

基于MODIS数据的2000–2013年西昆仑山 玉龙喀什河流域积雪面积变化

颜伟^{1,2}, 刘景时¹, 罗光明³, 董克鹏³, 卢巍¹, 杜新豪^{2,4}

(1. 中国科学院青藏高原研究所环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 新疆和田水文水资源勘测局, 新疆 和田 848000; 4. 中国科学院自然科学史研究所, 北京 100190)

摘要: 利用两种卫星影像合成并引入冰川积雪区的方法, 对西昆仑山玉龙喀什河流域2000–2013年MOD10A2积雪数据进行去云处理, 分析不同海拔高度积雪的年内和年际变化特征及趋势, 结合气象要素, 分析其分布变化原因。结果表明: ① 低山区(1650–4000 m)积雪年内变化为单峰型, 补给期为冬季, 而高山区(4000–6000 m)存在“平缓型”春季补给期和“尖峰型”秋季补给期两个峰值; ② 就年际变化而言, 低、高山区平均、最大积雪面积呈微弱增加趋势, 高山区最小积雪面积显著增加, 倾向率为 $65.877 \text{ km}^2/\text{a}$; ③ 就季节变化而言, 春、夏、冬三季低、高山区积雪面积年际变化呈“增加—减少—增加”趋势, 秋季高山区积雪面积则呈“增加—减少”趋势, 而低山区积雪面积在2009和2010年异常偏大, 其他年份面积变化不大; ④ 在低山区, 气温是影响春、夏两季积雪面积变化的主因, 气温和降水对秋季积雪面积变化的影响相当, 而冬季积雪面积变化对降水更敏感; 在高山区, 夏季积雪面积变化对气温更敏感, 而冬、春季积雪面积变化主要受降水影响。

关键词: MODIS; 积雪面积; 相关分析; 西昆仑山; 玉龙喀什河

doi: 10.11820/dlkxjz.2014.03.003

中图分类号: P426.63+5

文献标识码: A

1 引言

作为冰冻圈的重要组成部分之一, 积雪对地表辐射平衡、能量平衡和水资源分配等具有重要影响, 在全球和区域气候系统中起着十分重要的作用(杨兴国等, 2012)。新疆山区是中国冰雪资源最丰富的地区, 冰川积雪融水是河流的重要补给来源, 也是绿洲经济赖以发展的生命线, 特别是山区融雪径流形成的春汛, 对本区农业灌溉具有重要意义(李培基, 2001; 穆振侠等, 2013; 章曙明等, 2008), 而夏季冰川积雪融水叠加, 极易引起洪水灾害(毛炜峰等, 2007), 严重影响下游社会经济发展。因此, 监测积雪变化对区域水资源管理和利用至关重要。

针对新疆及其周边地区积雪变化规律, 研究者们已开展大量研究。巴桑等(2012)基于多源数据对西藏地区积雪变化趋势进行分析, 结果表明1980–2009年该区积雪不断减少, 尤以近年为明显, 积雪日数和最大积雪深度均呈下降趋势; 胡列群等(2013)分析新疆91个台站资料, 指出1960–2011年

新疆积雪深度呈小幅增长, 但积雪日数呈减少趋势, 并指出, 积雪深度与冬春年降水变化一致, 而积雪日数却与气温有较好的负相关; 徐长春等(2007)利用NOAA数据研究了塔里木河流域积雪面积变化, 结果表明1982–2001年流域总体积雪面积缓慢增加, 结合气象数据分析认为, 低海拔区域积雪更易受降水影响, 而高海拔区域积雪更易受气温影响。

对缺乏站点实测资料、地形复杂的中小尺度流域, 学者们多选择高时空分辨率的Landsat、HJ-1A/1B、MODIS等遥感数据来研究流域积雪变化。李光辉等(2013)利用HJ-1A/1B数据分析了扎当冰川及周边地区积雪面积变化与气温的关系, 发现两者呈高度负相关; 蔡迪花等(2009)使用MOD10A2数据研究祁连山区积雪的空间分布和年内变化特征, 探讨了地形对积雪分布和季节变化的影响; 党素珍等(2012)利用MOD10A2分析黑河流域积雪面积时空变化规律, 讨论了气温和降水对积雪变化的影响; Tahir等(2011)利用MOD10A2分析喀喇昆仑山

收稿日期: 2014-01; 修订日期: 2014-02。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41030639); NSFC-新疆联合基金项目(U1178304)。

作者简介: 颜伟(1986–), 男, 山东临沂人, 博士研究生, 主要研究方向为寒区水文水资源, E-mail: yanwei@itpcas.ac.cn。

南坡 Hunza 河流域积雪变化,结果表明 2000-2009 年积雪缓慢增加。

在新疆境内,主要集中在天山地区开展流域尺度积雪变化及其对气候变化的响应和对径流的影响方面。张文博等(2012)对 MOD10A1 产品进行去云处理,并在此基础上分析了天山区积雪的时空特征;林金堂等(2011a, 2011b)使用 MOD10A2 探讨了玛纳斯河流域积雪频率、积雪覆盖率的时空特征,以及在不同坡向、坡度、海拔高度下积雪的年际波动特征;白淑英等(2012)利用多源数据系统分析博斯腾湖流域积雪面积、雪深的时空变化规律,探讨了地表温度、地形对积雪变化的影响;穆振侠等(2012, 2013)系统分析了昆马力克河流域积雪时空特征、对气候变化的响应和对径流的影响(王鹏等, 2013)。

但是,在广泛发育冰川的西昆仑山区的研究主要集中在冰川变化上(Shangguan et al, 2009; 纪鹏等, 2013; 李成秀等, 2013; 上官冬辉等, 2004; 许君利等, 2006),针对流域尺度的积雪变化则鲜有研究。基于此,选取源于西昆仑山腹地的玉龙喀什河为研究对象,考虑到地形复杂、站点资料缺乏,选取具有高时空分辨率的 MOD10A2 数据作为主要数据源,探讨流域积雪面积变化。值得注意的是,MOD10A2 数据是通过日积雪产品 8 日合成产生的,尽管其去云效果显著,但是在高山区特别是冰川区,作为流域内的高降水带和高径流区(丁贤荣, 2003; 汪奎奎等, 2009),受到云像元的影响要大于

其他地区,严重影响部分影像质量。因此,首先通过两种卫星影像合成并引入冰川积雪区的方法,对该产品进行去云处理,提高影像的可用性;在此基础上利用去云影像分析流域积雪面积的时空分布特征,并讨论气温和降水对积雪面积变化的影响,为探寻该流域河川径流变化原因,以及合理利用区域水资源提供科学依据。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

