

近 40 年来冷龙岭地区冰川退缩和气候变化的关系

田洪阵^{1,2}, 杨太保^{1,2}, 刘沁萍²

(1. 兰州大学 资源环境学院 冰川与生态地理研究所, 兰州 730000; 2. 兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000)

摘要:运用比值阈值法(TM3/TM5)结合目视解译,从 1973 年、1999 年和 2010 年 3 个时段的 MSS、ETM、TM 影像中提取了祁连山东段冷龙岭地区冰川的边界,并对距其较近的门源、乌鞘岭、武威和永昌 4 个气象站点 1961—2010 年的气象数据以及冰川区的气象数据进行了分析,结果表明:(1) 37 a 来,冰川处在持续退缩状态;近 10 a 来,冰川消融速度加快;南坡退缩较快,北坡退缩较慢,其它坡向介于二者之间;(2) 该区增温趋势较明显;该区的降水虽有少量增加,但趋势却很不明显;(3) 37 a 来,冰川退缩的主要原因是气温的升高;近 10 a 来,冰川加速消融反映了 20 世纪 90 年代末以来的气温变化特征;南坡冰川对气候变化的反应较敏感。

关键词:冰川退缩;气候变化;遥感;祁连山东段;冷龙岭

中图分类号:P343.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)05-0034-05

Relationship between Climate Change and Glacier Retreat over the Last 40 Years in Lenglongling Range of Eastern Qilian Mountains

TIAN Hong-zhen^{1,2}, YANG Tai-bao^{1,2}, LIU Qin-ping²

(1. Institute of Glaciology and Ecogeography, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The glacier outlines of the year 1973 were delineated manually from a Landsat MSS scene. The glacier outlines of the year 1999 and 2010 were delineated in a semi-automated way using band TM3/TM5 ratio images of Landsat ETM or TM scenes. The decrease in glacier extent was 56.21% between 1973 and 2010 because of rise of temperature, and a rapid and accelerating shrinkage in the last decade was detected, which was consistent with the temperature increase from 1997. Overall, south facing glaciers shrank most, which indicated that glaciers on this aspect were more sensitive to climate changes in this region. Given the temperature increase in the future, based on IPCC, the glaciers in this region will continue to retreat. With glaciers retreat and mass loss, their contribution to runoff will decrease, thereby serious sustainability concerns will be raised.

Key words: glacier retreat; climate change; remote sensing; Eastern Qilian Mountains; Lenglongling Range

冰川对气候变化反应敏感,能直观反应气候变化,因而是很好的气候变化指示器^[1-2]。另外,冰川作为高山固体水库,一方面通过冰雪融水的方式为河流提供补给,另一方面具有调节多年径流的良好作用,在低温湿润年份储存水分,在高温干旱年份提供较平常年份更为丰富的融水以补给雨水的不足^[3]。气候变暖使得全球冰川退缩,而冰川退缩将会给其所补给流域的人类生活带来巨大威胁^[4]。在我国西北的干旱和半干旱地区,冰雪融水是河流的重要补给来源,

冰川退缩会对当地的水资源产生很大影响^[5-6]。当前急需加强冰雪的监测、建模等研究,并制定出应对措施^[4]。

在古冰川方面,康建成等^[7]研究了祁连山冷龙岭南坡晚第四纪冰川演化序列,发现晚第四纪以来该区经历过两次大的冰川作用;郭鹏飞等^[8]与郭红伟等^[9]通过冰川沉积、黄土记录和阶地系列的研究,发现该区至少经历过三次冰期的冰川作用。在现代冰川方面,艾南山等^[10]研究发现祁连山冷龙岭现代冰川的

收稿日期:2011-11-23

修回日期:2012-03-26

资助项目:国家自然科学基金项目(40871057);兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2012-221)

