

基于 MODIS 数据中国天山积雪面积时空变化特征分析^①

何海迪¹, 李忠勤^{1, 2}, 张明军¹

(1 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 甘肃 730070;

2 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室/天山冰川站, 兰州 甘肃 730000)

摘要: 基于 2011—2015 年 MOD10A2 积雪产品和气象数据, 通过几何校正、去云预处理, 应用归一化差分积雪指数算法等获取中国境内天山山区积雪覆盖面积数据, 分析了积雪面积的时空变化特征及与气温降水的关系。结果表明: (1) 年内积雪面积呈单峰变化, 9 月开始积累, 次年 1 月达峰值, 3 月气温回暖消融加速, 至 7 月最小。春秋季节波动较大但没有明显的增减趋势, 夏季积雪面积最小, 冬季最大且呈减小趋势。(2) 2001—2015 年积雪覆盖面积整体上呈减少趋势, 积雪覆盖率最大值的波动比最小值的波动更加剧烈。(3) 积雪覆盖率随着海拔升高而增大, 海拔 < 1 500 m 区域积雪覆盖率低于 10%, 海拔 > 4 500 m 以上区域平均可达 70%, 为常年稳定积雪区。积雪覆盖率在西北坡最高, 南坡最低。(4) 年均气温升高是积雪覆盖面积减小的主因, 年积雪覆盖面积变化与年降水量变化保持一致的下降趋势。

关键词: 中国天山; 积雪面积; MODIS10A2; 时空变化; 气候响应

中图分类号: P426.635 文献标识码: A 文章编号: 1000-6060(2018)02-0367-08(0367~0374)

DOI:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2018.02.018

积雪是气候系统中比较活跃的因子, 对气候环境变化较为敏感, 其年内和年际变化影响全球气候和水文的变化^[1]。山区冰川与积雪是其流域主要的补给源和当地社会发展的重要淡水资源之一, 我国西北地区属于干旱半干旱地区, 积雪融水对当地农牧业灌溉有重要意义^[2-3], 其变化直接影响生态系统稳定和人类生存。

针对积雪的时间序列变化和小区域重点分析, 以及突飞猛进的遥感技术已成为监测积雪的重要手段, 国内外许多学者进行了大量研究。BRODZIK^[4]等以微波遥感数据为基础研究了北半球积雪面积的长期变化情况, 发现北半球积雪呈现减小的趋势; 穆振侠等^[5]得出 2001—2008 年天山西部区积雪覆盖面积呈现出波动减少的趋势; 车涛等^[6]研究表明 1993—2002 年我国积雪总储量没有明显的增加或减小的变化趋势, 但存在年际波动; 窦燕等^[7]研究了 2000—2006 年天山山区积雪的分布特征, 发现积雪年际变化呈略微的上升趋势; 王增艳等^[8]以中国干

旱区为研究对象, 计算并验证了用遥感方法提取研究区积雪日数、初雪日期和终雪日期的精度, 分析了研究区 2002—2009 年的积雪时空分布特征; 娄梦筠等^[9]利用 2000—2010 年的 MOD10A2 积雪产品数据分析了新疆地区 2002—2011 年积雪的年内、年际变化特征和空间分布特征; 张文博等^[10]进行了我国天山典型区积雪特征研究, 结果表明积雪频率总体上随海拔升高而增大, 不同坡向积雪面积差异明显。刘金平等^[11]利用 MOD10A2、MOD09A1 等数据分析了中亚干旱区季节性积雪时空分布特征和年内、年际变化趋势以及随纬度的变化趋势, 发现该地区平原区积雪覆盖年际变化呈增加趋势, 山区则基本上呈稳定状态。曾小箕等^[12]利用 MODIS L1B 数据获取了土库曼斯坦 2011 年 11 月—2012 年 4 月山区积雪覆盖范围和面积等信息, 揭示了该地区山区积雪面积均在 1 月达到最大值, 在监测时段积雪面积随温度的降低、降雨量的减少而增大。张连成等^[13]利用 2010—2014 年 6~8 月 MOD10A1、MOD10A2 及

① 收稿日期: 2017-12-05; 修订日期: 2018-03-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41471058); 国家自然科学基金重大研究计划项目(91425303)

作者简介: 何海迪, 女, 硕士研究生, 研究方向为干旱区水资源。E-mail: 18298339647@163.com

通讯作者: 李忠勤, 男, 研究员, 冰川学专业。E-mail: lizq@lzb.ac.cn

HJ-1/CCD 数据,以天山北坡为研究区,对比分析了积雪持续时间比率法及最大值合成法在雪线高程提取中的精度和适用性。

天山山区冬季降雪量大,夏季高温少雨,融雪径流成为该地区城市以及工农业发展的主要水资源。因此长期有效地监测天山山区积雪面积的时空变化对研究山区融雪径流、合理调度和利用水资源、对抗冬季牧区雪灾及春夏洪涝灾害等均有现实的指导意义。基于前人对中国天山山区积雪分布特征研究的方法和结论,本文运用 MOD10A2 积雪数据和气象数据,较长时间序列的对中国天山山区的积雪面积时空变化特征以及对气候的响应进行了分析。

