

文章编号: 1007-7588(2011)03-0399-09

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

王璞玉^{1,3}, 李忠勤^{1,2}, 高闻宇², 颜东海², 白金中², 李开明^{1,3}, 王 林^{1,3}

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室/天山冰川站, 兰州 730000;

2. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 本文运用RS和GIS, 基于航空相片、地形图和遥感影像数据分析了近50a来黑河流域冰川资源变化特征。研究表明, 1950s/1970s-2003年, 该流域的335条冰川总面积缩小了29.6%, 平均每条冰川缩小0.10 km², 冰川末端平均后退258 m, 退缩比率达31.0%, 且黑河干流以西的冰川面积缩小及末端退缩幅度均强于干流以东。分析认为, 气温显著升高是黑河流域冰川快速萎缩的主导因素。与我国西部其它地区冰川变化相比, 黑河流域冰川面积缩小幅度明显较大, 且祁连山东、中、西段冰川变化存在显著的区域差异性, 这是区域气候差异、冰川规模等因素综合作用的结果。

关键词: 遥感; 冰川资源变化; 区域差异性; 黑河流域; 祁连山中段

1 引言

地处中低纬地区的山岳冰川与人类密切相关, 被誉为高山“固体水库”, 不仅对河川径流有直接影响, 而且可以揭示气候波动的响应特征。我国分布有4 6298条山地冰川, 总储量达5590 km³, 冰川水资源是人类社会赖以生存和发展的源泉^[1]。20世纪以来随着气温持续升高, 全球冰川呈在波动中稳定、持续后退的总趋势。我国西部新疆地区、祁连山西段、横断山区、珠穆朗玛峰地区、青藏高原长江源区的各拉丹冬地区, 以及整个长江黄河源区的冰川均呈萎缩之势, 已成为国内外关注的热点^[2-7]。

黑河是我国西北干旱地区第二大内陆河, 不仅是我国内陆河流域的典型代表、研究内陆河生态环境变化的重要区域, 而且是河西绿洲重要的水资源, 联系着流域生态系统和经济系统, 对内陆干旱流域社会经济发展具有举足轻重的作用^[8]。以往有关黑河的研究主要集中在气候、生态、水文等方面^[9-11], 对流域冰川变化特征, 尤其是近年来的变化研究相对较少。近年来随着气温的升高, 分布在该区

的冰川出现了强烈消融, 冰川融水径流量普遍增加, 已对区域生态环境及可持续发展产生了显著影响。鉴于此, 本研究以黑河流域作为研究区域, 在RS和GIS技术的支持下, 基于20世纪50年代-70年代航摄地形图和2003年ASTER遥感影像, 严格按照国际冰川监测服务处(WGMS)提供的影像解译分析方法, 研究了黑河流域冰川过去50a的变化特征, 以为流域水资源评估提供科学依据。

2 研究区概况

黑河流域位于祁连山中段北坡, 是河西内陆区三大水系中最大的一个。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。黑河长821km, 出山口莺落峡以上为上游, 河道长303km, 流域集水面积1 0009km², 海拔介于1674~5103m (平均海拔高度为3738m)。上游分东西两支, 东支平均高度为3600m, 西支为3860m, 该区降水多、蒸发少、气温低、高寒阴湿, 是黑河流域地表水资源的发源地和产流区。据1981年完成的《中国冰川目录 I—祁连

收稿日期: 2010-10-10; 修订日期: 2011-01-18

基金项目: 国家自然科学基金黑河重大研究计划培育项目(编号: 91025012); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(编号: 2010CB951003); 国家自然科学基金重点项目(编号: 40631001)。

作者简介: 王璞玉, 女, 甘肃成县人, 博士生, 主要从事冰川变化研究。E-mail: wangpuyu862@163.com

通讯作者: 李忠勤, E-mail: lizq@lzb.ac.cn

山区》^[12],黑河流域共有冰川428条,总面积129.79 km²,平均面积0.30 km²,冰储量3.30 km³(约合计水当量29.70×10⁸m³)。冰川末端平均海拔4100 m,雪线高度介于海拔4400~4500 m。在此需要说明的是,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。为了便于变化特征分析,本研究主要根据冰川编目资料,重点研究了黑河流域不包括北大河流域的冰川空间分布状况及其变化特征(图1)。

3 数据与方法

本研究数据源主要有:地形图、ASTER影像、数字高程模型(DEM)、气象数据。共涉及24幅1:5万航摄地形图,反映了1950s/1970s冰川信息(航摄时间:1956年18幅、1958年1幅、1966年3幅、1978年2幅)。查询该区SPOT 5、ALOS等多种高分辨率遥感影像之后,选择了2000年至今云量、积雪覆盖最少、质量最好的ASTER影像共5景,时相均为2003年,集中在6月-9月。ASTER(Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer)是搭载在地球观测系统(EOS)TERRA卫星上的高分辨率多光谱传感器,其中VNIR波段的空间分辨率为15m。DEM数据为30 m分辨率,来源于国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心”。气象数据主要包括研究区5个气象站1960年-2005年的逐年逐日气温、降水资料(表1),具体站点位置见图1。

