

# 近50年黑河流域的冰川变化遥感分析

怀保娟<sup>1,2</sup>, 李忠勤<sup>1,3</sup>, 孙美平<sup>3</sup>, 周平<sup>1</sup>, 肖燕<sup>4</sup>

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070;

4. 聊城大学环境与规划学院, 聊城 252059)

**摘要:** 黑河流域作为中国西北地区第二大内陆流域, 其景观类型完整、流域规模适中、社会生态环境问题典型, 已成为寒区、旱区水文与水资源研究的热点地区。本研究结合 1:5 万地形图、Landsat TM/ETM+ 遥感影像及数字高程模型数据, 运用面向对象的图像信息自动提取方法, 建立冰川信息提取知识规则, 对近 50 年黑河流域的冰川变化进行遥感分析。结果表明: (1) 20 世纪 60 年代黑河流域内的 967 条冰川到 2010 年左右, 减少为 800 条冰川, 减少数量明显; 冰川面积由 361.69 km<sup>2</sup> 退缩为 231.17 km<sup>2</sup>, 共减少 130.51 km<sup>2</sup>, 退缩率为 36.08%, 平均每条冰川面积退缩 0.14 km<sup>2</sup>。(2) 黑河流域冰川分布及变化存在显著的区域差异性, 黑河冰川退缩率比北大河大 16% 左右; 冰川末端主要分布在 4300~4400 m、4400~4500 m 和 4500~4600 m 海拔区间内。(3) 与西部其他山地冰川相比, 黑河流域冰川退缩率较高。(4) 根据流域内 6 个气象站资料分析表明, 降水增加对冰川的补给无法弥补气温上升导致的冰川消融所带来的物质损失, 是黑河流域冰川普遍萎缩的关键因素。

**关键词:** 遥感分析; 冰川; 面向对象的信息提取; 冰川退缩; 黑河流域

DOI: 10.11821/dlxb201403008

## 1 引言

在全球变暖导致冰冻圈加速萎缩的现实背景下<sup>[1]</sup>, 国际上冰冻圈的研究已受到前所未有的重视<sup>[2]</sup>, 成为气候系统研究中最活跃的领域之一, 也是当前全球变化和可持续发展研究领域关注的热点<sup>[3]</sup>。冰川作为冰冻圈系统的主要组成部分之一, 是淡水资源的固体水库<sup>[4]</sup>, 受全球变暖的影响, 冰川萎缩成为普遍趋势, 专家预测未来 50 年我国冰川面积将减少 27.20%<sup>[3]</sup>。诸多研究表明冰川变化在本世纪对全球气候变化的指示性作用愈加明显<sup>[5]</sup>, 且对水资源也有明显的影响, 因此冰川变化研究备受关注。适时正确评估冰川变化, 揭示冰川变化对西北地区河流径流量的影响十分重要<sup>[3]</sup>, 其变化特征对该地区的经济发展和人民生活也有极其重要的意义。

黑河流域是我国西北干旱地区的第二大内陆河流域, 近 30 年来, 黑河流域建立了较为完善的流域观测系统, 已经成为我国重要的内陆河研究基地。由于其景观类型完整、流域规模适中、社会生态环境问题典型, 成为研究寒区、旱区水文与水资源等方面的热点地区, 是内陆河研究的代表性流域<sup>[6]</sup>。黑河流域祁连山区发育的冰川年融水量 2.98 亿 m<sup>3</sup>, 占

收稿日期: 2013-09-11; 修订日期: 2013-12-20

**基金项目:** 国家自然科学基金创新研究群体项目 (41121001); 国家基金黑河培育项目 (91025012); 国家重点实验室自主项目 (SKLCS-ZZ-2012-01-01); 国家自然科学基金项目 (1141001040; 41101066) [Foundation: National Natural Science Foundation Creative Research Groups of China, No.41121001; National Fund for Heihe Programs, No.91025012; The SKLCS Funding SKLCS-ZZ-2012-01-01; National Natural Science Foundation of China, No.1141001040; No.41101066]

**作者简介:** 怀保娟 (1988-), 女, 山东省济南人, 博士研究生, 研究方向: 冰川变化与地理信息技术。

E-mail: huaibaojuan@126.com

河流径流量的8%，是流域水资源的重要组成部分<sup>[7-8]</sup>。

遥感技术的发展，使得借助遥感手段监测冰川的动态变化成为冰川学研究发展的重要趋势，也有效解决了现代冰川研究中高山区资料受限等问题<sup>[9-10]</sup>。目视解译、计算机辅助分类方法是从遥感影像上提取冰川信息的主要渠道<sup>[11-13]</sup>。传统遥感影像分析方法忽略了影像包含的相互关联的空间特征信息，从而制约信息提取的精度，甚至将丰富的形状、纹理和上下文信息当成噪声而做出错误的判断，造成影像解译中的误判和错分现象<sup>[14-17]</sup>。从其处理对象的本质上看，属于基于图像像素为分析对象的分析方法，这种完全基于像素的图像分析方法的局限在于像素本身仅仅具有光谱特征，仅从光谱特征出发进行图像分析和处理所能得到的信息是及其有限的<sup>[18]</sup>。近年来，出现了一种新的遥感图像分析方法—面向对象的分析方法<sup>[19-22]</sup>。面向对象的思想克服了传统基于像素图像分析方法中只利用光谱特征的局限，充分挖掘图像的各种特征，建立面向多特征单元的遥感图像分析理解的方法体系。这种新方法通过一定的分割方法对遥感图像进行分割，继而提取分割单元的各种特征，并在特征空间中进行对象识别和标识，从而完成分类<sup>[23-24]</sup>。本文将该方法引入黑河流域近年来冰川信息的提取过程中，探究气候变暖下黑河流域冰川变化的特征。

2 研究区概况

黑河流域 (38°~42°N, 98°~101°30'E) 东至石羊河水系西大河的源头，西以黑山与疏勒河水系为界，上游流域东西几乎横跨整个河西走廊 (图1)。发源于祁连山区南部，从发源地到居延海全长821 km，出山口莺落峡以上为上游，流域集水面积10009 km<sup>2</sup>，平均海拔高度3738 m，出山口地表径流总水量为25.11×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup><sup>[25]</sup>。流域地势南高北低，按海拔高度和自然地理特点分为上游祁连山地、中游走廊平原和下游阿拉善高原3个地貌类型区。中国科学院兰州冰川冻土研究所1981年完成了《中国冰川目录-I 祁连山区》的编纂<sup>[26]</sup>，编目所用航片摄于1956年、1963年，于1964年和1972年调绘成图。编目中黑河流域共有冰川1078条，总面积420.55 km<sup>2</sup>，平均面积0.39 km<sup>2</sup>，冰储量13.67 km<sup>3</sup>，平均粒雪线4410~4850 m。

