

基于 GIS 和 RS 的中亚阿拉套山脉近 22 年来冰川变化

何毅, 杨太保, 杜鹃, 田洪阵

(兰州大学 资源环境学院 冰川与生态地理研究所, 兰州 730000)

摘要:运用 Landsat TM/ETM⁺ 遥感影像资料,通过计算机自动解译结合目视解译的方法,提取了阿拉套山 1990 年、1999 年及 2011 年 3 个时段的冰川边界,并应用 GIS 技术手段系统研究了阿拉套山冰川变化与气候的关系。结果表明:1990—2011 年,阿拉套山地区冰川面积退缩了 20.24%,其冰川主要分布在北坡、东北坡和西北坡;西坡的冰川退缩速率最大,达到 30.96%。与 1990—1999 年相比,近 10 a 来冰川退缩加快。研究区冰川面积随海拔的升高先呈增加趋势,至 3 600~3 800 m 达到最大后呈减少趋势。对研究区附近温泉和阿拉山气象站点资料的分析表明,其气温升高但降水量变化不大可能是导致研究区冰川退缩的主要原因。

关键词:阿拉套山; GIS 技术; RS 技术; 冰川变化; 气候响应

中图分类号: P343.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)06-0130-05

Glacier Variation of Past 22 Years in Alatau Mountains of Central Asia Based on GIS and RS

HE Yi, YANG Tai-bao, DU Juan, TIAN Hong-zhen

(Institution of Glaciers and Ecology, College of
Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The Alatau Mountain was selected as a example to search a method for delineating glacier extent by Landsat TM, ETM⁺ image of 1990, 1999 and 2011. The study area for glaciers was extracted by using the remote sensing image processing and analyzing method, and the changes of glaciers in the study area were analyzed with the support of the GIS technology. The results indicated that the amplitude of the whole change of glaciers in Alatau Mountain was large and glaciers had retreated rapidly during the study period 1990 to 2011. The total area for the investigated glaciers had reduced by 20.24%. The glaciers were mainly distributed in the northern slope, northeast slope and northwestern slope, but retreat rate of western slope reached to 30.96%. Compared with the period of 1990—1999, the retreat rate of glaciers would speed up in the past 10 years. The glacier area distribution of study area first tended to increased with altitude, up to 3 600 m~3 800 m after decreasing trend. By studying the hot springs and the Alaskan mountain meteorological stations, little precipitation change and its temperature rises may be the main reasons for glacier retreat in the study area.

Key words: Alatau Mountains; GIS; RS; glacier change; climate response

由于冰川波动对气候变化的反应敏感^[1],冰川监测已经成为全球气候检测系统的一个重要组成部分^[2]。近几十年来在气候变暖的影响下,冰川处于持续的负物质平衡而不断退缩^[3-4]。气候情景预测表明,未来气候变暖将进一步导致冰川消退^[5-7],从而引起冰湖溃决^[8]。因此研究冰川变化的状态对相关地区的长期规划、资源管理与灾害预防具有重要的意义。

20 世纪 70 年代以来,遥感开始作为一种重要的手段来研究冰川的性质和特征、监测冰川的动态变化等^[9-11]。冰川学家对西部大部分地区的冰川进行了研究,如冷龙岭^[12]、西藏林芝^[13]等地区,这些研究表明,冰川基本上都处于不断退缩中,但是对于阿拉套山地区的研究却比较少。本文以阿拉套山地区现代冰川为研究对象,利用 Landsat TM/ETM⁺ 影像并结

收稿日期: 2013-03-12

修回日期: 2013-04-26

资助项目: 国家自然科学基金项目(41271024); 黄河上游晚更新世河流阶地和冰川演化对千年尺度气候变化的响应

作者简介: 何毅(1987—),男,甘肃会宁人,博士,主要研究方向为环境演变与全球变化。E-mail: heyi11@lzu.edu.cn

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

合现有文献资料,对该地区冰川变化数据进行分析,结合所观测数据探讨该区冰川的变化情况。

1 实验材料与方法

阿拉套山属于天山山系,位于新疆博尔塔拉蒙古自治州的北部(东经 $79^{\circ}30'$ — $81^{\circ}45'$,北纬 $44^{\circ}40'$ — $45^{\circ}20'$)。山脉近东西走向,其北坡为哈萨克斯坦共和国。研究区位于巩乃斯板块的东北边缘,巩乃斯板块与其东北的准噶尔板块在本区以艾比湖断裂为界,板块边界在艾比湖附近呈北西—南东走向,在艾比湖以北的哈萨克斯坦共和国境内(图 1)。