玉龙喀什河是和田河两大支流之一,发源于昆仑山主脉北坡的阿克沙依冰川,上游穿行于昆仑山主脉与喀拉塔什山之间,经同古孜洛克水文站(36°49'N、79°55'E,海拔 1650 m,简称同站)流出山口。研究区介于 35°17'N~36°50'N、79°22'E~81°41'E 之间,面积 14575 km²;海拔高度 1650~6855 m,平均海拔为 4698 m,是玉龙喀什河的产流区(图 1)。该河以冰川融雪补给为主,占总径流量的 59.3%,径流主要集中在夏季,约占全年径流量的 81%,其年径流量约占和田河年径流量的 51%,是和田绿洲社会经济赖以发展的重要资源。玉龙喀什河河源区是昆仑山西段主峰现代冰川分布规模最大、最集中的区域,流域内共有冰川 1331 条,冰川面积 2958.31 km²,冰储量 410.3246 km³(杨惠安等, 1992)。

2.2 数据来源

使用的数据包括:①自美国国家雪冰数据中

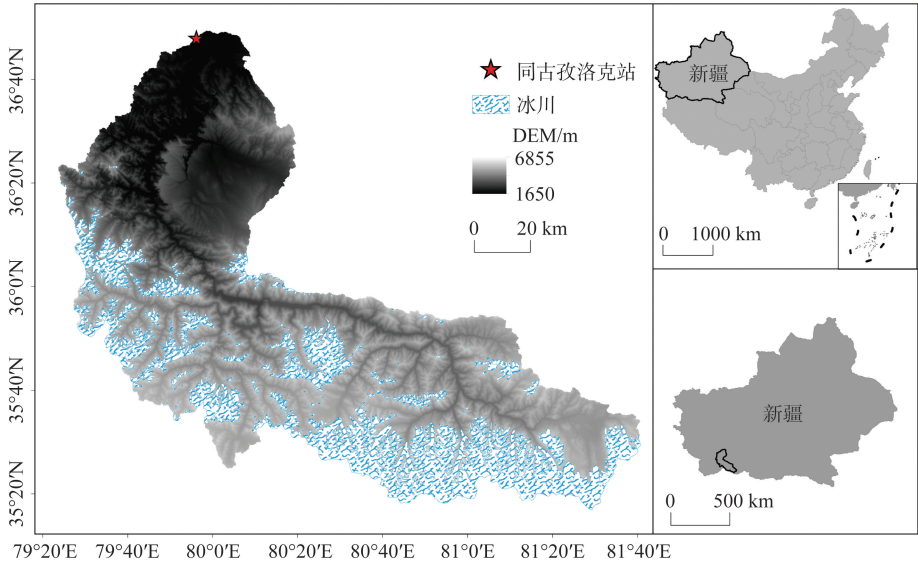


图1 玉龙喀什河流域位置示意图

Fig.1 Location of Yurungkax River Basin

心(NSIDC)网站下载的MODIS/Terra8日合成积雪数据(MOD10A2,简称MOD),时间序列为2000年2月26日-2013年2月26日,以及MODIS/Aqua8日合成积雪数据(MYD10A2,简称MYD),序列为2002年7月4日-2013年2月26日,空间分辨率为500 m。已有研究表明(Tahir et al, 2011; 蔡迪花等, 2009; 徐根生, 2010),在山区MOD产品具有较高的积雪识别率,可以用于山区积雪变化研究。②美国地质调查局(USGS)网站下载的Landsat TM/ETM+/OLI数据(表1),用于流域永久积雪冰川的提取。③“国际科学数据服务平台”网站下载的SRTM DEM数据,空间分辨率为90 m,用于流域边界提取,并以500 m为间隔将流域划分为10个高度带(表2)。④由和田水文水资源勘测局提供的同站2000-2012年间逐日气象资料,以及课题组在三十里营房附近(36°25′50.12″N、77°43′12.13″E,海拔4482 m)架设的一套AWS获取的2011年2月26日-2012年2月26日的逐日气温,用来分析高山区

表1 Landsat TM/ETM+/OLI数据参数

Tab.1 Parameters of Landsat TM/ETM+/OLI images used in this research

轨道号	获取时间	传感器	云含量/%	分辨率/m
145/035	2001-06-30	ETM+	0.22	30
	2009-08-15	TM	0.26	
	2010-07-17	TM	2.56	
	2011-08-05	TM	0.2	
	2013-09-13	OLI	3.81	
146/035	2000-10-08	ETM+	1.22	30
	2001-09-25	ETM+	2.66	
	2011-09-13	TM	0.29	
	2013-09-18	OLI	3.05	

表2 基于SRTM DEM的流域分带

Tab.2 Altitude zones based on SRTM DEM data

分带号	分带/m	面积/km ²	平均高程/m	面积比例/%
1	1650~2000	177.49	1865.0	1.20
2	2000~2500	730.83	2281.2	4.93
3	2500~3000	1083.12	2758.2	7.31
4	3000~3500	1171.31	3242.4	7.91
5	3500~4000	966.91	3748.7	6.53
6	4000~4500	1005.64	4265.9	6.79
7	4500~5000	1926.86	4782.8	13.01
8	5000~5500	3261.03	5261.0	22.01
9	5500~6000	2843.90	5738.8	19.20
10	6000~6855	1646.50	6191.7	11.11

气温变化。

2.3 研究方法

为提高MOD积雪影像数据质量,使用两种卫星影像合成和引入冰川积雪区方法做去云处理。在校正的积雪数据基础上,分析玉龙喀什河流域不同海拔高度带积雪年内(3月-次年2月)、年际和季节变化规律。另外,对同站和三十里营房AWS测得气温做8日平均、对降水做8日累加处理,获得与积雪时间序列一致的气温和降水序列,分别计算积雪面积与同站气温、降水的Pearson相关系数,讨论气温、降水对积雪面积变化的影响。

2.3.1 Landsat冰川积雪区提取

采用Hall等(2002)发展的积雪制图算法SNOWMAP对表1中的Landsat数据进行处理,获取最新的玉龙喀什河流域冰川积雪区。SNOWMAP算法是基于NDSI发展而来,具体算法为:

$$NDSI = \frac{B2 - B5}{B2 + B5} \geq 0.4 \tag{1}$$
$$B2 \geq 0.1 \tag{2}$$
$$B4 > 0.11 \tag{3}$$