数据处理包括两部分:地形图处理和遥感影像处理。首先对研究区24幅地形图扫描,并进行几何纠正,几何纠正的均方根误差小于1个像元。之后,以纠正好的地形图为底图,选择在遥感影像和地形图上均可明显识别的地物点为地面控制点,对遥感影像和地形图进行配准,处理过程在ERDAS 9.1软件进行,将ASTER影像以地形图为参考坐标建立坐标系统,统一投影为UTM WGS84,建立坐标转换方程进行几何精纠正和坐标归一化处理。地形因素会导致太阳入射角和高度角的变化,产生阴影,影响冰川分类的精度。因此,引入数字高程模型对ASTER遥感影像进行地形校正,配准误差在一个像元内,有效地降低地形的影响,确保冰川信息提取的准确性。对校正后的影像进一步锐化增强,处理后的图像冰川运动的纹理更清晰,对区分雪斑与雪覆盖的冰川有一定指示意义。鉴于研究区涉及到

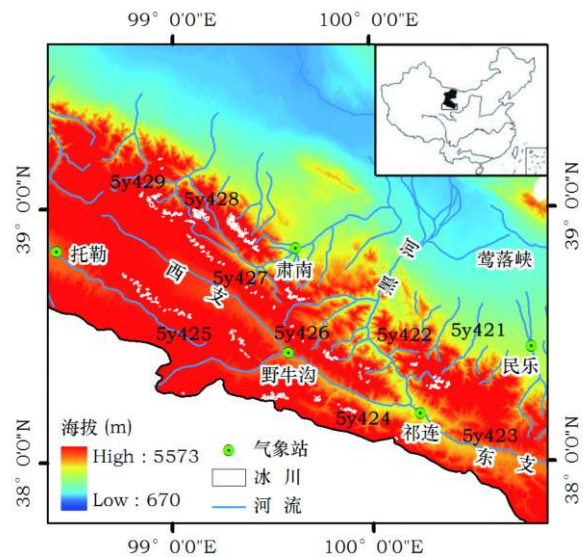


图1 研究区位置、气象站及冰川分布

Fig.1 Location of the study area, distribution of meteorological stations and glaciers

表1 研究区气象站的基本情况

Table 1 Meteorological stations used in this study

站名	经度	纬度	海拔高度(m)	资料长度(年)
民乐	100°49'E	38°27'N	2272	1960-2005
祁连	100°15'E	38°11'N	2789	1960-2005
肃南	99°37'E	38°50'N	2311	1960-2005
野牛沟	99°21'E	38°37'N	3180	1960-2005
托勒	98°25'E	38°48'N	3368	1960-2005

多景影像,直接拼接后的数据量太大,因此对拼接的影像进行裁接和掩膜处理,减少数据量,提高遥感影像冰川信息提取的处理速度。

为了提高遥感影像提取冰川信息的自动化程度,本研究分别采用了比值法和阈值法对遥感影像进行了解译尝试,但是效果不佳。因此,最终结合DEM,通过人工目视解译在地理信息系统软件ARCVIEW中确定了不同时期的冰川边界(图2),提取面积等形态参数,并通过两期数据空间叠加研究其变化特征。虽然这种方法解译费时耗力,但据GLIMS(Global Land Ice Measurements from Space)计划有关评估显示^[13],人工解译是目前提取冰川信息最为精确的方法。鉴于高质量影像数量有限,且部分冰川有积雪、云覆盖,因此仅对流域(共428条)内335条冰川作以重点研究。对于有表碛覆盖的冰川基于遥感自动提取的方法目前仍处于不断探索中^[14],鉴于这种特殊类型的冰川与非冰川边界

