

doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0066

Bie Qiang, Qiang Wenli, Wang Chao, *et al.* Monitoring the glacier variation in the upper reaches of the Heihe River based on remote sensing in 1960–2010 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 574–582. [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.]

1960—2010 年黑河流域冰川变化的遥感监测

别 强¹, 强文丽², 王 超¹, 何 磊¹, 赵传燕^{3*}

(1. 兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3. 兰州大学 草地农业系统国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 利用 1960 年地形图、1990 年、2000 年和 2010 年 TM 影像, 采用基于冰雪指数(NDSII)和原始波段的面向对象解译方法, 提取黑河流域 4 个时期的冰川分布, 结合 30 m 分辨率的 DEM 数据, 利用遥感、地理信息系统技术对冰川的时空分布变化及原因和不确定性进行分析. 结果表明: 从 1960—2010 年 50 a 间黑河流域上游冰川持续退缩, 面积共减少 138.90 km², 减少率为 35.6%, 平均每年减少 2.78 km², 祁连山中段冰川属于强烈退缩型. 祁连山中段黑河流域冰川主要分布在海拔 4 200~5 300 m 之间, 冰川分布下限为海拔 4 000 m; 冰川退缩主要发生在低海拔地区, 冰川的退缩上限为海拔 4 600 m. 气温的显著上升是研究区冰川退缩的关键因素, 气候持续变暖将会导致冰川退缩加剧.

关键词: 黑河流域; 冰川退缩; 遥感; 气候变化; GIS & RS; 面向对象解译方法

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A

0 引言

气候变化是近年来最热的研究课题^[1-3], 冰川是气候的产物, 冰川的退缩和前进是气候变化的强力佐证. 冰川的变化对全球气候变化具有敏感的指示作用^[4-6], 可以利用冰川变化的速率与幅度研究气候变化的动态过程^[7-8]. 此外, 冰川作为一种水资源, 对区域生态环境的平衡与稳定起着至关重要的作用^[9-10], 尤其是在我国西北内陆河地区, 水资源是生态环境可持续发展的决定性因素^[11-12].

近年来, 祁连山冰川的变化监测^[13-18]和物质平衡研究^[19-20]在逐渐加强, 并在这些领域取得重要进展. 研究表明: 近几十年以来祁连山冰川和其他山地冰川一样处于持续退缩状态, 气候变暖是祁连山冰川退缩的主要原因. 在冰川变化监测和物质平衡研究中, 对单个冰川或小流域冰川研究较多, 如七一冰川、老虎沟 12 号冰川、野牛沟流域冰川、疏勒南山冰川等^[7,13,20-21], 但对整个祁连山中段大范围冰川变化报道较少.

鉴于冰川对气候变化的指示性作用和对区域水资源的贡献, 冰川变化的地面长期观测和遥感持续监测具有重要意义. 随着对地观测技术的不断发展, 遥感监测的空间分辨率和时间分辨率逐渐满足冰川监测需要, 航拍数据和陆地卫星影像成为冰川监测的重要数据^[22-25]. 面向对象信息提取是遥感影像信息提取新的突破, 较传统基于象元信息提取有很大的优势.

因此, 本文基于 1960 年航拍测绘的地形图和 1990 年、2000 年、2010 年 TM 数据, 采用面向对象冰川自动解译方法, 提取近 50 a 来祁连山中段黑河流域上游冰川变化信息, 并参照冰川编目数据进行检查和修正, 为认识中纬度山地冰川对气候变化的响应和冰川变化对黑河流域水资源供给的影响提供一定的参考数据.

1 研究区概况

祁连山是青藏高原东北部边缘的一个巨大山系, 处于青藏高原、蒙新高原、黄土高原三大高原

收稿日期: 2012-10-11; 修订日期: 2013-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(91025015; 30770387); 环境保护公益性行业科研专项(200809098)资助

作者简介: 别强(1986—), 男, 甘肃武威人, 2009 年毕业于兰州大学, 现为在读硕士研究生, 主要从事遥感与 GIS 应用研究.