式中:B2、B4、B5分别代表Landsat影像的绿波段、近红外波段以及中红外波段的反射率。

同时满足公式(1)(2)(3),则将地物类型识别为冰川积雪,然后对每期冰川积雪影像进行叠加处理,得到流域冰川积雪区。

2.3.2 MOD10A2影像去云处理

对MOD影像进行去云处理(图2),处理方法和步骤为:①利用MRT软件对MOD和MYD影像进行格式和投影转换,坐标统一为WGS1984_UTM_ZONE44N;②两种卫星影像合成:基于流域边界提取积雪影像,对原始积雪分类编码进行重新编码,并对重新编码后同期MOD和MYD影像进行最大化合成(Gao et al, 2010);③基于生成的流域冰川积雪区数据,将冰川积雪区的云像元识别为积雪像元。第②、③步是在ArcGIS和Python软件下进行批处理操作。利用ArcGIS软件的地统计功能,统计不同海拔高度分带的积雪数据。

2.3.3 去云方法精度评价

区内没有站点资料来验证去云方法的可靠性,因此参考Paudel等(2011)提出的方法评价去云精度。其具体步骤为:①随机选取5期MOD(作为“真值”影像)和MYD,选取原则是:MOD影像的云像元含量<5%,并且同期MYD影像的云像元含量>30%;②在其他MOD影像中选取云像元含量较高

(>30%)的5景影像,并将其云像元分别赋给“真值”影像,作为“观测”影像,选取结果见表3。

根据上述去云方法对“观测”影像进行去云处理,并将去云后的结果与“真值”影像进行对比,评价去云精度。评价指标为:正确分类精度,即去云结果与“真值”影像一致的像元个数占总的云像元个数的百分比;低估,即将积雪像元(Snow)误分类为非积雪像元(No Snow);高估,即将非积雪像元识

别为积雪(Paudel et al, 2011)。

3 结果与分析

3.1 去云方法精度评价

由表4可知,经过两步去云处理后,平均消除77.23%的云像元,其中两卫星影像合成方法平均消除48.61%云像元,低估3.66%的积雪像元,高估

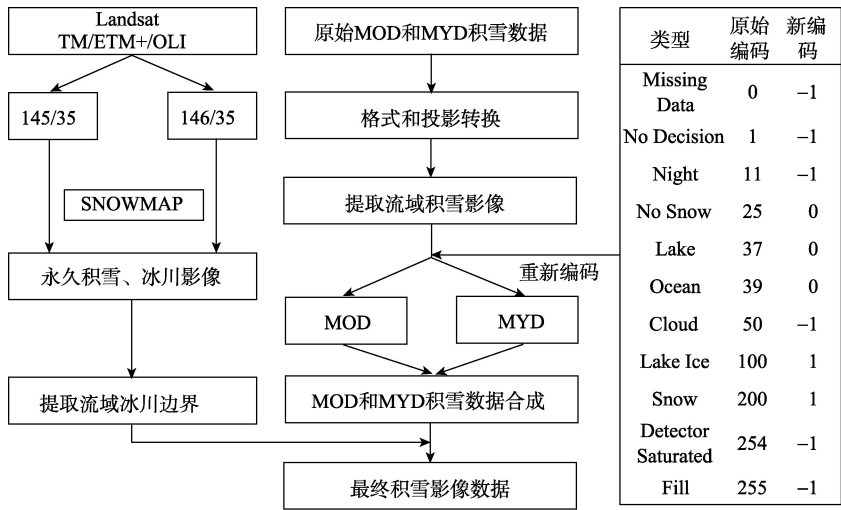


图2 流域积雪影像去云处理流程图

Fig.2 Flow chart of eliminating cloud pixels in MODIS snow cover images

表3 选取5期验证影像

Tab.3 Five images selected for validation

“真值”影像(MOD)		同期MYD影像	用于生成“观测”影像的MOD参数	
日期	云含量/%	云含量/%	日期	云含量/%
2005145	1.08	36.85	2005041	43.03
2008097	3.70	46.28	2003049	34.54
2009129	1.99	34.88	2007057	35.08
2010129	1.50	40.55	2004025	35.29
2011089	4.03	34.82	2012049	33.35

注:2005145表示2005年第145天,下同。

表4 两步去云方法精度评价

Tab.4 Accuracy assessment of two-step cloud pixel removal

日期	“观测”影像 云含量/%	第一步:两卫星合成/%				第二步:引入冰川边界/%				两步共去 云/%
		总去云量	正确分类	高估	低估	总去云量	正确分类	高估	低估	
2005145	43.07	42.49	39.05	0.39	3.05	28.85	28.84	0.01	0.00	71.34
2008097	34.98	33.41	29.17	0.70	3.54	37.22	37.10	0.12	0.00	70.63
2009129	35.60	61.45	55.32	2.26	3.87	25.80	25.76	0.03	0.00	87.25
2010129	36.22	56.58	50.68	0.23	5.67	23.96	23.92	0.04	0.00	80.54
2011089	34.10	49.14	46.12	0.85	2.17	27.27	27.24	0.02	0.00	76.41
平均		48.61	44.07	0.89	3.66	28.62	28.57	0.04	0.00	77.23

0.89%;引入冰川积雪区后,可进一步消除28.62%的云像元,并且仅存在微小的高估现象,没有低估现象。由此可知,引入冰川积雪区消除冰川积雪区云像元的方法是有效的。

为进一步评价该方法的去云效果,统计了2000-2013年627景影像去云前后云像元含量的变化(图3)。MOD影像中,有76景影像的云像元含量超过16%,45景影像的云含量介于10%~16%;经过两卫星影像合成后,有38景影像的云像元含量超过16%,44景影像的云像元含量介于10%~16%;引入冰川积雪区之后,仅有5景影像云像元含量超过16%,9景影像云像元含量介于10%~16%。经过两步去云之后有476景影像的云像元含量在0~2%之间,占到总影像的80.13%。由此可见,该方法有效地去除了云像元对积雪数据质量的影响。

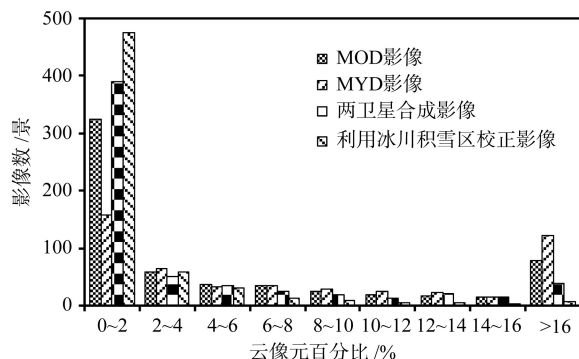


图3 去云前后MODIS积雪影像云像元含量变化

Fig.3 Percentage of cloud pixels of MODIS snow cover images before and after cloud pixel removal

