

基于 Landsat 数据的郭扎错北面冰川近 20 年来 面积动态变化遥感研究

纪 鹏^{1,2}, 郭华东¹, 张 露¹

(1. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心数字地球重点实验室, 北京 100094;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:冰川能够敏感地反映区域环境变化,是研究全球变化的重要因素之一。昆仑山地区冰川集中,是研究冰川动态变化的理想区域。根据郭扎错北面1991~2009年 Landsat TM 与 ETM+遥感影像,研究了该地区冰川近 20 a 来的变化情况。结果发现,该地区冰川变化显著,并得出以下结论:① 郭扎错北面冰川面积在 1991~2009 年间具有先增加后减少的波动规律;② 该区域内存在东部冰川比西部变化量大和变化率快的差异性;③ 该地区中峰冰川在 2001~2004 年间面积大幅增加,可能与 2001 年 11 月 14 日发生在昆仑山口以西的 8.1 级强烈地震有关;④ 该研究区内冰川面积变化主要受年均温度和年累积降水量的综合影响。

关 键 词:冰川面积变化;遥感;地理信息系统;昆仑山

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2011)02-0202-07

1 引 言

冰川是反映全球气候变化的重要敏感因子之一,尤其在变暖背景下,冰川的指示性作用显得越发重要^[1-2]。世界上大多数冰川都位于人类活动稀少的地区,所以其前进或后退受到的人为干扰很小,因而有利于我们就自然系统本身探究冰川变化和气候变化之间的关系。冰川变化产生的冰雪融水为下游湖泊和河流等淡水资源提供了补给,间接地影响着局地的人类社会生产用水^[3-4]。同时,这些地区也是湖泊或河流溃决、洪水灾害发生的潜在区域^[5]。因此,监测和研究冰川变化规律,尤其是代表性冰川或典型区域冰川变化,具有重要的科学和实际意义^[6]。

当前冰川学研究的重要手段之一是卫星遥感技术,它具有快速、高效、便捷等优点,尤其与 GIS 技术相结合,能够更好地监测和分析冰川的变化^[7-9]。郭华东^[10]于 1999 年运用雷达手段对郭扎错北面地质地貌作过研究。上官冬辉等^[11]根据航空相片、地

形图、遥感影像数据分析了玉龙喀什河源区的冰川变化,得出了该区冰川近 32 a 来面积和储量等的变化信息。宋波等^[12]综合遥感图像和 DEM 等多种数据,提出了基于遥感和地理信息系统的改进的半自动集成分类方法,对我国贡嘎山地区大量冰碛物覆盖的贡巴冰川进行了研究,取得了较好的分类结果。晋锐等^[13]利用 1970 年代中国冰川编目数据、2000/2001 年 ASTER 遥感影像及数字高程模型,在 GIS 支持下统计分析了西藏朋曲流域冰川的变化趋势,得出近 30 a 该流域内冰川数量减少了 10%,面积退缩 9%,冰储量减少 8.4% 的结论。这些研究均证实了遥感与 GIS 结合的方法是行之有效的。

在此基础上,本文根据郭扎错北面 1991 年、2001 年、2004 年和 2009 年 Landsat TM 与 ETM+遥感影像,采用半自动分类方法提取冰川信息,运用近似梯度算法将分类结果矢量化,然后利用地理信息系统技术进行统计分析,并结合近当地同期气候资料,推测该区近 20 a 来冰川变化的原因,以期发

现冰川变化与气候变化之间的关系。

2 研究区概况

研究区地处郭扎错北面,位于新疆和田区南部 34.5°~36°N,79.5°~82°E 之间,是我国冰川作用的中心地区之一。该区冰川的显著特点是比较集中、数量多、规模大、平均雪线高、冰舌末端高度低、山谷

冰川平均面积大^[14]。根据全球陆地冰空间观测计划(GLIMS)公布的调查结果显示,本区现共有冰川 3 165 条,其中玉龙喀什河流域的多峰冰川规模最大,长达 26.8 km,面积为 251.7 km²^[15]。该地区冰川类型较齐全,既有悬冰川、冰斗冰川,也有山谷冰川和平顶冰川,作为周边地区河流的融水补给,这些后备水源十分丰富和稳定。