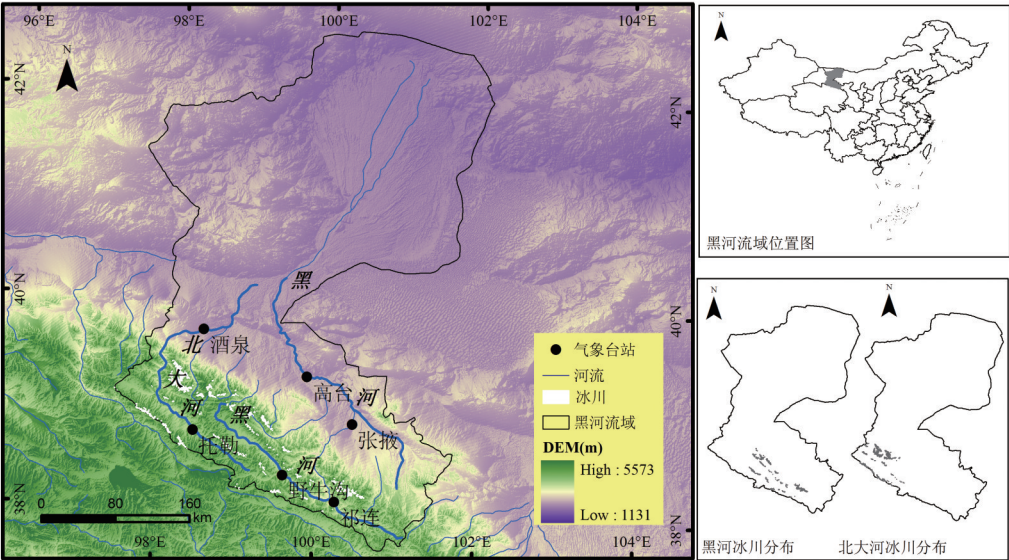


图1 黑河流域位置图  
Fig. 1 Location of the Heihe River Basin

在此需要说明的是,根据1985-1986年我国绘制的黑河流域图,整个流域被划分为三个水文平衡区,分别为:黑河干流水系平衡区、北大河干流水系平衡区和马营-丰乐山水系平衡区。广义上认为黑河流域包括北大河流域,而冰川编目将黑河流域和北大河流域单独列出,前人的研究将黑河与北大河分开,并不成体系。在本研究中,为求完整性,将北大河流域也纳入黑河流域的冰川空间分布状况及其变化特征的分析中,来探求广义上整个黑河流域的冰川变化情况。

3 数据与方法

表1 遥感影像信息  
Tab. 1 Remote sensing images

影像	接收日期	传感器	分辨率	轨道号
L5135033_03320070601	2007-6-1	TM	28.5	135/033
L5133034_03420090928	2009-9-28	TM	28.5	133/034
L71133033_03320110809	2011-8-9	ETM+	28.5/15	133/033
L5134033_03320100805	2010-8-5	TM	28.5	134/033

3.1 数据来源

20世纪60年代一期的冰川矢量边界来源于航摄地形图,黑河流域涉及1:5万地形图16幅,1:10万地形图14幅。航摄于1956、1963年,1964、1972年调绘,1973年出版第一版。1954北京坐标系,1956黄海高程系。用高精度扫描仪进行扫描,分辨率为300dpi。

所用影像数据为Landsat TM/ETM+ 数字影像,共使用4景,来自于USGS (U.S. Geological Survey, <http://www.usgs.gov>) 的数据共享平台(表1)。数字高程模型来源于SRTM (Shuttle Radar Topography Mission),由美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量。使用修订版V4.1版本,分辨率90 m,该版本由CIAT (国际热带农业中心)利用新的插值算法得到的SRTM地形数据,此方法更好的填补了SRTM90的数据空洞。该数据标称绝对高程精度是±16 m,绝对平面精度是±20 m。

此外,在解译60年代一期的冰川矢量数据时,参考了第一次冰川编目数据,该数据由中国科学院寒区旱区环境与工程研究所提供,黑河流域河流、边界矢量数据来源于中国西部生态与环境科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)。气象台站数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。

3.2 数据预处理

对地形图数据的预处理,包括对研究区地形图扫描、配准、拼接等。对地形图进行扫描,并按公里网格对其进行纠正,几何纠正的均方根误差小于1个像元。影像数据的预处理包括影像几何精纠正与增强处理。对地形图、Landsat影像、SRTM以地形图作为参考坐标进行坐标归一化处理,均采用统一的UTM投影和WGS84椭球体建立坐标系统。

3.3 方法介绍

在ArcGIS10支持下,对黑河流域地形图数据进行数字化冰川边界,计算冰川面积。得到20世纪60年代一期的冰川矢量数据。2010年左右冰川分布数据通过面向对象分析方法,并以影像叠加数字高程模型来进行部分数据的人工目视解译修正,最后参照专家指导意见进行边界的再次修订。获取冰川面积、平均长度、经纬度等属性信息;利用SRTM得到冰舌末端高程、冰川平均高程、坡度、朝向等属性信息。冰川变化分析通过ArcGIS10空间分析模块将地形图数据与近年两期冰川矢量数据进行叠加分析,得到冰川面积变化规律(图2a)。

面向对象分类技术集合临近像元为对象用来识别感兴趣的光谱要素。它主要分为两个过程<sup>[18]</sup>:影像对象构建和对象的分类(图2b)。首先通过一定的分割方法对遥感图像进行分割,继而提取分割单元的各种特征,并在特征空间中进行对象识别和标识,从而完成分类。通过图像分割,建立同质区域,然后对这些对象进行分类,这种基于被分割图像的分类不会产生任何椒盐效应,也不需要滤波操作<sup>[19-24]</sup>。