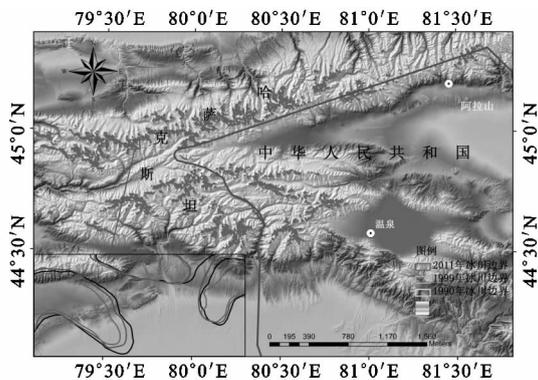


图 1 研究区地理位置及冰川分布

1.1 气象数据

本研究采用的年均降水量数据和年均气温数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)的中国地面气候资料年值数据集。由于阿拉套山地区没有气象站点,本文采用阿拉套山附近温泉和阿拉山气象站点 1980—2010 年的气象观测资料用于分析。

1.2 影像数据

本文所使用的 TM/ETM⁺ 遥感影像数据来自美国地质调查局 USGS(glovis.usgs.gov)的陆地卫星。下载数据为 NASA 和 USGS 发布的 Level 1T 级数据产品,该产品经过了系统辐射校正和地面控制点几何校正,并且利用 DEM 数据进行了地形校正。影像选取的时间间隔为 10 a 左右,以减少不同时期冰川

变化所造成的误差。同期的遥感资料尽量选用相近时段的数据。为了减少积雪对冰川边界提取的影响,选取夏季获取的少云或者无云的影像(表 1)。

表 1 影像数据信息

| 序号 | 轨道号 | | 成像日期 | 平均云量/% | 传感器 | 分辨率/m |
|----|------|-----|-----------|--------|------------------|-------|
| | Path | Row | | | | |
| 1 | 147 | 28 | 2011.9.20 | 0 | TM | 30 |
| 2 | 147 | 29 | 2011.8.19 | 8 | TM | 30 |
| 3 | 147 | 29 | 2011.9.12 | 0 | ETM ⁺ | 30 |
| 4 | 148 | 28 | 2011.9.11 | 0 | TM | 30 |
| 5 | 148 | 29 | 2011.9.11 | 0 | TM | 30 |
| 6 | 148 | 29 | 2011.9.3 | 0 | ETM ⁺ | 30 |
| 7 | 147 | 28 | 1999.8.26 | 0 | TM | 30 |
| 8 | 147 | 29 | 1999.8.26 | 0 | TM | 30 |
| 9 | 148 | 28 | 1999.8.17 | 0 | TM | 30 |
| 10 | 148 | 29 | 1999.9.18 | 0 | TM | 30 |
| 11 | 147 | 28 | 1990.9.10 | 0 | TM | 30 |
| 12 | 147 | 29 | 1990.9.10 | 0 | TM | 30 |
| 13 | 148 | 28 | 1990.7.31 | 0 | TM | 30 |
| 14 | 148 | 29 | 1989.9.14 | 0 | TM | 30 |

注:① 没有找到 1990 年行列号 148/29 对应的影像,用 1989 年的影像代替。② 对行列号为 147/29 和 148/29 的 TM 影像一小部分有云遮挡,因此下载了两幅 ETM⁺ 影像,采用多影像局部自适应回归分析模型进行条带修复后作为补充。其余影像的云量对冰川解译的影响不大。③ 所采用的 DEM 数据来源于国际科学数据服务平台(<http://datamirror.csdb.cn/>),分辨率为 30 m。

1.3 冰川提取方法

本文采用比值阈值法(b3/b5)提取冰川边界。比值阈值法相对于人工解译,是一种稳定和省时的方法,能够区分积雪和阴影中的冰。TM3/TM5^[14-15] 在处理阴影和阴影处的残骸覆盖物时比 TM4/TM5 优越。具体做法是先使用 ENVI 软件把同一景数据不同波段的数据合成一个文件,然后用合成的影像计算 TM3/TM5,得出比值影像后,再利用决策树进行分类。通过多次试验,将阈值设为 2.3 时提取的冰川边界最好。得到初步结果后,转换成 shape 格式。再在 ArcGIS 中将其转换成 Albers 投影,最后对 3 期冰川进行目视解译,利用 ArcGIS 进行面积变化分析。几条典型冰川变化如图 2 所示。

