

文章编号: 1008-2786-(2018)1-088-09

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000305

天山胜利达坂地区积雪分布特征

赵静毅^{1,2,3}, 陈继^{1,3*}, 吴青柏¹, 李静¹, 侯鑫^{1,2,3}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院西北生态环境资源研究院 青藏高原北麓河冻土工程与环境综合观测研究站, 兰州 730000)

摘 要: 本研究利用天山胜利达坂地区 2014—2016 年 Landsat 系列卫星的 57 景 ETM+ 或 OLI 遥感影像, 基于 SNOMAP 算法提取研究区积雪面积, 并结合 DEM 数据研究了海拔高度、坡向和坡度对研究区积雪空间分布的影响。结果表明, 随着海拔的增加, 积雪覆盖率持续增加; 阴坡积雪覆盖率约是阳坡的 2~3 倍。进一步的一般线性模型 (GLM) 分析表明: 海拔、坡向和坡度均显著影响积雪的空间分布, 但各地形因子的影响程度在不同季节有所差异。在冬季 (12~2 月), 坡向是影响积雪覆盖率空间变异的主要地形因子, 贡献了积雪覆盖率总变异的 57%, 约是海拔的 2 倍, 坡度的 4.5 倍。对其他季节而言, 海拔是主要影响因子, 其次是坡向, 坡度的影响最小。

关键词: 积雪; 天山; 地形; 坡向; SNOMAP; GLM

中图分类号: P343, P429

文献标志码: A

积雪作为一种特殊的下垫面, 由于它的高反射率、低导热率等物理性质^[1]以及融雪水文效应, 使得其对地表的能量平衡以及水分循环产生重要影响^[2]。在干旱半干旱地区, 积雪融水是河流的重要补给方式之一, 融雪径流往往对相关地区河流的径流起到重要的调节作用^[3, 4]。同时积雪也是众多水文模型、气候模型的重要输入参数之一^[5, 6]。天山山系是我国西北干旱与半干旱区冰雪资源最为丰富的地区之一^[7, 8], 其冰雪资源分布, 尤其是季节性积雪的分布状况对南北疆的水资源利用、农牧业生产、交通运输、工程建设均有重要影响^[7, 8]。以往的监测研究表明, 天山胜利达坂属于季节性积雪多发的区域, 冬季稳定积雪期可达 140 天左右^[9]。积雪, 尤其是风吹雪, 是导致目前天山公路只能季节性通车的主要原因, 雪害已是天山公路最大的病害^[10-12]。

山区积雪具有显著的空间异质性, 且在不同的空间尺度和时间区间上, 影响积雪异质性的主要因子不同。山区冷季积雪的分布和变化主要受到地形的影响, 海拔、坡向和坡度通过改变局地小气候影响雪面融化和蒸发, 进而使得积雪分布表现出较强的空间异质性。相关研究表明^[13-21], 对山区积雪影响较大的地形因子有: 海拔高度、山坡的朝向、坡度、地表粗糙度和风吹雪对积雪的再分配作用等。在不同的区域, 这些因子对积雪分布的影响程度主要取决于当地的自然地理条件。地形条件对积雪的赋存条件有重要影响, 如坡度较大的坡面由于重力作用容易导致积雪下滑^[22], 而在某些地形起伏较小的山谷谷底位置, 有利于风吹雪的形成, 积雪覆盖率高。坡向、坡度结合起来往往可以影响某一坡面接受太阳辐射的多寡^[23, 24], 如果一定坡度的斜坡比其它坡面接收到的太阳辐射多, 该坡面上的积雪融化或者升

收稿日期 (Received date): 2017-04-09; **改回日期** (Accepted date): 2017-08-17

基金项目 (Foundation item): 国家重点研发计划 (2016YFC0801803); 国家自然科学基金项目 (41101065); 冻土工程国家重点实验室基金项目 (SKLFSE-ZT-34)。[National Basic Research Priority Program of China (2013CBA01803); National Natural Science Foundation of China (41101065); State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering Foundation (SKLFSE-ZT-34)]

作者简介 (Biography): 赵静毅 (1989-), 男, 河南焦作人, 博士研究生, 主要研究方向: 寒区工程与环境。[Zhao Jingyi (1989-), male, born in Jiaozuo, Henan Province, Ph.D. candidate, research on engineering and environment in cold region.] E-mail: zhaojingyi@lzb.ac.cn

* **通讯作者** (Corresponding author): 陈继 (1977-), 男, 教授, 研究方向: 寒区工程与环境。[Chen Ji (1977-), male, professor, mainly engaged in engineering and environment in cold region.] E-mail: chenji@lzb.ac.com

华的也最快,积雪的赋存状况也最差。

上述对山区积雪分布特征及其规律的研究虽然得到了一些定性的结论^[13-21],但缺乏定量区分海拔、坡向和坡度对积雪覆盖率空间异质性影响的研究。本文选取天山典型中高山区积雪为研究对象,利用研究区 30 m 分辨率的多时相 ETM + 或 OLI 影像及 DEM 数据,分析积雪覆盖率的年内时空变化特征。同时,基于一般线性模型(GLM),定量区分海拔、坡向和坡度对研究区积雪覆盖率空间变异的贡献,确定不同季节影响积雪覆盖率空间变异的主导地形因子。

1 研究区概况及影像数据来源

1.1 研究区概况

本文研究区域经纬度范围为 $86.65^{\circ} \sim 87.99^{\circ} \text{E}$, $42.90^{\circ} \sim 43.15^{\circ} \text{N}$, 位于天山东段 216 国道两侧 5 ~ 20 km 范围内,总面积约 792 km²,属于天山东段典型中高山区,发育有乌鲁木齐河、乌拉斯台河和阿拉沟河,海拔介于 2546 ~ 4461 m 之间,平均海拔约 3450 m 左右,研究区位置及地形见图 1。研究区域多年平均降水量为 448.5 mm,年均气温为 -5.1°C (大西沟气象站 3540 m)^[25-27],植被类型主要是高山草甸,研究区内山地多年冻土发育,山地冰川广泛分布,共有大小冰川 92 条^[28],包括著名的乌鲁木齐河源 1 ~ 6 号冰川。