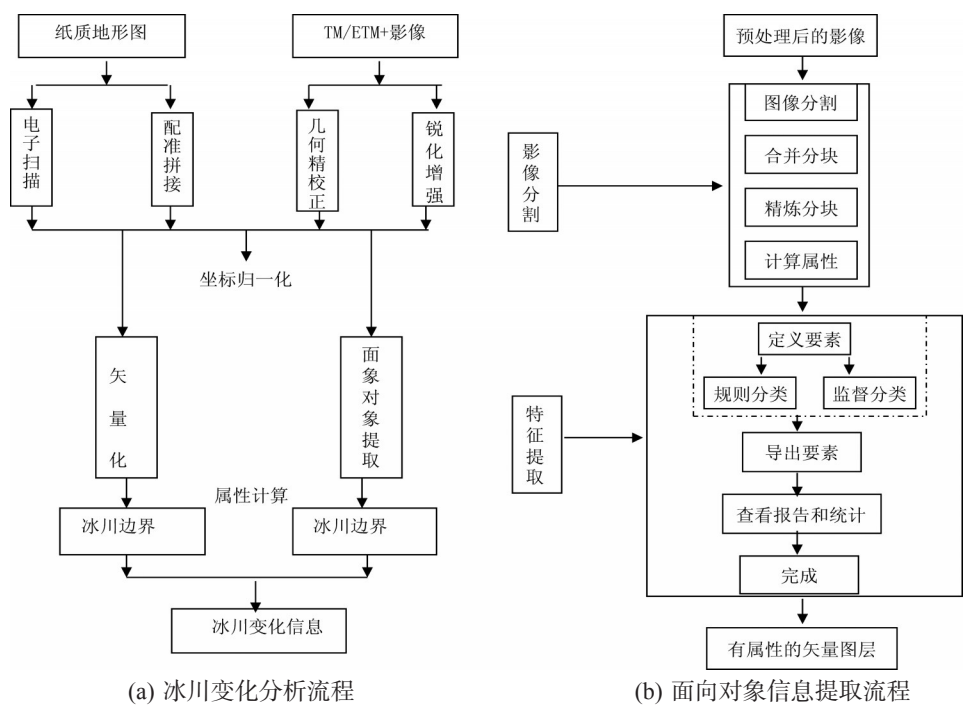


图2 方法流程图  
Fig. 2 Technical flowchart

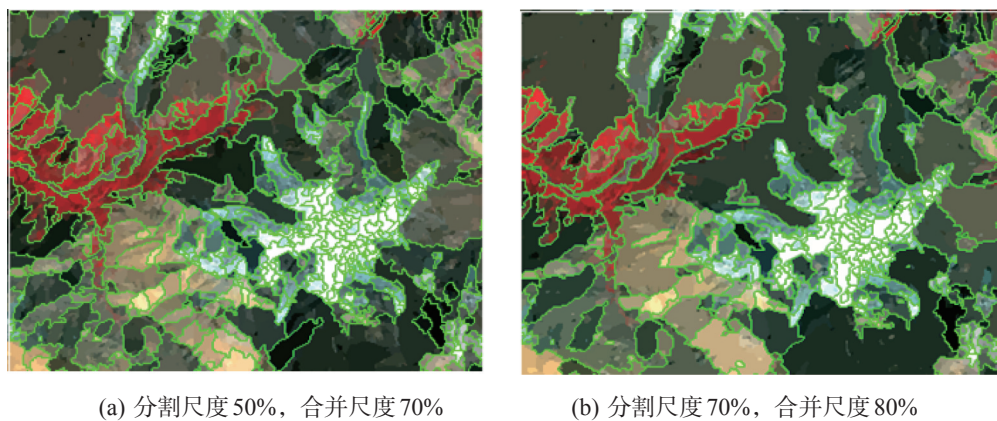


图3 面向对象信息提取方法分割等级图  
Fig. 3 Different scale segmentation images

**3.3.1 影像分割** 运用多尺度分割算法，综合 Landsat 图像的光谱特征和形状特征，计算图像中每个波段的光谱异质性与形状异质性的综合特征值，然后根据各个波段所占的权重，计算图像所有波段的加权值，当分割出对象的光谱和形状综合加权值小于某个指定的阈值时，进行重复迭代运算，直到所有分割对象的综合加权值大于指定阈值即完成图像的多尺度分割操作<sup>[27]</sup>。利用 ENVI EX 执行多尺度分割过程，再对任何选定的尺度下进行与知识无关的原始图像对象提取。为保证信息提取准确度，根据目视效果不断调试尺度参数，直到效果最优。经过反复试验，最后确定纯冰的分割尺度参数为 70%，合并尺度参数为 80% (图 3)。

**3.3.2 知识规则建立** 图像分割完成后，对每个对象的各个波段的光谱特征、空间结构等相关指数的计算结果，参照直方图，人工寻找各波段相关信息的阈值，选择目标地物与

其他地物差异性较明显的指数分别进行阈值设置，并根据目视预览效果对各指数的阈值进行反复设置试验，综合所有相关指数的阈值，最终确定目标地物的提取边界，建立各类型信息提取的知识规则<sup>[28-29]</sup>：(1) 引入冰雪指数 NDSI (Normalized Difference Snow/Ice Index),  $NDSI = (CH(2)-CH(5))/(CH(2) + CH(5))$ ，由于冰雪在可见光波段具有较高的光谱反射值，在短波红外波段具有较低的光谱反射值，由这两个波段的组合可以有效的提取冰雪<sup>[30-31]</sup>。(2) 比值运算对于区分和增强光谱亮度值不明显，而不同波段的比值差异较大的地物效果明显。选取 TM3、TM5 波段做比值，以阈值为2来提取冰川边界。(3) 此外，对冰川海拔特征、面积等取一定的阈值来提取冰川。最终确定的冰川边界提取知识规则为： $TM3/TM5 > 2.0$ , &  $0.46 < NDSI < 0.58$ , &  $DEM > 4200\text{ m}$ , &  $(TM4-TM1)/(TM4-TM1) > -0.44$ , &  $0.01\text{ km}^2 < area < 6\text{ km}^2$ 。

**3.3.3 冰川区山脊线提取** 对于冰川的自动提取而言，山脊线的提取实质上是分水线的提取。本研究自动提取山脊线的方法是基于规则格网的 SRTM-DEM 数据，利用平面曲率与坡形组合的算法来实现的<sup>[32]</sup>。首先利用 SRTM-DEM 提取地面的平面曲率及地面的正地形，而正地形的平面曲率的最大值即为山脊，由于平面曲率的提取比较繁琐，而坡向变率在一定程度上可以很好地表征平面曲率，因此利用 ArcGIS10 来提取坡向变率来代替平面曲率。利用提取的山脊线切割冰川流程如图4。

**3.3.4 精度评价** 从遥感影像上获取冰川边界的精度评价一直是十分重要却较难确定的问题<sup>[33]</sup>。本研究从两方面来评价利用面向对象的方法提取冰川边界的误差：(1) 影像分辨率对冰川信息提取的误差。所用 TM 影像空间分辨率 28.5 m，遥感影像的空间分辨率与均方根误差都影响到测量的准确性，据 Hall、Silvreo 等计算冰川长度和面积变化不确定性的公式<sup>[33-35]</sup>：

$$U_r = \sqrt{\sum \lambda^2} + \sqrt{\sum \varepsilon^2} \tag{1}$$

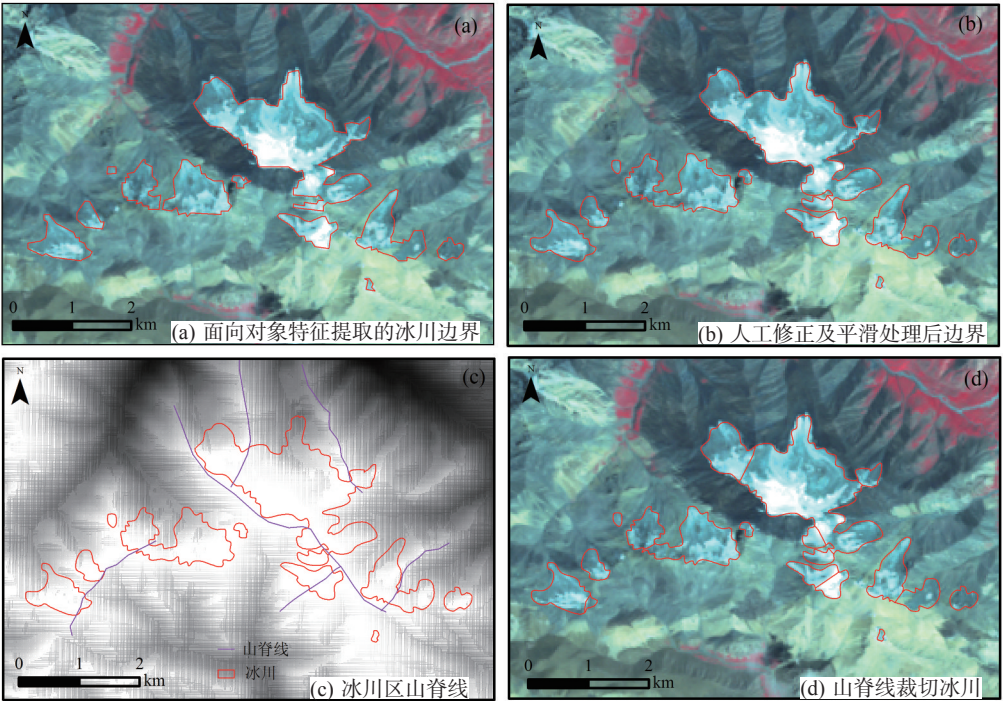


图4 面向对象特征提取冰川结果及山脊线切割冰川结果

Fig. 4 Object-oriented extraction results and results of the ridgelines cutting glaciers

$$U_A = 2U_T \sqrt{\sum \lambda^2} + \sqrt{\sum \varepsilon^2}$$

(2)