1 研究区概况及数据处理

1.1 研究区概况

参考天山山脊范围^[14],中国境内的天山横亘于新疆维吾尔自治区中部(73°~95°E,38°~45°N),西邻吉尔吉斯斯坦,东至哈密市以东的星星峡戈壁,东西绵延 1 700 km^[15]。天山位于内陆中纬度西风带地区,属于典型的温带大陆性气候,气温温差较大,日照时间充足(年日照时数 2 500~3 500 h),降水量少,气候干燥,年均降水量约 150 mm,且地域差异明显。水汽主要来自西和西北方向,冬季在冷高压的控制下天气稳定、气候严寒;春季北支急流活动频繁降水增多;夏季南支急流扰动形成较强的雨雪天气;秋季高压迅速控制,秋高气爽^[7]。天山山区是新疆三大山系中积雪最为发育的地区,积雪深度达 30~50 cm 以上^[8],也是我国三大稳定积雪中心

之一^[16]。天山山区降雪及积雪时空分布特征受山系走向、山势高低、水汽来源及天气特征等因素影响^[17]。天山是影响新疆乃至中国西部地区气候和生态环境的重要天然屏障,也是新疆最重要的河流发源地之一。

1.2 采用数据及处理

积雪数据: 基于研究精度的考虑,积雪数据使用源于美国国家冰雪产品数据中心(NSIDC)提供的 MOD10A2 的积雪产品,该产品可获取最大积雪像元数,同时使云量减为最少,且去云效果显著、数据获取方便^[18]。500 m 高分辨率的 MODIS 可见光通道观测得到的 8 d 合成积雪比例数据能更好地反映山地积雪的真实情况。本文选用 2001—2015 年的 MOD10A2 积雪产品,覆盖天山山区的影像有 4 幅,轨道号分别为 h23v04、h23v05、h24v04 和 h24v05 (每年有 46 期,其中数据缺失共计 4 期,不纳入统计分析)。

DEM 数据: 为研究不同海拔、不同坡向等地形条件下积雪覆盖率的大小,选用由美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量的公布于地理空间数据云的数字高程模型 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)。数据版本为修订版 V4.1 版,空间分辨率为 90 m。

气象资料: 气象资料来自于国家气象数据网(<http://data.cma.cn/>),共选取了 16 个国家基本气象站(图 1) 2000—2014 年的年气温、年降水资料。

数据预处理: 借助 EOS/MODIS 数据中心提供软件 MRT(MODIS Reprojection Tool)对 MOD10A2 数据

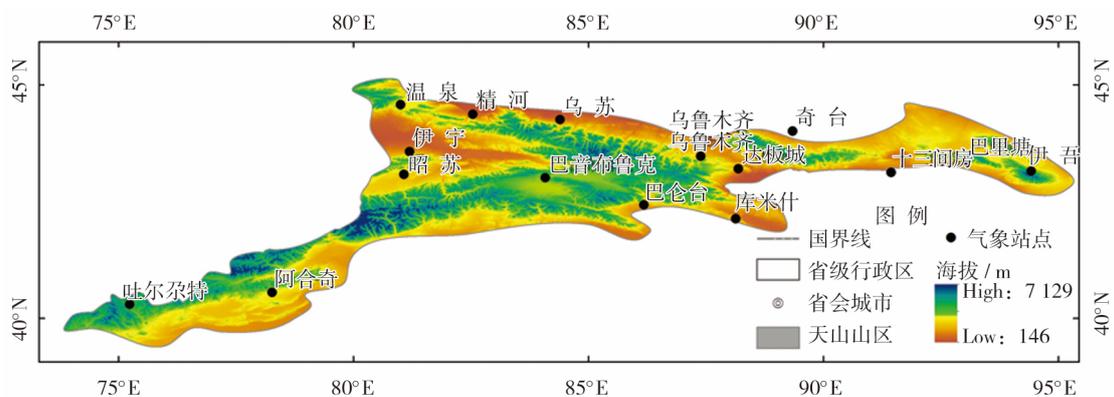


图 1 研究区概况与气象站的分布

Fig. 1 Study area and distribution of meteorological stations

(备注:中国地图 1:4 200 万,来自国家测绘地理信息局标准地图服务网站 <http://bzdt.nasg.gov.cn/8080>)