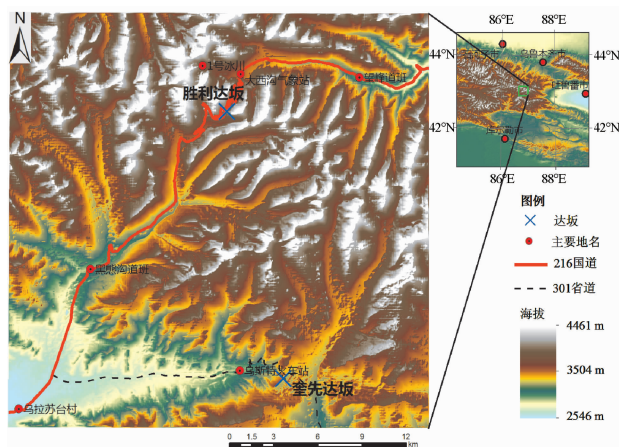


图1 研究区位置及地形图

Fig. 1 Location of the study area

根据研究区内大西沟气象站的多年资料,年降雪量占年降水量的 80 ~ 90%,除夏季 7 ~ 8 月份外,其他月份降水多表现为降雪,5 月和 6 月降雪多为

瞬时积雪,存留时间一般在两日以内。在秋季(9 ~ 11 月上旬)和初春(4 月)经常会有 $\geq 5 \text{ mm}$ 的降雪出现,形成不稳定积雪,存留时间一般在一周以上^[26,27]。由于冬季中山带逆温层的出现,整个冬季降水量一般小于 10 mm。与西天山地区整个冬季都被厚层积雪覆盖相比,在本研究区只有部分高海拔冰川区或山谷区及部分风吹雪严重区发育不稳定性积雪或整个冬季均有持续稳定积雪^[8-9]。

1.2 遥感影像来源

本文选取多时相的 Landsat7 - ETM + 影像和 Landsat8 - OLI 影像,影像的空间分辨率为 30 m,同一传感器对同一区域的拍摄周期为 16 天,影像的轨道号(PATH)为 143,行号(ROW)为 30,成像日期为 2014 年 1 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日,选取云量覆盖较少的影像,共 57 景。以上数据通过美国地质勘查局网站 (<http://glovis.usgs.gov>) 下载得到。由于 ETM + 影像存在条带丢失的问题,在预处理前,需要先对其进行条带修复,OLI 影像无须此操作,之后对数据进行地形校正、辐射定标和 FLAASH 大气校正,最后得到研究区各影像的地表反射率数据。

DEM 数据为 ASTER - GDEM 数据,空间分辨率为 30 m,投影信息为 UTM/WGS84,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://www.gscloud.cn>)。DEM 数据的处理主要包括拼接、裁剪和投影转换等。

2 方法介绍

2.1 地形信息提取方法

研究区的地形信息提取主要是根据研究区的 DEM 数据用 ArcGIS 软件来实现高程带分类、坡度分类和坡向分类。将高程带主要按照 200 m 间隔进行分带,共分为 9 个高度带,分别为 2546 ~ 2800、2800 ~ 3000、3000 ~ 3200、3200 ~ 3400、3400 ~ 3600、3600 ~ 3800、3800 ~ 4000、4000 ~ 4200 和 4200 ~ 4461 m。将坡度主要分为 5 类,分别为 $0 \sim 10^{\circ}$ 、 $10 \sim 20^{\circ}$ 、 $20 \sim 30^{\circ}$ 、 $30 \sim 40^{\circ}$ 和 $> 40^{\circ}$ 。将坡向划分为 8 个坡向,以 0° 为正北坡向,顺时针依次划分为北坡 ($0 \sim 22.5^{\circ}$ 或 $337.5 \sim 360^{\circ}$)、东北坡 ($22.5 \sim 67.5^{\circ}$)、东坡 ($67.5 \sim 112.5^{\circ}$)、东南坡 ($112.5 \sim 157.5^{\circ}$)、南坡 ($157.5 \sim 202.5^{\circ}$)、西南坡 ($202.5 \sim 247.5^{\circ}$)、西坡 ($247.5 \sim 292.5^{\circ}$) 和西北坡向 ($292.5 \sim 337.5^{\circ}$)。

2.2 积雪覆盖面积提取方法

在本研究中,将结合 Landsat 卫星数据多波段特点,采用 SNOMAP 算法来提取积雪面积,该算法的核心是归一化差分积雪指数(Normalized Difference Snow Index, NDSI)^[29-31]。NDSI 阈值提取法的主要是利用积雪与云在可见光波段反射率的相似性和短波红外波段反射率的差异性,将积雪在可见光区的强反射波段($<1\ \mu\text{m}$)和在短波红外波段的低反射波段($1.5\sim1.7\ \mu\text{m}$)进行归一化处理,以突出积雪的特性。具体计算公式如下^[30]:

$$NDSI = (R_a - R_b) / (R_a + R_b)$$

式中 R_a, R_b 分别是对应波段的反射率, a, b 分别为对应的遥感影像的可见光波段号和短波红外波段号,分别对应 ETM+ 影像的第 2 波段和第 5 波段与 OLI 影像的 3 波段和 6 波段。为了确定研究区 NDSI 阈值的取值,首先采用监督分类和目视解译相结合的方法得到的较为“真实”的积雪提取结果图,然后将其与采用 SNOMAP 方法得到积雪提取结果图进行对比,综合多个对比结果,发现当选取 0.4 作为 NDSI 的阈值取值,总体精度可以达到 95% 以上,故选取 SNOMAP 方法中的 NDSI 的取值取 0.4。