2011年3月

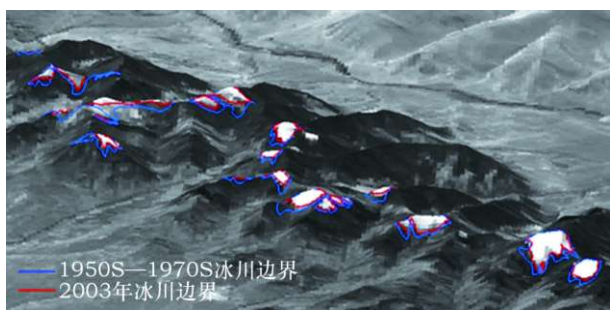


图2 1950s/1970s和2003年冰川边界矢量叠加示例

Fig.2 Example of the glacier outlines in 1950s/1970s and 2003

难以清晰识别,需要通过实地考察确定冰川末端位置变化,但由于该区冰川多属于“洁净型”冰川^[12],因此暂不考虑此方面影响。对于冰川和冰川湖相接触部分,解译过程中主要参照冰川编目数据、地形图、野外调查资料、DEM叠加、Google Earth,并请教专家知识,最终进行冰川末端的确定。通常,冰川末端变化采用冰川主流线长度之差值来表示,但这并不能呈现冰川末端变化的复杂形态,因此本文采用主轴平行线法(具体方法参见聂勇等人研究^[5])来反映复杂冰川末端的变化速率。冰川面积和长度提取的总体精度主要与几何配准技术与像元分辨率等有关^[15-17],据Hall^[15]、Silvreo^[16]、Ye^[17]等人计算冰川长度和面积变化不确定性的公式:

$$U_T = \sqrt{\sum \lambda^2} + \sqrt{\sum \varepsilon^2} \quad (1)$$

式中 U_T 为长度不确定性; λ 为影像分辨率; ε 为配准误差。

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

式中 U_A 为面积不确定性。

结果表明,冰川长度的不确定性为 ± 50.4 m,冰川面积的不确定性为 ± 0.005 km²。

4 结果

4.1 冰川变化

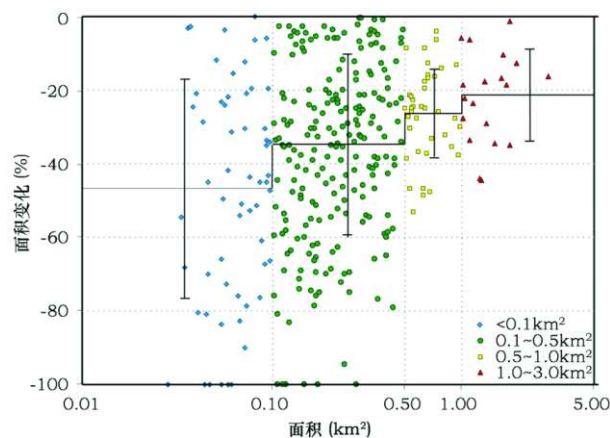
对比分析,过去50a来黑河流域冰川面积大幅缩小、末端急剧退缩。1950s/1970s到2003年,冰川面积已经从109.35km²缩小到76.94 km²,相当于29.6%的冰川面积已经消失殆尽,平均每条冰川缩小0.10km²。13条冰川已经完全消失,其中6条小于0.10km²,其余均介于0.10~0.50km²,且末端海拔相对较低,主要分布于黑河上游、马营河和柯柯里河。将所研究的冰川根据面积等级统计其变化情况,如图3所示。面积<0.10km²的冰川面积缩小比

率最大,达46.7%,平均面积缩小0.03km²。面积介于1.00~5.00km²的冰川缩小比率最小,仅为21.3%,平均面积缩小0.31km²。面积等级为0.10~0.50km²和0.50~1.00km²的冰川缩小比率介于其间(34.6%和26.2%),平均面积分别缩小了0.08km²和0.17km²。由此可见,小冰川通常具有较小的绝对变化量和较大的变化率,表明小冰川对气候变化的敏感性比大冰川强^[18],这是因为能量交换对于体积较小冰川的作用较之体积大的冰川相对强烈^[19]。冰川面积变化率的标准差也反映了相同的结论。标准差反映数据的离散程度,即说明冰川变化的不一致性(波动性),对外界条件变化的响应具有差异性^[20]。研究结果显示,面积等级为<0.10km², 0.10~0.50km², 0.50~1.00km², 1.00~5.00km²的冰川面积缩小比率的标准差依次为29.87、24.67、12.16、12.55,即小冰川的面积缩小比率的标准差较大。

冰川末端变化是冰川变化的重要指标之一,通过遥感解译的方法可以开展此方面研究。分析显示,过去50a,所统计的335条冰川末端平均后退258m,长度缩短比率为31.0%。其中,面积<0.10km²和0.50~1.00km²的冰川退缩最快,分别为36.6%和37.0%。面积介于0.10~0.50km²的冰川退缩相对较慢(30.2%),而面积介于1.00~5.00km²的冰川退缩比率为20.2%,幅度相对最小。

4.2 冰川变化的区域差异性

黑河流域不同支流冰川过去50a的变化显示(表2),黑河上游的冰川面积缩小幅度最大,夹道



注:横线:冰川平均面积变化;纵线:标准差

图3 1950年/1970年-2003年黑河流域不同面积等级冰川的面积变化

Fig.3 Relative changes in glacier area of different area classes from 1950s/1970s to 2003 in the Heihe River Basin

表2 黑河流域各支流 1950s/1970s 和 2003 年冰川分布及变化

Table 2 Distribution of the glaciers and their changes in the sub-basins of the Heihe River Basin for the periods of 1950s/1970s and 2003