E-mail: bieq@qq.com

* 通信作者: 赵传燕, E-mail: nanzhr@lzb.ac.cn

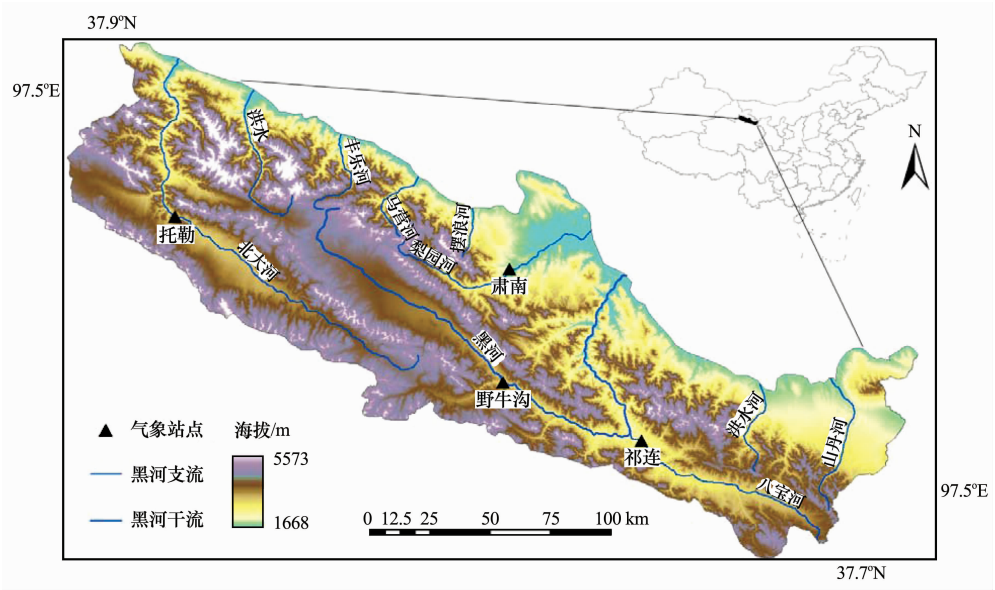


图1黑河流域上游位置示意图

Fig. 1 Map showing the upper reaches of the Heihe River

表1研究区数据列表

Table 1 Data sources of the research area

地形图编号(1960年编绘)				Landsat 影像			
				轨道号	获取时间 /(年-月-日)	获取时间 /(年-月-日)	获取时间 /(年-月-日)
10-47-15	10-47-31	10-47-54	10-47-70	p133r33	1987-08-15	2000-08-10	2009-08-11
10-47-16	10-47-40	10-47-55	10-47-71	p133r34	1990-08-21	2001-08-13	2009-08-11
10-47-17	10-47-41	10-47-56	10-47-72	p134r32	1991-09-02	1999-07-30	2009-07-01
10-47-18	10-47-42	10-47-57	10-47-73	p134r33	1987-10-09	1999-07-30	2009-07-17
10-47-29	10-47-43	10-47-58	10-47-82	p134r34	1990-08-21	2001-07-03	2009-07-17

的交汇地带，按地形可分为东段、中段、西段三段，黑河上游祁连山区位于祁连山中段。黑河是我国第二大内陆河，是我国内陆河流域的典型代表和研究内陆河生态环境变化的重要区域^[26-27]。本研究区选择黑河上游区域(图1)，总面积27 968 km²，位于97.5°~101.6° E、37.7°~39.7° N。区域年降水量在250 mm以上，最高达700 mm，相对湿度约60%，蒸发量约1 200 mm，空间差异明显^[28]。黑河上游海拔4 000 m以上发育现代冰川，冰川融水对流域径流起着重要的作用^[19]。

2 数据和方法

2.1 数据源

本研究使用的地形图为1957年航测，1960年编绘完成，图上附有的冰川信息代表1960年数据源。使用的遥感影像主要来自美国航空航天管理局(NASA)网站，为了消除积雪和云对冰川提取的影

像，遥感数据选用1990年、2000年和2010年7月到8月无云或低云Landsat TM数据，轨道号为P133R33、P133R34、P134R33、P134R34和P135R33(表1)。由于研究区20世纪70年代的MSS夏季影像空缺很多，在本文中没有提取1970年代冰川面积。

其他数据包括：由中国科学院寒区旱区环境与工程研究所编制的中国冰川编目数据；由日本经贸及工业部(METI)和美国航空航天管理局(NASA)发布的最新的全球空间分辨率为30 m的DEM(ASTER GDEM)；中国气象局国家气象信息中心气象资料室提供的4个气象站点(祁连、野牛沟、托勒和肃南)1960—2010年气温和降水数据。

2.2 研究方法

2.2.1 地形图冰川数字化

首先扫描研究区1:10万地形图，在ENVI软件支持下采用北京1954坐标系，高斯-克吕格投影

对地形图进行几何纠正, 纠正误差 RMS 小于 0.5. 在 ArcGIS 软件中根据地形图中绘制的冰川边界提取黑河流域冰川范围, 由于数字化过程中出现的重叠、缝隙等错误, 对数字化好的面数据建立拓扑, 进行拓扑检查和修改.

2.2.2 遥感影像预处理

(1) 遥感影像的大气纠正. 为了消除大气和云对遥感影像分类精度的影响, 本研究利用 ENVI 的 FLAASH 模块进行大气辐射纠正, FLAASH 使用了目前精度高的 MODTRAN 辐射传输模型, 它基于像元进行校正, 校正了由于漫反射引起的邻域效应^[29].

(2) 遥感影像拼接、剪切. 研究区覆盖范围广, 遥感影像数据量大, 对研究区影像进行拼接并裁剪可以减少数据量, 提高运算效率. 在拼接中以研究区中间影像直方图为准, 其他图像配准, 保证了整个研究区色调一致.

2.2.3 冰川遥感解译

(1) 参数计算. 冰雪指数 NDSII (Normalized Difference Snow/Ice Index) 被用于冰川范围的提取. 冰雪在可见光波段(TM2(0.52~0.60 μm), TM3(0.63~0.69 μm), TM4(0.76~0.90 μm))具有较高的光谱反射值, 而在短波红外(TM5(1.55~1.7 μm))的光谱反射值很低^[30], 由这两个波谱段的遥感数据组合构成的 NDSII 可以有效的提取冰雪范围. 可见光波段 TM2、TM3 和 TM4 分别与短波红外波段 TM5 构成不同的形式的 NDSII^[31], 本文根据研究区试验采用如下 NDSII 公式:

$$NDSII = (Red - SWIR) / (Red + SWIR) \quad (1)$$
或
$$NDSII = (TM3 - TM5) / (TM3 + TM5) \quad (2)$$
式中: NDSII 为冰雪指数; Red、SWIR 分别为可见光波段和短波红外波段. NDSII 为比值运算, 可以部分消除与太阳高度角、卫星观测角、地形、云、阴影和大气条件有关的辐照度条件变化的影响, 可有效提取阴影覆盖的冰川.