另外,由于积雪和水体在可见光和短波红外波段的反射特征相似,会造成水体可能会被误判为积雪,为了排除水体的影响,SNOMAP 算法利用水体在近红外波段的反射率比积雪低这一特点,另外加入一个判别因子, $R_c \geq 0.11$, 其中 R_c 为 ETM+ 影像的第 4 波段或 OLI 影像的第 5 波段的反射率。只有当满足 $NDSI \geq 0.4$ 且 $R_c \geq 0.11$ 时,该像元才会被识别为积雪^[32]。以上方法主要通过遥感图像处理软件 ENVI 来实现。

2.3 统计分析方法

本文采用一般线性模型(General linear model, GLM)评估地形因子对积雪覆盖率空间变异的贡献。该模型通过将因变量的总体变异分解成由各自变量以及误差引起的变异,然后根据每一部分对总体变异的贡献率确定每一个自变量对因变量的影响程度^[33, 34]。模型构建采用 SAS 9.2 中的 GLM 过程步。

3 积雪分布特征

3.1 不同季节积雪分布特征

从 2014~2016 年各个月份积雪覆盖率均值统

计图(图 2-a),可以发现:积雪覆盖率最高的月份在冷暖季交替的时期,11 月份和 4 月份的积雪覆盖率最高,分别达到 70% 和 60%;其次是冬季,积雪覆盖率普遍超过 50%;积雪覆盖率最低的时期是夏季月份, $<5\%$,季节性积雪仅分布在冰川表面。

3.2 不同地形条件下积雪分布特征

从各海拔高度带的年均积雪覆盖率变化图(图 2-b)可以看出:研究区的积雪覆盖率有很明显的随海拔高度的增加而增加的趋势。进一步分析发现,在不同时间段,不同坡向上,积雪覆盖率也具有高程特征,均随海拔高度的增加而增大(表 1)。

年均积雪覆盖率与坡向统计(图 2-c)表明,研究区积雪分布的坡向差异明显,偏北坡向的积雪覆盖率要明显大于偏南的坡向,东西坡向积雪覆盖率介于南坡和北坡之间。就各个海拔高度带而言,北坡积雪覆盖率都要大于南坡,但是低海拔区域(2546~3000 m)和高海拔区域($>4000\text{ m}$)的南、北坡积雪覆盖率差异要明显小于中间海拔高度区域(3000~4000 m)(表 1)。

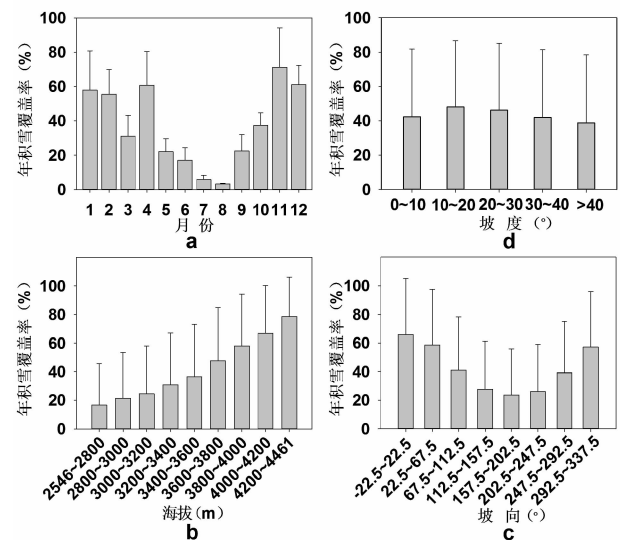


图 2 积雪覆盖率时空变化统计

Fig. 2 Temporal and spatial variation of snow cover

图 2-d 表达了年均积雪覆盖率与坡度之间的关系,从整个年度来看,积雪覆盖率的坡度差异性较小。但是就某一特定时间而言,坡度也会对积雪覆盖率产生影响,且在不同朝向的坡面上坡度的影响程度也不同。以 2014 年 11 月 19 日影像(图 3-d)为例,在坡度较小($\leq 20^\circ$)坡面的积雪覆盖率为 82%,坡度较大($> 20^\circ$)的坡面为 62%,缓坡区域的积雪覆盖率显著大于陡坡地区。进一步分析此影

像,可以发现坡度对积雪覆盖率影响主要表现在偏南坡面上,东西坡向次之,对北坡积雪覆盖率的影响最小。

3.3 地形因子对积雪分布空间异质性的贡献

本研究将积雪覆盖率作为因变量,高程、坡向、坡度、坡向与坡度的交互作用以及其他误差作为自变量,利用一般线性模型(GLM)计算出每种自变量对总体变异的贡献率,分析各地形因素对积雪覆盖率变异的影响程度。