进行投影转换与拼接,将坐标系统转换为地理坐标 WG84,投影转换为 Albers 投影,同时为便于进一步分析,采用最邻近法(Nearest neighbor)对数据进行重采样,分辨率与 SRTM 数据一致。将 DEM 数据重采样为 500 m,重投影为和 MOD10A2 参数一致的 Albers 投影。积雪数据提取:将处理后的数据导入 ArcGIS 软件中,利用天山山区的矢量边界进行裁剪,然后根据 MOD10A2 产品编码及其意义,把编码为 200(snow) 归为积雪,其余归为无雪。已有相关研究对所用遥感数据精度进行验证,平均积雪识别率达 87.3%^[19]。提取并统计研究区年际、年内以及不同海拔、坡向的积雪像元数,用加权平均计算获取相应的积雪面积。

2 结果分析

2.1 积雪面积年内变化特征

将 2001—2015 年 15 a 内每月积雪面积覆盖的平均值作为当月的积雪面积,得到年内 12 个月的积雪面积资料,进而分析中国天山地区积雪面积的年内变化特征。天山山区积雪覆盖面积年内呈单峰变化趋势,如图 2 所示。1 月积雪面积最大为 $20.42 \times 10^4 \text{ km}^2$,7 月最小仅为 $1.92 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

积雪面积最大的 3 个月出现在冬季,均超过 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$,其次是 3 月、10 月和 11 月,积雪面积分别为 $13.69 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $10.62 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $14.39 \times 10^4 \text{ km}^2$,其余月均小于 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。年内积雪变化过程为:积雪在 9 月开始积累,11、12 月积雪面积快速增大直至次年 1 月达到峰值,2 月积雪开始消融,3 月之后随着春季气温回暖,积雪加速消融,面积迅速减少,7 月达到最低值。

2.2 积雪面积年际变化特征

对天山山区 2001—2015 年 15 a 的每 8 d 合成

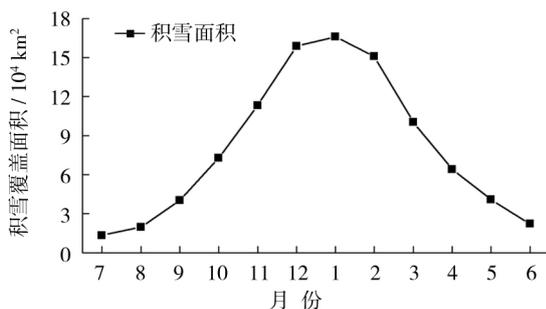


图 2 天山山区积雪覆盖面积年内变化

Fig. 2 Monthly snow cover in the Tianshan Mountains

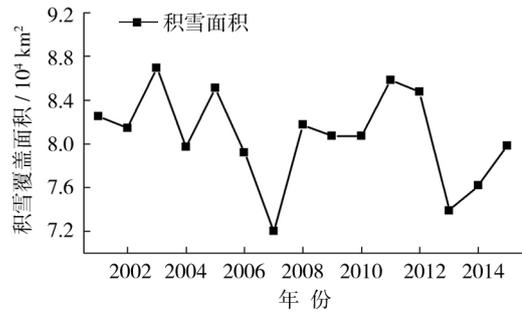


图 3 天山山区积雪覆盖面积年际变化图

Fig. 3 Variation of annual snow cover in the Tianshan Mountains

积雪覆盖面积进行统计,分析积雪覆盖面积变化特征(图 3),结果表明:天山山区积雪覆盖面积从 2001—2015 年整体上呈减少趋势,且年际波动幅度较大,多年平均积雪面积约为 $8 \times 10^4 \text{ km}^2$,占研究区总面积的 25% 左右。2003 年出现 15 a 间积雪面积最大值,为 $8.69 \times 10^4 \text{ km}^2$,2007 年出现最小值,仅为 $7.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。2001—2007 年积雪面积为明显的减少趋势,从 2001 年的 $8.25 \times 10^4 \text{ km}^2$ 减少到 2007 年的 $7.20 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均每年减少 $0.15 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。2008—2012 年间积雪面积有所增减,从 $8.18 \times 10^4 \text{ km}^2$ 波动上升到 $8.47 \times 10^4 \text{ km}^2$,2013 年下降到 $7.39 \times 10^4 \text{ km}^2$,2014 年、2015 年积雪面积略微增长。与 2001 年相比,2015 年积雪覆盖面积缩减了约 $0.27 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。通过比较分析 2001 年与 2015 年的年积雪覆盖图发现,中天山积雪覆盖面积变化较小,西天山积雪面积减少最多。天山南坡积雪覆盖面积变化较北坡大,而且高海拔地区积雪面积减小明显。