支流名称	编码	1950s/1970s		2003 年		冰川变化				
		冰川条数	冰川面积 (km ²)	冰川条数	冰川面积 (km ²)	条数变化	面积变化 (km ²)	变化率 (%)	长度变化 (m)	变化率 (%)
大河	5y421	8	2.53	8	2.05	0	-0.48	-19.0	-88	-9.2
夹道沟-潘家河	5y422	13	3.67	13	3.32	0	-0.35	-9.6	-59	-7.8
八宝河	5y423	12	3.36	12	2.73	0	-0.63	-18.6	-72	-10.3
柯柯里河	5y424	51	19.19	50	12.31	-1	-6.88	-35.9	-273	-33.3
黑河上游	5y425	75	21.37	65	13.10	-10	-8.28	-38.7	-281	-40.0
长千河等	5y426	36	6.64	36	4.84	0	-1.80	-27.1	-172	-26.0
梨园河	5y427	61	17.02	61	12.81	0	-4.21	-24.8	-163	-23.1
摆浪河	5y428	30	16.41	30	12.24	0	-4.16	-25.4	-255	-20.2
马营河	5y429	49	19.15	47	13.53	-2	-5.62	-29.3	-518	-47.4
总计	5y42	335	109.35	322	76.94	-13	-32.41	-29.6	-258	-31.0

沟-潘家河相对最小,分别为 38.7%和 9.6%。柯柯里河、马营河、长千河等、摆浪河和梨园河的冰川面积分别缩小了 35.9%, 29.3%, 27.1%, 25.4% 和 24.8%。大河和八宝河的冰川面积缩小不到 20.0%; 与面积变化情况一致,马营河、黑河上游和柯柯里河冰川退缩幅度在整个流域亦相对较大,过去 50a 分别退缩了 47.4%, 40.0%和 33.3%。长千河等、梨园河和摆浪河冰川分别退缩了 26.0%, 23.1%和 20.2%,比率相对较小。八宝河、大河和夹道沟-潘家河冰川退缩比率最小,分别为 10.3%, 9.2%和 7.8%。综合分析冰川面积和长度变化,黑河干流以西的冰川消融强于干流以东。

黑河流域冰川变化显著的区域差异性,一方面是由气候差异决定,根据蓝永超等人的研究^[21],黑河山区汇流区西部(代表站为托勒站)的气温递升率约为 0.19 °C/10a,中部(代表站为祁连站)约为 0.11 °C/10a,而中西部的降水量主要受西风环流带来的大西洋水汽的影响,均呈增加的趋势,汇流区西部(野牛沟站)降水量的增幅最大,20 世纪 90 年代比 50 年代降水量增加近 40 mm,增幅为 10.3%; 汇流区中部(祁连站)1990 年代比 1950 年代降水量增加 13 mm,增幅为 3.5%。由此看出黑河干流以西冰川面积缩小比率较以东大主要是受气温快速上升影响,而丰富的降水对冰川萎缩起到缓冲的作用;另一方面,冰川规模也是一个重要影响因素,分析发现,黑河干流以西面积<0.10km²冰川的条数、面积所占比率均大于以东区域。

5 讨论

5.1 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,气温和降水与其关系最为紧密,而夏季气温和年降水是冰川变化的两个主要控制因素,夏季气温决定消融量,年降水影响积累率^[22]。选取黑河上游 5 个气象站(表 1)逐年逐日气温、降水资料,分别计算了各年份的气温、降水量的平均值和距平值,并利用一元回归分析法进行趋势分析(图 4)。线性趋势显示,夏季平均气温呈明显增高趋势,增幅为 0.27 °C/10a。夏季气温的升高明显会加剧冰川的消融。同时段年降水呈波动变化,平均增长率为 12.56 mm/10a。降水量的增加为冰川积累创造了良

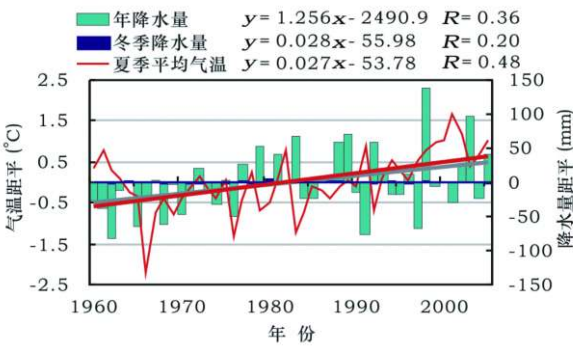


图4 1960 年-2005 年黑河上游 5 个气象站夏季平均气温(6 月-8 月)、年降水量及冬季降水量(12 月-次年 2 月)变化
Fig.4 Variation of mean temperature (June to August) in summer, annual and winter precipitation (November to March) for 1960~2005 in the five meteorological stations of the Heihe River Basin