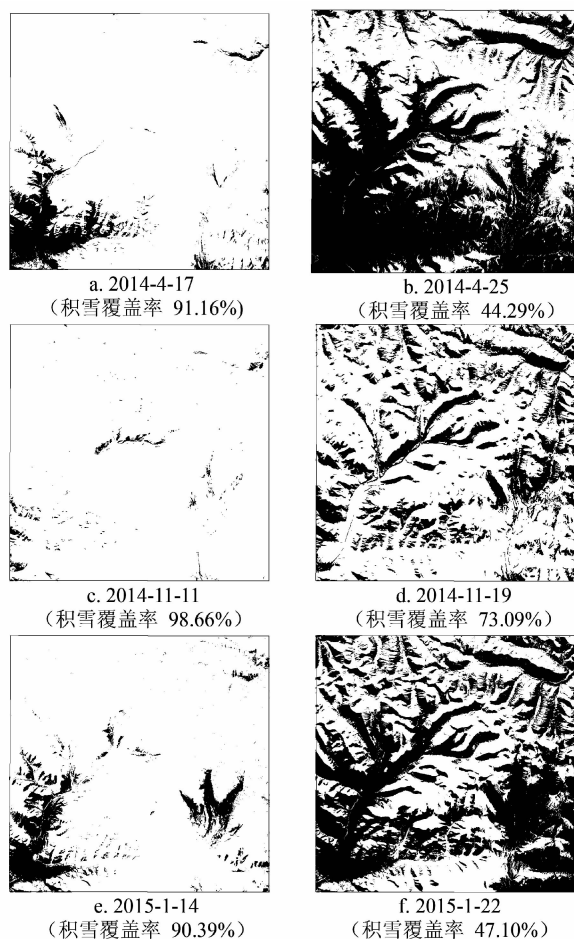


图3 降雪后第3天和第11天积雪覆盖率

Fig. 3 Snow cover on the 3rd and 11rd day after snowfall

结合大西沟气象站2014、2015年日气温、日降水资料和现有遥感数据,选取了6副不同季节降雪后第3天(2014-04-17、2014-04-25、2014-11-11和2015-01-14)和第11天(2014-11-19和2015-01-22)的连续影像(图3)进行单幅影像分析,结果表明,不同影像中海拔、坡向、坡度及坡向和坡度的交互作用对积雪覆盖率的影响不同(图4)。4月的两幅影像都成像于降雪后第3天,虽然

两幅影像的积雪覆盖率明显不同,但各地形因子对积雪覆盖率变化的贡献基本一致,海拔对积雪覆盖率空间异质性的贡献率在85%~87%,坡向贡献率平均为12%~15%,其他因素不足5%。对比11月的两幅影像后发现,降雪后初期,积雪分布主要受海拔影响,贡献率在50%左右,坡向和坡度分别为18%和17%。在降雪后第11天,海拔的贡献率降至5%以下,坡向贡献率增至63%,坡度贡献率增至29%。1月份(冬季)两幅影像则表明,降雪后初期,影响积雪分布的主要因素是海拔,坡向次之,在降雪第11天后,坡向占主导,海拔次之。

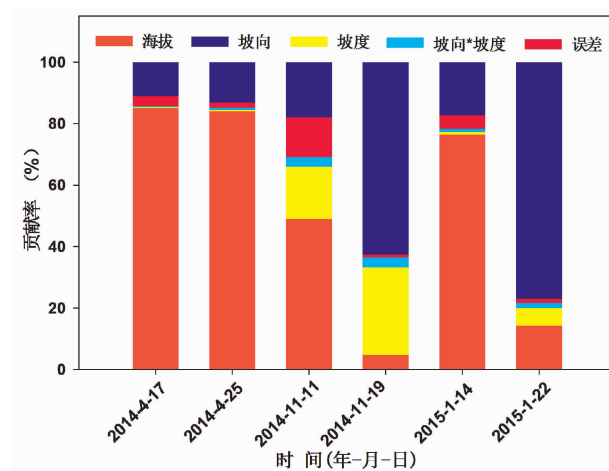


图4 地形因子对积雪覆盖率变化的影响

Fig. 4 Contribution rates of terrain factors to snow cover of single image

对每个月平均积雪覆盖率分析后,发现对积雪覆盖率空间变异贡献最大的地形因子是海拔和坡向,两者对积雪覆盖率空间变化的贡献率之和在80%以上(图5),坡度的贡献一般都小于10%。进一步分析发现,影响积雪覆盖率的主导地形因子随

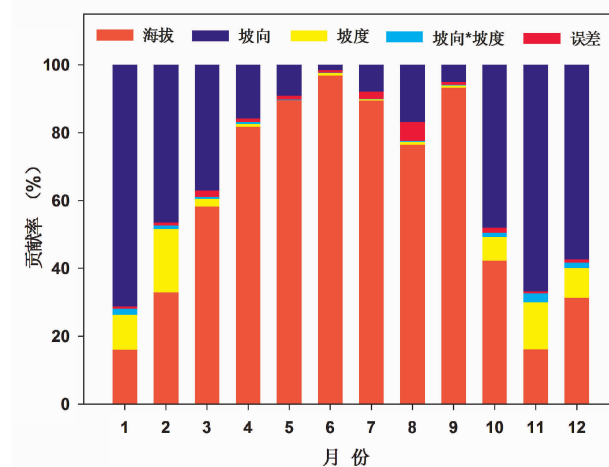


图5 各因子对月平均积雪覆盖率空间变化的影响

Fig. 5 Contribution rates of terrain factors to monthly annual snow cover

表 1 积雪覆盖率随季节、海拔高度和坡向变化统计
Tab. 1 Snow coverage rate changes with the season, altitude and aspect