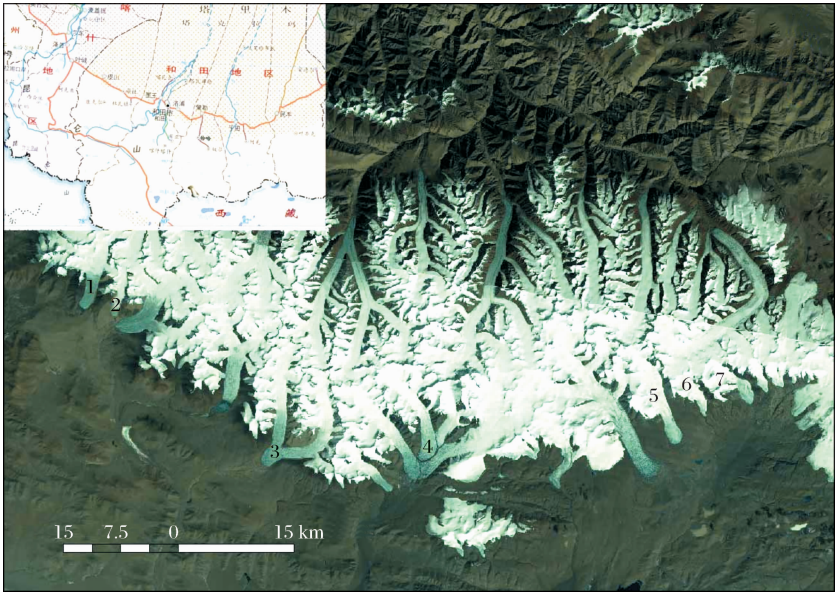


图 1 郭扎错北面研究区域
Fig. 1 Study area of the south slope on the middle Kunlun mountains

3 数据源

本文采用的数据分别为 1991 年 10 月 17 日 Landsat 5 TM 数据,2001 年 10 月 20 日和 2004 年 9 月 10 日 Landsat 7 ETM+数据以及 2009 年 10 月 2 日 Landsat 5 TM 数据,如表 1 所示。全部 4 景

图像均来自于 GLCF(Global Land Cover Facility, <http://www.glc.f.gov>)和 USGS(U. S. Geological Survey,<http://www.usgs.gov>)的数据共享平台。所有图像均为带有地理坐标信息的 GeoTIFF 格式,其大地参考椭球坐标系为 WGS84,投影坐标系统为 UTM,Zone 44N。

表 1 1991~2009 年 Landsat 数据源表
Table 1 Landsat data source from 1991 to 2009

时间	条带号	行编号	卫星	传感器	分辨率/m
1991 年 10 月 17 日	145	36	Landsat 5	TM	30
2001 年 10 月 20 日	145	36	Landsat 7	ETM+	30
2004 年 09 月 10 日	145	36	Landsat 7	ETM+	30
2009 年 10 月 02 日	145	36	Landsat 5	TM	30

此外,考虑到云的因素,4 景图像的成像时间分别选在每年的 9 月或 10 月,含云量非常少的日子,从而减少云的影响。

4 研究方法

本文采用阈值分割法对冰川信息进行半自动分

类提取,该方法不仅具有耗时少、效率高的优点,还能够准确地检测出在阴影区中的冰川^[16]。实际操作时,按如下步骤进行提取:

(1) 波段 RED/波段 SWIR,即 TM3/TM5,计算公式如下:
$$\text{Threshold}=\text{Red}/\text{SWIR} \text{ 或 } \text{Threshold}=\text{TM3}/\text{TM5} \tag{1}$$

其中:Red 代表红波段,SWIR 代表中红外波段, TM3 为红波段通道, TM5 为中红外波段通道。

(2) 设定阈值 2.0,将步骤(1)中所得的比值结果按照大于等于 2.0 冰川类和小于 2.0 非冰川类两类进行分割,其判别公式如下:

Glacier=if(Threshold≥2.0)

Others=if(Threshold<2.0)

(2)