作者简介:田洪阵(1979—),男,安徽淮北人,博士研究生,讲师,主要从事遥感与全球变化研究。E-mail: broadsky2008@gmail.com

通信作者:杨太保(1962—),男,山西平陆人,博士,教授/博导,主要从事自然地理环境变化研究。E-mail: yangtb@lzu.edu.cn

分布受到新构造应力场控制;赵力强^[11]研究了冷龙岭冰川表面沙尘及冰川近期变化,发现在全球气候变暖的大背景下,冰川表面沙尘物质的增多,导致反照率的降低是引起冰川消融加速的主要原因;曹泊等^[12]利用地形图和遥感影像研究发现1972—2007年的该区冰川全部处于退缩状态,且2000—2007年的退缩速率慢于1994—2000年的退缩速率;张华伟等^[13]利用地形图和遥感影像研究发现1970—2009年该区冰川一直处在退缩状态。纵观现有文献,笔者认为有些问题还需要进一步研究:第一,现有文献由于采用了复杂的数据来源、非消融季末的遥感影像以及研究的时间间隔过短,一定程度上增大了自身研究结果的误差,影响了不同研究结果的对比;第二,对冰川变化与气候变化之间的响应研究薄弱,对气候变化的分析不够全面。

基于上述分析,本文在研究时全部采用美国Landsat卫星影像,力求统一数据来源,不仅可以避免采用不同数据源对冰川变化信息提取的不利影响^[14],而且考虑到Landsat 8将于2013年发射,本研究结果将能更好地与将来的研究进行对比,保持研究的连续性;同时各时段研究间隔在10 a以上,更有利于避免因时间间隔过短在提取冰川时误差对变化趋势的影响;最后,对距研究区较近的门源、乌鞘岭、武威和永昌4个气象站点的气象数据和冰川区的气象数据进行分析,并采用Mann—Kendall方法^[15-16]对气温的变化趋势进行分析。

1 研究区概况

冷龙岭位于祁连山东部(37°25′—37°50′N, 101°20′—102°20′E),海拔3 000~5 254 m。该区水汽主要来源于太平洋,通过东南季风输送^[11],冰川类型为亚大陆型^[17]。北坡冰川融水注入河西走廊第三大内陆河石羊河,为河西走廊地区重要的灌溉取水河流。南坡冰川融水注入黄河支流大通河,是青海省除黄河之外的水电资源最丰富的河流(图1)。

2 数据和方法

2.1 数字高程数据

数字高程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服务平台(<http://datamirror.csdb.cn>)。其中SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)数据,版本为4.1,空间分辨率为90 m。30 m分辨率的DEM由ASTER GDEM第一版本(V1)的数据进行加工得到。

由于云覆盖、边界堆叠产生的直线、坑、隆起、大

坝或其它异常等的影响,ASTER GDEM第一版本原始数据局部地区存在异常,所以由ASTER GDEM V1加工的数字高程数据产品存在个别区域的数据异常现象。首先对SRTM数据重采样生成30 m数据,然后与ASTER GDEM进行比较,对于差值大于200 m的像素和ASTER GDEM中无值(nodata)像素,用SRTM数据替代进行异常处理。

2.2 气象数据

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网的中国地面气候资料年值数据集和月值数据集,因冰川变化对气候变化的响应具有滞后性,本文选用距冷龙岭较近且有较长仪器记录的门源、乌鞘岭、武威和永昌4个气象站点(图1)的1961—2010年的气象数据进行气候变化的分析。另外,本文还选取了祁连山区附近的63个气象站点的气象数据,利用多元线性回归方法^[18]对1961—2010年间逐年的年平均气温、年总降水量、夏季(6—8月)平均气温和夏季(6—8月)总降水量进行插值,后统计出冰川区的气候变化信息,与冰川退缩情况进行进一步对比分析。本文采用了Mann—Kendall方法对气温的变化趋势进行了分析,其基本原理如下:设时间序列为 $\{x_i\}$ ($i=1, 2, \dots, n$),定义统计量:

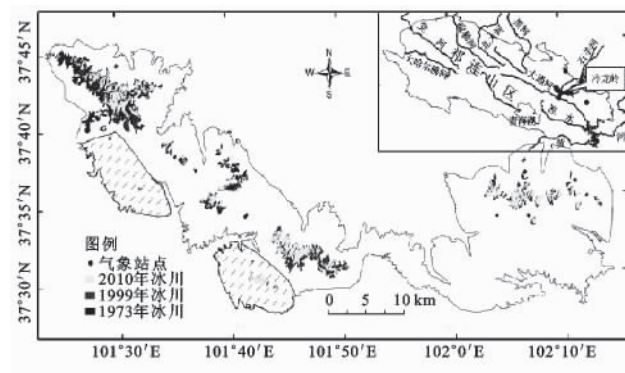


图1 研究区位置及1973年、1999年、2010年的冰川分布

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad (2 \leq k \leq n) \quad (1)$$