季 节	坡 向	积雪覆盖率(%)								
		2546~2800 m	2800~3000 m	3000~3200 m	3200~3400 m	3400~3600 m	3600~3800 m	3800~4000 m	4000~4200 m	4200~4461 m
春季	北	8.26 ± 8.51	17.5 ± 13.25	35.09 ± 21.45	55.69 ± 27.03	68.76 ± 25.34	84.44 ± 11.72	94.36 ± 3.68	95.14 ± 3.19	98.09 ± 1.32
	东	1.73 ± 1.57	6.04 ± 6.14	10.46 ± 11.14	18.22 ± 17.38	27.97 ± 23.00	45.65 ± 26.53	64.07 ± 21.82	79.57 ± 12.41	92.94 ± 4.82
	南	0.57 ± 0.43	3.32 ± 3.84	6.32 ± 7.65	11.01 ± 11.44	18.10 ± 13.84	27.52 ± 16.62	39.14 ± 22.77	55.27 ± 24.89	68.41 ± 20.85
	西	2.78 ± 2.76	8.71 ± 9.1	11.85 ± 12.9	16.92 ± 17.16	26.95 ± 21.14	43.62 ± 23.17	61.53 ± 20.38	72.84 ± 17.47	88.25 ± 8.84
夏季	北	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.01	1.00 ± 1.26	9.82 ± 13.78	30.75 ± 33.41	60.64 ± 27.18	80.07 ± 15.39	92.47 ± 6.92
	东	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.05 ± 0.03	0.80 ± 1.12	6.87 ± 8.71	22.16 ± 24.94	42.02 ± 36.12	63.82 ± 28.29
	南	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.31 ± 0.43	0.43 ± 0.53	2.10 ± 2.46	9.55 ± 13.40	25.70 ± 35.96	38.31 ± 43.14	58.00 ± 33.59
	西	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.22 ± 0.22	3.19 ± 4.48	14.00 ± 19.32	32.60 ± 34.75	49.44 ± 36.04	79.14 ± 18.21
秋季	北	36.99 ± 32.63	45.54 ± 36.18	54.51 ± 39.47	58.78 ± 39.08	69.26 ± 31.52	84.60 ± 15.05	94.59 ± 2.96	96.09 ± 1.30	98.49 ± 0.18
	东	19.64 ± 26.94	22.45 ± 28.11	21.01 ± 27.35	25.82 ± 27.99	29.18 ± 27.44	43.57 ± 25.31	62.52 ± 17.10	78.07 ± 8.52	88.76 ± 4.39
	南	9.58 ± 13.53	11.59 ± 16.12	13.06 ± 17.84	16.46 ± 19.17	19.59 ± 19.61	27.93 ± 17.78	38.98 ± 12.85	51.51 ± 13.03	62.23 ± 13.76
	西	16.17 ± 20.29	24.94 ± 24.38	27.39 ± 24.59	30.90 ± 26.40	35.60 ± 23.67	47.70 ± 17.60	66.40 ± 7.31	77.97 ± 2.47	87.90 ± 2.58
冬季	北	56.55 ± 10.44	73.55 ± 6.80	80.73 ± 4.81	89.37 ± 3.80	92.98 ± 2.15	94.94 ± 1.39	96.29 ± 0.95	96.25 ± 1.49	97.78 ± 0.70
	东	30.63 ± 6.57	40.06 ± 4.22	36.34 ± 4.07	46.57 ± 4.35	52.94 ± 4.52	66.72 ± 4.06	75.23 ± 4.90	82.99 ± 5.67	91.44 ± 3.18
	南	13.17 ± 4.47	15.63 ± 3.81	15.01 ± 5.30	21.07 ± 3.97	31.12 ± 4.67	39.12 ± 4.74	38.45 ± 4.23	43.42 ± 6.02	51.19 ± 3.70
	西	25.98 ± 6.05	36.44 ± 5.81	40.12 ± 4.49	43.54 ± 4.33	49.58 ± 4.19	59.02 ± 4.42	65.41 ± 4.39	70.04 ± 4.33	80.85 ± 2.39

表 2 不同季节各地形因子对积雪覆盖率空间变异的影响

Tab. 2 Contribution rates of various terrain factors to snow cover variation in different seasons

变异来源	春季(3-5月)		夏季(6-8月)		秋季(9-11月份)		冬季(12-2月)	
	MS	SS%	MS	SS%	MS	SS%	MS	SS%
高程	3.81	77.54	3.79	89.18	2.65	46.42	1.08	27.64
坡向	0.97	19.72	0.20	4.61	1.48	25.95	2.24	57.07
坡度	0.05	0.99	0.20	4.61	1.48	25.95	0.51	13.01
坡向*坡向	0.02	0.48	0.00	0.10	0.05	0.83	0.06	1.42
误差	0.06	1.27	0.06	1.51	0.05	0.84	0.03	0.86

MS:均方,SS%:方差贡献率

月份和季节而不同(图 5 和表 2)。在 11~1 月,坡向是积雪覆盖率变异的主导地形因子,都在 55% 以上,约为海拔 2~4 倍,其中 1 月份坡向的贡献率最高,达到了 71%。在 2 月和 10 月,海拔和坡向对积雪覆盖率的贡献接近。在 3~9 月,海拔高度的贡献率明显大于其他地形因子,贡献率在 70% 以上(图 5)。在秋末和冬季月份(10~11 月和 12~2 月份)坡度有 7%~18% 不等的贡献率,但是在春季和夏季月份,坡度的贡献率往往在 1% 以下。

4 讨论

本研究基于遥感解译和统计模型,分析了天山胜利达坂地区季节性积雪的时空分布特征及各地形因子对积雪覆盖率空间变异的影响,发现海拔和坡向是影响积雪分布的两个主要地形因子,并且在不同时期,两者的影响程度不同。

在海拔梯度大的区域,海拔高度对积雪深度、持续时间、空间分布等的影响都很大^[14]。海拔高度对积雪覆盖率的影响主要通过气温随海拔的递减规律来体现出来,即总体上积雪覆盖率随高程的增加呈现增加的趋势^[14, 20]。另外,本研究发现海拔的影响程度随季节而变化。冬季,海拔对积雪覆盖率空间变异的贡献率要低于夏季(表 2)。这可能与不同季节的气温有关:在气温最低的冬季,研究区日均温在 -5℃ 以下,有利于积雪的累积,不同海拔积雪覆盖率差异较小;夏季时期,中低海拔气温普遍在 0℃ 以上,积雪仅存在于高海拔的冰川区域,不同海拔积雪覆盖率差异很大。