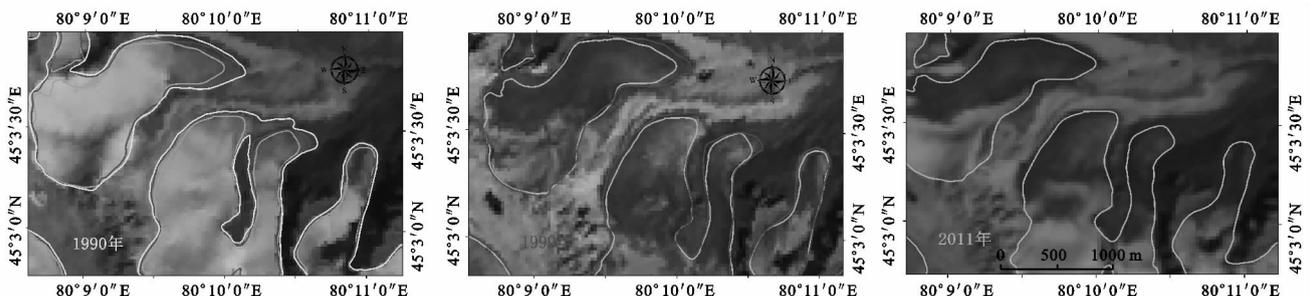


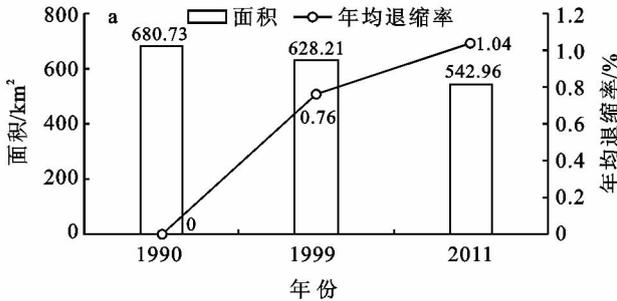
图 2 不同时期典型冰川示意图

2 结果与分析

2.1 不同时期冰川面积变化

阿拉套山地区 1990 年冰川总面积为 680.73 km²,到 2011 年减少为 542.96 km²。一部分冰川在退缩的过程中分解成小冰川。

图 3a 反映出 1999—2011 年研究区冰川的年均退缩率明显高于 1990—1999 年,也高于 1990—2011 年的年均退缩率,表明近 10 a 阿拉套山地区冰川退缩有加快趋势。图 3b 显示出 1990—2011 年冰川总



面积减少了 137.77 km²,面积变化率为 -20.24%。

2.2 不同朝向冰川面积变化

统计了 1990 年、1999 年和 2011 年冰川总面积在各个朝向的分布,从朝向分布玫瑰图(图 4)可见,朝向偏 N 的冰川在面积上占有明显优势,朝向偏 S 的冰川只占朝向偏北的 1/6。这是由于山脉北坡受太阳辐射较弱,更利于冰川积累、发育。从东坡和西坡来看,朝向偏 E 的冰川多于朝向偏 W 的冰川,这可能是由于受偏东气流影响较大。综合多个因素来看,在各个朝向中,朝向为 N 的冰川最多,规模也偏大。

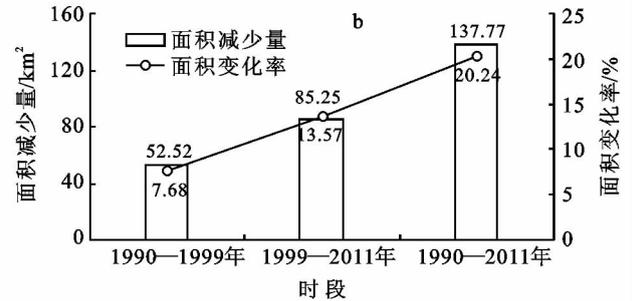


图 3 1990—2011 年冰川总面积分布及变化

从冰川面积变化率来看(1990—2011 年),阿拉套山现代冰川各坡向冰川面积都在减少。但减少的程度并不相同,如图 5 所示,偏西(W、SW、NW)冰川面积退缩较快,其中正 W 冰川面积退缩最大,达到