其中 m_i 为 $x_i > x_j$ ($1 \leq j < i$) 的样本累积数。

d_k 的均值、方差定义如下:

$$\text{均值: } E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (2 \leq k \leq n) \quad (2)$$

$$\text{方差: } \text{var}(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (2 \leq k \leq n) \quad (3)$$

在时间序列随机独立假设下,定义统计量:

$$UF_k = \begin{cases} 0 & k=1 \\ \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{\text{var}(d_k)}} & (2 \leq k \leq n) \end{cases} \quad (4)$$

统计量 UF_k 大于0表示增温,大于置信水平表示增温趋势显著。具体计算过程在Matlab中编程实现。

2.3 遥感数据来源及冰川提取

2.3.1 遥感数据来源 Landsat 数据来源于美国马里兰大学和美国地质调查局网站,用于精度评估的 HR 影像来源于中巴卫星。影像选择标准为:(1)影像选取的时间间隔为 10 a 以上;(2)为减少积雪的影响,选取 7 月、8 月份获取的影像;(3)尽量选取云量低的影像,选用影像详见表 1。

表 1 所用遥感数据列表

年份	条带号	获取日期	传感器	所用波段	分辨率/m
1973	142/034	1973/08/14	MSS	1,2,4	80
1999	132/034	1999/08/01	ETM	1,2,3,4,5	30
	132/034	2010/07/22	TM	1,2,3,4,5	30
	132/034	2010/08/07	TM	1,2,3,4,5	30
2010	132/034	2010/08/23	TM	1,2,3,4,5	30
	133/034	2010/07/29	TM	1,2,3,4,5	30

2.3.2 冰川提取方法 对于 1973 年 MSS 影像,利用 1,2,4 波段组合得到的假彩色影像,在 ArcGIS 中通过人工解译得到冰川边界。需要说明的是,图 1 中带斜线的区域因云的影响,无法获取 1973 年的冰川数据,并且无法获得相近时段的影像进行替代。

对于 1999 年的 ETM 影像,本文通过对监督分类、非监督分类和比值阈值方法的简单试验对比,最终采用了简捷高效的比值法提取冰川边界,即红色波

段与中红外的比值(TM3/TM5)^[19-21]。具体过程为:使用 ENVI 软件计算 TM3/TM5,得到比值影像,再利用决策树进行分类,阈值设为 1.8(经多次试验确定该值),得到冰川的初步提取结果,然后再利用 3,2,1(红、绿、蓝)波段组合得到的真彩色影像及 5,4,3 波段组合得到的假彩色影像,通过人工解译修正冰川边界。

对于 2010 年 TM 影像,因为该区云量较大,因此选择了时段较近的多幅影像,利用无云区替代有云区的方法^[22],得到合成的影像,该方法有效避免了云的影响。然后再利用处理 ETM 影像的方法提取冰川边界。

最后再把 1999 年和 2010 年的冰川数据转换成 shape 格式,在 ArcGIS 中将其转换至 Albers 等积投影。对 3 个时期冰川进行对比处理,进一步去除误判区域,剔除面积小于 8 100 m²(约相当于 TM 影像的 3×3 像素的面积)的空洞(通常为冰碛物)。因为小面积的多边形很多为雪斑,因而删除了面积小于 0.1 km² 的多边形,冰川提取结果见图 1,面积统计结果见表 2,其中各变化值是图 1 非斜线区(不受云影响的区域)的计算结果。最后,用中巴卫星(CBERS2B) HR 数据(精度 2.36 m)进行验证,该方法的误差为 ±3% 左右。

表 2 1973—2010 年期间的冰川变化

时间	起始年或结束年		面积变化/	面积变化/	年均面积变化/	年均面积
	冰川个数	冰川面积/km ²	km ²	%	(km ² ·a ⁻¹)	变化/%
1973—1999	56	78.07	-27.03	-34.62	-1.04	-1.33
1999—2010	46(53)	51.04(53.03)	-16.85	-33.01	-1.53	-3.00
1973—2010	58(62)	34.19(37.02)	-43.88	-56.21	-1.19	-1.52