阈值 2.0 是在数理统计的基础上,对比假彩色合成图像,结合目视解译综合得来。如图 2 所示,冰川与其他地物的 DN 值在 2.0 处有清晰的界限,将阈值设为 2.0 可以较容易地区分冰川和其他地物。经过上述两步处理后,就能够获取比较好的冰川分类结果。这种方法对有冰碛覆盖的冰川也能够进行有效地提取,但是不能区分水体与冰雪区,原因是在 TM3 和 TM5 波段下,水体和冰雪具有相似的反射光谱特征。针对这一问题,采用目视解译的方法,人工剔除错分为冰川的水体比其他任何自动方法都要优越和省时^[17]。

接着,运用 Roberts 算子(近似梯度算子)对上述冰川分类结果进行矢量化处理,其原理是将四邻域中对角线上的像元值差作为水平和垂直方向梯度的近似值,从而检测出图像中相应目标的边界^[18]。

| ∇ f(x,y) | = √(f(x,y) - f(x+1,y+1))² + (f(x+1,y) - f(x,y+1))²

(4)

其中: $x,y,f(x,y)$ 意义不变。

上式可简化为:

| ∇ f(x,y) | = | f(x,y) - f(x+1,y+1) | +

| f(x+1,y) - f(x,y+1) |

(5)

| ∇ f(x,y) | = max(| f(x,y) - f(x+1,y+1) |,

| f(x+1,y) - f(x,y+1) |)

(6)

表示成模板形式为:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \text{与} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

由于阈值分割后的冰川分类结果为灰度图像,为了更好地检测出冰川边界,在矢量化处理之前还需要对其进行二值化处理。方法是通过波段运算把 DN 值大于 0 的像元都置为 1,这样处理后,冰川边界被有效地提取出来。公式如下:

if(DN>0)DN'=1,else DN'=0

(7)

最后,在 ArcInfo 中叠加全部四组不同时期的冰川边界矢量化数据,并利用 ArcInfo 强大的统计功能对郭扎错北面冰川属性进行了变化分析。

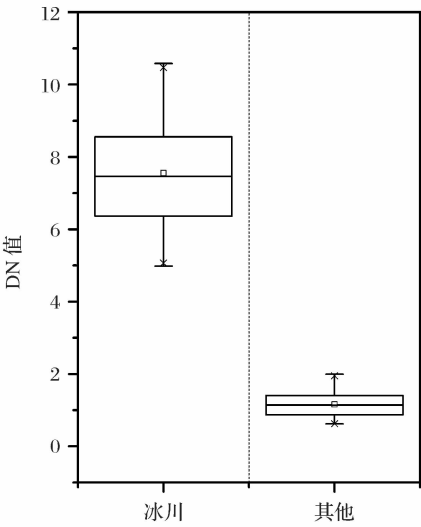


图 2 冰川与其他地物 DN 值的箱型图

Fig. 2 Boxplot of the glaciers and other classes DN value

本研究中对对应目标是冰川。详细解释如下:
梯度的定义:

$$\nabla f(x,y) = \frac{\partial f(x,y)}{\partial x}i_x + \frac{\partial f(x,y)}{\partial y}i_y$$

(3)

其中: x,y 为图像像素的坐标值, $f(x,y)$ 为像素值, i_x 为横坐标单位向量, i_y 为纵坐标单位向量。

Roberts 算子的梯度表达式:

5 结果与分析

根据世界冰川编目,本文在郭扎错北面选取了 7 条冰川,对其在 1991 年、2001 年、2004 年和 2009 年 9 或 10 月份的冰川面积大小与其年际变化进行了统计分析。结果发现,位于研究区西南部的泉水冰川末端面积从 1991 年的 1.21 km² 到 2001 年的 1.26 km²,增加了 0.05 km²,到 2009 年,其面积又减少为 1.21 km²。泉水冰川东侧一冰川,其末端面积在 1991 年为 1.29 km²,至 2001 年增加到 1.43 km²,增幅为 0.14 km²;到 2004 年其面积减少为 1.33 km²,减幅为 0.1 km²;再到 2009 年其面积减少为 1.31 km²,继续减少 0.02 km²。