2011年3月

好的条件,但对于以夏季为主要积累期的冰川,夏季气温显著升高会引起高海拔冰川区夏季液态降水的增加而不是固态降水的增加,使得冰川物质平衡收入减小,但是支出还在增加,而且冬季降水量趋势分析显示,冬季的积累(0.28 mm/10a,图4)甚少,不足以弥补物质平衡亏损,使得冰川加速消融,这与已有关于祁连山七一冰川的研究结果相一致^[23,24]。乌鲁木齐河源1号冰川也呈现同样的现象,该冰川物质平衡量在1985年前与降水呈正相关,但在1985年后年降水和夏季降水都明显增加而物质亏损^[22],因此除了夏季冰川消融增强之外,很可能是夏季气温的升高引起冰川区夏季液态降水的增加,使得物质输入量减少,但气温升高引起的物质输出量增加,由此造成冰川物质的亏损。此外,冰川温度的升高和冰川表面反照率的降低与冰川消融也有直接关系。根据Shumskii的研究^[25],冰川温度的高低指示着冰川冷储的多少,决定了冰川对气温变化的敏感性。在冰川表面热量平衡中,冰川表面接受热量的一半以上来自净辐射,其余来自感热等,而净辐射的大小很大程度上取决于冰川表面反射率大小^[26]。

5.2 冰川稳定性变化

冰川是具有复杂空间结构的集合体,仅从单一指数描述具有一定的局限性,因此,考虑引入分形的概念,以期通过确定分形维数进而分析冰川稳定性的变化,更加全面的了解冰川的变化特征。分形(Fractal)是指通常局部和整体具有几何的或统计上的自相似性,且有无限嵌套精细结构的几何,该理论已广泛应用在土地利用、生物学等诸多方面^[27]。在分形理论诞生之前,欧式几何常用来描述直线、平滑的曲线、平面及边界整齐的平滑曲面,但对不规则的形状体却无能为力。分形则使得计算机上可以从少量数据出发,对复杂的自然景观进行逼真的模拟,提供了一种描述自然形态的几何方法。

基于黑河流域1950s/1970s和2003年冰川信息,利用分形理论对不同面积等级的冰川建立了面积-周长的关系,并通过线形回归分析确定分形维数和稳定性指数^[27](表3),具体方法如下:

$$\ln A = (2/D) \ln P + C \quad (3)$$

式中 A 为冰川面积; P 为冰川周长; D 为分形维数; C 为待定常数。 D 值越大,表示空间结构越复杂。当 $D=1.5$ 时,表示处于一种类似于布朗运动的随机运动状态,即空间结构最不稳定。 D 值越接近1.5,表示空间结构越不稳定。反映冰川对外界环境变化响应强弱的空间结构稳定性指数 SK 可以通过以下公式计算:

$$SK = |1.5 - D| \quad (4)$$

两期数据分析结果显示,面积等级为0.50~1.00km²的冰川分形维数最高,即冰川的空间结构最为复杂,其它三个面积等级的冰川分形维数相差不大,均相对较低。面积<0.10km²的冰川稳定性指数变化最大,1.00~5.00km²的冰川稳定性指数变化较小,一定程度上反映了小冰川对外界环境变化的响应要强于大冰川,这与上述研究结论相一致;0.50~1.00km²的冰川稳定性指数变化也相对较大,很大程度上与该面积等级的冰川空间结构复杂程度较高(分形维数)有直接关系;0.10~0.50km²的冰川稳定性指数有所增加,空间形态有向稳定状态转化的趋势。

当外界气候发生变化时,冰川空间结构的不同将决定其消融的强弱。为了进一步探讨冰川各形态因子对消融强度的影响,采用灰色关联分析方法寻求影响该区冰川消融的主导因子。灰色关联度是研究事物之间、因素之间关联性的一种方法,它是根据事物或因素的时间序列曲线的相似程度来判断其关联程度的,若两条曲线的形状彼此相似,则关联度大,反之则关联度小。该理论是我国学者邓聚龙1982年创立的,继问世以来,已成功地应用

表3 黑河流域不同面积等级冰川稳定性变化

Table 3 Changes of stability indexes of glaciers with different sizes in the Heihe River Basin

面积等级 (km ²)	1950s/1970s		2003年		指数变化
	分形维数	稳定性指数	分形维数	稳定性指数	
<0.10	1.9761	0.4761	1.3342	0.1658	0.3103
0.10~0.50	1.6193	0.1193	1.3569	0.1431	-0.0238
0.50~1.00	3.5280	2.0280	3.3568	1.8568	0.1711
1.00~5.00	1.5798	0.0798	1.4632	0.0368	0.0429