注:起始年或结束年一栏中,前两行表示起始年数据,最后一行表示结束年数据,加括号的数字表示整个区域数据,不加括号的数字表示非斜线区的数据。

3 结果与分析

3.1 气候变化特征

研究区增温趋势较明显。1987 年后各个站点的年平均气温陆续出现增加趋势,1997 年后各个站点的年平均气温陆续出现显著增加趋势(置信水平 95%)(图 2)。1988 年后各个站点的夏季平均气温陆续出现增加趋势,1998 年后各个站点的夏季平均气温陆续出现显著增加趋势(置信水平 95%)(图 3)。1997 年以后各站点年平均气温和夏季平均气温一直高于 1961—1990 年的平均水平。该区的降水虽有少量增加,但趋势却很不明显。年总降水量除了永昌站点的线性拟合系数(R^2)略大于 0.1(0.111)外,其余站点的 R^2 均小于 0.05。夏季降水量除了永昌站点的线性

拟合系数(R^2)略大于 0.05(0.074 8)外,其余站点的 R^2 均小于 0.002。

3.2 冰川变化特征

从表 2 可以看出,37 a 来,冷龙岭冰川处在持续退缩状态,冰川面积减少了 43.88 km²,占 1973 年面积的 56.21%,年均减少 1.19 km²,即 1.52%。近 10 a 来,冷龙岭冰川消融速度加快。1999—2010 年相对于 1973—1999 年的年均面积变化无论是绝对量(1999—2010 年:-1.53 km²/a,1973—1999 年:-1.04 km²/a)还是相对量(1999—2010 年:-3.00%/a,1973—1999 年:-1.33%)都在变大,从中可以看出,冷龙岭冰川近 10 a 来消融速度加快。冰川退缩的坡向特征是:南坡退缩较快,北坡退缩较慢,其余坡向介于两者之间,见图 5。

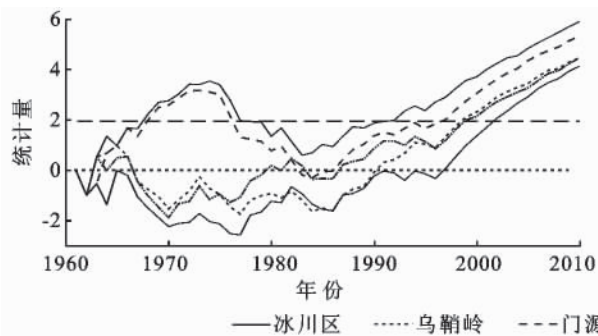


图2 年平均气温 Mann-Kendall 检验

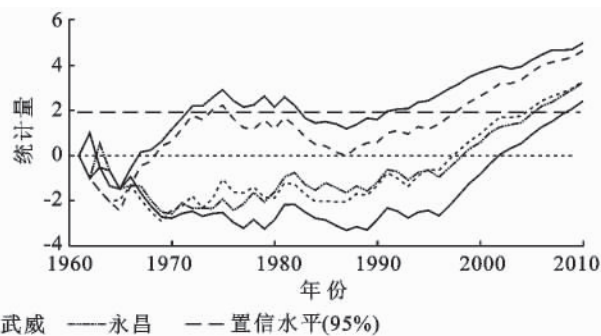


图3 夏季平均气温 Mann-Kendall 检验

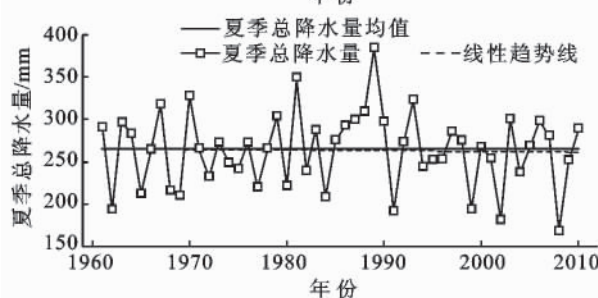
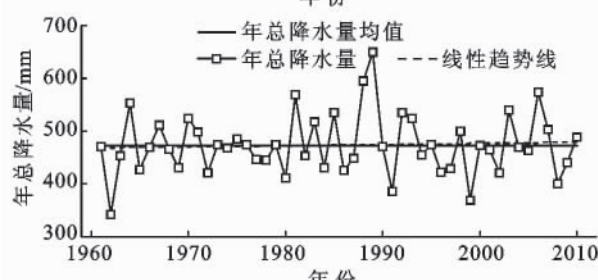
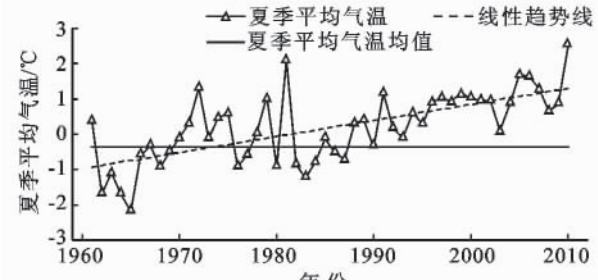
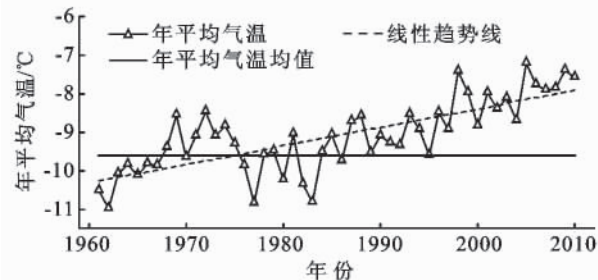
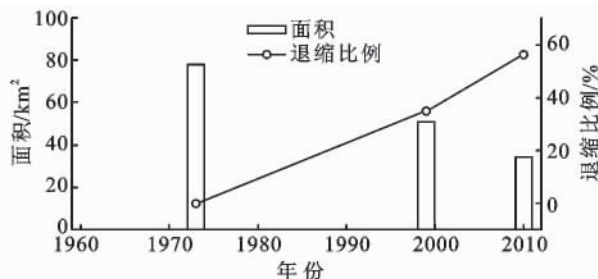