30.96%,SE 次之,为 27.85%。正 N 冰川分布最多,但是冰川面积退缩率最小,为 15.3%。这可能是由偏北坡受到太阳辐射较弱,受气流影响较大,而偏西坡受到太阳辐射较强,并且冰川规模较小造成的。

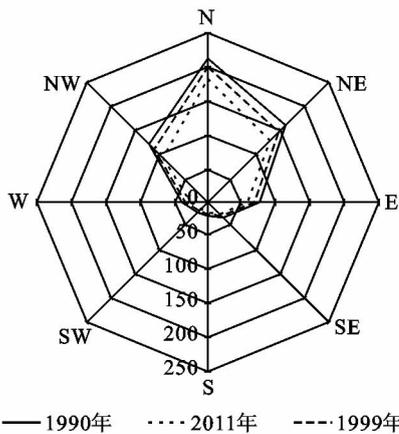


图 4 1990 年、1999 年和 2011 年各朝向冰川面积(km²)

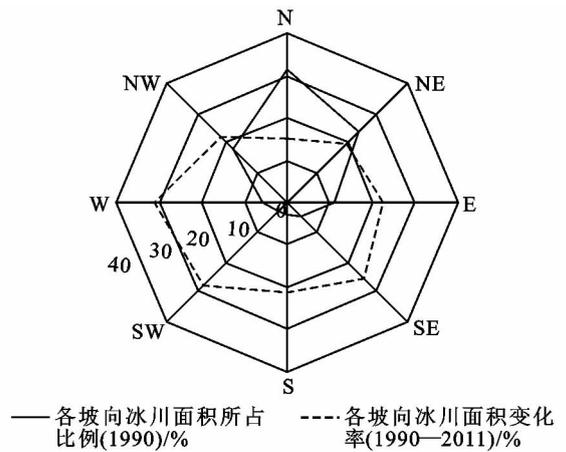


图 5 各朝向冰川面积退缩速率

2.3 不同高程冰川面积变化

根据研究区 1:5 万 DEM,以 200 m 为分类间距将该地区冰川分布的范围按高程分为 8 个梯度,并对这些梯度上的面积进行了统计(图 6)。结果表明,冰川面积分布随海拔的升高先呈增加趋势,至 3 600~3 800 m 达到最大后又呈减少趋势。分布在 3 200~4 200 m 这 5 个梯度的冰川面积为 663.7 km²,占总面积的 97.5%;而分布在 3 200 m 以下和 4 200 m 以上的冰川仅占总面积的 2.5%。冰川的这种分布反映了降水和地势对冰川发育的综合作用,即随着地势

的升高,液态降水逐步转化为固态降水,积累变大,物质平衡变大,因此在山腰至山脊处发育冰川^[16]。

统计 1990—2011 年前述 8 个海拔梯度上的冰川面积变化率(图 6)可知,冰川面积退缩率随着海拔的升高而减小。主要的冰川消融发生在海拔 4 000 m 以下的 5 个梯度,面积减少共计 136.74 km²,占冰川面积减少总量的 99.35%;而海拔 4 000 m 以上的 3 个梯度面积仅减少 0.89 km²,占冰川面积减少总量的 0.65%。这与纳木那尼^[14]等地高海拔出现冰川消

融的结果相一致,表明升温迫使冰川消融面积增大和雪线升高。

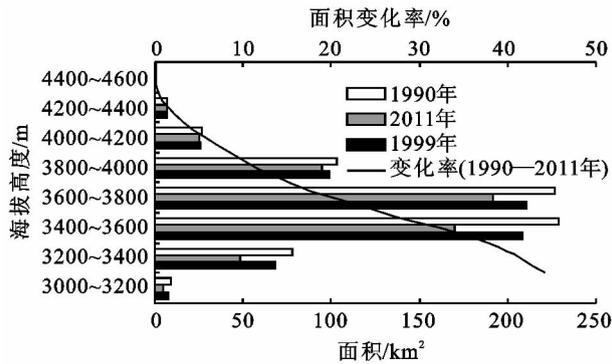
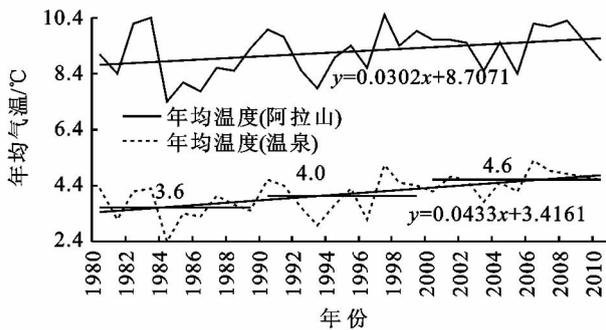