式中： $U_T$ 为长度不确定性； $\lambda$ 为影像分辨率； $\varepsilon$ 为配准误差； $U_A$ 为面积不确定性。计算得单条冰川面积的不确定性为 $\pm 0.002\text{ km}^2$ 。(2) 冰碛物对冰川提取的误差。目前计算机自动分类方法还不能够完全解决同物异谱和异物同谱现象，对于冰碛物覆盖型冰川，基于遥感有效自动提取方法目前仍处于不断探索中，面向对象的冰川提取方法并未考虑这部分冰川的提取，因此对于冰碛物覆盖的冰川区，采用人工修正的方法对其进行修正。

4 结果与讨论

4.1 黑河流域冰川近期变化的空间特征

鉴于 Landsat 影像的质量问题，部分冰川有积雪、云覆盖，因此对流域 (1078 条) 内 967 条冰川作以重点研究。研究表明：20 世纪 60 年代黑河流域内的 967 条冰川到 2010 年左右，退缩为 800 条冰川，条数退缩率为 17.27%，退缩数量明显；冰川面积由 361.69  $\text{km}^2$  退缩为 231.17  $\text{km}^2$ ，共退缩 130.51  $\text{km}^2$ ，面积退缩率为 36.08%，平均每条冰川面积退缩 0.14  $\text{km}^2$  (图 5)。过去 50 年间，其变化的幅度、区域差异、气候背景和对水资源的影响等分述如下。

**4.1.1 冰川面积与条数变化** 由于本研究区的冰川都是发育规模较小的冰川，将所研究的冰川按照面积大小分为 9 个等级：①  $< 0.1\text{ km}^2$ ；②  $0.1\sim 0.2\text{ km}^2$ ；③  $0.2\sim 0.3\text{ km}^2$ ；④  $0.3\sim 0.4\text{ km}^2$ ；⑤  $0.4\sim 0.5\text{ km}^2$ ；⑥  $0.5\sim 1\text{ km}^2$ ；⑦  $1\sim 2\text{ km}^2$ ；⑧  $2\sim 5\text{ km}^2$ ；⑨  $> 5\text{ km}^2$ 。分析发现 (图 6)：面积  $< 0.1\text{ km}^2$  的冰川面积与条数退缩率分别为 -10.01%、-42.44%； $0.1\sim 0.2\text{ km}^2$  为 32.09%、31.47%； $0.2\sim 0.3\text{ km}^2$  为 37.32%、39.01%； $0.3\sim 0.4\text{ km}^2$  为 30.16%、28.89%； $0.4\sim 0.5\text{ km}^2$  为 48.68%、48.48%； $0.5\sim 1\text{ km}^2$  为 45.63%、46.09%； $1\sim 2\text{ km}^2$  为 28.61%、28.30%； $2\sim 5\text{ km}^2$  为 34.94%、38.89%； $> 5\text{ km}^2$  为 100%、100%。大于  $5\text{ km}^2$  的冰川共 1 条，冰川编号 5Y433B0039，面积  $5.61\text{ km}^2$ ，到 2011 年分裂为两条冰川，面积分别为  $4.62\text{ km}^2$ ， $0.13\text{ km}^2$ ，退缩明显。

**4.1.2 不同海拔梯度冰川变化特征** 利用 SRTM-DEM 数据，根据冰川的末端海拔，以 100 m 为海拔梯度，对两期冰川数据进行统计分析 (图 7)：黑河流域冰川末端主要分布在 4300~4400 m、4400~4500 m 和 4500~4600 m 海拔区间

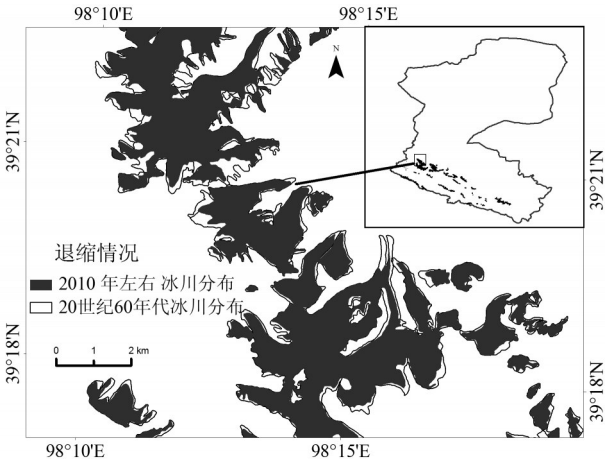


图5 黑河流域冰川退缩情况  
Fig. 5 Glacier shrinkage in the Heihe River Basin

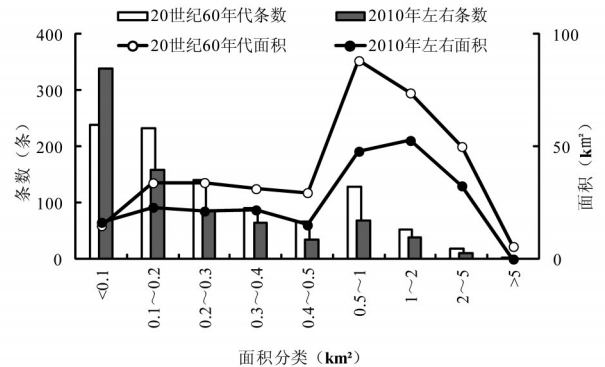


图6 黑河流域冰川面积与条数变化  
Fig. 6 Changes of area and number of the Heihe River Basin



内, 数量分别占 20%、24.5% 和 19.38%, 共占了 63.88%。

从变化趋势看, 4100~4200 m、4200~4300 m、4300~4400 m、4400~4500 m 四个海拔区间内冰川条数呈减少趋势, 减少率分别为: 85.25%、56.59%、27.93%、7.55%, 以 4100~4200 m、4200~4300 m 海拔区间内冰川条数退缩最明显。4100~4500 m 海拔区间内冰川条数的高退缩率直接导致 4500~4800 m 海拔区间内冰川数量有增加趋势, 4500~4600 m、4600~4700 m、4700~4800 m 区间内冰川条数的增加率分别为: 11.51%、55.38%、18.60%。这些事实充分说明, 随着全球气温的普遍升高, 黑河流域的冰川雪线上升, 末端海拔不断增高。

**4.1.3 流域冰川分布及区域差异性** 广义上, 黑河流域包括黑河与北大河, 本研究分别对比了黑河与北大河的冰川变化差异性、并对黑河与北大河的各个支流进行对比分析。

对黑河与北大河的统计分析结果表明 (表 2): 冰川分布及变化存在显著的区域差异性, 黑河冰川面积退缩率 46.07% 远高于北大河 29.55%。这种差异主要是冰川面积导致, 黑河的 464 条冰川的平均面积为 0.31 km<sup>2</sup>, 而北大河的 503 条冰川平均面积为 0.43 km<sup>2</sup>, 小冰川对气候变化更为敏感; 且前人的研究中黑河夏季增温趋势为 0.27 °C/10a 比北大河的 0.21 °C/10a 大<sup>[36]</sup>, 导致黑河冰川退缩率比北大河大 16% 左右。

黑河冰川分布的统计结果表明 (表 3): 黑河支流大河的冰川条数变化率为 0, 但面积变化率为 -43.8%, 条数虽然没变但面积缩小显著, 有 8 条小冰川完全消失, 并新发育三条小冰川, 4 条大冰川分裂为 9 条冰川; 夹道沟、潘家河冰川由 18 条增加为 20 条, 该支流有 2 条冰川消失, 有 3 条大冰川分裂为 7 条小冰川, 并没有新冰川发育; 长千河冰川条数退