本研究中,相同海拔条件下北坡年平均积雪覆盖率最大、东西坡次之、南坡最少(表 1)。山区特有的积雪坡向差异,其首要原因就是到达山区坡面的

太阳辐射存在着差异。坡向可以通过影响日照长度^[23, 24],来影响坡面太阳辐射收入。根据 McCune 等的年潜在太阳辐射量的公式^[23],北纬 43°、坡度为 30°南坡的年潜在直接太阳辐射量要比对应北坡多出 89%。另外坡向对积雪覆盖率空间变异的贡献率随季节而变。冬季时坡向对积雪覆盖率空间变异的贡献率较高,达到 57%;夏季时,坡向贡献率在 5% 以下(表 2)。积雪的蒸发、升华和融化速率与气温、地表温度、风速和雪面的太阳辐射条件密切相关^[35]。夏季,地表温度和气温都在 0℃ 以上,即使不考虑太阳辐射的影响,地表积雪的融化时间也很短,各坡面基本同时融化,坡向的不同在夏季不会导致积雪持续时间的较大差异。而在冬季,在高寒地区积雪的损失主要以积雪蒸发、升华为主^[36-38],杨大庆等^[39]曾对乌鲁木齐河源高山区冬季积雪的蒸发做过观测研究,认为冬季各月份的积雪蒸发量相当于月降水量的 55%~100%,积雪蒸发量主要取决于热量条件。由于天山地处中纬度,冬季太阳入射角小,南、北坡坡面的太阳总辐射差异比夏季显著^[40-41],导致南坡的积雪持续时间往往仅几天到十几天,很少有能够超过一个月的持续积雪;而北坡的积雪则往往可以持续整个冬季(表 1 和图 6)。由于积雪覆盖率反映的是一个较长时间尺度的平均值,因此坡向在夏季对积雪覆盖率的影响要远小于冬季。

研究表明坡度对年均积雪覆盖率的影响较弱。一方面是因为研究区坡度较小的区域通常海拔较低,坡度大的区域对应高海拔区域,坡度的影响容易被海拔因素遮盖,尤其是在春季和夏季月份,气温较高,坡度的影响基本显现不出来,在秋末和冬季坡度的影响也只表现在偏南坡面。另一方面,与坡向相比,坡度引起的太阳辐射差异不明显。对于坡度

而言,对它的分析更多包含在太阳光的入射角度的影响方面^[23, 24]。根据 McCune 等给出的经验公式^[23],得出研究区坡度为 30° 的南坡接收到的年直接太阳辐射最多,但也仅比平坦地表多出 10% 左右。但是对于 2014 年 11 月 19 日影像(图 3-d)的分析表明坡度对积雪覆盖率差异性的贡献率为 28%,说明在初冬降雪后一定时间段内,坡度对积雪后积雪覆盖率的变化有一定的贡献率,主要原因为冷季积雪损失主要由升华引起,而 11 月中旬,坡度 >30° 的南坡面接收太阳辐射更多,导致积雪不易保存。

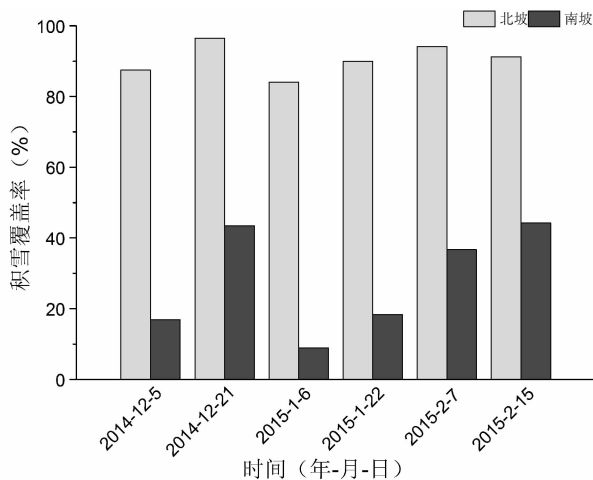


图 6 冬季南、北坡积雪覆盖率对比

Fig. 6 Snow coverage rate on the north-facing slopes and the south-facing slopes in winter

5 结论

本文结合积雪遥感方法分析了天山胜利达坂段典型中高山区积雪空间分布特征,并运用一般线性模型(GLM)方法定量分析了不同时段各地形因子对积雪覆盖率差异性的影响,主要得到以下结论:

(1) 研究区的积雪分布具有明显的季节性特征,冬季时积雪覆盖率在 50% ~ 60%,春季在 60% 以上,秋季积雪覆盖率在 70% 左右,夏季时最小,仅分布在冰川区域。

(2) 研究区的积雪分布具有显著的海拔高度和坡向差异性,坡度差异性相对较小,在冬季时坡向差异性显著,北坡的雪线高度要明显低于南坡,春季、夏季和秋季积雪分布主要受海拔高度影响。

(3) 地形因子对积雪空间异质性的影响程度在不同季节有所差异。冬季(12 ~ 2 月),坡向贡献了积雪覆盖率总变异的 57%,约是海拔的 2 倍,坡度

的 4.5 倍。其他季节,海拔是主要影响因子,其次是坡向,坡度仅在秋末和冬季有较为显著的影响。

参考文献(References)