(2) 冰川提取流程. 面向对象的分类方法可以利用对象的几何信息及对象之间的语义信息、纹理信息和拓扑关系, 而不仅仅是单个对象的光谱信息, 因此, 该分类方法具有很大的优势^[31-35]. 故本文采用面向对象分类方法提取黑河流域冰川.

对预处理过的遥感影像进行参数提取并合成数据集, 即 TM 各个波段、NDSII、NDVI、DEM 等合成一数据集, 在参考资料支持下, 采用面向对象方法结合专家知识构建分类规则, 获得冰川边界数

据. 其中, 面向对象方法提取冰川特征是在 ENVI EX 遥感处理平台下实现, 主要包括 4 个处理过程: 影像分割、合并、规则制定和输出结果(图 2).

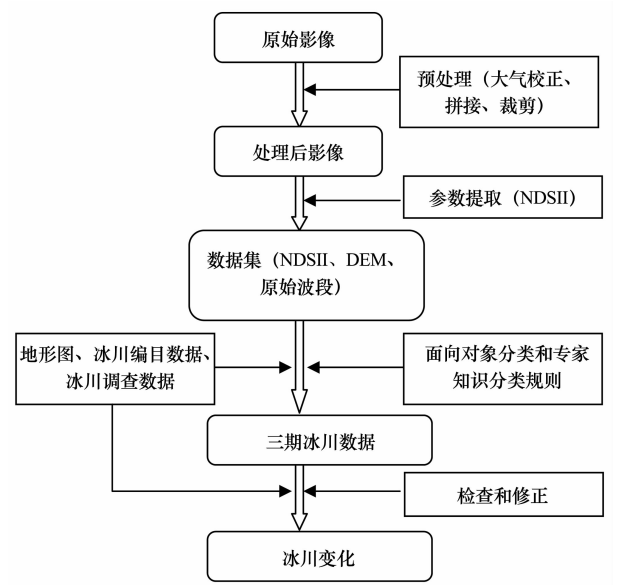


图 2 冰川提取流程图

Fig. 2 Workflow chart of deriving glacier variation

冰川信息提取的关键步骤在于规则的制定. 选择最佳的指标, 确定合理的阈值从而制定最优的冰川提取规则. 另外, NDSII 是试验中用于区分冰川区和非冰川区的关键因子, NDSII 的阈值越大, 识别出的冰雪对象越少. 所以, 选取合适的 NDSII 值非常关键, 在本研究中采取直方图截取法^[27]确定 NDSII 值为 0.48~0.96.

3 结果分析和讨论

3.1 冰川变化

研究区面积共 27 968.49 km², 冰川约占研究区面积 1%. 1960、1990、2000 和 2010 年研究区冰川分布面积分别为 389.63 km²、320.78 km²、267.40 km² 和 250.73 km², 分别占黑河上游面积 1.393%、1.15%、0.956% 和 0.89%(表 2).

表 2 1960—2010 年黑河上游冰川面积分布
Table 2 Glacierized area in the upper reaches of the Heihe River changing from 1960 to 2010

类型	1960 年		1990 年		2000 年		2010 年	
	面积 /km ²	比例 /%	面积 /km ²	比例 /%	面积 /km ²	比例 /%	面积 /km ²	比例 /%
冰川	389.63	1.393	320.78	1.15	267.40	0.956	250.73	0.89

黑河流域上游冰川自 1960 年以来一直处于持

续减少的状态，减少幅度和减少速率见表3。1960—1990年间冰川面积共减少68.65 km²，年均减少2.30 km²，平均每年减少0.59%；1990—2000年间冰川面积共减少53.38 km²，年均减少5.34 km²，平均每年减少1.66%，冰川退缩强度增大；2000—2010年间冰川共退缩16.67 km²，平均每年退缩1.67 km²，平均每年减少0.62%，退缩速率较1990—2000年显著减缓。1960—2010年50 a间黑河流域上游冰川面积共减少138.90 km²，平均每年减少0.71%。

与其他研究结果相比，祁连山中部黑河流域冰川对气候响应敏感，属于强烈退缩型(表4)。祁连山区气温在20世纪80年代中后期大幅度升高，90年代以后明显变暖，与我国西北地区气温变化规律基本一致^[36,14]。在气候变暖的背景下，祁连山区冰川均呈现面积大幅度缩小的趋势。研究区在过去50 a内面积共退缩35.6%，退缩速率为每年0.71%，比祁连山西段疏勒南山和祁连山东段冷龙岭的退缩率要大，主要是祁连山西段冰川分布的面积和规模都较中段大，而冰川规模越大冰川相对稳定^[13]。与研究区报道的结果相比，本研究结果的冰川退缩率要高，可能因为研究区选择的不同或研究时段不同。