从季节角度分析,春、秋季积雪面积年际波动较大,但没有明显的增减趋势。多年平均积雪面积秋季比春季多 $0.57 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。夏季积雪主要分布在高海拔地区,覆盖面积少且变率小,平均为 $1.83 \times 10^4 \text{ km}^2$;冬季积雪面积较大,多年平均为 $15.80 \times 10^4 \text{ km}^2$,且呈明显的下降趋势,下降幅度为 $823 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。冬季积雪面积对天山山区年内积雪覆盖贡献率可达 45%。由此可以推断,天山山区多年积雪面积的变化主要受冬季积雪面积变化的影响。

对天山地区 15 a 间每 8 d 合成影像的最大和最小积雪覆盖率进行统计(图 4),发现天山地区年积雪覆盖率最大范围为 75%~53%,出现时间多为 1、12 月,2003 年最大积雪覆盖率为 61.9%,出现在 3

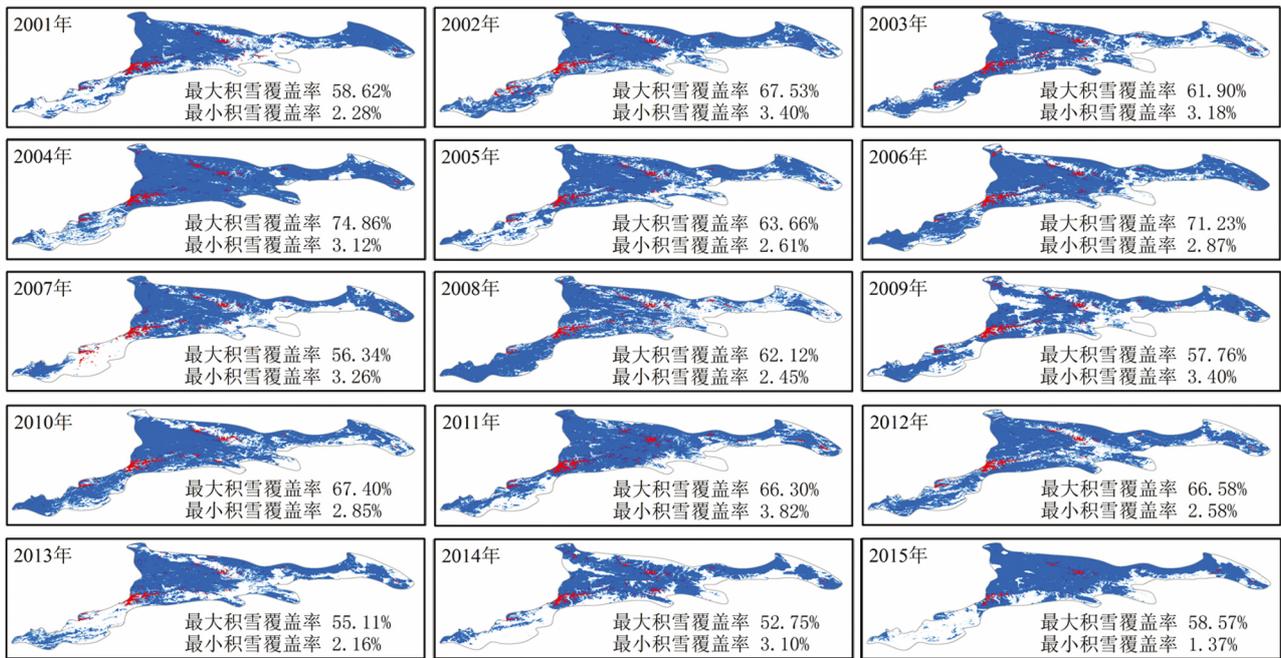


图4 2001—2015年中国天山最大、最小积雪覆盖率

Fig.4 Maximum and minimum snow cover fraction from 2001 to 2015 in Tianshan Mountains.

月6日 2014年最大积雪覆盖率为52.8%，出现在11月9日；最小覆盖率范围为1%~4%，出现时间为7、8月 2003年最小积雪覆盖率为3.2%，出现在9月6日 2004年最小积雪覆盖率为3.1%，出现在6月18日。积雪覆盖率最大值的波动比最小值的波动更加剧烈，且呈下降趋势，说明冬季降雪变率较大，夏季积雪覆盖率变化稳定。

2.3 积雪面积海拔高程变化

天山山脉绵延，山体高大，复杂的地形影响区域内积雪面积的分布状况。为了分析积雪覆盖面积随海拔高程的变化，将研究区按照不同的海拔高度划分为5大高程带，分别为海拔小于1500m，1500~2500m，2500~3500m，3500~4500m以及海拔4500m以上，通过ArcGIS处理积雪数据，统计得到天山山区15a来各海拔积雪覆盖(图5)。总体上，该区域积雪覆盖率随着海拔的上升而逐渐增大，各高程带内积雪覆盖率年际变化较小，但不同高度带的积雪覆盖率差异明显。海拔低于1500m区域由于山麓地带地形抬升不够且降水形式多以降雨为主，积雪覆盖率低于10%，是积雪覆盖面积变率最大区；海拔1500~2500m区域积雪覆盖率介于11%~17%，积雪覆盖率的变化较小；海拔2500~3500m山腰区域水汽集聚，气温骤降，多降雪天气，积雪覆盖率开始变大，平均达到20%；海拔3500