于社会、农业、工程控制、经济管理等150多个行业和部门,对一个系统发展变化态势提供了量化的度量,非常适合动态的历程分析^[28]。具体方法如下,

设 $X_0=\{X_0(t) \mid t=1,2,\cdots,n\}$ 为参考序列, $x_i=\{X_i(t) \mid t=1,2,\cdots,n\}$, ($i=1,2,\cdots,m$) 为被比较的序列,则关联系数为:

$$\zeta = \left[\min_i \min_t |X_0(t) - X_i(t)| + \rho \max_i \max_t |X_0(t) - X_i(t)| \right] / \left[|X_0(t) - X_i(t)| + \rho \max_i \max_t |X_0(t) - X_i(t)| \right] \quad (5)$$

式中 $\rho \in (0, 1)$ 为分辨系数,一般取0.5。

整条曲线 X_i 与参考曲线 X_0 的关联度 r_i 为:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \zeta \quad (i=1,2,\cdots,m) \quad (6)$$

将求得的 m 个关联度 r_i ($i=1,2,\cdots,m$) 按大小排列得到关联序列,居前者对 X_0 的影响 (或紧密程度) 较后者要大。

在分析过程中,将分形维数作为母序列 X_0 ,参考已有冰川变化研究^[2,29,30],选取冰川面积、长度、平

均末端海拔、平均最高海拔、海拔跨度、坡度为主要分析因子 (表4),另外,还考虑将冰川积累区大小、积累面积比率 (AAR)、物质平衡线等因子包括在内,但由于消融区和积累区无法从遥感数据中准确识别,因此本研究暂不作此方面分析。

分析结果显示,影响黑河流域冰川消融的三个主要形态因子分别为:海拔跨度;冰川面积;冰川长度。Chueca 等人^[31]研究也发现冰川对气候变化的响应主要决定于冰川的规模、所处位置和气候条件,气温较高区域的小冰川消融速度要比高海拔区的大冰川快。由于黑河流域冰川海拔跨度范围相对较小,随着气候变暖,平衡线将不断攀升,绝大部分冰川将会处于消融区,据此估计,未来黑河流域冰川将经历更为强烈的消融。此外,表碛覆盖对冰川消融也产生一定影响,但黑河流域冰川多属于“洁净型”冰川,在此不作考虑。

5.3 与我国西部其它区域冰川变化对比

为了进一步研究黑河流域冰川的变化特征,将其与我国西部其它地区作以比较^[2, 3, 6, 32-37] (表5),分析发现,黑河流域冰川面积的减小比率较中国西部其它区域明显要大。笔者认为,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,还受到其它诸多因素的影响,该区大多数冰川面积都小于 1km^2 ,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^[18,19]。此外,祁连山东、中、西段的冰川变化存在显著区域差异性。中段与东段冰川变化幅度相差不大,远大于西段。虽然有关祁连山西段冰川变化研究的时段仅为1956年-1990年,近年来随着气温的迅速升

表4 冰川消融与形态影响因子的灰色关联分析
Table 4 Grey correlation analysis of glacier ablation and morphological factors

基本特性	形态因子	灰色关联度
冰川消融	面积	0.686
	长度	0.645
	平均末端海拔	0.597
	平均最高海拔	0.521
	海拔跨度	0.721
	坡度	0.580

表5 中国西部冰川近几十年变化比较
Table 5 Comparison of glacier changes in western China in recent decades

研究区	时期	冰川条数	面积变化 (km^2)	变化率 (%)	资料来源
祁连山东段(冷龙岭)	1960s/1970s-2002	244	-29.85	-28.97	赵力强 ^[32]
祁连山中段(黑河流域)	1950s/1970s-2003	335	-32.41	-29.60	本研究
祁连山中段(黑河野牛沟流域)	1956-2003	165	-16.22	-25.71	阳勇等 ^[33]
祁连山西段(疏勒河、党河、北大河、哈拉湖)	1956-1990	1731	-151.90	-10.30	刘时银等 ^[3]
新疆地区	1960s/1970s-2002/2006	1800	-437.40	-11.70	李忠勤等 ^[2]
西昆仑	1970-2001	278	-10.00	-0.40	Shangguan et al. ^[34]
中天山	1963-2000	70	-7.00	-13.00	Li et al. ^[35]
塔里木河流域	1960s/1970s-1999/2001	7665	-574.09	-3.30	Shangguan et al. ^[36]
西藏朋曲流域	1980-2001	797	-131.24	-8.89	晋锐等 ^[37]
青藏高原各拉丹冬	1969-2000	-	-14.91	-1.70	鲁安新等 ^[6]

2011年3月

高,冰川变化速率可能有所改变,但是作为定性分析仍具有一定可比性。蒲健辰等人^[38]研究发现,祁连山中段黑河上游“七一”冰川物质平衡从20世纪70年代的正平衡到80年代的接近零平衡到现状年的较大负平衡,进一步说明近年来祁连山冰川基本上都处于不断退缩中。