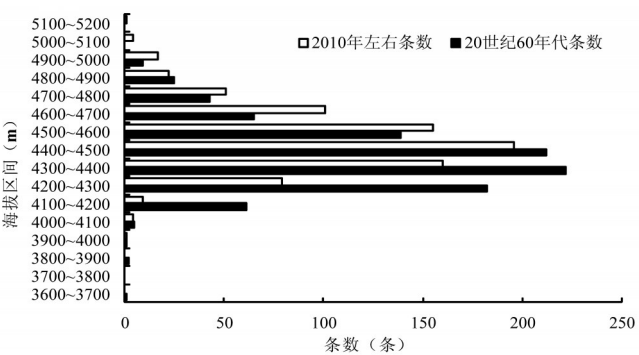


图7 黑河流域冰川条数海拔区间上的变化  
Fig. 7 Change of terminal elevation of the Heihe River Basin

表2 黑河与北大河冰川变化对比分析

子流域	冰川条数 (条)			冰川面积 (km <sup>2</sup> )		
	20 世纪 60 年代	2010 年	变化率%	20 世纪 60 年代	2010 年	变化率%
黑河 5Y42	464	365	-21.34	143.18	77.22	-46.07
北大河 5Y43	503	435	-13.52	218.51	153.95	-29.55
总计	967	800	-17.27	361.69	231.17	-36.08

表3 黑河子流域冰川变化对比分析

黑河	冰川条数 (条)			冰川面积 (km <sup>2</sup> )		
	20 世纪 60 年代	2010 年	变化率%	20 世纪 60 年代	2010 年	变化率%
大河	61	61	0	21.04	11.82	-43.80
夹道沟、潘家河	18	20	11.11	5.76	3.29	-42.97
八宝河	42	35	-16.67	12.58	5.69	-54.77
柯柯里河	53	41	-22.64	19.46	10.01	-48.54
黑河上游	79	56	-29.11	20.99	11.34	-45.95
长千河	41	22	-46.34	6.83	1.43	-79.14
梨园河	66	51	-22.73	17.56	8.88	-49.40
摆浪河	31	29	-6.45	16.24	12.28	-24.36
马营河	73	50	-31.51	22.72	12.48	-45.07
总计	464	365	-21.34	143.18	77.22	-46.07

表 4 北大河子流域冰川变化对比分析  
Tab. 4 Glacier change in sub-basins of the Beida River

北大河	冰川条数(条)			冰川面积(km <sup>2</sup> )		
	20世纪60年代	2010年	变化率%	20世纪60年代	2010年	变化率%
丰乐河	60	53	-11.67	24.94	18.06	-27.58
洪水坝河	150	131	-12.67	79.98	56.61	-29.23
朱龙观河	149	110	-26.17	62.86	41.83	-33.46
北大河上游右岸	23	18	-21.74	4.05	2.34	-42.12
高崖泉	121	123	1.65	46.67	35.11	-24.78
总计	503	435	-13.52	218.51	153.95	-29.55

缩率最大,达46.34%,摆浪河退缩率较小,为6.45%;其它支流条数退缩率较为平均。面积退缩率最大的支流亦是长千河,为79.14%,其它支流面积退缩率较平均,都在40%~50%左右。对北大河冰川分布的统计结果表明(表4):朱龙观河和北大河上游右岸与丰乐河和洪水坝河相比冰川条数与面积退缩率都较高,分别为26.17%、33.46%、21.74%、42.12%;高崖泉冰川条数增加两条,但面积退缩率为24.78%,与大河情况相似。

4.2 讨论

4.2.1 典型山地冰川退缩对比分析 气候变暖背景下全球山地冰川为总体退缩趋势<sup>[2, 37]</sup>,而近年来高分辨率卫星影像数据在冰川动态监测中得到广泛应用,使研究大区域内冰川变化成为可能。为了进一步研究黑河流域冰川变化的特征,选取中国西部典型山区及流域的冰川变化情况与本研究做对比(表5)。在考虑研究时段的情况下,结合学者们对祁连山冷龙岭<sup>[38]</sup>、疏勒南山<sup>[39]</sup>、祁连山野牛沟<sup>[40]</sup>的冰川变化研究进行统计分析,发现与西部其他山地冰川相比,本研究区冰川退缩率明显较高。张华伟等人研究得到1972-2007年间祁连山冷龙岭的冰川退缩速率为0.67%/a;阳勇等人研究得到1956-2003年间祁连山野牛沟流域的冰川退缩速率为0.54%/a;而本研究得到20世纪60年代到2010年左右黑河流域967条冰川的退缩速率为0.60%/a。相对于天山<sup>[41]</sup>(0.22%/a)、阿尼玛卿山<sup>[42]</sup>(0.49%/a)、格拉丹东<sup>[43]</sup>(0.05%/a)、纳木那尼峰<sup>[44]</sup>(0.26%/a)等地黑河流域冰川变化幅度较中国西部其他典型区域冰川变化幅度呈明显大的趋势。

表 5 典型山地冰川退缩情况  
Tab. 5 Shrinkage of the typical mountain glaciers

研究区域	面积变化 km <sup>2</sup>	面积变化率 %	退缩速率 %/a	数据源	解译方法	研究时段	来源
祁连山冷龙岭	-24.29	-23.57	-0.67	地形图、ETM	目视解译	1972-2007	张华伟 <sup>[38]</sup>
疏勒南山	-55.00	-12.80	-0.36	地形图、ETM	目视解译	1970-2006	张华伟 <sup>[39]</sup>
祁连山野牛沟	-16.22	-25.71	-0.54	航片、地形图、 ASTER	目视解译	1956-2003	阳勇 <sup>[40]</sup>
祁连山西段	-124.2	-10.3	-0.29	航片、ETM	目视解译	1956-1990	刘时银 <sup>[46]</sup>
黑河	-32.41	-29.6	---	地形图、ASTER	目视解译	1950s/1970s-2003	王璞玉 <sup>[47]</sup>
天山	---	-11.5	-0.22	---	---	1960-2010	王圣杰 <sup>[41]</sup>
乌鲁木齐河流域	-6.65	-13.8	-0.45	航片、地形图	航空摄影测量	1962-1992	陈建明 <sup>[48]</sup>
开都河流域	-38.5	-11.6	-0.31	地形图、TM、ETM+	目视解译	1963-2000	刘时银 <sup>[49]</sup>
盖孜河流域	-188.1	-10	-0.26	地形图、TM、ETM+	目视解译	1960-1999	刘时银 <sup>[49]</sup>
阿尼玛卿山	-21.7	-17.0	-0.49	TM	目视解译	1966-2000	刘时银 <sup>[42]</sup>
格拉丹东	-14.91	-1.7	-0.05	航片、TM	目视解译	1969-2000	鲁安新 <sup>[43]</sup>
纳木那尼峰	-7.12	-8.44	-0.26	MSS、TM、ASTER	冰雪指数、 人工修正	1976-2003	叶庆华 <sup>[44]</sup>
朋曲流域	-131.24	-8.98	-0.30	地形图、ASTER	目视解译	1970s-2000	晋锐 <sup>[50]</sup>
珠峰保护区	-501.91	-15.63	-0.52	MSS、TM	面向对象方法	1976-2006	聂勇 <sup>[19]</sup>
黑河流域	-130.51	-36.08	-0.60	TM、ETM	面向对象方法	1960s -2010	本研究



探究其原因，黑河流域冰川面积缩小如此之快，除了受区域气候（温度和降水）影响之外，单条冰川的面积大小也是主要影响因素<sup>[45]</sup>，该区面积小于1 km<sup>2</sup>的冰川895条，占整个区域条数的92.55%，而冰川越小，对气候变化的敏感性则越强，面积缩小、末端退缩速率则越快<sup>[45]</sup>。