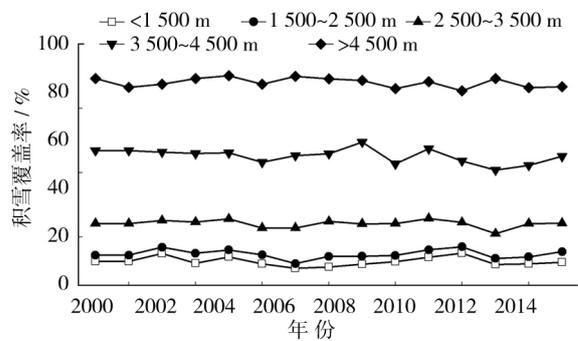


图5 天山山区不同海拔高程积雪覆盖率

Fig.5 Snow coverage at different elevations in the Tianshan Mountains

~4500m区域积雪覆盖率有很大的上升，平均介于41%~50%；海拔高于4500m以上区域积雪面积最小，但积雪覆盖率平均可达70%，为常年稳定积雪区。

2.4 积雪面积坡向变化

山体坡向对气温和降水有很大影响，迎风坡受暖湿气流影响，降水量大，气流过山体到达背风坡水汽含量减少，降水量少，因此迎风坡积雪面积大于背风坡。在ArcGIS软件中将研究区DEM数据按照方位角重分类为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(202.4°~247.5°)、西坡(247.5°~292.5°)以及西北坡(292.5°~337.5°),然后提取各坡向的积雪像元,进行积雪覆盖率计算并统计(图6)。

结果表明:天山山区不同坡向积雪覆盖率有明显差异,西北坡、西坡、北坡、东坡以及东北坡积雪覆盖率比西南坡、东南坡、南坡积雪覆盖率高。其中,西北坡的覆盖率最高达到25%,西坡、北坡、东坡和东北坡积雪覆盖率为22%左右,西南坡和东南坡覆盖率对较低在18%左右,南坡积雪覆盖率最低,仅为16%。

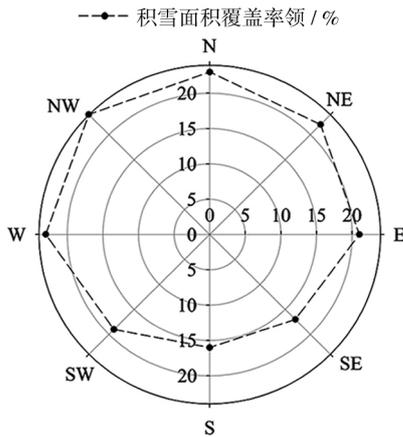


图6 天山山区各坡向积雪覆盖率

Fig.6 Snow coverage at different aspects in the Tianshan Mountains

3 成因分析

气温和降水是描述气候变化的两个主要因子,了解研究区积雪与气候的相互关系,主要是了解积雪对气温和降水的敏感度。气温是维持积雪的重要因素,其高低直接影响积雪消融;降水尤其是冬季降雪的多寡直接影响积雪面积的大小。将天山山区近

15 a 的积雪面积与同期的气温、降水数据进行相关性分析,结果显示积雪面积与平均气温呈显著负相关($R=0.77$),则气温升高,积雪面积减小。积雪面积与降水量的相关性较小。

近年来天山山区气温呈上升趋势,气温倾向率为 $0.039^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,积雪覆盖面积从2001—2015年整体上呈减少趋势(图7a)。2003年年均气温低至 5.4°C ,积雪覆盖面积则出现15 a 来最大值,为 $8.69\times 10^4\text{ km}^2$ 。2004年气温比2003年高 0.8°C ,积雪覆盖面积则比2003年小 $0.72\times 10^4\text{ km}^2$ 。2007年出现天山山区近15 a 来年均最高温 6.6°C ,同年积雪覆盖面积则出现15 a 来最小值,仅为 $7.20\times 10^4\text{ km}^2$ 。2008—2012年年均气温持续下降,同期积雪覆盖面积则从 $8.18\times 10^4\text{ km}^2$ 波动上升到 $8.47\times 10^4\text{ km}^2$ 。2013年年均气温骤增至 6.4°C ,同年积雪覆盖面积则下降到 $7.39\times 10^4\text{ km}^2$ 。由此发现,天山山区近年来积雪覆盖面积受气温变化的影响很大,气温升高是导致积雪覆盖面积减小的主因。