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,对全球气候变暖响应比较明显^[39]。在这样的气候背景下,祁连山区冰川均呈现面积大幅度缩小的变化趋势,但由于区域间气候差异,其变化特征又不尽相同。贾文雄等人^[39]选用祁连山区8个气象站从建站到2005年逐年逐月的气温和降水量资料,对祁连山区气候变化的区域差异特征作了分析,结果表明:东、中、西部年均气温和夏季气温均呈显著上升趋势,年均气温的年际变化倾向率分别为 $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,主要影响冰川变化的夏季气温年际变化倾向率分别为 $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,中、东部的年均气温和夏季气温增长幅度均强于西部,且中部尤为明显。祁连山区年降水量的年际变化呈波状起伏,20世纪60年代降水量最少,之后逐渐增多,80年代达到最多,90年代又减少,2000年以来又增多。东、中、西部年降水量的年际变化倾向率分别为 $10.0\text{ mm}/10\text{a}$ 、 $12.6\text{ mm}/10\text{a}$ 、 $12.2\text{ mm}/10\text{a}$ 。通过对祁连山东、中、西部气候条件的对比发现,在降水量呈波状变化的情况下,气温的变化直接影响冰川的消融强度,中部升温幅度较大是造成该区冰川消融强度较大的一个主要原因,如果升温趋势持续,位于祁连山中段的黑河流域雪线会不断升高,冰川消融将加剧。

冰川规模对冰川消融强度也有直接影响。相关研究显示^[3,32,33],2002年祁连山东段冷龙岭冰川平均面积 0.41 km^2 ,2003年祁连山中段野牛沟冰川平均面积 0.24 km^2 ,1990年祁连山西段冰川平均面积 0.62 km^2 。本研究结果显示,2003年黑河流域冰川平均面积为 0.25 km^2 ,小于 1.00 km^2 的冰川条数和面积分别占整个流域冰川的97.2%和82.5%。相比之下,黑河流域冰川规模较小,这也是造成该区冰川消融相对强烈的另一个重要原因,冰川越小,对气候变化响应越敏感。此外,黑河流域冰川强烈消融特性还受冰川局地环境、形态特征、末端海拔等影

响^[29,30],是多种因素共同作用的结果。

6 结论

(1) 对比分析显示,1950s/1970s–2003年,黑河流域冰川面积已从 109.35 km^2 缩小到 76.94 km^2 ,共缩小 32.41 km^2 ,相当于29.6%的冰川面积已经消失殆尽,且有13条冰川完全消失。冰川末端平均后退258 m,退缩比率达31.0%。西南和东南朝向冰川的面积缩小幅度较大。综合分析表明,冰川变化存在显著的区域差异性,黑河干流以西的冰川面积缩小以及末端退缩幅度均强于干流以东。

(2) 冰川稳定性变化分析结果显示,面积 $<0.10\text{ km}^2$ 的冰川稳定性指数变化较其它面积等级的冰川要大,进一步证实小冰川对气候变化的敏感性比大冰川大。采用灰色关联分析方法分析表明,影响黑河流域冰川消融的三个主导因子为海拔跨度;冰川面积;冰川长度。

(3) 与中国西部其它地区冰川变化进行了比较。结果表明,黑河流域冰川面积减小幅度较中国西部其它流域明显要大,且祁连山东、中、西段冰川变化存在显著差异性,主要与区域气候差异、冰川规模等因素有直接关系。

参考文献 (References):

- [1] 施雅风,黄茂桓,姚檀栋,等.中国冰川与环境—现在、过去和未来[M].北京:科学出版社,2000.
- [2] 李忠勤,李开明,王林.新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究[J].第四纪研究,2010,30(1):96–106.
- [3] 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[J].冰川冻土,2002,24(3):227–233.
- [4] 李宗省,何元庆,王世金,等.1900–2007年横断山区部分海洋型冰川变化[J].地理学报,2009,64(11):1319–1330.
- [5] 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.
- [6] 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] 叶佰生,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.
- [8] 程国栋.黑河流域可持续发展的生态经济学研究[J].冰川冻土,2002,24(4):335–343.
- [9] 张凯,王润元,韩海涛,等.黑河流域气候变化的水文水资源效应[J].资源科学,2007,29(1):77–83.
- [10] 柳景峰,张勃.河西内流干旱区气候变化与径流的时空耦合分析[J].资源科学,2008,30(7):1105–1114.
- [11] 杨明金,张勃,王海青,等.黑河流域1950年–2004年出山径流变

