

1977—2013年玛河流域山区冰雪覆被消融态势分析

王雅君, 徐丽萍, 郭鹏, 李慧婷

(石河子大学理学院, 新疆石河子 832003)

摘要:对1977年MSS, 1990年、2000年和2013年TM影像采用监督分类最大似然法区分冰雪与其他地物, 探测冰雪面积及储量变化趋势, 结合梯度、坡度、坡向等分析其分布规律。结果表明: (1) 时间上: 1977—2013年玛河流域山区冰雪面积从3 125.63 km²减少到745.81 km², 总退缩面积为2 379.82 km², 占1977年冰雪总面积76.14%。其中1977—1990年, 年均变化率为1.6%, 1990—2000年为2.9%, 近13 a为2.0%, 总体上呈“小—大—小”趋势退缩; 玛河流域山区冰雪储量减少明显, 减少量为1 446.75 km³。(2) 空间上: 海拔≤2 700 m的梯度冰雪消减最快, 速率达到25.55 km/a, 其次是海拔2 700~3 600 m, 消减速率达到23.44 km/a, 最后是海拔3 600~5 242 m的消减速率, 仅为17.11 km/a; 坡向上, 冰雪分布阴坡大于阳坡, 北坡、东北、西北坡分布最多, 东坡、西坡次之, 南坡、东南坡、西南坡最少, 但不同坡向分布的冰雪百分比没有明显变化; 坡度上, 冰雪主要分布在坡度0°~50°, 所占比例超过95%, ≥50°雪盖分布较少。(3) 控制冰雪变化的主要两个因素是夏季均温和年降水量, 其中夏季气温对冰川的消融量起决定作用, 年降水则影响冰川的积累量, 冰雪覆被消融态势随自然因素和人类活动影响进一步加剧。

关键词: 冰雪覆被; 玛纳斯河流域; 消融; 态势

中图分类号: P331

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)06-0208-05

Analysis on Melting Snow and Ice Cover in Manas Mountain River Basin During the Period form 1977 to 2013

WANG Yajun, XU Liping, GUO Peng, LI Huiting

(College of Sciences, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: Based on the 1977 MSS, 1990, 2000 and 2013 TM images, the Maximum likelihood supervised classification method is used to distinguish between ice and other features, detection of ice and snow area and reserves change trend and to analyze its distribution pattern by combining with the gradient, aspect, slope. The results show that: (1) in time series, mountain snow and ice area reduced to 745.81 km² from 3 125.63 km² in Manas river basin during the period from 1977 to 2013, the total withdrawal covers area was 2 379.82 km², accounting for 76.14% of the total area in 1977, with an average annual rate of 1.6% from 1977 to 1990, it was 2.9% from 1990 to 2000, and it was 2.0% in recent 13 years, the overall pattern showed a trend of “small-big-small” retreat; snow and ice reserves obviously decreased by 1 446.75 km³ in mountain of Manas River basin; (2) In spatial series: the fastest reduce gradient of snow and ice occurred at altitude of 2 700 m or less, with the rate of 25.55 km/a, followed by an elevation of 2 700~3 600 m, with the reduction rate of 23.44 km/a, the least cut rate occurred an elevation of 3 600~5 242 m, only with the rate of 17.11 km/a, with respect to slope aspect, the snow and ice distribution was bigger on shady slope than the sunny slope, it on is more north aspect, northeast aspect, northwest aspects than east aspect, and west aspect, and it is the least on the southern aspect, southeast, southwest aspects, but they did not change obviously between different aspects in percentage of ice and snow, with regard to slope gradients, snow and ice mainly distributed in gradients between 0°~50°, the proportion is more than 95%, and distribution is less under the gradient ≥50°; (3) temperature and annual precipitation are two main factors controlling the changes of snow and ice, the summer temperature determines the melting of glaciers, and annual precipitation affects the accumulation of glaciers. The natural factors and human activities will course a further effect on the intensify of the melt.