3.2 冰川分布海拔梯度特征及其变化

高程数据采用空间分辨率为30 m的ASTER GDEM数据，以100 m为间距，通过将高度带和不同时期冰川叠加获取冰川的梯度分布及变化，结果

如表5所示：1)黑河流域冰川主要分布在海拔4 200~5 300 m之间，占整个研究区冰川分布面积的95%，分布下线为海拔4 000 m，随着海拔的上升分布面积逐渐增大，海拔超过4 700 m后，由于其附着面减小而逐渐减少；2)在气候变暖的背景下，不同海拔梯度的冰川对全球变暖的敏感度不同，1960—1990年、1990—2000年、2000—2010年3个时段冰川退缩主要发生在海拔4 000~4 600 m之间，处于冰川分布的低海拔区域。低海拔冰川较高海拔冰川而言，其分布面积和厚度相对较小，其退缩率远远大于高海拔冰川^[15]。低海拔冰川对气候响应敏感，冰川退缩剧烈；3)从表5看出，3个时期冰川在海拔4 700 m以上的区域都没有发生退缩，部分冰川的物质平衡为正，冰川的面积有所增加。据此可以推断黑河流域冰川退缩上限在海拔4 700 m。不同区域冰川退缩上限有很大差别，珠穆朗玛峰保护区冰川退缩上限为海拔6 600 m^[37]，托木尔峰南麓科其喀尔冰川退缩上限为海拔4 600 m^[38]。

3.3 研究区典型冰川变化分析

图3显示的是研究区桦树沟脑冰川和道沟冰川两典型冰川变化特征，两冰川为南北向分布的山谷型冰川，冰川出口方向为北。桦树沟脑冰川和道沟冰川在过去50 a面积分别减少0.32 km²、1.26 km²。冰川的变化主要体现在冰川末端，冰舌部分是冰川变化最剧烈部分。从1960年到1990年桦树沟脑冰川冰舌平均退缩140 m，道沟冰川冰舌平均退

表3 1960—2010年黑河上游冰川面积变化

Table 3 The variation of glacierized area in the upper reaches of the Heihe River from 1960 to 2010						
类型	1960—1990	1960—2000	1960—2010	1990—2000	1990—2010	2000—2010
退缩面积/km ²	68.85	122.23	138.90	53.38	70.05	16.67
退缩率/%	17.67	31.37	35.65	16.64	21.84	6.23
退缩速率/(km ² ·a ⁻¹)	2.30	3.06	2.78	5.34	3.50	1.67
退缩速率/(%·a ⁻¹)	0.59	0.78	0.71	1.66	1.09	0.62

表4 山地冰川退缩研究比较

Table 4 Information of glacier retreats in some districts						
冰川或地区	退缩/%	退缩速率/(%·a ⁻¹)	时段	数据源	方法	资料来源
祁连山冷龙岭	28.97	0.68	1960—2002	地形图、ETM	目视解译	文献[39]
祁连山中段	29.6	0.56	1950—2003	地形图、ASTER	目视解译	文献[14]
祁连山西段	12.8	0.36	1970—2006	地形图、ETM	目视解译	文献[13]
祁连山野牛沟	27.5	0.59	1956—2003	地形图、ASTER	自动解译	文献[7]
祁连山中段	35.6	0.71	1960—2010	地形图、TM	面向对象分类	本文

表 5 1960—2010 年黑河流域上游冰川在各个海拔梯度的分布和变化

Table 5 Glacierized area of various elevation zones in the upper reaches of the Heihe River changing from 1960 to 2006

海拔 /m	1960 年 /%	1990 年 /%	2000 年 /%	2010 年 /%	1960—1990 年 变化率/%	1990—2000 年 变化率/%	2000—2010 年 变化率/%
≤4000	0.036	0.004	0.017	0.015	−0.032	0.012	−0.002
4000~4100	0.140	0.031	0.009	0.007	−0.109	−0.022	−0.002
4100~4200	1.687	0.302	0.071	0.036	−1.385	−0.230	−0.035
4200~4300	3.485	0.461	0.683	0.432	−3.024	0.221	−0.251
4300~4400	7.770	6.528	3.405	2.747	−1.241	−3.124	−0.657
4400~4500	12.076	13.522	8.378	7.962	1.446	−5.144	−0.416
4500~4600	15.323	17.276	14.118	14.141	1.952	−3.158	0.023
4600~4700	15.458	16.827	17.143	17.359	1.369	0.316	0.216
4700~4800	14.065	14.286	16.479	16.639	0.221	2.193	0.160
4800~4900	11.048	11.436	13.436	13.506	0.388	2.000	0.070
4900~5000	8.965	9.204	11.278	11.506	0.239	2.073	0.228
5000~5100	5.097	5.248	8.133	8.351	0.151	2.885	0.218
5100~5200	3.182	3.200	4.548	4.750	0.018	1.348	0.201
5200~5300	1.287	1.297	1.774	1.971	0.009	0.478	0.197
5300~5400	0.273	0.315	0.378	0.418	0.042	0.063	0.041
5400~5500	0.076	0.092	0.110	0.117	0.015	0.018	0.007
5500~5600	0.029	0.035	0.042	0.045	0.006	0.007	0.003