3.2 积雪的年内变化特征

根据表3划分的高程带,分别绘制了流域积雪面积以及各高程带积雪覆盖率多年平均年内变化曲线。由流域积雪面积年内变化曲线(图4b)可知,玉龙喀什河流域积雪面积年内分布呈双峰型,春、秋季是本流域积雪的两个补给期。而不同海拔高度积雪覆盖率年内变化曲线有着显著差异(图4c、4d):海拔6000 m以下,随着海拔升高,积雪年内变化曲线由单峰向双峰转变,临界高度大约在4000 m左右;海拔6000 m以上以冰川覆盖为主,积雪覆盖率均保持在95%以上,年内变化不明显。因此,将海拔1650~4000 m的区域定义为低山区,4000~6000 m的区域定义为高山区,分别探讨积雪年内变化规律。

低山区积雪的主要补给期在冬季(图4c)。海拔

2500 m,以下积雪11月中旬开始生成,次年3月中旬以前积雪即消融结束;海拔2500~3000 m,10月中旬积雪覆盖率开始波动上升,至次年4月末积雪消融结束;海拔3000~4000 m,9月中旬积雪开始波动上升,次年4月初开始消融,至6月末积雪消融结束。在夏季,由于气温较高,降水多以液态形式存在,因此4000 m以下的区域基本没有积雪覆盖。

高山区积雪覆盖率年内变化为双峰型,两个峰值分别出现在春季和秋季,从图4d可知,春季为“平缓型”峰值期,秋季为“尖峰型”峰值期。分析本区气温和降水的年内分布(图4a)可知,从3月中旬开始至5月末,这一海拔高度范围内气温仍维持在0℃左右,而降水量却显著增加,降水多以固态降落,流域得到稳定的积雪补给,积雪覆盖率均维持在一个较高的水平上,且变化较小,构成了“平缓型”春季峰值期。自5月末开始,气温显著升高到0℃以上,高山区积雪迅速消融,至7月末积雪面积达到最小。由于本区存在大量的冰川区,因此5000 m以上仍然有较高的积雪覆盖率。8月初起,随着气温下降,积雪开始建立并快速增加,直至10月底达到次峰值;之后积雪覆盖率有所下降,导致冬季积雪覆盖率小于春季和秋季。这与青藏高原及其周边区域高海拔积雪年内变化规律一致(Pu et al, 2007; 蔡迪花等, 2009; 党素珍等, 2012)。

高山区冬季积雪覆盖率相比春、秋两季低,可能是以下几个原因造成的:①从降水的年内分布来看,本区域冬季降水量小于其他季节,积雪补给少;②冬季山区气温低、风速较大,因而风吹雪临界风速小,更易发生吹雪现象,导致积雪再分布和升华(李弘毅等, 2012),消耗积雪;③地表温度变化滞后于气温变化,当秋末气温下降到0℃后,地温仍然较高,消融部分积雪,导致积雪覆盖率有所下降。

3.3 积雪的年际变化特征

不同海拔高度积雪的年内变化差异较大,因此仍然按照低山区和高山区的划分,分别探讨两个区域积雪的年际变化和季节变化。

图5a、5b分别为低、高山区13年来年平均、最大和最小积雪面积柱状图和线性趋势。低山区最大、平均积雪面积均呈微弱增加趋势,最大积雪面积年际波动剧烈;高山区最小积雪面积以65.877 km²/a ($p<0.05$)的速率显著增加,而其最大和平均积雪面均呈不显著的增加趋势。整体而言,该区域积雪面积变化趋势与新疆地区积雪长期变化

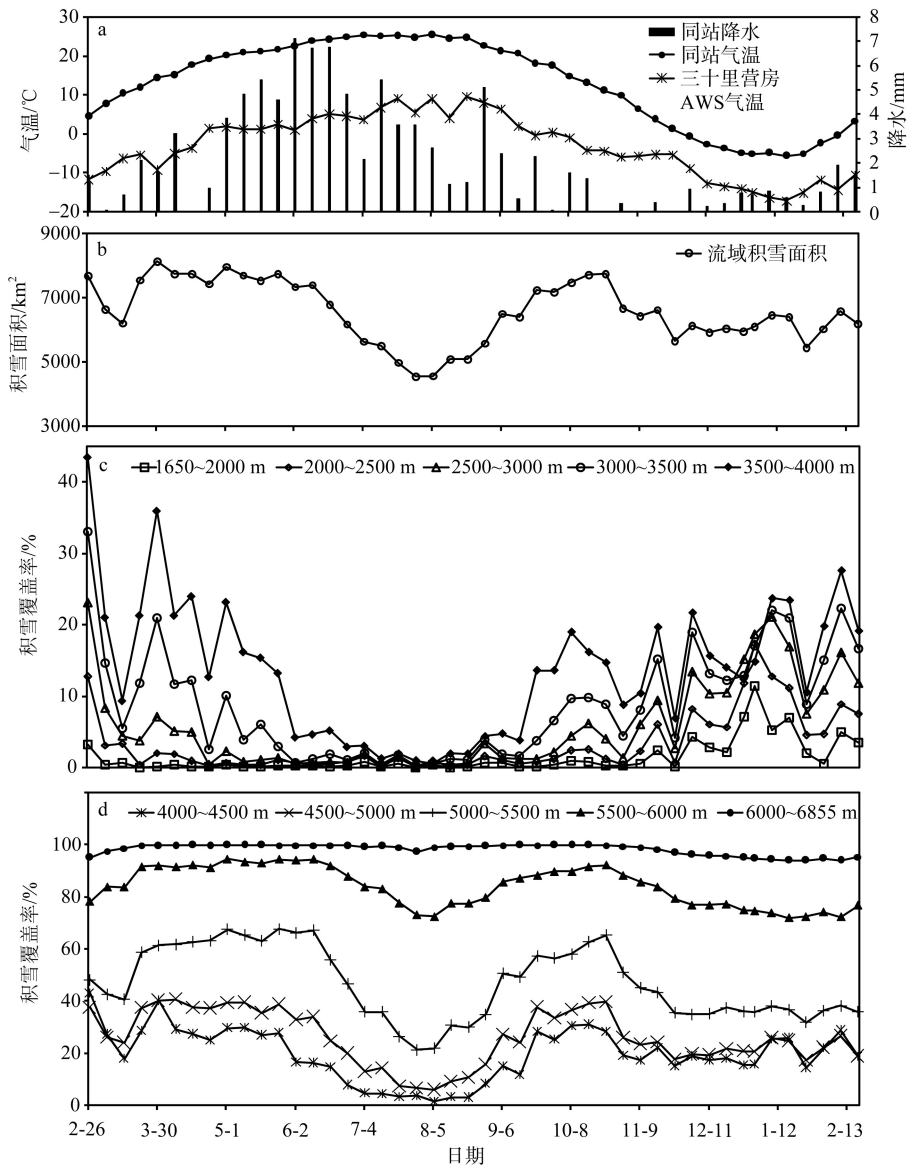


图4 2000-2013年间不同时段平均气温、降水(a)、平均积雪面积(b)、不同高程带平均积雪覆盖率年内变化(c, d)
Fig.4 Seasonal changes of air temperature and precipitation(a), snow cover area(b) and snow cover fraction(c, d) at different altitudes during 2000-2013