Keywords: ice and snow cover; Manas River basin; melt; situation

冰川和积雪是冰冻圈的重要组成部分,在全球或区域气候系统中起着指示器的作用^[1]。政府间气候变化委员会(IPCC)第四次评估报告指出^[2],过去100年(1906—2005年)全球地表平均气温上升了0.74℃,而最近50a的升温速率几乎是接近过去100年升温速率的两倍。升温速率的加快加剧了冰雪消融的速率,影响了冰雪覆被变化,尤其是山地冰川在近30多年来呈加速消融趋势^[3-4]。近年来国内关于山区冰川变化的研究区域上关注天山^[5]、祁连山^[6]、念青唐古拉山^[7]、昆仑山^[8]、珠穆朗玛峰^[9]、阿尔泰山^[10]等,研究方法上多采用遥感影像^[11-13]提取冰雪信息而未进行消融态势的分析。而对于玛河流域山区冰雪覆被消融的报导较少^[14],基于此,本论文选择玛河流域山区,以1977年、1990年、2000年、2013年四个时段的遥感影像为数据源,利用最大似然法并辅以Google earth目视解译进行冰雪信息提取,对覆被特征加以分析,了解该区域的冰雪动态变化对全球变化的响应,初步分析该区冰雪消融的态势,以期为该地区采取应对冰雪覆被变化对生活产生的影响提供依据。

1 研究区概况

玛纳斯河(以下简称玛河)是准噶尔盆地最长的内陆河,发源于依连哈比尔尕山乌代肯尼河的43号冰川^[15]。玛河流域地处亚欧腹地,新疆天山北麓、准噶尔盆地南沿,位于43°20′—45°55′N,85°01′—86°42′E,自东向西有塔西河、玛纳斯河、清水河、金沟河及巴音沟河5条大的河流^[16]。该流域地形呈南高北低走势,源头海拔5000~5500m^[17],属典型的温带大陆性干旱荒漠气候,又有垂直气候特征,属于典型的大陆性气候^[18]。据兰州冰川研究所1986年版《中国冰川目录》统计,玛河流域共有冰川1379条,冰川总面积1035.68km²^[19],总储量73.021km³。

2 研究数据与方法

2.1 数据来源与预处理

本研究遥感影像数据由美国地质勘察局(USGS)官方网站(<http://www.usgs.gov>)下载,包括1977年Landsat MSS影像数据(分辨率为60m),1990年、2000年、2010年和2013年玛河流域相同时相Landsat TM影像数据^[19],为了减少或消除云对冰雪提取的影响,本研究选取8月无云或少云的影像;玛河流域分辨率为90m的SRTM DEM数据由地理空间数据云下载(<http://www.gscloud.cn/>)。

由于1977年遥感影像分辨率较低,对遥感影像进行降噪处理,除去周期性噪声、尖锐性噪声、坏线以及条带等噪声,提高影响质量。然后对四期影像分别进行遥感影像的大气校正,为了减轻大气和云对遥感影像分类精度的影响,利用ENVI 5.1的FLAASH模块进行大气辐射校正^[13]。为了减小几何形变对影像处理造成的误差,对影像进行几何校正,并以WGS-84为大地参考椭球坐标系,此外,将遥感影像数据和非遥感影像数据统一数据格式、投影方式和研究区域等使之可以相互匹配,便于运算,对于有雪斑干扰的影像,进行锐化增强处理,这样可以更有效地区分雪斑和有冰雪覆盖的冰川。