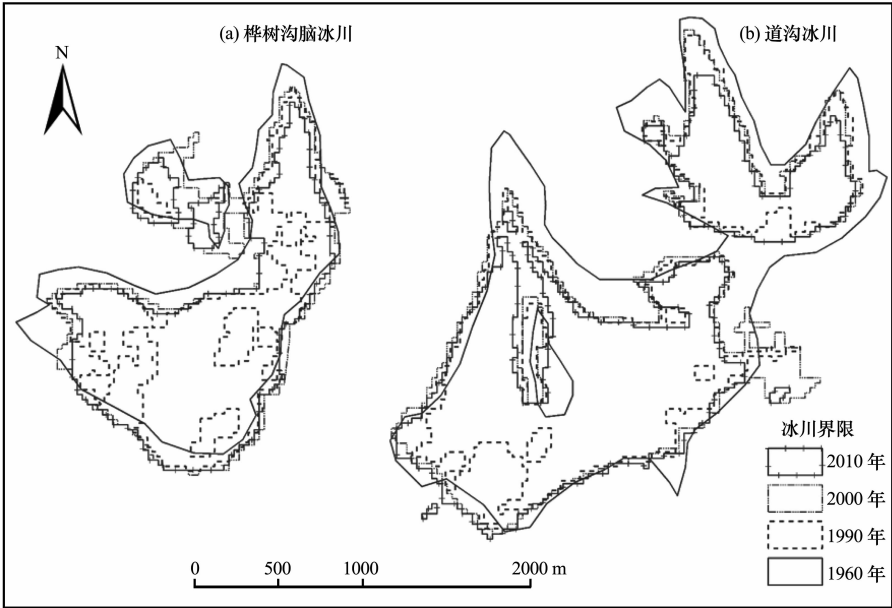


图 3 桦树沟脑冰川(a)和道沟冰川(b)边界变化

Fig. 3 The boundary changes of the Huashugounao Glacier (a) and the Daogou Glacier (b)

缩 160 m, 1990 年到 2010 年桦树沟脑冰川冰舌平均退缩 70 m, 道沟冰川冰舌平均退缩 170 m. 冰川退缩是冰川面积、厚度和冰储量的减少, 主要表现为冰川末端的退缩、大冰川分裂成小冰川等, 而且

冰川变化中, 面积较大的冰川变化较面积较小的冰川更为稳定^[7].

3.4 冰川变化结果不确定性分析

(1)冰碛物覆盖冰川区域对冰川变化的影响.

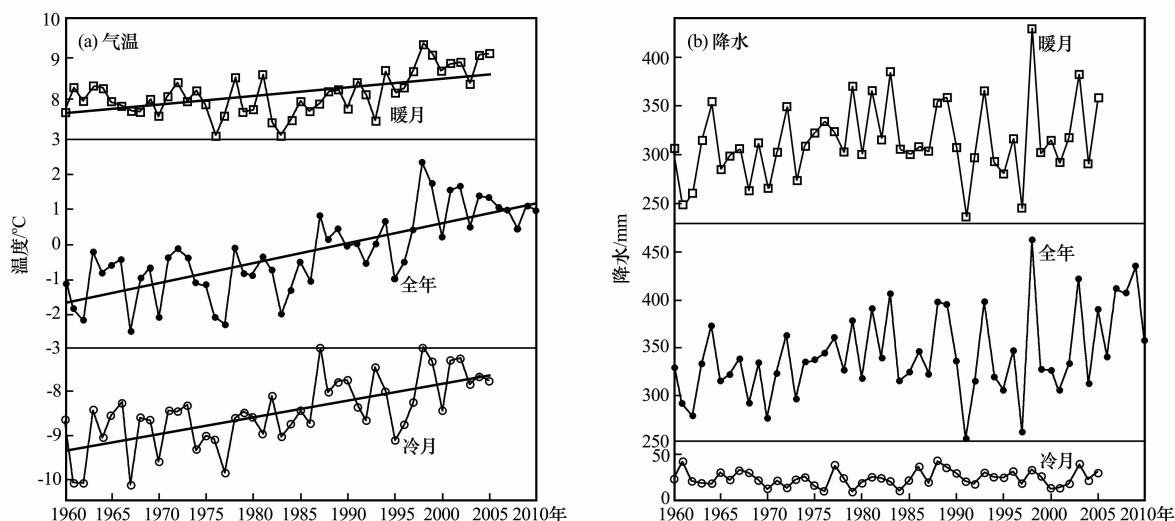


图 4 研究区气温和降水变化

Fig. 4 The changes of air temperature and precipitation in the study area

遥感数据对冰碛物覆盖冰川难以辨别清楚^[4,22], 这种类型冰川变化研究, 需要实地勘测以确定末端位置变化. 本研究暂不考虑这部分冰川的变化, 本研究提取冰川是冰川主体延伸的边缘与裸岩的分界. 冰碛物覆盖冰川一般位于冰川边缘, 是冰川变化非常活跃的区域, 本研究未提取这部分冰川会使结果稍微偏低.

(2) 遥感影像的空间分辨率和时间分辨率对冰川变化的影响. Landsat TM 的空间分辨率为 30 m, 最小制图单元为 3×3 像元. 提取的冰川的边界局部放大不像实际冰川是光滑的弧线, 而是成锯齿状边界, 也就是说在一个像素单元内有的是冰川但未被提取, 有些不是冰川但被提取. 另外, 在高山地区对流强烈, 获得的高质量遥感影像较少, 很难获得时间一致的遥感影像, 在研究中都是采用时间相近的高质量影像来代替.

(3) 季节性积雪对冰川变化的影响. 积雪和冰川具有相似的光谱特征, 冰川发育地区降水通常以雪的形式降落, 本研究采用 7、8 月的遥感影像最大限度的避免了积雪的影响, 但是若在遥感影像成像前有降雪, 提取的冰川因冰川边缘积雪的原因会略大于真实值.