**4.2.2 气候变化对冰川变化的影响** 水（降水）、热（气温）及其组合是影响冰川发育的主要气候因子，二者年际变化共同决定冰川的性质、发育和演化<sup>[51]</sup>，温度决定消融，降水影响积累<sup>[52]</sup>。为分析气温和降水对该地区冰川变化的影响，根据研究区的位置，选择托勒、野牛沟、祁连、张掖、高台、酒泉6个气象站资料1960-2010年间数据做对比研究。分析可以看出（图8）：从各站年平均气温年际变化看，6个气象站气温均呈上升趋势。托勒、野牛沟、张掖、祁连站气象台增温幅度均超过0.30 °C/10a（通过显著性水平0.001检验），酒泉、高台的增温幅度均超过0.20 °C/10a（通过显著性水平0.001检验），均高于全球平均升温率（0.148 °C/10a）<sup>[53]</sup>，各气象台站1990年以后升温趋势普遍明显。与气温变化趋势类似，各气象台站年降水量略呈上升趋势：托勒、野牛沟增加量大于13.0 mm/10a，而酒泉、张掖、高台、祁连站的平均增加量均大于2.0 mm/10a。根据康尔泗对高亚洲地区

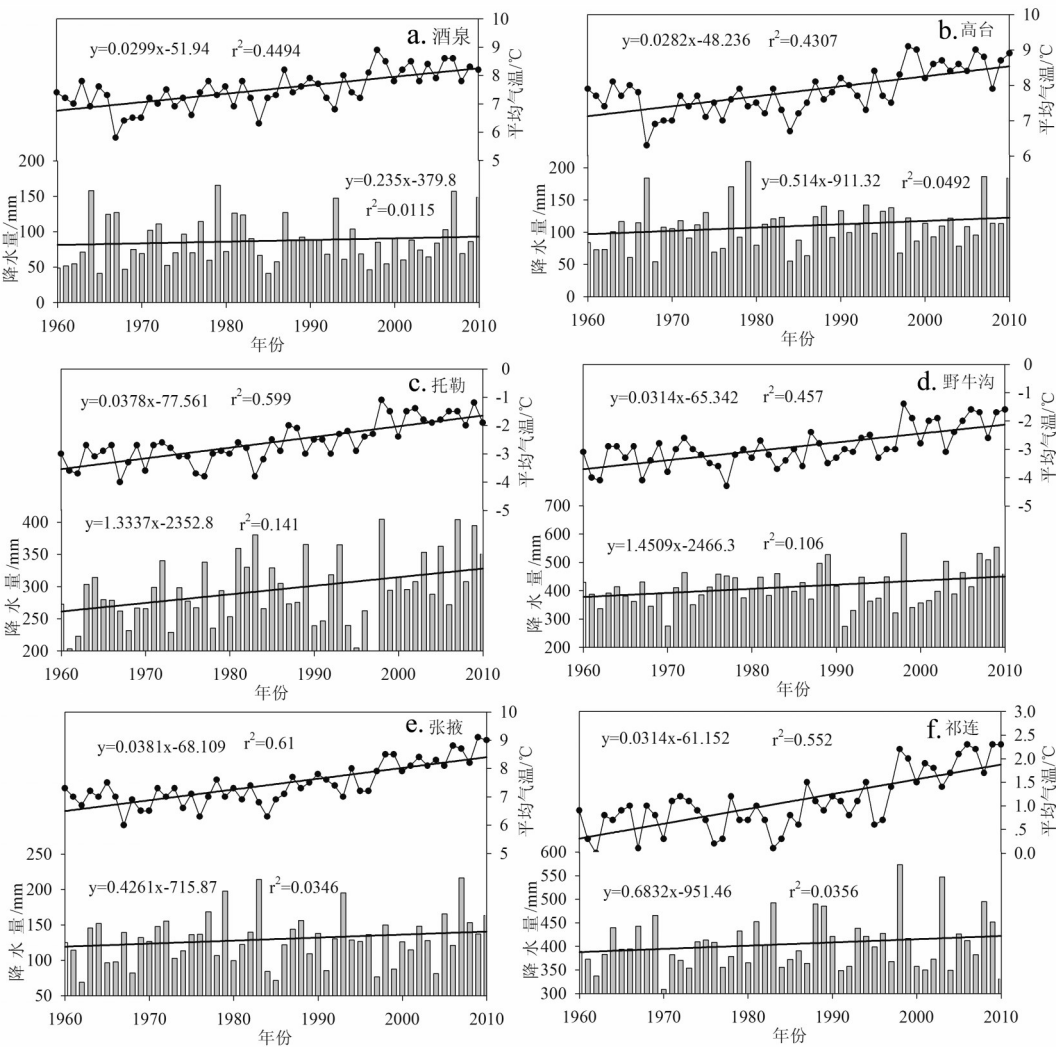


图8 黑河流域近50年气温与降水的变化

Fig. 8 Temperature and precipitation change of the Heihe River Basin in the last 50 years

12条冰川平衡线(ELA)和夏季气温关系分析,夏季平均气温升高 $1^{\circ}\text{C}$ ,冰川平衡线升高可达100~160 m的高差,如保持平衡线不变,需要固态降水增加幅度在40%以上,甚至需增加约1倍<sup>[54]</sup>。显然,研究区这种组合气候变化背景下,虽然降水量有所增加,但冰川对气温的敏感性大,随着该区域气温升高,雪线上升,冰川融水量持续增加,降水增加对冰川的补给无法弥补冰川消融所带来的物质损失,导致黑河流域冰川普遍萎缩。

## 5 结论

本文利用面向对象的信息提取技术研究了广义黑河(包括黑河和北大河)自20世纪60年代到2010年左右的冰川变化信息,得到以下结论:

(1) 20世纪60年代黑河流域内的967条冰川到2010年左右,退缩为800条冰川,退缩数量明显;冰川面积由 $361.69\text{ km}^2$ 退缩为 $231.17\text{ km}^2$ ,共退缩 $130.51\text{ km}^2$ ,面积退缩比率为36.08%,平均每条冰川面积退缩 $0.14\text{ km}^2$ 。

(2) 黑河流域冰川分布及变化存在显著的区域差异性:黑河冰川退缩率比北大河大16%左右;冰川末端主要分布在4300~4400 m、4400~4500 m和4500~4600 m海拔区间内;4100~4200 m、4200~4300 m海拔区间内冰川条数退缩明显,而4500~4800 m海拔区间内冰川数量有增加趋势。

(3) 黑河流域内面积小于 $1\text{ km}^2$ 的冰川895条,占整个区域条数的92.55%,由于小冰川对气候变化更为敏感,与西部其他山地冰川相比,黑河流域冰川退缩率较高。

(4) 根据流域内6个气象站资料分析表明,气温升高,降水增加对冰川的补给无法弥补冰川消融所带来的物质损失,是黑河流域冰川普遍萎缩的关键因素。

致谢:感谢中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)所提供的气象数据,对于USGS(U.S. Geological Survey, <http://www.usgs.gov>)数据共享平台提供的Landsat影像一并表示感谢。