天山山区的年降水量与积雪覆盖面积并没有明显的对应关系(图7b)。2003年积雪面积最大为 $8.69\times 10^4\text{ km}^2$,同年降水为240 mm,并不是近年降水最多年;2007年积雪面积最小仅为 $7.20\times 10^4\text{ km}^2$,同年降水却高于多年平均降水量为236 mm;2008年降水量为近15 a 最小,仅为162 mm,同年积雪面积却高于多年平均值为 $8.18\times 10^4\text{ km}^2$ 。2010年降水量是15 a 来最大值,达到250 mm,同年积雪覆盖面积却保持多年平均值为 $8.07\times 10^4\text{ km}^2$ 。虽然天山山区降水量的大小不直接影响积雪覆盖面积,但是15 a 降水量变化趋势与积雪覆盖面积变化趋势一致,均呈下降趋势。

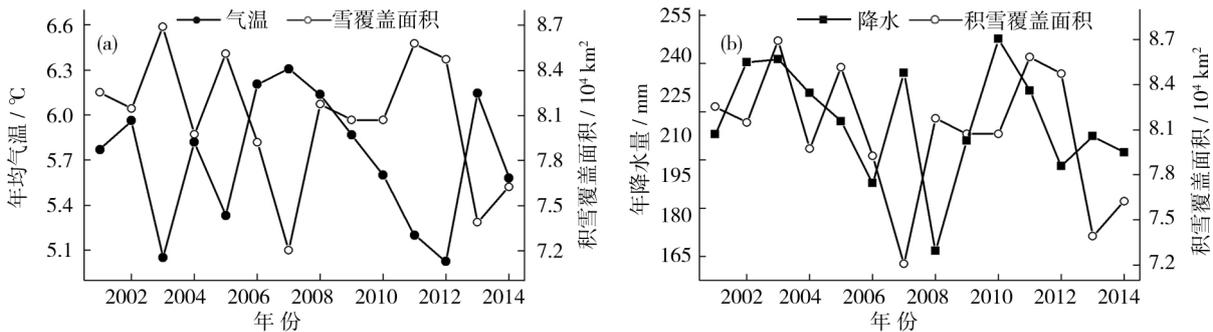


图7 积雪面积与(a)气温和(b)降水的关系

Fig.7 Snow area relationship with (a) the temperature and (b) the rainfall

4 讨论

曾小箕等人^[12]利用 MODIS 数据和气温降水数据对土库曼斯坦南部山区积雪动态变化进行研究,得出 MODIS 数据适应中亚山区积雪监测方法,积雪面积最大出现在 1 月,山区积雪面积随气温的降低、降雨量的减少而增加。刘金平等^[11]对中亚干旱区 2001—2013 年积雪时空分布、变化趋势分析得出,中亚干旱区冬季积雪覆盖的比例最大,范围为 54.4%~76.4%,夏季最小仅为 0.9%~1.5%;平原区是积雪的主要分布区;从整体来看中亚干旱区东南部及哈萨克斯坦中西部在 13 a 间冬季积雪日具有减少趋势;在平原和山区积雪覆盖率都具有随纬度的升高而增加的趋势。窦燕等人^[7]对中国天山山区积雪时空分布特征进行了研究,得出 1~2 月面积最大,7~8 月面积最小,10 月中旬积雪开始建立,冬季积雪所占比例最大;2000—2006 年积雪面积年际变化略呈上升趋势;天山中断积雪最多,西段最少;从积雪频率来看存在 5 个高值区,覆盖频率高达 70% 左右;天山山区平均雪线海拔在 2 875 m。娄梦筠等人^[9]对新疆积雪时空分布特征进行了研究,得出冬季积雪面积所占比例最大,夏季最小;2002—2011 年新疆积雪面积总体上呈现减少趋势;空间分布极不均匀,北疆多于南疆;永久性积雪主要分布在海拔 5 000~6 000 m。本文研究的中国境内天山山区积雪面积年内变化过程与前人研究中亚地区的相似,1 月面积最大,7 月面积最小,积雪面积随海拔升高而增大;区别在于天山山区的积雪从 9 月中旬开始建立,西北坡的积雪覆盖率最高。对天山山区最大和最小积雪覆盖率进行系统的统计和分析,积雪覆盖率最大值的波动比最小值的波动更加剧烈,且呈下降趋势,冬季降雪变率较大,夏季积雪覆盖率变化稳定。

5 结论

本文运用 MODIS10A2 的积雪产品,通过几何校正、去云预处理,应用归一化差分积雪指数算法等获取了整个中国境内天山山区较长时间序列(2001—2015 年)的积雪数据,通过分析积雪年内、年际、空间变化特征以及与气温降水的关系,得出以下结论:

(1) 2001—2015 年天山山区积雪覆盖面积整体

上呈减少趋势,且年际波动幅度较大;2003 年出现最大值,2007 年出现最小值,与 2001 年相比,2015 年积雪面积减少了 $0.27 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。年内呈单峰变化趋势,1 月积雪面积最大,7 月最小;积雪从每年 9 月开始建立,至次年 1 月达峰值,7 月为最低值。夏季积雪覆盖面积少且变率小;冬季积雪覆盖面积最大且呈明显的下降趋势,下降幅度为 $823 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(2) 系统的统计了天山山区每年积雪最大和最小面积,年积雪覆盖率最大范围为 75%~53%,出现时间多为 12、1 月,最小覆盖率范围为 1%~4%,出现时间多为 7、8 月,积雪覆盖率最大值的波动比最小值的波动更加剧烈。

(3) 天山山区的积雪覆盖率随着海拔的升高而增大。海拔低于 1 500 m 区域积雪覆盖率低于 10%,是积雪覆盖面积变率最大区;海拔高于 4 500 m 以上区域积雪面积最小,但积雪覆盖率平均可达 70%,为常年稳定积雪区。各坡向积雪覆盖率差异明显,西北坡的覆盖率最高达到 25%,南坡积雪覆盖率最低,仅为 16%。

(4) 近几年来天山山区呈升温趋势,相关性分析表明积雪面积与平均气温呈显著负相关($R = 0.77$),与降水量的相关性较小。气温升高是导致积雪覆盖面积减小的主要原因,年积雪覆盖面积变化趋势与年降水量变化趋势一致,均呈下降趋势。

本文仅从年际、年内、季节以及不同海拔高度和坡向探讨了天山山区积雪面积的变化,但积雪消融还受坡度、风速、地温等因素的影响;所选取的气象站点在一定程度上并不能完整的反映天山山区的气温变化,这是下一步需要深入研究的课题。

参考文献(References)

- [1] 王亚军,陈发虎,勾晓华,等.黑河 230 a 以来 3~6 月径流的变化[J].冰川冻土,2004,26(2):202-206. [WANG Yajun, CHEN Fahu, GOU Xiaohua, et al. March-June runoff of Heihe River since 1770 reconstructed from tree-ring date [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(2):202-206.]
- [2] 李培基,米德生.中国积雪的分布[J].冰川冻土,1983,5(4):9-18. [LI Peiji, MI Desheng. Distribution of snow cover in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1983, 5(4):9-18.]
- [3] 李培基.近 30 年来我国积雪量变化的初步探讨[J].气象学报,1990,48(4):433-437. [LI Peiji. A preliminary study of snow mass variations past 30 years in China [J]. Acta Meteorologi-