3.5 冰川变化的气候背景

冰川变化是气候变化的必然结果, 在气象要素中, 气温和降水是决定冰川物质平衡的关键因素. 利用黑河上游分布的 4 个站气象站点(野牛沟: 99.58°E , 38.41°N ; 托勒: 98.01°E , 39.03°N ; 祁连: 100.23°E , 38.19°N ; 肃南: 99.61°E , 38.83°N)

记录的气温和降水数据, 分析冰川变化的气候背景. 从图 4 可以看出, 黑河上游 4 个气象站点年平均气温呈明显的上升趋势, 并且在 1990 年代开始气温上升加速. 其中, 1960—1990 年间 4 站平均增温速率为 $0.31^{\circ} \text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 1990—2010 年 4 站平均增温速率为 $0.65^{\circ} \text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 过去 50 a 年间气温上升 2.7°C . 气温的强烈上升导致祁连山中段黑河流域冰川加速退缩^[14,15,27].

研究区 4 个气象站点年降水量在过去 50 a 中增加 45 mm, 增加幅度与气温变化相比很小. 有研究报道祁连山和黑河流域气候变化趋势是由于冷转向暖湿, 但是降水的增加远小于增温的幅度^[36]. 在气温显著增加的背景下, 黑河流域发育的现代冰川持续退缩, 并且退缩的速率和气温的增速呈正相关.

为了研究气候变化在年内的差异及其对冰川的影响, 本文根据月平均气温是否大于 0°C 为标准将研究区分为热月和冷月来统计. 热月时间范围为 4—9 月, 冷月时间范围为 10—次年 3 月, 托勒和野牛沟站点 4 月和 10 月的平均气温在 $0 \sim 3^{\circ} \text{C}$ 之间, 在本文中归为热月统计. 如图 4 所示, 研究区 50 a 间热月增温 0.95°C , 冷月增温 1.69°C , 冷月增温占全年增温的 64%; 研究区全年降水 50 a 间有少量的增加, 其中冷月降水增加 2.1 mm, 热月降水增加 31.1 mm, 占全年增加的 94%.

祁连山冰川的消融和积累主要受夏季气候的影响^[15], 冷月的增温不利于积雪转化为粒雪以及粒雪经变质作用形成冰川, 而热月的增温加速冰川的

相变；热月降雨大多以液态的形式，对冰川的物质积累作用很小。

4 结 论

(1) 从 1960—2010 年 50 a 间黑河流域上游冰川持续退缩，面积共减少 138.90 km²，减少率为 35.6%，平均每年减少 2.78 km²；其中，1960—1990 年间冰川面积共减少 68.65 km²，平均每年减少 2.30 km²，减少率为 0.59%。随着气温的剧烈增加，1990—2010 年间冰川退缩速率加剧，平均每年减少 3.5 km²。通过比较，祁连山中段冰川属于强烈退缩型。

(2) 冰川在高程梯度上的分析得出，祁连山中段黑河流域冰川主要分布在海拔 4 200~5 300 m 之间，冰川分布下限为海拔 4 000 m；冰川退缩主要在低海拔地区，冰川的退缩上限为海拔 4 600 m。

(3) 黑河流域上游气温在过去 50 a 持续增温，共增温 2.7℃，尤其是 1990 年以来增温幅度增加，降水量在过去 50 a 有少量增加。气温的显著上升是研究区冰川退缩的关键因素，持续变暖将会导致冰川退缩加剧。

(4) 面向对象的影像分类与人工目视解译和传统的计算机自动分类相比有很大的优势，在冰川信息提取时有很好的应用，引入冰雪指数 NDSII，可以提高大面积冰川提取的效率和精度。另外，由于遥感影像的局限和冰川的特殊性，在冰川变化研究中存在一定的不确定性，为了降低不确定性，需要对冰川长期的实地监测。

参考文献 (References):

[1] Owen L A, Thackray G, Anderson R S, *et al.* Integrated research on mountain glaciers: Current status, priorities and future prospects[J]. *Geomorphology*, 2009, **103**(2): 158—171.

[2] Gore A. An Inconvenient Truth: The Planetary Emergency of Global Warming and What We Can Do About It[M]. New York: Rodale, 2006: 1—328.

[3] The Core Writing Team, Pachauri R K, Reisinger A. Climate Change 2007: Synthesis Report[R]. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007.

[4] 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.

[5] Haeberli W, Hoelzle M, Paul F, *et al.* Integrated monitoring of mountain glaciers as key indicators of global climate change: the European Alps[J]. *Annals of Glaciology*, 2007, **46**(1): 150—160.

[6] 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.]

[7] Yang Yong, Chen Rensheng, Ji Xibin. Variations of glaciers in the Yeniugou watershed of Heihe River basin from 1956 to 2003[J]. *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[J]. *冰川冻土*, 2007, **29**(1): 100—106.]

[8] Wang Sheng, Pu Jianchen, Wang Ninglian. Study of mass balance and sensibility to climate change of Qiyi Glacier in Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(6): 1214—1221. [王盛, 蒲健辰, 王宁练. 祁连山七一冰川物质平衡及其对气候变化的敏感性研究[J]. *冰川冻土*, 2011, **33**(6): 1214—1221.]

[9] Wang Zongtai, Su Hongchao. Glaciers in the world and China: Distribution and their significance as water resources [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(5): 498—503. [王宗太, 苏宏超. 世界和中国的冰川分布及其水资源意义[J]. *冰川冻土*, 2003, **25**(5): 498—503.]