2.2 冰川信息的提取与精度评估

相对于其他地物,冰雪在可见光区反射能力很强,在遥感影像上与其他地物通常呈明显反差。故常用目视解译法、亮度阈值法、归一化积雪指数(Normalized difference snow index, NDSI)法、监督分类法等^[20],提取冰雪信息。对于1977年的MSS采取6,5,4波段假彩色合成,2000年、2010年和2013年使用5,4,3波段分别代表R,G,B进行假彩色合成,采用监督分类根据地物的光谱差异来进行分类。建立感兴趣区选取不少于20个训练样本,区域选择完成后使用工具计算ROI分离度,样本分离度达到1.8~2.0,为合适的样本。本研究先采用最大似然分类器获得积雪分类结果,为了保证数据质量,又辅以目视解译对其进行修正,提高其精度。分类后产生很多细小破碎的斑块,采用Majority/Minority分析方法,以3×3窗口进行小斑合并或重分类。对分类后影像精度验证,精度达到93.2%,kappa系数为0.92,符合分类标准。将处理后的栅格图像转换为矢量文件,加载到ArcGIS中进行进一步的图像处理。经过对分类精度进行验证之后,对于分类结果中误分和错分的部分,结合影像在ArcGIS中进行手动修改,并将数据输出部分细小的斑块进行合并和处理。利用玛纳斯河流域山区矢量边界对提取雪盖裁剪,得到各年研究区冰雪覆被的信息(图1)。

2.3 冰雪面积年均变化率

由于ENVI的局限性,运用遥感技术对影像提取存在不确定性,但仍可以作为评估大时空尺度的冰川变化的重要依据。运用评价冰雪面积变化程度的指标冰川面积年均变化率(annual percentages of area changes, APAC)可以更准确地反映不同时空尺度的冰雪变化。其表达式为:

$$APAC = \frac{\Delta S}{S_0 \Delta t} \quad (1)$$

式中: ΔS ——冰川变化面积(km^2); S_0 ——初始状态下冰雪面积(km^2); Δt ——研究时段的年限(a)。

2.4 冰雪储量估算

在无法获取冰雪厚度的情况下,人们通常根据冰雪储量和冰雪面积之间的经验公式进行冰储量的估

算。本文所采用的是适用于天山山系的冰储量计算公式^[23]:

$$V=0.04S^{1.35} \quad (2)$$

式中: V ——冰雪体积即冰雪储量(km^3); S ——冰雪面积(km^2)。

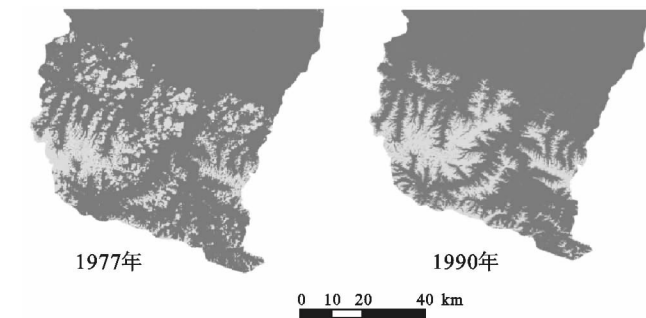


图1 玛纳斯河流域冰雪分布

3 结果与分析

3.1 冰雪覆被分布的面积变化

玛河流域冰雪在1977—2013年面积逐渐减少,且退缩程度严重。研究区1977年冰雪面积为3125.63 km^2 减少到2013年的745.81 km^2 ,减少了2379.81 km^2 ,占1977年的76.14%,基于公式(1)年变化率(APAC)为2.11%。其中1977—1990年,冰雪面积减少量很大,达到653.74 km^2 ,减少率为1.61%;1990—2000年冰雪面积变化量最大,达到917.90 km^2 ,APAC为2.94%;2000—2013年,冰雪退缩趋势加剧,减少面积为808.17 km^2 ,APAC减少为1.99%,缩减面积超过2000年总面积一半。总而言之,随着全球气温的普遍升高,该区域的冰雪面积呈现减少的趋势,近36 a三个时间段玛河流域山区冰雪面积总体上呈“小—大—小”趋势退缩(图2—3)。