该冰川东侧是本研究区规模较大的冰川之一,称为弓形冰川,其末端面积由 1991 年的 12.38 km² 到 2001 年的 11.75 km²,减少了 0.63 km²;到 2004 年的 11.5 km²,其面积再减少了 0.25 km²;到 2009 年的 10.55 km²,该冰川面积进一步减少了 0.95 km²。总的来看,弓形冰川的面积在这 4 a 中趋于减少。

表 2 研究区冰川面积变化表

Table 2 The area changes of the selected seven glaciers

冰川编号	1991~2001 年 面积变化/km ²	2001~2004 年 面积变化/km ²	2004~2009 年 面积变化/km ²
1(泉水)	0.05	0	-0.05
2	0.14	-0.10	-0.02
3(弓形)	-0.63	-0.25	-0.95
4(中峰)	-0.29	3.12	-0.63
5	0.02	-0.02	-0.03
6	0.02	0	-0.02
7	0.05	-0.02	-0.01

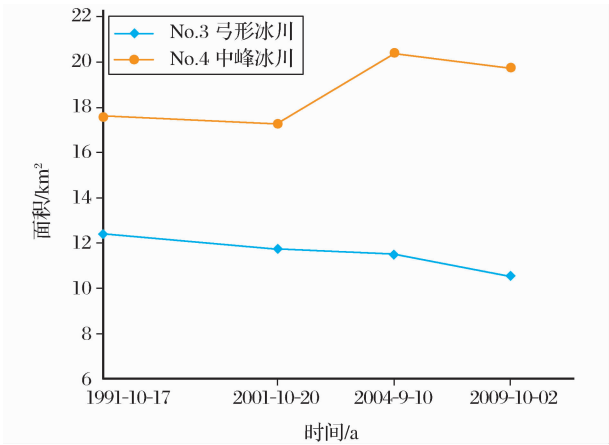


图 3 两条典型冰川的面积变化趋势图

Fig. 3 The area trend changes of the selected two typical glaciers in the field

本研究区中另一条大型冰川是中峰冰川,1991 年其面积为 17.56 km²,到 2001 年减少了 0.29 km²,为 17.27 km²;到 2004 年,其面积增加到 20.39 km²,增幅 3.12 km²;在 2009 年,面积又减少为 19.76 km²。该冰川 2001 年和 2004 年间面积的增加,可能与相关地质活动有关,有待深入研究。

总体来看郭扎错北面冰川在 1991~2009 年间具有明显的先增加后减少的波动规律。

6 讨 论

郭扎错北面冰川由于没有对应的国家气象站点,所以缺少长时间序列的气温和降水资料,因此本文采用距离最近的国家站台狮泉河站气象资料作为分析冰川和气候变化之间关系的依据。狮泉河站与