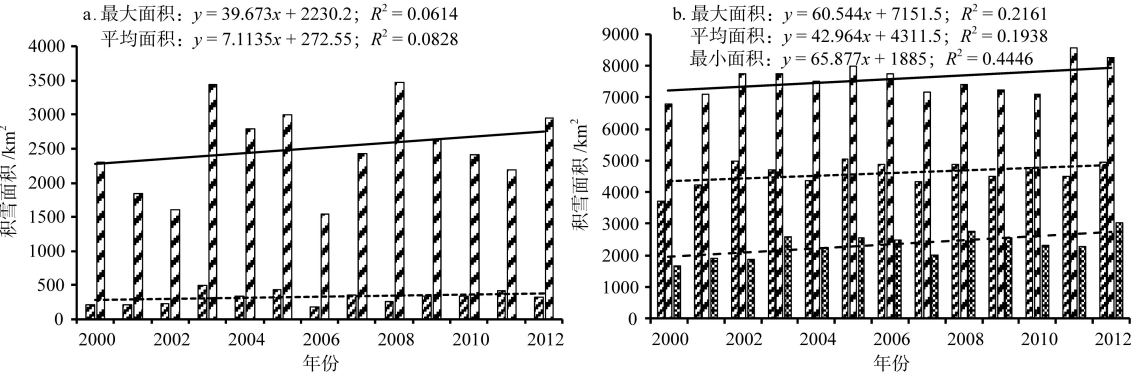


图5 玉龙喀什河流域低(a)、高(b)山区平均、最大、最小积雪面积年际变化
Fig.5 Inter-annual variation of average, maximum, and minimum snow cover area in Yurungkax River Basin at low altitude zone(a) and high altitude zone(b)

趋势一致(胡列群等, 2013; 徐长春等, 2007)。

图6为低、高山区不同季节积雪的年际变化。对其进行线性回归分析发现,各个季节积雪均呈增加趋势,但是均未通过0.05的显著性检验。对4个季节的积雪面积进行多项式拟合,发现低、高山区的季节变化规律基本一致。春、夏、冬三季积雪的年际变化规律相似,表现出“增加—减少—增加”年际变化规律:冬、春两季,2000-2003年间积雪面积

呈增加趋势,2003-2009年间积雪呈减少趋势,2009-2012年间积雪转而增加;夏季,2000-2004/2005年间积雪面积呈增加趋势,2004/2005-2008年间呈减少趋势,2008-2012年间为增加趋势。而秋季积雪年际变化则不同,低山区2009、2010年是积雪峰值年份,积雪面积达到600 km²以上,其他年份积雪大都在200 km²以内,没有显著变化;高山区2002年是积雪最大值年份,积雪面积达到6000 km²