- ca Sinica, 1990, 48(4): 433-437.]
- [4] BRODZIK M J, ARMSTRONG R L, WEATHERHEAD E C, et al. Regional trend analysis of satellite-derived snow extent and global temperature anomalies [C]//AGU Fall Meeting. AGU Fall Meeting Abstracts, 2006.
- [5] 穆振侠, 姜卉芳, 刘丰, 等. 2001—2008 年天山西部山区积雪覆盖及 NDVI 的时空变化特征 [J]. 冰川冻土, 2010, 32(5): 875-882. [MU Zhengxia, JIANG Huifang, LIU Feng, et al. 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.]
- [6] 车涛, 李新. 1993—2002 年中国积雪水资源时空分布与变化特征 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(1): 64-67. [CHE Tao, LI Xin. Spatial distribution and temporal variation of snow water resources in China during 1993—2002 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(1): 64-67.]
- [7] 冀燕, 陈曦, 包安明, 等. 2000—2006 年中国天山山区积雪时空分布特征研究 [J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 28-34. [DOU Yan, CHEN Xi, BAO Anming, et al. Study of the temporal and spatial distribute of the snow cover in the Tianshan Mountains, China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(1): 28-34.]
- [8] 王增艳, 车涛. 2002—2009 年中国干旱区积雪时空分布特征 [J]. 干旱区研究, 2012, 29(3): 464-471. [WANG Zengyan, CHE Tao. Spatiotemporal distribution of snow cover in arid regions in China [J]. Arid Zone Research, 2012, 29(3): 464-471.]
- [9] 娄梦筠, 刘志红, 娄少明, 等. 2002—2011 年新疆积雪时空分布特征研究 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1095-1102. [LOU Mengyun, LIU Zhihong, LOU Shaoming, et al. Temporal and spatial distribution of snow cover in Xinjiang from 2002 to 2011 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1095-1102.]
- [10] 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. [ZHANG Wenbo, XIAO Pengfeng, FENG Xuezhi. 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.]
- [11] 刘金平, 包安明, 李均力, 等. 2001—2013 年中亚干旱区季节性积雪监测及时空变异分析 [J]. 干旱区地理, 2016, 39(2): 405-412. [LIU Jinping, BAO Anming, LI Junli, et al. Spatial and temporal characteristics of snow cover in arid area of Central Asia from 2001 to 2013 [J]. Arid Land Geography, 2016, 39(2): 405-412.]
- [12] 曾小箕, 丁建丽, 鄢雪英, 等. 基于 MODIS 数据的土库曼斯坦山区积雪监测 [J]. 干旱区地理, 2013, 36(4): 717-723. [ZENG Xiaoji, DING Jianli, YAN Xueying, et al. Snow monitoring using MODIS in Turkmenistan Mountains [J]. Arid Land Geography, 2013, 36(4): 717-723.]
- [13] 张连成, 胡列群, 李帅, 等. 基于遥感影像的雪线高程提取方法对比分析——以天山北坡为例 [J]. 干旱区地理, 2015, 38(4): 788-796. [ZHANG Liancheng, HU Liequn, LI Shuai, et al. Comparison of snow line elevation extraction method based on remote sensing image: A case of north slope of Tianshan Mountains [J]. Arid Land Geography, 2015, 38(4): 788-796.]
- [14] WANG Xianwei, XIE Hongjie, LIANG Tiangang. Evaluation of MODIS snow cover and cloud mask and its application in northern Xinjiang, China [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(4): 1497-1513.
- [15] 胡汝骥. 中国天山自然地理 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 1-14, 180-198. [HU Ruji. Physical geography of the Tianshan Mountains in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004: 1-14, 180-198.]
- [16] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨 [J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164. [SHI Yafeng, SHEN Yongping, LI Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in northwest China [J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 152-164.]
- [17] 仇家琪, 孙希华. 天山积雪初步研究 [J]. 干旱区地理, 1992, 15(3): 9-12. [QIU Jiaqi, SUN Xihua. Preliminary study on snow cover in the Tianshan Mountain [J]. Arid Land Geography, 1992, 15(3): 9-12.]
- [18] LI Baolin, ZHU Axing, ZHANG Yichi, et al. Glacier change over the past four decades in the middle Chinese Tianshan [J]. Journal of Glaciology, 2006, 178(52): 425-432.
- [19] 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. [HUANG Xiaodong, ZHANG Xuetong, LI Xia, et al. Accuracy analysis for MODIS snow product of MOD10A1 and MOD10A2 in northern Xinjiang area [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(5): 722-729.]

Spatio-temporal variation analysis of snow cover area of Tianshan Mountains in China using MODIS data

HE Hai-di¹, LI Zhong-qin^{1,2}, ZHANG Ming-jun¹

(1 College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2 State Key Laboratory of Cryospheric Science/Tianshan Glaciological Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Based on MODIS10A2 snow cover data from 2001 to 2015, the MODIS10A2 500 m resolution data were preprocessed through geometric correction and cloud effects elimination. The snow-cover area was extracted using normalized difference snow index (NDIS) algorithm and the comprehensive threshold discriminator in combination of DEM data and the temporal and spatial distribution characteristics of the snow cover in the Tianshan Mountains in China were analyzed. The results indicated as follows: (1) During the time period from 2001 to 2015, the snow cover area of Tianshan Mountains showed a decreasing trend and it was decreased by $0.27 \times 10^4 \text{ km}^2$ from 2001 to 2015. It showed a single peak distribution during a year with the peak in January and the least in July. The snow cover area in summer is small and its change rate year after year is also small. The snow cover area in winter is the biggest and it shows a downward trend year after year with an average annual decrease rate of 823 km^2 . (2) The maximum and minimum snow cover areas in Tianshan Mountain were calculated systematically. The year with the largest snow cover area was 2003 and the smallest 2007. The maximum snow coverage ratio ranges from 75% to 53% and it happened in December and January timeframe. The minimum ratio ranges from 1% to 4% which occurred in July and October timeframe. The fluctuation on the maximum snow coverage was more intense than that on the minimum. (3) The snow coverage ratio is increased gradually along the altitude with a value less than 10% below 1 500 m and a value of 70% above 4 500 m. The snow coverage ratio was changed with slope. It was higher in northwest, west, north and northeast slopes than in the southwest, south and southeast slopes. It was 25% on the northwest slope, 16% on the south slope. (4) In recent years, Tianshan Mountain area has shown a temperature rising trend. The correlation analysis demonstrated that the snow coverage, which is sensitive to climatic factors, and had a significant negative correlation ($R=0.77$) with the air temperature but was less relevant to the precipitation. Temperature rising is the main cause for the decrease of snow cover area. The annual snow cover area change showed a similar trend to the annual precipitation change, both were on a declining curve.

Key words: Tianshan Mountains in China; snow cover; MODIS10A2; spatiotemporal variation; climatic response