图4 1961—1990年冰川退缩与气候变化关系

3.3 冰川退缩与气候变化的关系

水(降水)、热(气温)及其组合是影响冰川发育和演化的主要气候因子^[23]。气温的升高导致冰川的消融,而降水的增加有利于冰川的积累^[24]。由图4分析可知,该区增温趋势较明显,而降水虽有少量增加,但趋势却很不明显,从中可以推断冷龙岭冰川退缩的主要原因是气温的升高。另外,近10a冰川消融速度加快反映了1997年后气温变化特征。当气温升高后,其他条件变化不大时,物质平衡为负,冰川消融。此时即使气温保持不变,若要达到新的动态平衡也需要一段时间,即当气温升高后保持稳定,冰川也要持续消融一段时间,而当冰川尚未达到新的动态平衡时,气温又进一步升高,这时冰川就会出现加速消融的现象。根据不同坡向冰川变化的特征可以推断,该区南坡冰川对气候变化的反应较敏感(图5)。

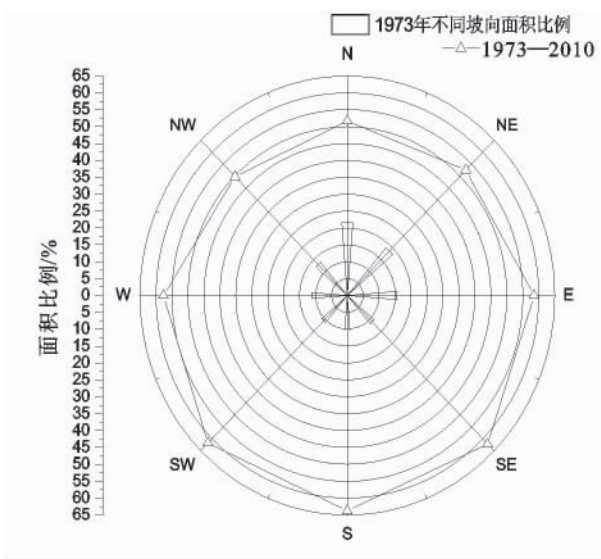


图5 不同坡向面积变化

4 结论

本文选用1973年、1999年和2010年三个时段的Landsat遥感影像为数据源,运用比值阈值法结合目视解译,定量研究了祁连山东段冷龙岭地区冰川的变化情况,并结合气象数据进一步分析了冰川变化的原

因,最后探讨了冰川变化对气候变化的响应,主要结论如下:(1) 37 a 来,该区域冰川处在持续退缩状态;近 10 a 来,冰川消融速度加快;南坡退缩较快,北坡退缩较慢,其它坡向介于两者之间;(2) 近半个世纪以来,该区域增温趋势比较明显,降水量有少量增加,但是趋势并不明显;冰川退缩的主要原因是气温的升高;(3) 近 10 a 来,该区域冰川加速消融,反映了 20 世纪 90 年代末以来气温变化的特征;南坡冰川对气候变化的反应比较敏感。