图6 1990年、1999年和2011年各高程梯度的冰川面积及面积变化率

3 讨论

由于研究区内没有气象站点,本文采用阿拉套山地区附近的温泉和阿拉山气象站1980—2011年气象观测资料进行了分析(图7)。两站1980—2010年温度持续升高,温泉站增温率为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,阿拉山站增温率为 $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。同时,这一期间两站的降水量略增,温泉站增长率为 $22.1\text{ mm}/10\text{ a}$,阿拉山站增长率为



$8.9\text{ mm}/10\text{ a}$ 。

冰川变化对温度和降水最为敏感^[17]。通常情况下,温度在气候变化过程中对冰川物质平衡起主导作用,一方面表现在温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 需要降水增加 25% ^[18]或者 35% ^[19]才能弥补由于升温所引起的冰川消融;另一方面温度升高还可以使降水中的雨雪比例变化及冰川表面融雪过程增强^[20],从而降低反照率并暴露更多的冰而促进消融。据研究^[21-22],20世纪70—80年代为冰川稳定或者出现小的前进时期,80年代末至90年代以来冰川出现普遍的强烈退缩现象,近年退缩幅度呈逐渐加剧的趋势。气温和降水与冰川变化关系最为密切。冰川变化虽然滞后于温度变化,但他们之间存在很好的对应关系^[23]。20世纪70年代被认为是冰川变化的一个转换时期,之后的30 a冰川消融速度加快,尤其近10 a来随着温度的显著升高,冰川消融速度超过以往任何时段^[24]。近22 a来阿拉山地区冰川的面积明显退缩,同期的气温明显上升而降水在波动中小幅上升。从冰川变化结果可以推断,气温的上升对冰川的退缩起了更主要的作用。因此,在阿拉套山地区,近期的冰川退缩是由于当地气候变暖引起的。

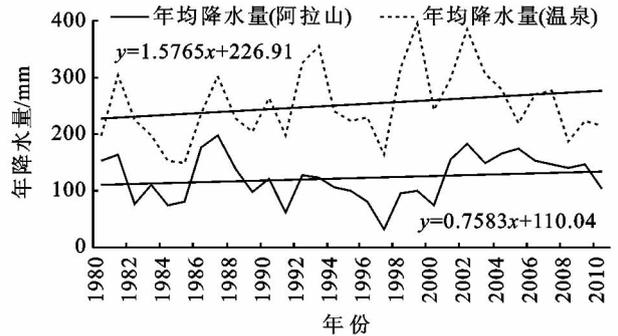


图7 1980—2010年各站点年均降水量和年均气温

4 结论

根据多期遥感资料和气象资料,利用遥感和GIS技术对阿拉套山地区的冰川变化进行了研究,得出以下结论:

(1) 1990—2011年,阿拉套地区冰川面积从 680.73 km^2 减少至 542.96 km^2 。共退缩了 137.77 km^2 ,占1990年总面积的 20.24% 。多期影像对比显示,1990—1999年和1999—2011年冰川退缩平均速率分别为 0.76% 和 1.04% 。表明冰川退缩在近10 a加快。

(2) 坡向是影响冰川变化的一个重要因子。从1990年冰川分布来看,研究区冰川主要分布在N坡、NW坡和NE坡。但冰川面积退缩率较大的坡向为

W坡、SE坡和SW坡,分别达到 30.96% 、 27.85% 和 25.23% 。

(3) 1990—2011年,主要的冰川消融发生在海拔 $4\text{ }000\text{ m}$ 以下的区域,面积共计减少了 136.74 km^2 ,占冰川面积减少总量的 99.35% ;而海拔 $4\text{ }000\text{ m}$ 以上的区域面积仅减少 0.89 km^2 ,占冰川面积减少总量的 0.65% 。

