最高达到 2 以上,天山南部地处沙漠地区,全年降水量少,冬季寒流的强弱直接影响该区域的积雪日数,并且该地区海拔较低,积雪状

况受当地气候等因素影响明显,年际积雪日数变化不稳定。

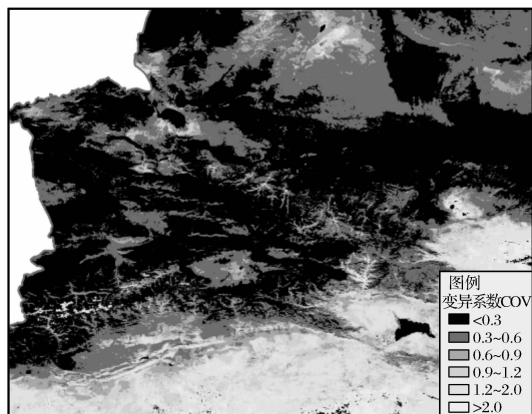


图 8 研究区积雪日数变异系数分布图

Fig. 8 Coefficient of variation map of snow cover duration of the study area

6 结 语

本研究针对 MODIS/Terra (MOD10A1) 和 MODIS/Aqua (MYD10A1) 积雪产品数据高云量的问题,利用 4 个步骤有效地减少了云的影响,得到天山地区 2002~2009 年的积雪影像,结合 DEM 对天山地区积雪面积及积雪日数的分布特征进行分析,得到以下结论:

(1) 研究区积雪面积与海拔密切相关,海拔越高,积雪的覆盖频率越大。总体全年积雪频率高值的积雪像元主要集中在 3 800 m 以上的高海拔区域,随着海拔下降,积雪频率逐渐下降,1 600 m 以下的区域大部分像元积雪频率分布在 20% 以下。

(2) 受水汽运输和太阳辐射的影响,不同坡向的积雪差异明显,水汽来源方向的西北坡积雪覆盖率最大,其次为北坡、西北坡和东北坡;南坡的积雪覆盖率最小。

(3) 11 月份大部分地区进入积雪季节,表现为积雪面积的迅速扩大,1 月份积雪面积达到顶峰,持续到 3 月份大部分地区积雪面积开始减少。研究区积雪面积年际变化明显,最大积雪面积呈逐年减少的趋势,从平均积雪面积及最大积雪面积看,2008 年为典型少雪年。

(4) 积雪日数较长的地区主要分布在海拔较高的高山带,随着海拔下降积雪日数变小,天山南部及海拔较低的河谷地区积雪日数仅为 40 d 以下。积雪日数的变化情况和积雪日数的大小有一定相关性,天山南部积雪日数小,年际积雪日数变化剧烈,

而高山地区年际积雪日数变化相对较小。

参考文献 (References):

- [1] Li Peiji, Mi Desheng. Distribution of Snow Cover in China[J]. Journal of Glaciology and Cryopedology, 1983, 5(4): 9-18. [李培基, 米德生. 中国积雪的分布[J]. 冰川冻土, 1983, 5(4): 9-18.]
- [2] Li Peiji. A Preliminary Study of Snow Mass Variations over Past 30 Years in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1990, 48(4): 433-437. [李培基. 近 30 年来我国雪量变化的初步探讨[J]. 气象学报, 1990, 48(4): 433-437.]
- [3] Wang X W, Xie H J. New Methods for Studying the Spatio-temporal Variation of Snow Cover based on Combination Products of MODIS Terra and Aqua[J]. Journal of Hydrology, 2009, 371: 192-200.
- [4] Hou Huishu, Yang Hongye. A General Introduction to MODIS Snow Products and Its Researching Application[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(2): 252-256. [侯慧姝, 杨宏业. MODIS 积雪产品及研究应用概述[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(2): 252-256.]
- [5] Mu Zhenxia, Jiang Huifang, Liu Feng. Spatial and Temporal Variations of Snow Cover Area and NDVI in the West of Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(5): 875-882. [穆振侠, 姜卉芳, 刘丰. 2001~2008 年天山西部山区积雪覆盖及 NDVI 的时空变化特性[J]. 冰川冻土, 2010, 32(5): 875-882.]
- [6] Huang Zhen, Cui Caixia. Snow Monitoring Using EOS/MODIS Data in Xinjiang, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(3): 343-347. [黄镇, 崔彩霞. 基于 EOS/MODIS 的新疆积雪监测[J]. 冰川冻土, 2006, 28(3): 343-347.]
- [7] Brown R, Derksen C, Wang L. Assessment of Spring Snow Cover Duration Variability over Northern Canada from Satellite Datasets[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 111: 367-381.
- [8] Hall D K, Riggs G A. Accuracy Assessment of the MODIS Snow Products[J]. Hydrological Processes, 2007, 21: 1534-1547.
- [9] Maurer E P, Rhoads J D, Dubayah R O, et al. Evaluation of the Snow-covered Area Data Product from MODIS [J]. Hydrological Processes, 2003, 17: 59-71.
- [10] Wang X W, Xie H J, Liang T G. Evaluation of MODIS Snow Cover and Cloud Mask and Its Application in Northern Xinjiang, China[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112: 1497-1513.
- [11] Huang Xiaodong, Zhang Xuotong, Li Xia, et al. Accuracy Analysis for MODIS Snow Products of MOD10A1 and MOD10A2 in Northern Xinjiang Area[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(5): 722-729. [黄晓东, 张学通, 李霞, 等. 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): 722-729.]