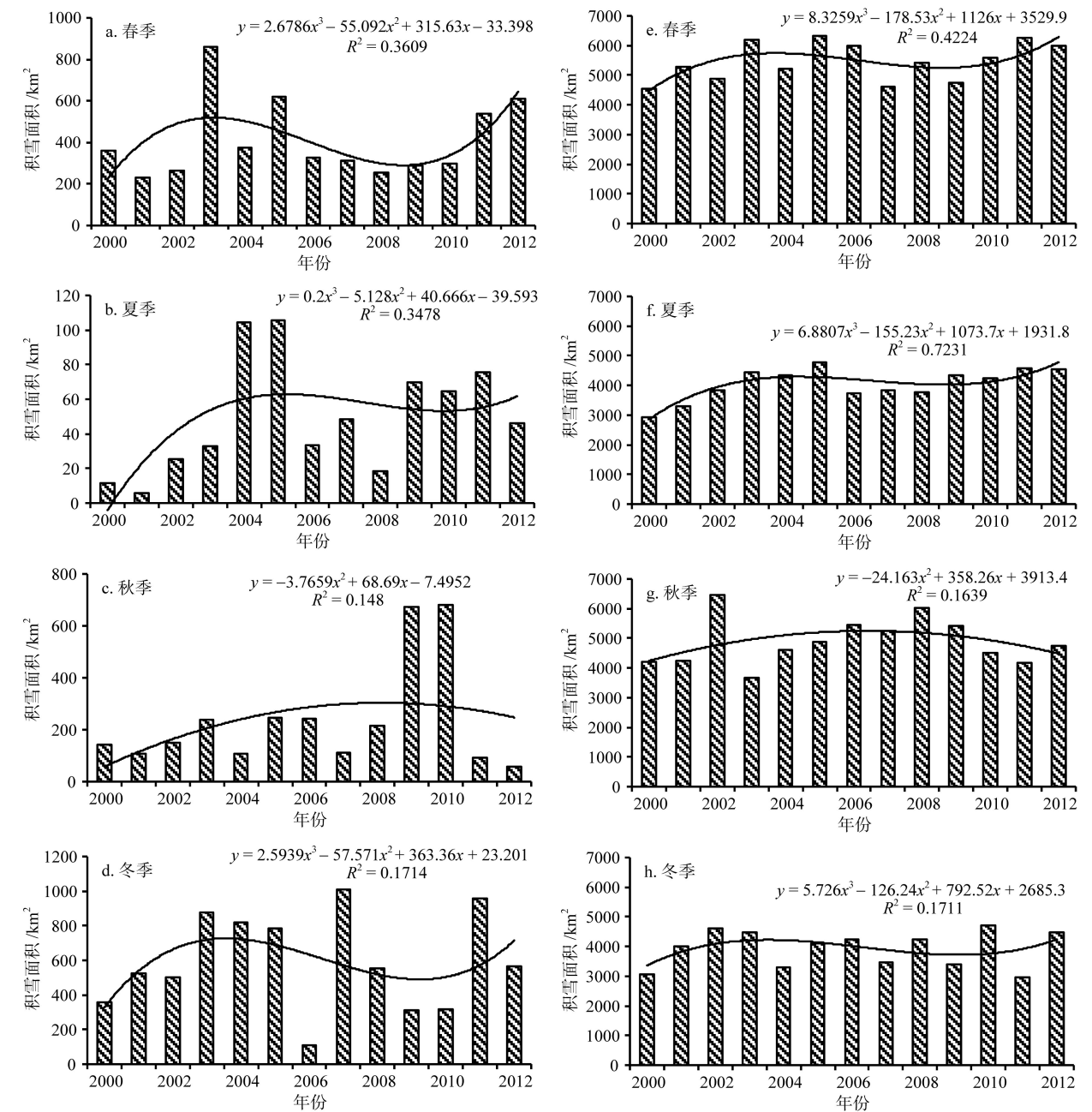


图6 玉龙喀什河流域低(左列)、高(右列)山区积雪面积季节变化

Fig.6 Inter-Annual variation of snow cover area in different seasons in low altitude zone(left) and high altitude zone(right) in Yurungkax River Basin

以上。整体而言,2000-2008年间积雪面积呈增加趋势,2008-2012年间积雪转而减少,即表现出“增加—减少”的年际变化规律。

3.4 气温、降水对积雪变化的影响

气温和降水是决定积雪消融、累积的两个重要因素(韦志刚等, 2005)。考虑到本区缺乏高海拔站点数据,并且 Abe 等(2004)利用位于策勒河流域上游一套气象站(海拔 2800 m)获取了 1991 年 9 月—1997 年 8 月间的气象数据,并与策勒气象站(海拔 1400 m)同期数据进行对比分析,发现两站月平均气温、降水具有较强的正相关关系。因此,对 2000 年以来的低、高山区积雪面积与低海拔同站气温、降水进行了相关分析。由表 5 可知,不同海拔高度积雪变化受气温和降水的影响差异很大。

在低山区,各季节积雪面积与气温均呈显著负相关关系、与降水呈正相关关系,其中春季积雪面积与气温的负相关最大(-0.49),夏季最小(-0.19),这

是因为,低山区积雪消融主要发生在春季,春季气温回升导致积雪的快速消融,春末夏初积雪基本消融结束,并且夏季气温较高,降水多以液态的形式存在,因此夏季降水与积雪面积没有显著相关关系。对比各季节积雪面积与气温和降水的相关系数可知:气温是影响春、夏两季积雪变化的主因;气温和降水对秋季积雪变化的影响相当;而冬季积雪变化对降水更敏感。

在高山区,夏季积雪面积与气温呈显著负相关关系,这是因为本区积雪消融主要发生在夏季,气温升高导致积雪面积减小。由于本区存在大范围冰川区,气温较低,降水多以固态的形式存在,因此,本区夏季积雪面积也受到降水一定的影响,但以气温影响为主。本区海拔较高,春、冬季节平均气温较低,不足以引起积雪消融,同时降水多以固态形式存在,因此降水是影响春、冬季节积雪变化的主要因素。

表 5 不同季节低、高山区积雪面积与气温和降水的相关系数
Tab.5 Correlations between snow cover areas and air temperature and precipitation in different seasons at different altitudes

季节要素	春季(N=156)		夏季(N=143)		秋季(N=156)		冬季(N=135)	
	气温	降水	气温	降水	气温	降水	气温	降水
低山区	-0.49***	0.23**	-0.19*	0.10	-0.22**	0.22**	-0.30***	0.38***
高山区	0.14	0.24**	-0.29***	0.20*	0.05	0.01	0.09	0.17*

注:***,**,*分别代表显著性水平为0.001,0.01,0.05。

4 结论

融雪是玉龙喀什河径流的重要补给来源之一,利用两卫星影像合成并引入冰川积雪区对 MOD 积雪数据做去云处理,并在此基础上分析了玉龙喀什河流域不同海拔高度带积雪的年内、年际变化规律以及积雪面积与气温、降水的相关关系,结论如下:

- (1) 对 MOD 积雪数据来说,利用两种卫星影像合成和引入冰川积雪区方法平均减少 77.23%的云像元含量,有效改善了积雪影像的质量,这对获取准确的山区积雪面积、研究积雪变化是十分必要的。
- (2) 随着海拔升高,流域积雪年内变化由单峰向双峰转变,临界高度在 4000 m 左右。低山区积雪补给期为冬季;高山区积雪存在“平缓型”春季补给期和“尖峰型”秋季补给期;海拔 6000 m 以上主要为冰川覆盖区,积雪年内变化不大。
- (3) 低、高山区平均、最大积雪面积均呈微弱增

- 加趋势;高山区最小积雪面积显著增加,倾向率为 65.877 km²/a。春、夏、冬三季积雪面积年际变化呈“增加—减少—增加”的变化趋势;秋季,2009、2010 年是低山区积雪面积的峰值年份,其他年份面积变化不大,高山区积雪面积则呈“增加—减少”的变化趋势。
- (4) 不同季节低、高山区积雪面积变化受气温和降水的影响不同。在低山区,气温是影响春、夏积雪变化的主因,秋季气温和降水对积雪变化的影响相当,而冬季积雪变化对降水更敏感;在高山区,夏季积雪变化对气温更敏感,而春、冬季节积雪变化主要受降水影响。
- 本文仅从不同海拔高度带方面探讨了玉龙喀什河流域积雪的年内、年际变化规律及其与气温和降水的关系,但积雪累积消融还受到诸如坡度、坡向、地表覆被类型等因素影响,同时风速、地温等因素变化也对积雪分布有重要影响,这是下一步需要深入研究的课题。

参考文献(References)