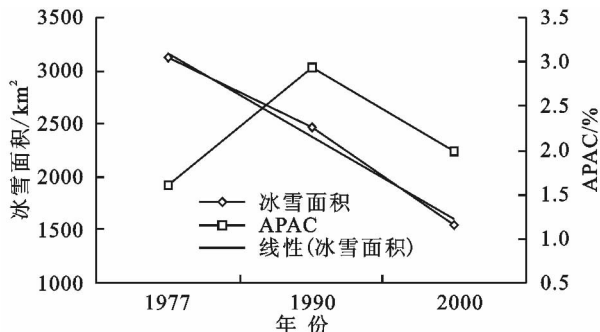


图2 1977—2013年冰雪面积变化

3.2 冰雪储量变化特征

基于公式(2)计算研究区1977年,1990年,2000年,2013年四个时期的冰川储量,1977—2013年玛河流域冰雪储量由2090.38 km^3 锐减到302.07 km^3 ,冰雪储量减少比例达62.88%,退缩速率为49.68 km^3/a 。1977—1990年冰雪储量变化为567.56 km^3 ,在1990—2000年变化量达到最大值,为709.03 km^3 ,变化速率为70.90

km^3/a 。从2000—2013年期间,变化量减少,仅为511.72 km^3 。通过对影像解译分析,其中1977年 $<0.1 \text{ km}^2$ 冰川条数为13.41%,面积占0.95%, $0.1 \sim 1 \text{ km}^2$ 的冰川条数为56.85%,面积为2.36%, $>1 \text{ km}^2$ 条数,面积分别为29.74%,97.55%。而2013年 $<0.1 \text{ km}^2$ 冰川条数为6.2%,面积则为0.88%; $0.1 \sim 1 \text{ km}^2$ 的冰川条数为91.53%,面积为13.74%, $>1 \text{ km}^2$ 冰川条数,面积则分别为2.26%,85.38%。从变化趋势上看,该流域近36 a冰雪储量退缩幅度较大,但近年来退缩速率减少,36 a以来冰川条数同面积变化主要分布在 $0.1 \sim 1 \text{ km}^2$,大多数为小冰川,对气候变化异常敏感(见图4)。

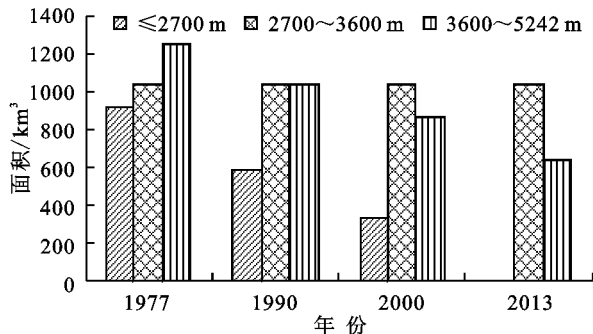


图3 不同梯度雪盖分布

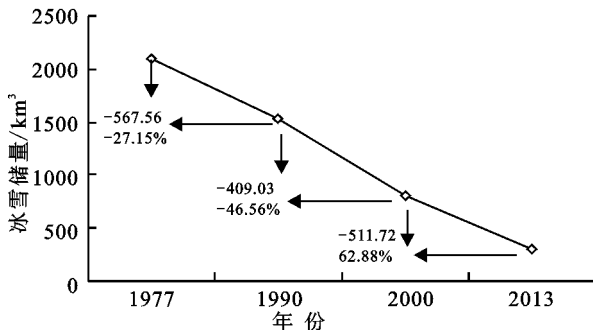


图4 冰雪储量变化

3.3 冰雪覆被随海拔高度的梯度变化

本研究选取玛河流域分辨率为90 m的SRTM DEM数据,以100 m为间距,通过DEM高程数据和冰

川分类信息进行叠加,参考王娟等^[21]高寒山区气温垂直分布的估测方法,同时考虑 3 600 m 为雪线等因素,将玛纳斯河流域冰雪分布分为 3 个高程带,分别是不