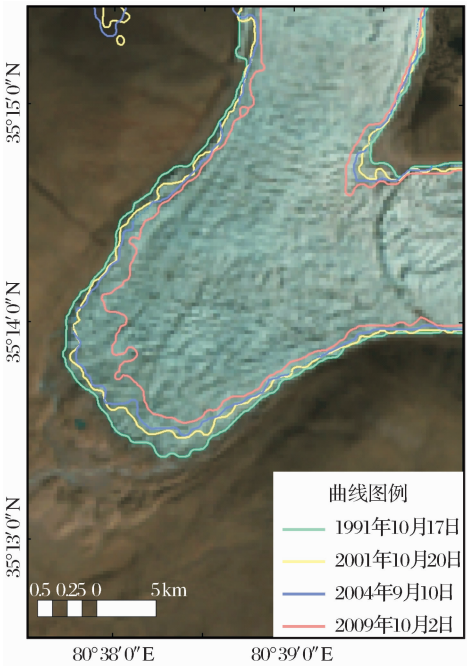


图 4 弓形冰川

Fig. 4 Gongxing glacier

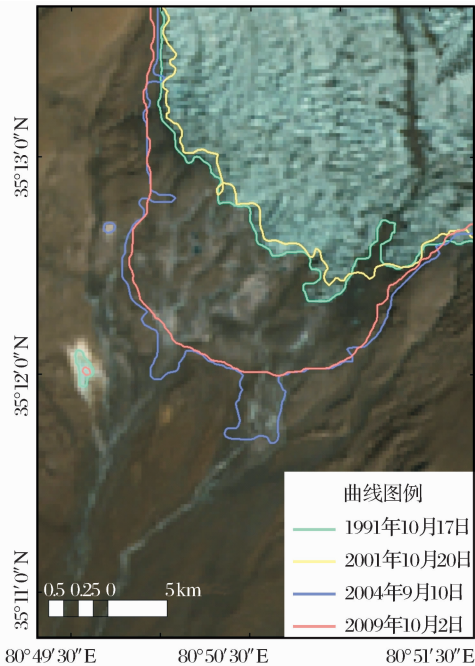


图 5 中峰冰川

Fig. 5 Zhongfeng glacier

郭扎错北面冰川皆处于昆仑山以南地区,区域中无高山阻挡,大气流动度高,气候状况相近,可以认为狮泉河站获取的气象资料一定程度上能够反映郭扎错北面地区实际气候状况。

研究发现在 1991~2009 年间,昆仑山中段地区平均气温大约在 0~2.5℃之间,从图 6 变化曲线可以看出,平均气温波动起伏较大,但其发展过程仍可以分成 3 个阶段:1991~1997 年、1997~2004 年、2004~2009 年。在 1991~1997 年间,气温于 1995 年和 1997 年达到两个谷值,分别为 0.5℃和 0.1℃,差值为 0.4℃;从距平角度看,期间温度没有太大的变化。在 1997~2004 年之间,气温曲线上出现了 3 个峰值和两个谷值,分别为 1999 年的 2.1℃,2001 年的 2.3℃,2004 年的 2℃与 2000 年的 1.6℃,2002 年的 1℃。比较峰值温度,3 者最大差距也只有 0.3℃,但是比较谷值温度,二者差值为 0.6℃,距离较大;且总距平为正,期间温度较 1997 年前结果为增加。由此推测在 2001~2004 年间,郭扎错北面冰

川的减少可能是温度上升所致。同理,从 2004~2009 年,峰值温度 2.4℃和谷值温度 1.6℃比之前亦有所上升,因此,期间研究区内冰川面积进一步减少。

综上所述,我们推测郭扎错北面冰川在 2004~2009 年的大幅减少主要是由温度引起的。

此外,我们还分析了 1991~2009 年间该地区年累积降水量数据,发现 1996~2002 年间该区累积降水量最多,共计 538.3 mm;1991~1996 年为 300.1 mm;2002~2009 年为 358.9 mm。由此,我们推测郭扎错北面冰川在 1991~2004 年间的大幅增加主要是受降水量的影响。

7 结 语

本文根据昆仑山地区 1991~2009 年 Landsat TM/ETM+遥感影像,研究了郭扎错北面冰川近 20 a 来的变化情况,得出以下结论:

- (1) 总体来说,郭扎错北面冰川整体呈现出冰川面积缩减的现象,但是在 1991~2009 年间具有先增加后减少的波动规律。
- (2) 本研究区中,东西部冰川的变化存在较明显的差异。从变化量角度看,东部冰川比西部冰川要大;从变化率角度看,东部比西部要快。
- (3) 中峰冰川在 2001~2004 年间面积大幅增加的原因可能与 2001 年 11 月 14 日发生在昆仑山口以西的 8.1 级强烈地震^[19]有关。
- (4) 结合距离最近的国家气象站点的温度和降水资料,发现郭扎错北面冰川面积变化主要由年均温度和年累积降水量综合影响而成,从 1991~2004 年的面积增加是累积降水量多所致,而 2004~2009 年冰川面积的减少是由于温度增加所致。

综上,郭扎错北面冰川在 1991~2009 年间,由于特定条件影响,存在面积增大的冰川,然而从整体上看,冰川的面积在不断缩减。随着全球气候变化该区域的冰川仍然是我们研究和关注的焦点。

致谢:在研究区描述性资料收集过程中,得到中国科学院对地观测与数字地球科学中心杨怀宁、孙中昶、阎世勇和黄庆妮博士的大力支持和热情帮助;本研究中使用的气候资料由中国气象局提供,在此表示衷心感谢!