- [1] ZHANG Tingjun. Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview [J]. Reviews of Geophysics, 2005, 43(4): RG4002 - RG4002
- [2] 沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I): 水文效应 [J]. 冰川冻土, 2013(3): 513 - 527 [SHEN Yongping, SU Hongchao, WANG Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (I): hydrological effects [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013(3): 513 - 527]
- [3] 王建, 李硕. 气候变化对中国内陆干旱区山区融雪径流的影响 [J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2005, 35(7): 664 - 670 [WANG Jian, LI Shuo. Effect of climatic change on snowmelt runoffs in mountainous regions of inland rivers in Northwestern China [J]. Science China(series D), 2005, 35(7): 664 - 670]
- [4] STEWART I T. Changes in snowpack and snowmelt runoff for key mountain regions [J]. Hydrological Processes, 2009, 23(1): 78 - 94
- [5] ARMSTRONG R L, BRUN E. Snow and climate: physical processes, surface energy exchange and modeling [J]. Polar Research, 2010, 29(3): 461 - 462
- [6] [陈仁升, 康尔泗, 丁永建. 中国高寒区水文学中的一些认识和参数 [J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 307 - 317 [CHEN Rensheng, KANG Ersi, DING Yongjian. Some knowledge on and parameters of China's alpine hydrology [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 307 - 317]
- [7] 胡汝骥. 中国天山自然地理 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 155 - 198 [HU Ruji. Physical geography of the Tianshan mountains in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004: 155 - 198]
- [8] 胡汝骥. 中国积雪与雪灾防治 [M]. 北京: 中国环境出版社, 2013: 161 - 201 [HU Ruji. Snow and its disaster control in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013: 161 - 201]
- [9] 张志忠, 杨大庆. 乌鲁木齐河流域积雪状况及其对公路的影响 [J]. 干旱区地理, 1992, 15(4): 78 - 84 [ZHANG Zhizhong, YANG Daqing. Seasonal snow cover and its effect to the highway transportation in the Urumqi river basin [J]. Arid Land Geography, 1992, 15(4): 78 - 84]
- [10] 朱诚. 我国天山山区公路山地灾害及其防治 [J]. 山地研究, 1993, 11(2): 88 - 96, 129 - 130 [ZHU Cheng. Highway mountain hazards and their prevention and control of the Chinese Tianshan Mountainous region [J]. Journal of Mountain Research, 1993, 11(2): 88 - 96, 129 - 130]
- [11] 熊黑钢, 刘耕年, 崔之久, 等. 天山北坡乌—库公路沿线自然灾害特征及其对公路的影响 [J]. 新疆大学学报(自然科学版), 1993, 10(4): 92 - 99 [XIONG Heigang, LIU Gengnian, CUI Zhijiu, et al. The characteristics of natural disaster and its

- influence on Urumqi-Kuerle highway, in north slope of Tianshan Mountain [J]. *Journal of Xinjiang University*, 1993, **10**(4):92 – 99]
- [12] 王中隆. 中国风雪流及其防治研究[M], 兰州: 兰州大学出版社, 2001:15 – 43 [WANG Zhonglong. Research on wind drift and its control in China [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2001:15 – 43]
- [13] 李海星, 冯学智, 肖鹏峰. 天山典型区卫星雪盖的年内变化特征分析[J]. *遥感技术与应用*, 2011, **26**(3):375 – 382 [LI Haixing, FENG Xuezhi, XIAO Pengfeng. Satellite snow cover change analysis within the year of typical area in Tianshan Mountains [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, **26**(3):375 – 382]
- [14] [王宏伟, 黄春林, 郝晓华, 等. 北疆地区积雪时空变化的影响因素分析[J]. *冰川冻土*, 2014, **36**(3):508 – 516 [WANG Hongwei, HUANG Chunlin, HAO Xiaohua, et al. Analyses of the spatiotemporal variations of snow cover in North Xinjiang [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, **36**(3):508 – 516]
- [15] REVUELTO J, LOPEZMORENO J I, AZORINMOLINA C, et al. Topographic control of snowpack distribution in a small catchment in the central Spanish Pyrenees: intra— and inter-annual persistence [J]. *Cryosphere*, 2014, **8**(2):1989 – 2006
- [16] TONG J, DERY S J, JACKSON P L. Topographic control of snow distribution in an alpine watershed of western Canada inferred from spatially-filtered MODIS snow products [J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2008, **13**(3):319 – 326
- [17] ERICKSON T A, WILLIAMS M W, WINSTRAL A. Persistence of topographic controls on the spatial distribution of snow in rugged mountain terrain, Colorado, United States [J]. *Water Resources Research*, 2005, **41**(4):1517 – 1523
- [18] ANDERTON S P, WHITE S M, ALVERA B. Evaluation of spatial variability in snow water equivalent for a high mountain catchment [J]. *Hydrological Processes*, 2004, **18**(3):435 – 453
- [19] 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 [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]
- [20] 贾翔, 陈蜀江, 黄铁成, 等. 基于 MODIS 数据的新疆叶尔羌河流域山区积雪特征分析[J]. *冰川冻土*, 2014, **36**(2):296 – 303 [JIA Xiang, CHEN Shujiang, HUANG Tiecheng, et al. Variability of snow cover in the mountain region of the Yarkant river basin analyzed with MODIS data [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, **36**(2):296 – 303]
- [21] 胡伟杰, 刘海隆, 王辉, 等. 地形对天山积雪冻融变化的影响分析[J]. *冰川冻土*, 2016, **38**(5):1227 – 1232 [HU Weijie, LIU Hailong, WANG Hui, et al. Analysis of the terrain effect on snow cover accumulating and melting in the Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, **38**(5):1227 – 1232]
- [22] SOMMER C G, LEHNING M, MOTT R. Snow in a very steep rock face: accumulation and redistribution during and after a snowfall event [J]. *Frontiers of Earth Science in China*, 2015, **3**:1 – 13
- [23] MCCUNE B, KEON D. Equations for potential annual direct incident radiation and heat load [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2002, **13**(4):603 – 606
- [24] 白重媛, 大畑哲夫. 天山乌鲁木齐河源冰川与空冰斗辐射气候的计算结果[J]. *冰川冻土*, 1989, **11**(4):336 – 349 [BAI Zhongyuan, OHATA T, HIGUCHI K. Calculation results of radiational climate in glacierized cirque and glacier-free cirque at the headwater of Urumqi river in Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1989, **11**(4):336 – 349]
- [25] 杨大庆, 康尔泗. 天山乌鲁木齐河源高山区的降水特征[J]. *冰川冻土*, 1992, **14**(9):258 – 266 [YANG Daqing, KANG Ersi. Characteristics of precipitation in the source area of the Urumqi river basin [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1992, **14**(9):258 – 266]
- [26] 张志忠, 杨大庆. 乌鲁木齐河流域季节积雪的基本特征[J]. *冰川冻土*, 1992, **14**(2):129 – 133 [ZHANG Zhizhong, YANG Daqing. Characteristics of seasonal snow cover in Urumqi river basin [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1992, **14**(2):129 – 133]
- [27] 李效收, 张明军, 王飞腾, 等. 天山乌鲁木齐河源区空冰斗积雪特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, **26**(12):102 – 107 [LI Xiaoshou, ZHANG Mingjun, WANG Feiteng, et al. Characteristics of snow cover at the empty cirque basin in the headwaters of Urumqi river, Tianshan Mountains [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, **26**(12):102 – 107]
- [28] 郭万钦, 刘时银, 姚晓军, 等. 中国第二次冰川编目数据集(V1.0)[J]. 寒区旱区科学数据中心, 2014 [GUO Wanqin, LIU Shiyin, YAO Xiaojun, et al. The second glacier inventory dataset of China (version 1.0). Cold and Arid Regions Science Data Center at Lanzhou, 2014]
- [29] 王建. 卫星遥感雪盖制图方法对比与分析[J]. *遥感技术与应用*, 1999, **14**(4):29 – 36 [WANG Jian. Comparison and analysis on methods of snow cover mapping by using satellite remote sensing data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1999, **14**(4):29 – 36]
- [30] 曹梅盛, 李新, 陈贤章, 等. 冰冻圈遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2006:55 – 65 [CAO Meisheng, LI Xin, CHEN Xianzhang, et al. Remote Sensing on Cryosphere [M]. Beijing: Science Press, 2006:55 – 65]
- [31] 黄晓东, 郝晓华, 杨永顺, 等. 光学积雪遥感研究进展[J]. *草原科学*, 2012, **29**(1):35 – 43 [HUANG Xiaodong, HAO Xiaohua, YANG Yongshun, et al. Advances in snow-cover monitoring using optical remote sensing [J]. *Pratacultural Science*, 2012, **29**(1):35 – 43]
- [32] 郝晓华, 王建, 李弘毅. MODIS 雪盖制图中 NDSI 阈值的检验——以祁连山中部山区为例[J]. *冰川冻土*, 2008, **30**(1):132 – 138 [HAO Xiaohua, WANG Jian, LI Hongyi. Evaluation of the NDSI threshold value in mapping snow cover of MODIS——A