稳定积雪、稳定积雪和永久积雪。不稳定积雪是随着季节的变化而增加或减少,夏季消融速率增加,因此随着海拔的降低消融速率逐渐增加(见表 1)。

表 1 冰雪梯度分布

分带	冰雪等级	冰雪特征	消融速率/(km ² ·a ⁻¹)	海拔/m
1	不稳定积雪	斑状不连续性积雪	25.55	≤2700
2	稳定积雪	片状不连续性积雪	23.44	2700~3600
3	永久积雪	冰川及永久性积雪	17.11	3600~5242

受自然因素的影响,海拔位于 3 600~5 242 m 分布有冰川和永久积雪,该地带冰雪消融速率最低,仅为 25.55 km²/a。随着海拔的降低,消融速率逐渐增大。在低于 2 700 m 的山区,随季节变化的不稳定积雪消融速率达到 17.11 km²/a,消融速率达到最大值,尤其在 2013 年,低海拔冰雪几乎完全消失(见图 3)。

3.4 冰雪覆被在不同坡度的空间分布特征

地表面任一点的坡度指通过该点的切平面与水平地面的夹角。坡度表示了地表面在该点的倾斜程度。玛河流域海拔高度范围 877~5 242 m,冰雪面积约占流域面积的 26%。冰雪分布随着坡度的不同而具有很大差异。在 36 a 间低坡度 0°~20°冰雪面积所占百分比逐渐增加,坡度≥50°区域冰雪面积所占百分比不断减小。1977 年、1990 年、2000 年和 2013 年冰雪主要分布在坡度为 0°~50°山体之间,坡度≥50°的山体上冰雪分布仅占 2%~3%。1977 年雪盖分布在相对陡峭的坡面上,而 1990 年、2000 年和 2013 年雪盖分布在相对平缓的坡面上。1977 年、1990 年和 2000 年相比,坡度为 0°~20°的冰雪面积所占百分比增加。而≥20°山体的冰雪面积所占百分比逐渐减少,70°~80°之间只有在 1977—1990 年有少量冰雪。2000 年和 2013 年相比,0°~20°的冰雪面积所占百分比减少,20°~40°的冰雪面积所占百分比增加(见图 5)。

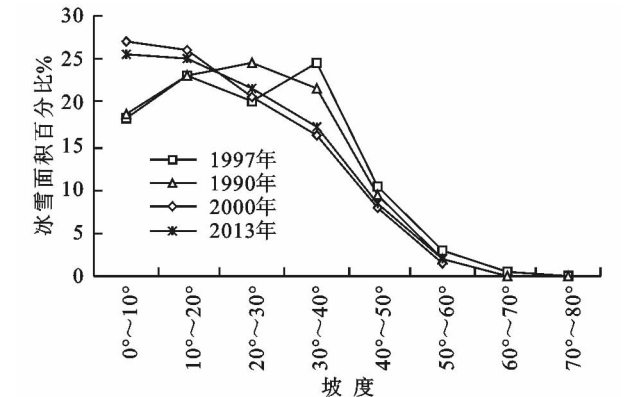


图 5 不同坡度的雪盖分布

3.5 冰雪覆被不同坡向的分布特征

冰川坡向为冰川所在山坡面对的方向,冰川朝向

则为冰川面对的方向,在大部分情况下,冰川坡向和朝向是一致的。近 36 a 玛河流域山区的冰雪分布呈阴坡(北、东、东北和西北)大于阳坡(南、东南和西南),尤其 2000 年和 2010 年更为显著。36 a 间阴坡冰雪所占百分比均超过 13%,而阳坡基本都在 13% 以下,其中 2000 年北坡为 17.61%,2013 年东北坡达到 18.33%。其成因是由于阳坡太阳辐射时长、强度大于阴坡,促使冰雪消融加快。虽然只有正东、西南和正西方向雪盖覆盖面积逐年递减,但是由于太阳辐射方向呈季节性变化,且年季差距小,因此在近 36 a 年各坡向冰雪分布比例并没有明显变化(见图 6)。