参考文献(References):

[1] Su Zhen, Shi Yafeng. Response of Monsoonal Temperate Gla-

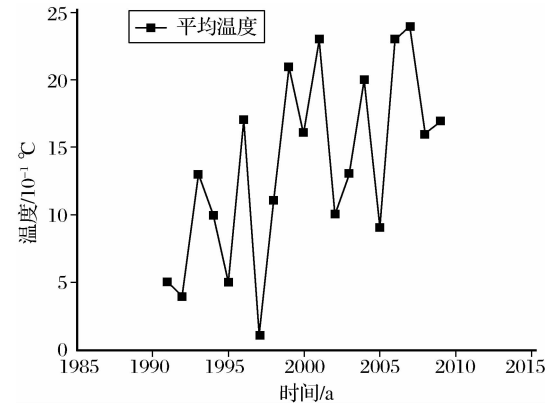


图 6 1991~2009 年狮泉河站平均温度图
Fig. 6 Annual mean temperature of Shiquanhe Meteorologic Station from 1991 to 2009

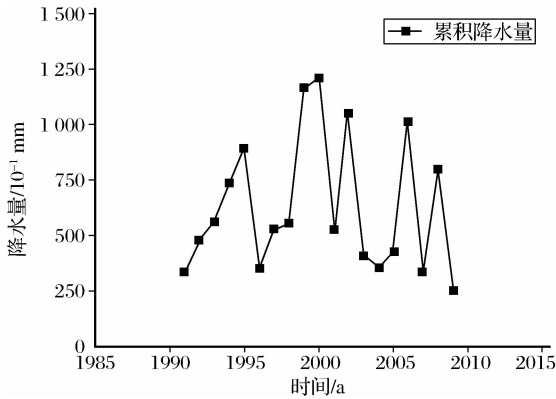


图 7 1991~2009 年狮泉河站累积降水量图
Fig. 7 Accumulated precipitation of Shiquanhe Meteorologic Station from 1991 to 2009