- case study of snow in the middle Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, **30**(1):132–138]
- [33] TAO S, FANG J, ZHAO X, et al. Rapid loss of lakes on the Mongolian Plateau [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, **112**(7):2281–2286
- [34] CHEN L F, HE Z B, DU J, et al. Patterns and environmental controls of soil organic carbon and total nitrogen in alpine ecosystems of northwestern China [J]. *Catena*, 2016, **137**:37–43
- [35] ANTERSON E A. A point energy and mass balance model of a snow cover [J]. *NOAA Technical Report, NWS*, 1976, **19**:1–150
- [36] BOX J E, STEFFEN K. Sublimation on the Greenland Ice Sheet from automated weather station observations [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2001, **106**(D24):33965–33981
- [37] GUSTAFSON J R, BROOKS P D, MOLOTCH N P, et al. Estimating snow sublimation using natural chemical and isotopic tracers across a gradient of solar radiation [J]. *Water Resource Research*, 2010, **46**(12):439–445
- [38] STRASSER U, BERNHARDT M, WEBER M, et al. Is snow sublimation important in the alpine water balance? [J]. *Cryosphere*, 2007, **2**(1):53–66
- [39] 杨大庆, 张寅生. 乌鲁木齐河流域山区冬季积雪蒸发观测的主要结果[J]. *冰川冻土*, 1992, **14**(2):122–128 [YANG Daqing, ZHANG Yinsheng. Results of snow surface sublimation measurements in the mountain area of Urumqi river basin [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1992, **14**(2):122–128]
- [40] TIAN Y Q, DAVIESCOLLEY R J, GONG P, et al. Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2001, **109**(1):67–74
- [41] YARD M D, BENNETT G E, MIETZ S N, et al. Influence of topographic complexity on solar insolation estimates for the Colorado River, Grand Canyon, AZ [J]. *Ecological Modelling*, 2005, **183**(2–3):157–172

Variation Characteristic of Snow Cover in the Shenglidaban Area, Tianshan Mountains, China

ZHAO Jingyi^{1,2,3}, CHEN Ji^{1,3*}, WU Qingbai¹, Li Jing¹, HOU Xin^{1,2,3}

(1. *State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *Beiluhe Observation Station of Frozen Soil Environment and Engineering, Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: An algorithm of SNOMAP was used to extract the information of snow coverage in the Shenglidaban Area, Tianshan Mountains from remote sensing images. A total of 57 Landsat images (ETM+ and OLI) ranging in 2014–2016 were collected and processed for the extraction. A digital elevation model (DEM) data with a resolution of 30 m was used to obtain the topography information of the snow covered area, which was mainly expressed as index of elevation, topographic aspect and slope. It was shown that the mean annual snow coverage increased as the elevation increases, and the snow coverage on north-facing slopes was about 2~3 times more than that on south-facing slopes. An analysis based on general linear model (GLM) indicated that the spatial patterns of snow cover in this area were significantly affected by elevation, aspect and slope, and the effects of topographic factors varied greatly in different seasons. During wintertime (from Dec. to Feb.), the topographic aspect was the dominant factor affecting the distribution of snow cover, which accounted for 57% of the overall variance in the annual snow coverage. The effect from aspect was approximately twice of elevation and four-and-a-half of slope, respectively. During the other seasons, however, elevation was the dominant affecting factor, and followed by topographic aspect and slope.

Keywords: Snow cover; Tianshan Mountains; topography; aspect; SNOMAP; GLM