## 参考文献 (References)

- [1] IPCC. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summary for Policymakers. Report of Working Group II of The Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Haeblerli W, Cihlar J, Barry R G. Glacier monitoring within the Global Climate Observing System. *Annals of Glaciology*, 2000: 241-246.
- [3] Qin Dahe, Xiao Cunde, Ding Yongjian et al. Progress on cryospheric studies by international and Chinese communities and perspectives. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(6): 649-656. [秦大河, 效存德, 丁永建 等. 国际冰冻圈研究动态和我国冰冻圈研究的现状与展望. *应用气象学报*, 2006, 17(6): 649-656.]
- [4] Wang Zongtai, Su Hongchao. World and China's glacier distribution and water resources significance. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(5): 500-503. [王宗太, 苏宏超. 世界和中国的冰川分布及其水资源意义. *冰川冻土*, 2003, 25(5): 500-503.]
- [5] Oerlemans J. Quantifying global warming from the retreat of glaciers. *Science*, 1994, 264: 243-245.
- [6] Ning Baoying, He Yuanqing, He Xianzhong et al. Advances on water resources research in Heihe River Basin. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(6): 1180-1185. [宁宝英, 何元庆, 和献中 等. 黑河流域水资源研究进展. *中国沙漠*, 2008, 28(6): 1180-1185.]
- [7] Yang Zhenniang. *Glacier Water Resources in China*. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1991: 72. [杨针娘. 中国冰川水资源. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991: 72.]
- [8] Feng Qi, Cheng Guodong, Endo Kunihiko. Towards sustainable development of the environmentally degraded Heihe River Basin, China. *Hydrological Science Journal Des Sciences Hydrologiques*, 2002, 46 (5): 647-658.
- [9] Paul F, Kaab A, Maisch M et al. The new remote sensing derived Swiss glacier inventory: Methods. *Annals of Glaciology*, 2000, 34: 355-361.
- [10] Shangguan Donghui, Liu Shiyin, Ding Yongjian et al. Glacier changes at the head of Yulongkaxi River in the west Kunlun Mountains in the past 32 years. *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. 地理学报, 2004, 59(6): 855-862.]
- [11] Serandre I, Barbero R, Rabagliati R et al. Glacier retreat in the 1980s in the Breonie, Aurine and Pustersi group (eastern Apls, Italy) in Landsat TM. *Hydrological Science Journal des Sciences Hydrologiques*, 1999, 44(2): 279-296.
- [12] Bolch T. Climate change and glacier retreat in northern Tianshan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data. *Global and Planetary Change*, 2007, 56: 1-12.
- [13] Hall D K, Bayr K J, Bindschadler R et al. Changes in the Pasterze Glacier, Austria, as measured from the ground and space. The 58th Eastern Snow Conference, 2001: 197-193.
- [14] Huai Baojuan, Li Zhongqin, Sun Meiping et al. Discussion of RS methods for glacier outline detection: A case study in headwaters of the Kanas River. *Arid Zone Research*, 2013, 30(2): 372-377. [怀保娟, 李忠勤, 孙美平 等. 多种遥感分类方法提取冰川边界探讨: 以喀纳斯河源地区为例. 干旱区研究, 2013, 30(2): 372-377.]
- [15] Sidjak R W, Wheate R D. Glacier mapping of the Illecillewaet Icefield, British Columbia, Canada, using Landsat TM and digital elevation data. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(2): 273-284.
- [16] Zhang Tingbin, Zhang Jianping, Wu Hua et al. Variation of the glaciers in Nyingchi Municipality of Tibet Autonomous Region during 1990-2000. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(1): 14-20. [张廷斌, 张建平, 吴华 等. 1990-2000年间西藏林芝地区冰川变化研究. 冰川冻土, 2011, 33(1): 14-20.]
- [17] Zhang Minhua. Extracting the temperate glacier information in the Mount Namjagbarwa, Tibet Autonomous Region, based on ETM+ image. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(2): 226-232. [张明华. 基于ETM+影像的西藏南迦巴瓦峰地区海洋性冰川信息提取. 冰川冻土, 2005, 27(2): 226-232.]
- [18] Wei Yuchun, Tang Guoan, Yang Xin et al. Remote Sensing Digital Image Processing Tutorial. Beijing: Science Press, 2007. [韦玉春, 汤国安, 杨昕 等. 遥感数字图像处理教程. 北京: 科学出版社, 2007.]
- [19] Nie Yong, Zhang Yili, Liu Linshan et al. Monitoring glacier change based on remote sensing in the Mt. Qomolangma National Nature Preserve, 1976-2006. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 13-28. [聂勇, 张懿锂, 刘林山 等. 近30年珠穆朗玛峰国家自然保护区冰川变化的遥感监测. 地理学报, 2010, 65(1): 13-28.]
- [20] Blaschke T, Hay G J. Object-oriented image analysis and scale-space: Theory and methods for modeling and evaluating multiscale landscape structure. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, 34(4): 22-29.
- [21] Benz U C, Hofmann P, Willhauck G et al. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2004, 58(3/4): 239-258.
- [22] Baatz M, Schape A. Multiresolution segmentation an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung*, 2000, 12: 12-23.
- [23] Laliberte A S, Rango A, Havstad K M et al. Object-oriented image analysis for mapping shrub encroachment from 1937 to 2003 in southern New Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(1/2): 198-210.
- [24] Schiewe J, Tufte L, Ehlers M. Potential and problems of multi-scale segmentation methods in remote sensing. *GeoBIT/GIS*, 2001, 6: 34-39.
- [25] Yellow River Conservancy Committee. Overview of the Heihe River Basin. <http://www.yellowriver.gov.cn/vh/heihe/lykk.php>, 2010-06-22. [黄河水利委员会. 黑河概览. <http://www.yellowriver.gov.cn/vh/heihe/lykk.php>, 2010-06-22.]
- [26] Wang Zongtai. Glacier List of China Qilian Mountains. Lanzhou: Institute of Glaciology and Cryopedology, Chinese Academy of Sciences, 1981: 58-61. [王宗太. 中国冰川目录(I): 祁连山区. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1981: 58-61.]
- [27] Guo Jiancong, Li Peijun, Xiao Xiaopai. A hierarchical segmentation method for multispectral imagery. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2008, (3): 123-127. [郭建聪, 李培军, 肖晓柏. 一种高分辨率多光谱图像的多尺度分割方法. 北京大学学报: 自然科学版, 2008, (3): 123-127.]
- [28] Blaschke T. Object based image analysis for remote sensing. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65: 2-16.
- [29] Lahousse T, Chang K T, Lin Y H. Landslide mapping with multi-scale object-based image analysis: A case study in the Baichi watershed, Taiwan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, 11: 2715-2726, doi: 10.5194/nhess-11-2715-2011.
- [30] Xiao Xiangming, Shen Zhenxi, Qin Xiaoguan. Assessing the potential of vegetation sensor data for mappingsnow and ice cover: A normalized difference snow and ice index. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(13): 2479-2487.
- [31] Willmes S, Bareiss J, Haas C et al. Observing snowmelt dynamics on fast ice in Kongsfjorden, Svalbard, with NOAA/AVHRR data and field measurements. *Polar Research*, 2009, 28(2): 203-213, doi: 10.1111/j.1751-8369.2009.00095.x.
- [32] Tang Guoan, Yang Xin. GIS Spatial Analysis Experimental Course. Beijing: Science Press, 2006. [汤国安, 杨昕. 地理信息系统空间分析实验教程. 北京: 科学出版社, 2006.]