- ciers in China to Global Warming Since the Little Ice Age[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(3): 223-229. [苏珍, 施雅风. 小冰期以来中国季风温冰川对全球变暖的响应[J]. 冰川冻土, 2000, 22(3): 223-229.]
- [2] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [3] Cai Dihua, Ma Jinhui, Nian Yanyun, *et al.* The Study of Glacier Change Using Remote Sensing in Mt. Muztagta[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2006, 42(1): 13-17. [蔡迪花, 马金辉, 年雁云, 等. 慕士塔格峰冰川变化遥感研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2006, 42(1): 13-17.]
- [4] Nie Yong, Zhang Yili, Liu Linshan, *et al.* Monitoring Glacier Change based on Remote Sensing in the Mt. Qomolangma National Nature Preserve, 1976-2006[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(1): 13-28. [聂勇, 张懿翎, 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.]
- [5] Che Tao, Li Xin, Mool P K, *et al.* Monitoring Glaciers and Associated Glacial Lakes on the East Slopes of Mount Xixabangma from Remote Sensing Images[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(6): 801-805. [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.]
- [6] Li Deping, Wang Liping, Liu Shiyin, *et al.* Tupu Analysis of the Spatio-Temporal Glacier Variations in the Central and Western Qangtang Plateau since the Little Ice Age[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(1): 40-47. [李德平, 王利平, 刘时银, 等. 小冰期以来羌塘高原中西部冰川变化图谱分析[J]. 冰川冻土, 2009, 31(1): 40-47.]
- [7] Paul F, Kääb A, Maisch M, *et al.* The New Remote Sensing Derived Swiss Glacier Inventory: I. Methods[J]. Annals of Glaciology, 2002, 34: 355-361.
- [8] Lu Anxin, Yao Tandong, Liu Shiyin, *et al.* Glacier Change in the Geladandong Area of the Tibetan Plateau Monitored by Remote Sensing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 559-562. [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.]
- [9] Li Zhen, Sun Wenxin, Zeng Qunzhu. Deriving Glacier Change Information on the Xizang (Tibetan) Plateau by Integrating RS and GIS Techniques[J]. Acta Geographica Sinica, 1999, 54(3): 263-268. [李震, 孙文新, 曾群柱. 综合 RS 与 GIS 方法提取青藏高原冰川变化信息[J]. 地理学报, 1999, 54(3): 263-268.]
- [10] Guo Huadong. Chinese Radar Remote Sensing Image Analysis [M]. Beijing: Science Press, 1999: 87-89. [郭华东. 中国雷达遥感图像分析[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 87-89.]
- [11] Shangguan Donghui, Liu Shiyin, Ding Yongjian, *et al.* Glacier Changes at the Head of Yurungkax River in the West Kunlun Mountains in the Past 32 Years[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(6): 855-862. [上官冬辉, 刘时银, 丁永建, 等. 玉龙喀什河源区 32 年来冰川变化遥感监测[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 855-862.]
- [12] Song Bo, He Yuanqing, Pang Hongxi, *et al.* Identifying Automatically the Debris-covered Glaciers in China's Monsoonal Temperate-Glacier Regions based on Remote Sensing and GIS [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 456-462. [宋波, 何元庆, 庞洪喜, 等. 基于遥感和 GIS 的我国季风海洋型冰川区冰碛物覆盖型冰川边界的自动识别[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 456-462.]
- [13] Jin Rui, Che Tao, Li Xin, *et al.* Glacier Variation in the Pumqu Basin Derived from Remote Sensing Data and GIS Technique [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(3): 261-266. [晋锐, 车涛, 李新, 等. 基于遥感和 GIS 的西藏朋曲流域冰川变化研究[J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 261-266.]
- [14] Qu Yaoguang, Liu Jingshi, Ma Shimin. Water Resources in Hetian Region and the Potentialities[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1994, 8(2): 31-39. [曲耀光, 刘景时, 马世敏. 新疆和田地区的水资源及其潜力[J]. 干旱区资源与环境, 1994, 8(2): 31-39.]
- [15] Li X. GLIMS Glacier Database[DB]. National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology. Digital Media, 2003.
- [16] Paul F, Kääb A. Perspectives on the Production of a Glacier Inventory from Multispectral Satellite Data in Arctic Canada: Cumberland Peninsula, Baffin Island[J]. Annals of Glaciology, 2005, 42: 59-66.
- [17] Tobias B, Brian M, Roger W. Landsat-based Inventory of Glaciers in Western Canada, 1985-2005[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114: 127-137.
- [18] Jia Yonghong. Digital Image Processing[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003: 134. [贾永红. 数字图像处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003: 134.]
- [19] Xinhua Net, Unconver the Secret of Magnitude-8. 1 Earthquake in the Year 2001, Kunlun Mountain in Hoh Xil[EB/OL]. http://news.xinhuanet.com/video/2008-05/16/content_8184617.htm, May 16th, 2008. [新华网, 揭秘可可西里 2001 年昆仑山 8.1 级大地震 [EB/OL], http://news.xinhuanet.com/video/2008-05/16/content_8184617.htm, 2008-05-16.]

Landsat-based Dynamic Area Change of the Glaciers to the North of the Guozhacuo Lake, 1991~2009

JI Peng^{1,2}, GUO Hua-dong¹, ZHANG Lu¹

(1. *Key Laboratory of Digital Earth, Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*; 2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Glaciers can sensitively reflect the changes of the regional environment that they has become one of the important factors to study the global changes. The glaciers of the Kunlun mountains are concentrated. This area is the ideal one to study glacier dynamic changes. According to the Landsat TM and ETM+ remote sensing images of the year from 1991 to 2009 about the Kunlun moutains, we studied the changes of the glaciers in the recent 20 years. As a result, we found these glaciers changed obviously and concluded that: ① The glaciers to the north of the Guozhacuo lake owned the fluctuation pattern from 1991 to 2009; ② There existed the difference between the east and west that the changed amount and rate of the east were larger and faster than the west; ③ About the phenomenon that the Zhongfeng glacier increased largely between the year 2001~2004, we inferred it may correspond to the Ms 8.1 strong earthquake occurred to the west of the Kunlun mountain pass on November 14th, 2001; ④ Combined with meteorological data analysis, we inferred that the changes of the glaciers in this area were synthetically caused by the temperature and precipitation.

Key words: Glacier area change; Remote sensing; GIS; Kunlun mountains