根据 IPCC 的第四次评估报告^[25],未来的全球气温将进一步升高,据此可以推断冰川将会持续消融。随着冰川规模的变小,其所能提供的河流补给最终将会减少,冰川融水补给的减少将进一步恶化该区水资源紧张的局面。山前绿洲的工农业生产生活用水主要依赖发源于祁连山的河流。地处石羊河流域最下游的民勤绿洲,东西北三面被腾格里和巴丹吉林两大沙漠包围。由于祁连山出水量减少,上游武威绿洲开发用水量增大,下游地区的来水量逐年减少,该区荒漠化程度不断加剧^[26]。温家宝总理早在 2001 年就曾批示:“决不能让民勤成为第二个罗布泊”,面对如此严峻的形势,该区须做好应对措施,如建立灾害监测、预警、防范体系;提高节水技术,综合利用,减少污染,更好地保护水资源;产业转型等。

参考文献:

- [1] IPCC. The Physical Science Basis[R]. NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Vuille M, Francou B, Wagnon P, et al. Climate change and tropical Andean glaciers: past, present and future [J]. Earth—Science Reviews, 2008, 89(3/4): 79-96.
- [3] 王宗太. 中国冰川目录 I: 祁连山区[M]. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1981.
- [4] Kaltenborn B P, Nellesmann C, Vistnes I I, et al. High Mountain Glaciers and Climate Change Challenges to Human Livelihoods and Adaptation[R]. Norway: Birkeland Trykkeri AS, 2010.
- [5] 王宗太, 刘潮海. 祁连山区现代冰川发育条件、分布特征及区划[J]. 地理学报, 1983, 38(2): 141-153.
- [6] 姚檀栋, 刘时银, 蒲健辰, 等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响[J]. 中国科学, 2004, 34(6): 535-543.
- [7] 康建成, 朱俊杰, 陈宏凯. 祁连山冷龙岭南坡晚第四纪冰川演化序列[J]. 冰川冻土, 1992, 14(4): 352-259.
- [8] 郭鹏飞. 祁连山中东段地区第四纪冰期探讨[J]. 冰川冻土, 1980, 2(1): 1-16.
- [9] 郭红伟, 陈晔, 李吉均. 祁连山冷龙岭南麓的冰川序列、黄土记录和阶地系列的初步研究[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1995, 31(1): 102-110.
- [10] 艾南山, 伍光和, 赵镇. 祁连山冷龙岭的冰川分布与新构造应力场[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1982, 18(4): 182-183.
- [11] 赵力强. 冷龙岭冰川表面沙尘及冰川近期变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- [12] 曹泊, 潘保田, 高红山, 等. 1972—2007 年祁连山东段冷龙岭现代冰川变化研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 242-248.
- [13] 张华伟, 鲁安新, 王丽红, 等. 基于遥感的祁连山东部冷龙岭冰川变化研究[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(5): 682-686.
- [14] 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(1/2): 42-52.
- [15] 符涂斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482-492.
- [16] 朱良燕. 基于 M—K 法的安徽省气候变化趋势特征 R/S 分析及预测[D]. 合肥: 安徽大学, 2010.
- [17] 施雅风. 简明中国冰川目录[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005.
- [18] 李艳丽. 近 10 年来气候变化对东昆仑山北坡山地及山前绿洲植被的影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [19] Andreassen L M, Paul F, Kääb A, et al. The new Landsat-derived glacier inventory for Jotunheimen, Norway, and deduced glacier changes since the 1930s [J]. The Cryosphere, 2008, 2(2): 131-145.
- [20] Bolch T, Menounos B, Wheate R. Landsat-based inventory of glaciers in western Canada, 1985—2005[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(1): 127-137.
- [21] Paul F, Kääb A, Maisch M, et al. The new remote sensing derived Swiss Glacier Inventory: I. Methods [J]. Annals of Glaciology, 2002, 34(1): 355-361.
- [22] RI Pyongsop, MA Zhangbao, QI Qingwen, et al. Cloud and shadow removal from Landsat TM data[J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(3): 534-545.
- [23] 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.
- [24] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川概论[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [25] IPCC. Synthesis Report[R]. Geneva, Switzerland, 2007.
- [26] 安富博, 丁峰. 甘肃省民勤县土地荒漠化的发展趋势及其防治[J]. 干旱区资源与环境, 2000, 14(2): 41-47.