- [33] Hall D K, Bayr K, Schfner W et al. Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from ground and space (1893-2001). *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86: 566-577.
- [34] SilverioW, Jaquet J M. Glacial cover mapping (1987-1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(3): 342-350.
- [35] Ye Q H, Kang S C, Chen F et al. Monitoring glacier variation on Geladandong Mountain, central Tibetan Plateau, from 1969 to 2002 using remote sensing and GIS technologies. *Journal of Glaciology*, 2006, 52(179): 537-545.
- [36] Jia Wenxiong, He Yuanqing, Li Zongxing et al. The regional difference and catastrophe of climatic change in Qilian Mt. Region. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(3): 257-269. [贾文雄, 何元庆, 李宗省 等. 祁连山区气候变化的区域差异特征及突变分析. *地理学报*, 2008, 63(3): 257-269.]
- [37] Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 219-226. [施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号影响和前景初步探讨. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 219-226.]
- [38] Zhang Huawei, Lu Anxin, Wang Lihong et al. Glacier change in the Lenglongling Mountain monitored by Remote Sensing, 2010, 25(5): 682-686. [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. *遥感技术与应用*, 2010, 25(5): 682-686.]
- [39] Zhang Huawei, Lu Anxin, Wang Lihong et al. Glacier change in the Shulenan Mountain monitored by remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(1): 8-13. [张华伟, 鲁安新, 王丽红 等. 祁连山疏勒南山地区冰川变化的遥感研究. *冰川冻土*, 2011, 33(1): 8-13.]
- [40] Yang Yong, Chen Rensheng, Ji Xibin. Variations of glaciers in the Yeniugou Watershed of Heihe River Basin from 1956 to 2003. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(1): 100-106. [阳勇, 陈仁升, 吉喜斌. 近几十年来黑河野牛沟流域的冰川变化. *冰川冻土*, 2007, 29(1): 100-106.]
- [41] Wang Shengjie, Zhang Mingjun, Li Zhongqin et al. Response of glacier area variation to climate change in Chinese Tianshan Mountains in the past 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 38-46. [王圣杰, 张明军, 李忠勤 等. 近50年来中国天山冰川面积变化对气候的响应. *地理学报*, 2011, 66(1): 38-46.]
- [42] Liu Shiyin, Lu Anxin, Ding Yongjian et al. Glacier fluctuations and the inferred climate changes in the A Nyêmaqên Mountains in the source area of the Yellow River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(6): 701-707. [刘时银, 鲁安新, 丁永建, 等. 黄河上游阿尼玛卿山区冰川波动与气候变化. *冰川冻土*, 2002, 24(6): 701-707.]
- [43] Lu Anxin, Yao Tandong, Liu Shiyin et al. Glacier change in the Geladandong area of the Tibetan Plateau monitored by remote sensing. *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. *冰川冻土*, 2002, 24(5): 559-562.]
- [44] Ye Qinghua, Chen Feng, Yao Tandong. Tupu of glacier variations in the Mt. Naimona Nyi region, Western Himalayas, in the last three decades. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(4): 511-520. [叶庆华, 陈锋, 姚檀栋. 近30年来喜马拉雅山脉西段纳木那尼峰地区冰川变化的遥感监测研究. *遥感学报*, 2007, 11(4): 511-520.]
- [45] Jóhannesson T, Raymond C, Waddington E. Time-scale for adjustment of glaciers to changes in mass balance. *Journal of Glaciology*, 1989, 35: 355-369.
- [46] Liu Shiyin, Shen Yongping, Sun Wenxin et al. Glacier variation since the maximum of the Little Ice Age in the western Qilian Mountains, Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 227-233. [刘时银, 沈永平, 孙文新 等. 祁连山西段小冰期以来的冰川变化研究. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 227-233.]
- [47] Wang Puyu, Li Zhongqin, Gao Wenyu et al. Glacier changes in the Heihe River Basin over the past 50 years in the context of climate change. *Resources Science*, 2011, 33(3): 399-407. [王璞玉, 李忠勤, 高闻宇 等. 气候变化背景下近50年来黑河流域冰川资源变化特征分析. *资源科学*, 2011, 33(3): 399-407.]
- [48] Chen Jianming, Liu Chaohai, Jin Mingxie. Application of the repeated aerial photogrammetry to monitoring glacier variation in the drainage area of the Urumqi River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(4): 331-336. [陈建明, 刘潮海, 金明燮. 重复航空摄影测量方法在乌鲁木齐河流域冰川变化监测中的应用. *冰川冻土*, 1996, 18(4): 331-336.]
- [49] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Zhang Yong et al. Impact of glacier change on water resources in the Tarim River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(5): 482-490. [刘时银, 丁永建, 张勇 等. 塔里木河流域冰川变化及其对水资源影响. *地理学报*, 2006, 61(5): 482-490.]
- [50] Jin Rui, Che Tao, Li Xin et al. Glacier variation in the Pumqu Basin derived from remote sensing data and GIS Technique. *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. *冰川冻土*, 2004, 26(3): 261-266.]
- [51] Xie Zichu, Liu Chaohai. Introduction of Glaciology. Shanghai: Shanghai Science Popularization Press, 2010: 425. [谢自楚, 刘潮海. *冰川学导论*. 上海: 上海科学普及出版社, 2010: 425.]
- [52] Li Zhongqin, Han Tianding, Jing Zhefan et al. A summary of 40-year observed variation facts of climate and glacier

- No.1 at headwater of Urumqi River, Tianshan, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 117-123. [李忠勤, 韩添丁, 井哲帆 等. 乌鲁木齐河源区气候变化和1号冰川40a观测事实. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 117-123.]
- [53] IPCC. The Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on the Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 1-996.
- [54] Kang Ersi. Energy balance characteristics and mass balance change calculation research of cryosphere in High Asia. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(Suppl.): 12-22. [康尔泗. 高亚洲冰冻圈能量平衡特征和物质平衡变化计算研究. *冰川冻土*, 1996, 18(增刊): 12-22.]

## RS analysis of glaciers change in the Heihe River Basin in the last 50 years

HUAI Baojuan<sup>1,2</sup>, LI Zhongqin<sup>1,3</sup>, SUN Meiping<sup>3</sup>, ZHOU Ping<sup>1</sup>, XIAO Yan<sup>4</sup>

(1. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China;*

*2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

*3. College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;*

*4. College of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, Shandong, China)*

**Abstract:** The Heihe River Basin is the second largest inland river basin in Northwest China and it is also a hotspot in arid hydrology, water resources and other aspects of researches in cold regions. In addition, the Heihe River Basin has complete landscape, moderate watershed size, and typical social ecological environmental problems. So far, there has been no detailed assessment of glaciers change information of the whole river basin. Therefore, it is urgent to conduct studies on the assessment of glacial change in this region. Landsat TM/ETM+ remote sensing images, digital elevation model data and 1:50,000 topographic map data were used in this research. Through integrated computer automatic interpretation and visual interpretation methods, the object-oriented image feature extraction method was applied to extract glacier information. Glaciers change data were derived from spatial analysis, and the glacier variation and its response to climate change in the period 1956/63-2007/11 were also analyzed. The results are shown in the following. (1) In the period 1956/63-2007/11, the Heihe River Basin's glaciers had an evident retreat trend, the total area of glaciers decreased from 361.69 km<sup>2</sup> to 231.17 km<sup>2</sup>, at a rate of 36.08%, and average single glacier area decreased by 0.14 km<sup>2</sup>; the total number of glaciers decreased from 967 to 800. (2) Glaciers in this basin are mainly distributed at elevations of 4300-4400 m, 4400-4500 m and 4500-4600 m; there are significant differences in glacial distribution and glacial change. (3) Compared with other western mountain glaciers, glaciers retreat in the Heihe River Basin had a higher rate. (4) By analyzing the meteorological data at six weather stations from 1960 to 2010, it is found that the mean annual temperature increased significantly and the annual precipitation also showed an increasing trend. It is concluded that glacier shrinkage is closely related with temperature rising. Besides, glacier melting caused by rising temperatures is greater than glacier mass supply by increased precipitation to some extent.

**Key words:** RS analysis; glacier; object-oriented extraction method; glacier shrinkage; Heihe River Basin