(4) 1980年以来,气温升高和降水量变化不大是研究区冰川退缩的主要原因。

在进行研究中,发现存在以下问题:

(1) 由于受遥感影像质量的限制,不能够在长时间序列上研究阿拉套山脉冰川与气候变化的关系,无法深入研究整体变化趋势。

(2) 在研究冰川波动对气候变化的响应时,只能

定性分析两者之间的相互关系,无法定量表现降水量和温度对其的影响程度。

参考文献:

- [1] Oerlemans J. Quantifying global warming from the retreat of glaciers[J]. *Science*, 1994, 264: 243-245.
- [2] Haeberli W, Cihlar, Barry R G. Glacier monitoring within the global climate observing system[J]. *Annals of Glaciology*, 2000, 31(1): 241-246.
- [3] Yao Tandong, Wang youqing, Liu Shiyin, et al. Recent glacier retreat in High Asia in China and its impact on water resource in Northwest China[J]. *Science in China (D)*, 2004, 47(12): 1065-1075.
- [4] 蒲健辰,姚檀栋,王宁练,等. 近百年来青藏高原冰川的进退变化[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(5): 517-522.
- [5] Oerlemans J, Anderson B, Hubbard A, et al. Modelling the response of glaciers to climate warming[J]. *Climate Dynamics*, 1998, 14(4): 267-274.
- [6] 谢自楚,冯清华,王欣,等. 中国冰川系统变化趋势预测研究[J]. *水土保持研究*, 2005, 12(5): 77-82.
- [7] Shi Yafeng, Liu Shiyin. Estimation on the response of glaciers in China to the global warming in the 21st century[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(7): 668-672.
- [8] 郭国和,程尊兰,吴国雄,等. 川藏公路南线典型冰川及其溃决危险性评价[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(2): 50-55.
- [9] Casassa G, Katrine S, Andres R, et al. Inventory of glacier in Isla Riesco, Patagonia, Chile, based on aerial photography and satellite imagery[J]. *Annals of Glaciology*, 2002, 34(1): 373-378.
- [10] Paul F. Changes in glacier area in tyrol, Austria, between 1969 and 1992 derived from Landsat 5 Thematic Mapper and Austrian Glacier Inventory data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(4): 787-799.
- [11] Haeberli W, Cihlar J, Barry R G. Glacier monitoring within the Global Climate Observing System[J]. *Annals of Glaciology*, 2000, 31(1): 241-246.
- [12] 田洪阵,杨太保,刘沁萍. 近 40 年来冷龙岭地区冰川退缩和气候变化的关系[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(5): 34-38.
- [13] 胡桂胜,陈宁生,邓虎. 基于 GIS 的西藏林芝地区泥石流易发与危险区分析[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(3): 195-200.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 王园香. 青藏高原气候环境对冰川发育影响的数值模拟研究[D]. 北京:中国气象科学研究院, 2009.
- [17] Kehrwald N M, Thompson L G, Yao T D, et al. Mass loss on Himalayan glacier endangers water resources [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(22): L225031.
- [18] Oerlemans J. Extracting a climate signal from 169 glacier records[J]. *Science*, 2005, 308(5722): 675-677.
- [19] Raper S C B, Brown O, Braithwaite R J A. geometric glacier model for sea level change[J]. *Annals of Glaciology*, 2000, 46(154): 357-368.
- [20] Huntington T G. Evidence for intensification of the global hydrologic cycle: Review and synthesis[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 319(1): 83-95.
- [21] 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.
- [22] Bolch T, Buchroithner M, Pieczonka T, et al. Planimetric and volumetric glacier changes in the Khumbu Himal, Nepal, since 1962 using Corona, Landsat TM, and ASTER Data[J]. *Journal of Glaciology*, 2008, 54(187): 592-600.
- [23] 车涛,李新, Mool P K, 等. 希夏邦马峰东坡冰川与冰川湖泊变化遥感监测[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(6): 801-805.
- [24] Ye Q H, Zhu L P, Zheng H X, et al. Glacier and lake variations in the Yamzhog Yumco basin, southern Tibetan Plateau from 1980 to 2000 using remote sensing and GIS technologies[J]. *Journal of Glaciology*, 2007, 53(183): 673-676.