[10] Yang Jianping, Ding Yongjian, Liu Shiyin, *et al.* Glacier change and its effect on surface runoff in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers [J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, **18**(5): 595—602. [杨建平, 丁永建, 刘时银, 等. 长江黄河源区冰川变化及其对河川径流的影响[J]. *自然资源学报*, 2003, **18**(5): 595—602.]

[11] Ye Baisheng, Han Tianding, Ding Yongjian. Some changing characteristics of glacier streamflow in Northwest China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, **21**(1): 54—58. [叶柏生, 韩添丁, 丁永建. 西北地区冰川径流变化的某些特征[J]. *冰川冻土*, 1999, **21**(1): 54—58.]

[12] Zhang Jiutian, He Xiaojia, Shangguan Donghui, *et al.* Impact of intensive glacier ablation on arid regions of Northwest China and its countermeasure[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(4): 848—854. [张九天, 何霄嘉, 上官冬辉, 等. 冰川加剧消融对我国西北干旱区的影响及其适应对策[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(4): 848—854.]

[13] Zhang Huawei, Lu Anxin, Wang Lihong, *et al.* Glacier change in the Shulenan Mountain monitored by remote sensing [J]. *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[J]. *冰川冻土*, 2011, **33**(1): 8—13.]

[14] 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[J]. *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[J]. 资源科学, 2011, **33**(3): 399—407.]
- [15] Chen Ying, Xu Dianxiang, Song Xiuling. Evaluation of the effects of summer climate change on glacier development in the west Qilian Mountain over the last 50 years[J]. Arid Zone Research, 2009, **26**(2): 294—298. [程瑛, 徐殿祥, 宋秀玲. 近 50 年祁连山西段夏季气候变化对冰川发育的影响[J]. 干旱区研究, 2009, **26**(2): 294—298.]
- [16] Zhang Guoliang, Pan Baotian, Wang Jie, *et al.* Research on the glacier change in the Gongga Mountain based on remote-sensing and GPS from 1966 to 2008[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, **32**(3): 454—460. [张国梁, 潘保田, 王杰, 等. 基于遥感和 GPS 的贡嘎山地区 1966—2008 年现代冰川变化研究[J]. 冰川冻土, 2010, **32**(3): 454—460.]
- [17] Li Peng, Yan Ming, Xu Yuetong, *et al.* Calculation methods of glacier terminus variation based on GIS: A case study on Austre Lovénbreen in Arctic [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, **34**(2): 367—374. [李鹏, 闫明, 徐跃通, 等. 基于 GIS 冰川末端变化计算方法研究——以北极 Austre Lovénbreen 冰川为例[J]. 冰川冻土, 2012, **34**(2): 367—374.]
- [18] Lan Yongru, Liu Gaohuan, Shao Xuemei. Variation of the Melang Glacier in Mount Kawa Karpo in the past 40 years, based on dendrochronology [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **33**(6): 1229—1234. [蓝永如, 刘高焕, 邵雪梅. 近 40 年来基于树轮年代学的梅里雪山明永冰川变化研究[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(6): 1229—1234.]
- [19] Shen Yongping, Liu Shiyin, Zhen Lili, *et al.* Fluctuations of glacier mass balance in watersheds of Qilian Mountain and their impact on water resources of Hexi region [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, **23**(3): 244—250. [沈永平, 刘时银, 甄丽丽, 等. 祁连山北坡流域冰川物质平衡波动及其对河西水资源的影响[J]. 冰川冻土, 2001, **23**(3): 244—250.]
- [20] Pu Jianchen, Yao Tandong, Duan Kegin. Mass balance of the Qiyi Glacier in the Qilian Mountains: A new observation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, **27**(2): 199—204. [蒲健辰, 姚檀栋, 段克勤, 等. 祁连山七一冰川物质平衡的最新观测结果[J]. 冰川冻土, 2005, **27**(2): 199—204.]
- [21] Du Wentao, Qin Xiang, Liu Yushuo, *et al.* Variation of the Laohugou Glacier No. 12 in the Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, **30**(3): 373—379. [杜文涛, 秦翔, 刘宇硕, 等. 1958—2005 年祁连山老虎沟 12 号冰川变化特征研究[J]. 冰川冻土, 2008, **30**(3): 373—379.]
- [22] Andreassen L M, Paul F, Kääb A, *et al.* Landsat-derived glacier inventory for Jotunheimen, Norway, and deduced glacier changes since the 1930s[J]. The Cryosphere, 2008, **2**(2): 131—145.
- [23] 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——以布喀塔格峰为例[J]. 地理学报, 1999, **54**(3): 263—268.]
- [24] Paul F, Kääb A, Haeblerli W. Recent glacier changes in the Alps observed by satellite: Consequences for future monitoring strategies[J]. Global and Planetary Change, 2007, **56**(1—2): 111—122.
- [25] Bolch T. Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data [J]. Global and Planetary Change, 2007, **56**(1—2): 1—12.
- [26] Lan Yongchao, Sun Baomu, Ding Yongjian, *et al.* Studies on ecological environment changes of Heihe River basin and its influence factors[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004, **18**(2): 32—39. [蓝永超, 孙保沐, 丁永建, 等. 黑河流域生态环境变化及其影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2004, **18**(2): 32—39.]
- [27] Lan Yongchao, Hu Xinglin, Xiao Honglang, *et al.* A study of variations of water cycle factors in the mountainous area of the Heihe main river under global warming scene[J]. Advances in Earth Science, 2008, **23**(7): 739—747. [蓝永超, 胡兴林, 肖洪浪, 等. 全球变暖情景下黑河山区水循环要素变化研究[J]. 地球科学进展, 2008, **23**(7): 739—747.]
- [28] Zhang Yinghua, Wu Yanqing. Relation between oxygen and hydrogen isotopes in precipitation and temperature in Heihe river basin, China [J]. Arid Land Geography, 2007, **30**(1): 16—21. [张应华, 仵彦卿. 黑河流域中上游地区降水水中氢氧同位素与温度关系研究[J]. 干旱区地理, 2007, **30**(1): 16—21.]
- [29] Li Guoyan, Zhang Zhongyuan, Zheng Yanfen, *et al.* Atmospheric correction of MODIS and its application in cyanobacteria bloom monitoring in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2008, **20**(2): 160—166. [李国砚, 张仲元, 郑艳芬, 等. MODIS 影像的大气校正及在太湖蓝藻监测中的应用[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(2): 160—166.]
- [30] Racoviteanu A E, Arnaud Y, Williams M W, *et al.* Decadal changes in glacier parameters in the Cordillera Blanca, Peru, derived from remote sensing[J]. Journal of Glaciology, 2008, **54**(186): 499—510.
- [31] Hulka J. Calibrating ASTER for snow covers analysis[C]// Proceedings 2008: The 11th AGILE International Conference on Geographic Information Science. Girona, Spain: AGILE, 2008.
- [32] Bie Qiang, Zhao Chuanyan, Peng Shouzhong, *et al.* RS information extraction and accuracy evaluation based on multi-elements data and different classify method-A case study of the eastern section of Qilian Mountains[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, **24**(5): 576—581. [别强, 赵传燕, 彭守璋, 等. 基于多元数据和不同分类算法的遥感影像信息提取及精度评价——以祁连山东段为例[J]. 遥感技术与应用, 2009, **24**(5): 576—581.]
- [33] Zhang Chunxiao, Hou Wei, Liu Xiang, *et al.* Remote sensing image classification based on object-oriented and image cognition—a case study in Xiang'e, Dujiangyan[J]. Bulletin of Sur-