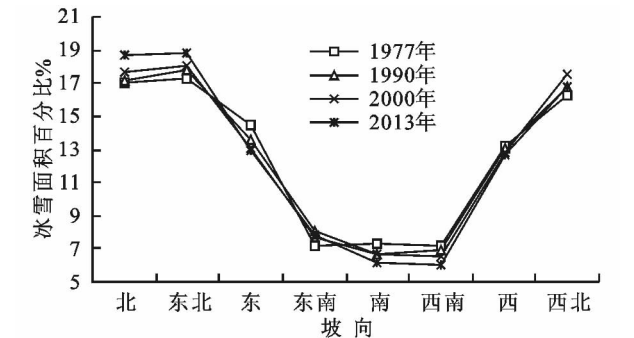


图 6 不同朝向冰雪面积统计

3.6 原因分析及消融趋势预测

在全球变暖的大背景下,对新疆天山北麓的气候特点进行研究分析,发现该区域由暖干向暖湿转变^[22]。近 30 a 来玛纳斯河流域的年降水量和年均温均在波动中上升,说明玛河流域气候呈暖湿化趋势。前人在探讨冰雪变化驱动机制中发现,控制冰雪变化的主要两个因素是夏季均温和年降水量,其中夏季气温对冰川的消融量起决定作用,年降水则影响冰川的积累量^[23-26]继而影响到面积。随着玛河流域气候暖湿化,降水集中在 5—8 月,期间蒸发剧烈,山区冰雪储量积累少,对气温的升高尤为敏感,冰雪消融量增加,尤其是小型冰川数量趋于增长,而小规模冰川对气候的变化更加敏感^[27]。玛河流域山区小规模冰雪缩减程度加剧,是近年来山区冰雪消融加剧的主要因素之一(见图 7)。

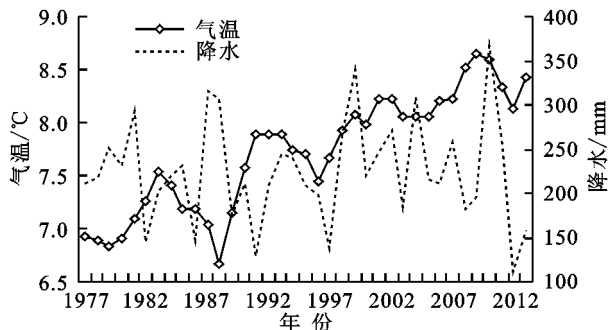


图 7 近 36 a 玛纳斯河流域年平均气温、平均降水量变化

4 结论与讨论

4.1 结论

通过对玛河流域近 36 a 四期遥感影像的解译分析,可以得出以下结论:

(1) 近 36 a 玛河流域山区冰雪面积总体上呈“小—大—小”趋势退缩,总体退缩面积为 1 258.18 km²,尤其是在 1990—2000 年间退缩趋势明显,减少率为 37.1%,之后有所退缩速率有所降低,且在低海拔不稳定积雪地区消融现象明显。

(2) 近 36 a 间玛河流域山区冰雪储量减少明显,储量减少 62.88%,同样呈现“慢—快—慢”的消减趋势,冰川主要分布在 0.1~1 km²。

(3) 近 36 a 间玛河流域冰雪减少趋势明显,从坡度分析,冰雪主要分布在坡度 0°~50°,≥50°雪盖分布较少。从时间尺度上看,冰雪分布趋于低坡度,2000 年至今坡度>80°的冰雪消失。

(4) 从坡向上看,冰雪分布阴坡大于阳坡,这是由于阴坡受太阳光照时间短且强度弱,不利于冰雪消融,反之则阳坡有利于冰雪消融。在时间尺度上,由于坡向,太阳辐射等变化差异小,因此不同坡向分布的冰雪百分比没有明显变化。