- 巴桑, 杨秀海, 拉珍, 等. 2012. 基于多源数据的西藏地区积雪变化趋势分析. 冰川冻土, 34(5): 1023-1030. [Basang, Yang X H, La Z, et al. 2012. Variation of snow cover over Tibet Autonomous Region based on multi-source data. Journal of Glaciology and Geocryology, 34(5): 1023-1030.]
- 白淑英, 王莉, 赵巧华, 等. 2012. 博斯腾湖流域积雪变化及影响因素. 湖泊科学, 24(3): 487-493. [Bai S Y, Wang L, Zhao Q H, et al. 2012. Influence factors of snow change in Lake Bosten Basin. Journal of Lake Sciences, 24(3): 487-493.]
- 蔡迪花, 郭锐, 王兴, 等. 2009. 基于MODIS的祁连山区积雪时空变化特征. 冰川冻土, 31(6): 1028-1036. [Cai D H, Guo N, Wang X, et al. 2009. The spatial and temporal variations of snow cover over the Qilian Mountains based on MODIS data. Journal of Glaciology and Geocryology, 31(6): 1028-1036.]
- 党素珍, 刘昌明, 王中根, 等. 2012. 近10年黑河流域上游积雪时空分布特征及变化趋势. 资源科学, 34(8): 1574-1581. [Dang S Z, Liu C M, Wang Z G, et al. 2012. Spatio-temporal distribution characteristics of snow cover in the upper reaches of Heihe River Basin over the past 10 years and the variation trend. Resources Science, 34(8): 1574-1581.]
- 丁贤荣. 2003. 高山增水效应及其水资源意义. 山地学报, 21(6): 681-685. [Ding X R. 2003. Water increasing effect of mountains and its value of water resources. Journal of Mountain Science, 21(6): 681-685.]
- 胡列群, 李帅, 梁凤超. 2013. 新疆区域近50 a积雪变化特征分析. 冰川冻土, 35(4): 793-800. [Hu L Q, Li S, Liang F C. 2013. Analysis of the variation characteristics of snow covers in Xinjiang Region during recent 50 years. Journal of Glaciology and Geocryology, 35(4): 793-800.]
- 纪鹏, 郭华东, 张露. 2013. 近20年西昆仑地区冰川动态变化遥感研究. 国土资源遥感, 25(1): 93-98. [Ji P, Guo H D, Zhang L. 2013. Remote sensing study of glacier dynamic change in West Kunlun Mountains in the past 20 years. Remote Sensing for Land and Resources, 25(1): 93-98.]
- 李成秀, 杨太保, 田洪阵. 2013. 1990-2011年西昆仑峰区冰川变化的遥感监测. 地理科学进展, 32(4): 548-559. [Li C X, Yang T B, Tian H Z. 2013. Variation of west Kunlun Mountains glacier during 1990-2011. Progress in Geography, 32(4): 548-559.]
- 李光辉, 习晓环, 岳彩荣, 等. 2013. 基于环境小卫星数据的冰川区积雪面积变化及其与温度响应关系研究. 冰川冻土, 35(3): 630-635. [Li G H, Xi X H, Yue C R, et al. 2013. Monitoring variation of snow cover areas in glaciated region based on data of HJ-1A/1B satellite and its relationship with the air temperature response. Journal of Glaciology and Geocryology, 35(3): 630-635.]
- 李弘毅, 王建, 郝晓华. 2012. 祁连山区风吹雪对积雪质能过程的影响. 冰川冻土, 34(5): 1084-1090. [Li H Y, Wang J, Hao X H. 2012. Influence of blowing snow on snow mass and energy exchanges in the Qilian Mountainous. Journal of Glaciology and Geocryology, 34(5): 1084-1090.]
- 李培基. 2001. 新疆积雪对气候变暖的响应. 气象学报, 59(4): 491-501. [Li P J. 2001. Response of Xinjiang snow cover to climate change. Acta Meteorologica Sinica, 59(4): 491-501.]
- 林金堂, 冯学智, 肖鹏峰, 等. 2011a. 基于MODIS数据的玛纳斯河山区雪盖年际波动特征研究. 干旱区地理, 34(6): 975-982. [Lin J T, Feng X Z, Xiao P F, et al. 2011a. Inter-annual fluctuation of snow cover in mountainous area of Manas River Basin based on MODIS. Arid Land Geography, 34(6): 975-982.]
- 林金堂, 冯学智, 肖鹏峰, 等. 2011b. 基于MODIS数据的玛纳斯河山区雪盖时空分布分析. 遥感技术与应用, 26(4): 469-475. [Lin J T, Feng X Z, Xiao P F, et al. 2011b. Spatial and temporal distribution of snow cover in mountainous area of Manasi River Basin based on MODIS. Remote Sensing Technology and Application, 26(4): 469-475.]
- 毛炜峰, 玉素甫·阿布都拉, 程鹏, 等. 2007. 1999年夏季中昆仑山北坡诸河冰雪大洪水及其成因分析. 冰川冻土, 29(4): 553-558. [Mao W Y, Yusup A, Cheng P, et al. 2007. Extreme flood events in 1999 and their formation conditions in northern slopes of the Middle Kunlun Mountains. Journal of Glaciology and Geocryology, 29(4): 553-558.]
- 穆振侠, 姜卉芳. 2012. 新疆阿克苏河流域昆马力克河积雪消融规律对气候变化的响应. 冰川冻土, 34(6): 1284-1292. [Mu Z X, Jiang H F. 2012. The response of snow cover ablation to climate change in the Kumalik River Basin, southern Xinjiang. Journal of Glaciology and Geocryology, 34(6): 1284-1292.]
- 穆振侠, 姜卉芳. 2013. 2001年至2010年昆马力克河流域积雪时空变化特性分析. 资源科学, 35(1): 148-156. [Mu Z X, Jiang H F. 2013. Spatial and temporal characteristics of snow cover in the Kunmalike River Basin. Resources Science, 35(1): 148-156.]
- 上官冬辉, 刘时银, 丁永建, 等. 2004. 玉龙喀什河源区32年来冰川变化遥感监测. 地理学报, 59(6): 855-862.