- [12] Parajka J, Blöschl G. Spatio-temporal Combination of MODIS Images-potential for Snow Cover Mapping[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44: W03406.
- [13] Liu Junfeng, Chen Rensheng. Validation of MODIS Snow Covered Days by the Combined Using of MODIS Aqua and Terra Snow Cover Products and In-situ Observations all over China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(3): 504-511. [刘俊峰, 陈仁升. 基于 MODIS 双卫星积雪遥感数据的积雪日数空间分布研究[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(3): 504-511.]
- [14] Gafurov A, Bardossy A. Cloud Removal Methodology from MODIS Snow Cover Product[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13: 1361-1373.
- [15] Paudel K P, Anderson P. Monitoring Snow Cover Variability in an Agropastoral Area in the Trans Himalayan Region of Nepal Using MODIS Data with Improved Cloud Removal Methodology[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115: 1234-1246.
- [16] Gao Y, Xie H J, Yao T D, *et al.* Integrated Assessment on Multi-temporal and Multi-sensor Combinations for Reducing Cloud Obscuration of MODIS Snow Cover Products of the Pacific Northwest USA[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114: 1662-1675.
- [17] Lin Jintang, Feng Xuezhi, Xiao Pengfeng, *et al.* Spatial and Temporal Distribution of Snow Cover in Mountainous Area of Manasi River Basin based on MODIS[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(4): 469-475. [林金堂, 冯学智, 肖鹏峰, 等. 基于 MODIS 数据的玛纳斯河山区雪盖时空分布分析[J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(4): 469-475.]
- [18] Gao Weidong, Wei Wenshou, Zhang Lixu. Climate Changes and Seasonal Snow Cover Variability in the Western Tianshan Mountains, Xinjiang in 1967~2000[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(1): 69-73. [高卫东, 魏文寿, 张丽旭. 近 30a 来天山西部积雪与气候变化—以天山积雪雪崩研究站为例[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(1): 68-73.]
- [19] Yang Qing, Cui Caixia, Sun Churong, *et al.* Snow Cover Variation during 1959~2003 in Tianshan Mountains, China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(2): 80-84. [杨青, 崔彩霞, 孙除荣, 等. 1959~2003 年中国天山积雪的变化[J]. *气候变化研究进展*, 2007, 3(2): 80-84.]
- [20] Zhang Jiahua, Wu Yang, Yao Fengmei, *et al.* Analyses of Recent Xinjiang Snow Cover Feature Utilizing Satellite Remote Sensing and Surface Observation Data[J]. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(3): 551-557. [张佳华, 吴杨, 姚凤梅, 等. 利用卫星遥感和地面实测积雪资料分析近年新疆积雪特征[J]. *高原气象*, 2008, 27(3): 551-557.]

A Study on Snow Cover Variability Using MODIS in the Typical Area of Tianshan Mountains, China

Zhang Wenbo, Xiao Pengfeng, Feng Xuezhi

(Department of Geographic Information Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Monitoring the extent and duration of snow cover in Tianshan mountains is significant for fully utilizing water resources and understanding the regional impact of climate change. Daily MODIS snow cover data can provide a basis for large scale snow cover mapping. However, the high cloud obscuration limits its applications. This study uses a four-step approach to remove cloud from the daily data. Using improved MODIS snow cover data and DEM analyse the spatial and temporal variability of snow cover extent and duration from 2002 to 2009 in the Tianshan Mountains of China. Snow cover extent is closely related to terrain factors. The snow cover frequency as a whole becomes higher with increasing altitude. The ratio of snow cover is higher at the northwest, north and west aspect than that at the south and southeast aspect. The snow cover extent of the whole area is small from 2006 to 2008. Maximum snow cover extent increases yearly on average. The regions snow cover duration exceeds 200 days, which are mainly in the high-altitude perennial snow cover areas, and their Coefficient of Variation (COV) is low. The snow cover duration in the southern Tianshan mountains and other low-altitude areas is very short, and change substantially due to seasonal climate situations.

Key words: MODIS snow cover data; Cloud removal method; Snow cover extent; Snow cover duration; Tianshan mountains