4.2 讨论

本文研究结果同我国西部天山区冰雪消融变化趋势基本相吻合,与刘海隆等^[28]的研究结果相比,总体的趋势是一样的。由于选取的遥感数据不同,研究的年限以及对影像冰川辨认的差别,不同作者对相同的冰雪变化的研究结果并不完全一致。虽然气候变化对冰雪的影响有一定的滞后性,但滞后期是短暂的,并不影响气候与冰雪变化之间关系研究的准确性。随着全球气温升高,冰雪消融态势会更突显,各国应采取各种措施应对这一变化。基于对该区域冰雪变化的分析以及其他区域的研究可以看出,玛河流域山区冰雪仍出现消融态势加剧趋势。另外,本文未从物质平衡角度以及冰雪消融的生态效应方面去考虑消融态势,也未对消融程度等级进行划分,这是未来进行针对性进一步深入研究的方面。

参考文献:

- [1] 施雅风. 中国冰川与环境: 现在、过去和未来[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [M]. USA: Cambridge University Press, 2007.
- [3] 白磊, 郭玲鹏, 马杰, 等. 基于数码相机拍摄影像的山区积雪消融动态观测研究: 以天山积雪站为例[J]. 资源科学, 2012, 34(4): 620-628.
- [4] Lapp S, Byrne J, Townshend I, et al. Climate warming impacts on snowpack accumulation in an alpine watershed[J]. International Journal of Climatology, 2005, 25(4): 521-536.
- [5] 戈振长. 天山山区积雪分布特性[J]. 新疆大学学报, 1989, 6(3): 74-82.
- [6] 陈亮, 段克勤, 王宁练, 等. 祁连山七一冰川消融期间的能量平衡特征[J]. 冰川冻土, 2007, 29(6): 882-888.
- [7] 冀琴, 杨太保, 田洪阵, 等. 念青唐古拉山西段近 40 年冰川与气候变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(7): 12-18.
- [8] 李成秀. 昆仑山冰川和积雪变化的遥感监测[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [9] 聂勇, 张德铨, 刘林山, 等. 近 30 年珠穆朗玛峰自然保护区冰川变化的遥感监测[J]. 地理学报, 2010, 65(1): 13-28.
- [10] 骆书飞, 李忠勤, 王璞玉, 等. 近 50 年来中国阿尔泰山友谊峰地区冰川储量变化[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(5): 180-186.
- [11] 祝合勇, 杨太保, 田洪阵. 1973—2010 年阿尔金山冰川变化[J]. 地理研究, 2013, 32(8): 1430-1438.
- [12] 鲁安新, 姚檀栋, 刘时银, 等. 青藏高原各拉丹冬地区冰川变化的遥感监测[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 559-562.
- [13] 别强, 强文丽, 王超, 等. 1960—2010 年黑河流域冰川变化的遥感监测[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 574-582.
- [14] 郑璞, 邓正栋, 关洪军, 等. 基于 TM 和 ETM+ 数据的玛纳斯河流域积雪时空分布特征研究[J]. 气象科学, 2014, 34(1): 39-46.
- [15] 汪凌霄, 冯学智, 肖鹏峰. 新疆玛纳斯河流域卫星雪盖信息提取的影响因素分析[J]. 遥感信息, 2011(5): 31-39.
- [16] 凌红波, 徐海量, 张青青, 等. 1957—2007 年新疆天山山区气候变化对径流的影响[J]. 自然资源学报, 2011, 26(11): 1908-1917.
- [17] 刘艳, 李杨, 张璞. 玛纳斯河流域融雪径流与积雪—气象因子分析[J]. 水土保持研究, 2010, 17(2): 145-149.
- [18] 尹小君. 新疆玛纳斯县域土地利用变化对景观生态系统的影响[J]. 水土保持研究, 2008, 15(3): 77-80.
- [19] 徐根生. 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, 2010.