- [Shangguan D H, Liu S Y, Ding Y J, et al. 2004. Glacier changes at the head of Yurungkax River in the West Kunlun Mountains in the past 32 years. *Acta Geographica Sinica*, 59(6): 855-862.]
- 汪奎奎, 刘景时, 巩同梁, 等. 2009. 水文气象学方法计算喜马拉雅山北坡冰川流域物质平衡. *山地学报*, 27(6): 655-662. [Wang K K, Liu J S, Gong T L, et al. 2009. Computation on the mass balance of glaciers in the north Himalaya with a hydro-meteorological method. *Journal of Mountain Science*, 27(6): 655-662.]
- 王鹏, 穆振侠. 2013. KM河流域融雪径流与积雪面积—气温关系分析. *水资源与水工程学报*, 24(4): 28-31, 36. [Wang P, Mu Z X. 2013. Study on relationship of snow-melt runoff with snow area and temperature in KM River Basin. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 24(4): 28-31, 36.]
- 韦志刚, 黄荣辉, 陈文. 2005. 青藏高原冬春积雪年际振荡成因分析. *冰川冻土*, 27(4): 491-497. [Wei Z G, Huang R H, Chen W. 2005. The causes of the interannual variation of snow cover over Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 27(4): 491-497.]
- 徐长春, 陈亚宁, 李卫红, 等. 2007. 45 a来塔里木河流域气温、降水变化及其对积雪面积的影响. *冰川冻土*, 29(2): 183-190. [Xu C C, Chen Y N, Li W H, et al. 2007. Climate change and its impacts on snow cover area in the Tarim River Basin over the last 45 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 29(2): 183-190.]
- 徐根生. 2010. 玛纳斯河上游积雪变化及其与径流量相关性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学. [Xu G S. 2010. Snow change in Manas River Basin and its relation to runoff of Manas river[D]. Urumqi, China: Xinjiang Normal University.]
- 许君利, 刘时银, 张世强, 等. 2006. 塔里木盆地南缘喀拉米兰河—克里雅河流内流区近30 a来的冰川变化研究. *冰川冻土*, 28(3): 312-318. [Xu J L, Liu S Y, Zhang S Q, et al. 2006. Glaciers fluctuations in the Karamilan-Keriya River watershed in the past 30 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 28(3): 312-318.]
- 杨惠安, 安瑞珍. 1992. 中国冰川目录(VI)昆仑山区(和田河内流区). 北京: 科学出版社. [Yang H A, An R Z. 1992. Glacier inventory of China (VI) Kunlun Mountains (interior drainage area of Hotan River). Beijing, China: Science Press.]
- 杨兴国, 秦大河, 秦翔. 2012. 冰川/积雪—大气相互作用研究进展. *冰川冻土*, 34(2): 392-402. [Yang X G, Qin D H, Qin X. 2012. Progress in the study of interaction between ice/snow and atmosphere. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 34(2): 392-402.]
- 章曙明, 王志杰, 尤平达, 等. 2008. 新疆地表水资源研究. 北京: 中国水利水电出版社. [Zhang S M, Wang Z J, You P D, et al. 2008. Research of surface water resources in Xinjiang Uygur Autonomous Region. Beijing, China: China Water Power Press.]
- 张文博, 肖鹏峰, 冯学智. 2012. 基于MODIS数据的我国天山典型区积雪特征研究. *遥感技术与应用*, 27(5): 746-753. [Zhang W B, Xiao P F, Feng X Z. 2012. A study on snow cover variability using MODIS in the typical area of Tianshan Mountains, China. *Remote Sensing Technology and Application*, 27(5): 746-753.]
- Abe O, Wang L W. 2004. Meteorological characteristics in upstream regions of the Qira River, Kunlun Mountains, China. *Bulletin of Glaciological Research*, 21: 17-22.
- Gao Y, Xie H J, Yao T D, et al. 2010. Integrated assessment on multi-temporal and multi-sensor combinations for reducing cloud obscuration of MODIS snow cover products of the Pacific Northwest USA. *Remote Sensing of Environment*, 114(8): 1662-1675.
- Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V, et al. 2002. MODIS snow-cover products. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2): 181-194.
- Paudel K P, Andersen P. 2011. Monitoring snow cover variability in an agropastoral area in the Trans Himalayan Region of Nepal using MODIS data with improved cloud removal methodology. *Remote Sensing of Environment*, 115(5): 1234-1246.
- Pu Z, Xu L, Salomonson V V. 2007. MODIS/Terra observed seasonal variations of snow cover over the Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 34(6): L06706.
- Shangguan D H, Liu S Y, Ding Y J, et al. 2009. Glacier changes during the last forty years in the Tarim Interior River Basin, Northwest China. *Progress in Natural Science*, 19(6): 727-732.
- Tahir A A, Chevallier P, Arnaud Y, et al. 2011. Snow cover dynamics and hydrological regime of the Hunza River Basin, Karakoram Range, Northern Pakistan. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(7): 2275-2290.

Snow cover area changes in the Yurungkax River Basin of West Kunlun Mountains during 2000–2013 using MODIS data

YAN Wei^{1,2}, LIU Jingshi¹, LUO Guangming³, DONG Kepeng³, LU Wei¹, DU Xinhao^{2,4}

(1. Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Hotan Hydrology and Water Resource Bureau, Hotan 848000, Xinjiang, China;

4. Institute for the History of Natural Sciences, CAS, Beijing 100190, China)

Abstract: The Yurungkax River is one of the two major tributaries of the Hotan River that is located at the southern edge of the Tarim River Basin. Its flow is mainly recharged by snow and ice melt water. Since these sources of river flow play an important role in the state of regional water resources, it is necessary to analyze the temporal and spatial variations of snow cover area(SCA) in this catchment for rational water resource management. In this study, we mainly used 8-day snow cover data(MOD10A2) of Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer to extract the SCA of the studied basin over a period of 13 years(March 2000 to February 2013). The two methods used for removing cloud contamination of the SCA images are as follows: MOD/MYD images compositing; and correction using glacier boundary extracted using nine Landsat TM, ETM+ and OLI images from 2000 to 2013. The results show that the two methods removed on average 77.23% of the cloudy pixels and effectively increased the number of images that can be used for analysis. Furthermore, we analyzed the spatial and temporal variations of the SCA in the study area using the corrected MOD10A2 snow cover data, and calculated the coefficients of the Pearson correlation between the SCA and meteorological parameters(air temperature and precipitation) from the hydrological station Tongguziluoke. Results of seasonal change analysis indicate single peak(winter season) of the SCA at low altitude (1650~4000 m asl.) and double peaks(spring and autumn respectively) at high altitude (4000~6000 m asl.), as well as no significant change of the SCA above 6000 m asl. because most areas at this altitude are covered by glaciers. Inter-annual changes of the SCA show that neither the average nor the maximum SCA at all altitude had a significant increasing trend, but the minimum SCA at high altitude increased significantly at a rate of 65.877 km² per year during the study period. The SCA time series analysis shows an increasing-decreasing-increasing trend at all altitudes in spring, summer and winter seasons respectively. But in the autumn, there was no significant fluctuation of the SCA at low altitude except in 2009 and 2010, which were the peak years of the SCA, and the SCA shows an increasing-decreasing trend at high altitude. Pearson correlation coefficients between the SCA and air temperature and precipitation in 8-day interval show that SCA changes are significantly influenced by air temperature and precipitation at low altitude, where air temperature was the dominant factor in the spring and summer, precipitation was the dominant factor in the winter, and air temperature and precipitation equally controlled the SCA regime in the autumn. At high altitude, SCA was sensitive to precipitation only in winter and spring. In the summer SCA was affected by both temperature and precipitation but air temperature was the main factor that influenced SCA.

Key words: MODIS; snow cover area; correlation analysis; West Kunlun Mountains; Yurungkax River