veying and Mapping, 2010(4): 11–14. [张春晓,侯伟,刘翔,等. 基于面向对象和影像认知的遥感影像分类方法——以都江堰向峨乡区域为例[J]. 测绘通报, 2010(4): 11–14.]

[34] Huang Huiping. Scale Issues in Object-oriented Image Analysis [D]. PhD Thesis, Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2003. [黄慧萍. 面向对象影像分析中的尺度问题研究[D]. 博士学位论文, 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2003.]

[35] Jin X, Paswaters S. A fuzzy rule base system for object-based feature extraction and classification[C]//Kadar I. Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XVI. Proceedings of SPIE, Vol. 6567. Belingham, WA: SPIE, 2007, doi: 10.1117/12.720063.

[36] Jia Wenxiong, He Yuanqing, Li Zongxing, *et al.* The regional difference and catastrophe of climatic change in Qilian Mt. region[J]. *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[J]. 地理学报, 2008, **63**(3): 257–269.]

[37] 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[J]. 地理学报, 2010, **65**(1): 13–28.]

[38] Xie Changwei, Ding Yongjian, Liu Shiyin, *et al.* Variation of Keqikaer Glacier terminus in Tomur Peak during last 30 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, **28**(5): 672–677. [谢昌卫,丁永建,刘时银,等. 近30 a来托木尔峰南麓科其喀尔冰川冰舌区变化[J]. 冰川冻土, 2006, **28**(5): 672–677.]

[39] Zhao Liqiang. A Study of Glacier Changes and Surface Dust on Lenglongling Glacier in the Qilian Mountains [D]. Master Thesis, Lanzhou: Lanzhou University, 2009. [赵力强. 冷龙岭冰川表面沙尘及冰川近期变化研究[D]. 硕士论文, 兰州: 兰州大学, 2009.]

Monitoring Glacier Variation in the Upper Reaches of the Heihe River Based on Remote Sensing in 1960—2010

BIE Qiang¹, QIANG Wen-li², WANG Chao¹, HE Lei¹, ZHAO Chuan-yan³

(1. College of Earth and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou Gansu 730000, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. State Key Laboratory of Pastoral Agricultural Ecosystem, Lanzhou University, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: The upper reaches of the Heihe River was selected as a study area. Based on topographic maps in 1960 and Landsat TM images in 1990, 2000 and 2010, glaciers distribution for four periods have been automatically derived by object-oriented image interpretation method combined with expert knowledge. Spatial-temporal distribution and changes of glaciers are analyzed with GIS and RS method. It is found that during 1960–2010, glaciers had shrunk significantly by 138.90 km² in total, and the ratio of retreated glacierized area to

the glacierized area in 1960 is 35.6%, with a retreating rate of 2.78 km² per year. Glaciers are mainly located in the western and middle portions of the study area, ranging from 4 200 to 5 300 m in altitude. The lower limit of glacier distribution is 4 000 m. The glacier retreat is found in the low elevation with an upper limit of 4 600 m a. s. l. Air temperature rising is considered to be the key factor of glacier retreat in this region. Glaciers will markedly shrink owing to continuous climate warming.

Key words: Heihe River basin; glacier retreat; remote sensing; climate change; GIS & RS; object-oriented image interpretation method