- [15] 李荣平,周广胜. 1980—2005 年中国东北木本植物物候特征及其对气候的响应[J]. 生态学杂志, 2010, 29(12):2317-2326.
- [16] Piao S L, Cui M D, Chen A P, et al. Altitude and temperature dependence of change in the spring vegetation green-up date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(12):1599-1608.
- [17] Yu H Y, Luedeling E, Xu J C. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau[J]. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2010, 107(51):22151-22156.
- [18] Beck H E, McVicar T R, van Dijk A I J M, et al. Global evaluation of four AVHRR-NDVI data sets: Intercomparison and assessment against Landsat imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(10): 2547-2563.
- [19] Goetz S J, Fiske G J, Bunn A G. Using satellite time-series data sets to analyze fire disturbance and forest recovery across Canada[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 101(3):352-365.
- [20] Malingreau J R. Global vegetation dynamics: Satellite observations over Asia[J]. Int J Remote Sens, 1986, 7: 1121-1146.
- [21] 侯英雨,王石立. 基于作物植被指数和温度的产量估算模型研究[J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(3):105-107.
- [22] 辛景峰,宇振荣, Driessen P M. 利用 NOAA-NDVI 数据集监测冬小麦生育期的研究[J]. 遥感学报, 2001, 6(6):442-447.
- [23] Roerink G J, Menenti M, Verhoef W. Reconstructing cloud free NDVI composites using Fourier analysis of time series[J]. Int J Remote Sens, 2000, 21(9):1911-1917.
- [24] Shen M G, Tang Y H, Chen J, et al. Influences of temperature and precipitation before the growing season spring phenology in grasslands of the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Agri Forest Meteorol, 2011, 151(12):1711-1722.
- [25] Lloyd D A. Phenological classification of terrestrial vegetation cover using shortwave vegetation index imagery[J]. Int. J. Remote Sens., 1990, 11:2269-2279.
- [26] Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R K, et al. Variation in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999[J]. J. Geophys Res., 2001, 106(D17):20069-20083.
- [27] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS[J]. Remote Sens. Environ., 2003, 84:471-475.
- [28] 韦振锋,任志远,张翀,等. 1999—2010 年陕甘宁黄土高原区荒漠化空间特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(5):1230-1236.
- [29] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation[J]. Glob. Change Biol., 2006, 12:672-685.
- [30] Stckli R, Vidale P L. European plant phenology and climate as seen in a 20-year AVHRR land-surface parameter dataset[J]. Int. J. Remote Sens., 2004, 25:3303-3330.
- [31] Kaduk J, Heimann M A. Prognostic phenology scheme for global terrestrial carbon cycle models[J]. Clim. Res., 1996, 6:1-19.



(上接第 212 页)

- [20] 刘宇硕,秦翔,高思如,等. Landsat-5TM 影像在冰川面积信息提取中的精度评价[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2013, 41(12):209-219.
- [21] 王娟,姜卉芳,穆振侠. 高寒山区气温垂直分布的估测方法研究:以玛纳斯河为例[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(3):44-47.
- [22] 沈永平,苏宏超,王国亚,等. 新疆冰川,积雪对气候变化的响应(辑)[J]. 伊犁河, 2013, 2373(2022. 66):142. 1791.
- [23] 曾磊,杨太保,田洪阵. 近 40 年东帕米尔高原冰川变化及其对气候的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(5):144-150.
- [24] 刘燕,李小龙,胡安焱. 河川径流对降水变化的响应研究:以渭河为例[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1):49-52.
- [25] 王鹏祥,杨金虎. 中国西北近 45a 来极端高温事件及其对区域性增暖的响应[J]. 中国沙漠, 2007, 27(4):649-656.
- [26] 李忠勤,沈永平,王飞腾,等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川消融对气候变化的响应[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(3):132-137.
- [27] Narama C, Kääb A, Duishonakunov M, et al. Spatial variability of recent glacier area changes in the Tien Shan Mountains, Central Asia, using Corona (~1970), Landsat (~2000), and ALOS (~2007) satellite data[J]. Global and Planetary Change, 2010, 71(1):42-54.
- [28] 刘海隆,王玲,包安明,等. 基于 MODIS 的玛纳斯河流域冰川积雪覆盖变化特征的分析[J]. 石河子大学学报, 2009, 27(6):770-774.