- 化规律分析[J].资源科学,2009,31(3):413-419.
- [12] 王宗太,刘潮海,尤根祥,等.中国冰川目录 I (祁连山区)[M].甘肃:中国科学院兰州冰川冻土研究所,1981.
- [13] Raup B, Racoviteanu A, Jodha S, et al. The GLIMS geospatial glacier database: A new tool for studying glacier change[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 56(1-2):101-110.
- [14] 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.
- [15] Hall D K, Bayr K, Schfer W, et al. Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from ground and space (1893 - 2001) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86:566-577.
- [16] Silverio W, Jaquet J M. Glacial cover mapping (1987-1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(3):342-350.
- [17] 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[J]. *Journal of Glaciology*, 2006, 52(179):537-545.
- [18] Jóhannesson T, Raymond C, Waddington E. Time-scale for adjustment of glaciers to changes in mass balance[J]. *Journal of Glaciology*, 1989, 35:355-369.
- [19] Granshaw F. Glacier change in the north cascades national park complex, Washington USA, 1958-1998[D]. Portland, Oregon: Portland State University, 2002.
- [20] 许君利,刘时银,张世强,等.塔里木盆地南缘喀拉米兰河-克里雅河流内流区近 30a 来的冰川变化研究[J].冰川冻土,2006,28(3):312-318.
- [21] 蓝永超,丁永建,康尔泗.近 50 年来黑河山区汇流区温度及降水变化趋势[J].高原气象,2004,23(5):723-727.
- [22] 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[J].冰川冻土,2003,25(2):117-123.
- [23] 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[J].冰川冻土,1996,18(S1):12-22.
- [24] Sakai A, Fujita K, Duan K, et al. Five decades of shrinkage of the July 1st Glacier, Qilian Mountains, China[J]. *Journal of Glaciology*, 2006, 52(176):11-16.
- [25] Shumskii P A. Principles of structural glaciology (translated from the Russian by David Kraus) [M]. New York: Dover publications, 1964.
- [26] Takeuchi N, Li Z Q. Characteristics of surface dust on Urumqi Glacier No.1 in the Tien Shan Mountains, China[J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2008, 40(4):744-750.
- [27] 谢和平,薛秀谦.分形应用中的数学基础与方法[M].北京:科学出版社,1997.
- [28] 刘思峰,郭天榜,党耀国,等.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社,1999.
- [29] Evans I S, Cox N J. Climatogenic north-south asymmetry of local glaciers in Spitsbergen and other parts of the Arctic[J]. *Annals of Glaciology*, 2010, 51(55):16-22.
- [30] Hodgkins R, FOX A, Nuttall A M. Geometry change between 1990 and 2003 at Finsterwalderbreen, a Svalbard surge-type glacier, from GPS profiling[J]. *Annals of Glaciology*, 2007, 46:131-135.
- [31] Chueca J A, Julián M A, Saz J C, et al. Responses to climatic changes since the Little Ice Age on Maladeta Glacier (Central Pyrenees)[J]. *Geomorphology*, 2005, 68(3-4):167-182.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] Shanguan D H, Liu S Y, Ding Y J, et al. Glacier changes in the west Kunlun Shan from 1970 to 2001 derived from Landsat TM/ETM+ and Chinese glacier inventory data[J]. *Annals of Glaciology*, 2007, 46:204-208.
- [35] Li B L, Zhu A X, Zhang Y C, et al. Glacier change over the past 4 decades in the middle Chinese Tien Shan[J]. *Journal of Glaciology*, 2006, 52:425-432.
- [36] Shanguan D H, Liu S Y, Ding Y J, et al. Glacier changes during the last forty years in the Tarim Interior River basin, northwest China[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(6):727-732.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.

Glacier Changes in the Heihe River Basin over the Past 50 Years in the Context of Climate Change

WANG Puyu^{1,3}, LI Zhongqin^{1,2}, GAO Wenyu², YAN Donghai²,
BAI Jinzhong², LI Kaiming^{1,3}, WANG Lin^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences/Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Region Environment
and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Heihe River basin, located in the middle part of the Qilian Mountains, is the second largest inland river basin across the arid area of northwestern China, east to the headwaters of Xidahe of the Shiyang River, west bounded by the Heishan and Shulehe, and the upper reaches almost across the Hexi Corridor. Glaciers, acting as a huge alpine reservoir that regulates annual runoff, are considered a reliable water source for oasis, benefiting the sustainable development of the environment, industry, and agriculture in this region. During the past decades, glaciers in the Heihe River basin have been experienced rapid shrinking due primarily to climate change. Impacts of the glaciers shrinkage on water resources have drawn much attention. Using the image interpretation method provided by World Glacier Monitoring Service (WGMS), historical data were retrieved for comparison with remote sensing images in order to reveal changes in glaciers in the Heihe River basin during the past 50 years. To compare recent changes in the glacier areas, 5 scenes of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images with spatial resolution of 15 m for visible and near-infrared bands acquired from June to September in 2003 and 24 topographic maps (1:50 000) derived from aerial photographs acquired during 1956-1978 (18 in 1956, 1 in 1957, 3 in 1966, and 2 in 1978) by the Chinese military geodetic service were jointly used and comprehensively analyzed. It is found that from the 1950s/1970s to 2003, the total area of the investigated glaciers (335) was reduced by 29.6%, with a mean reduction of 0.10 km² for the individual glacier. The glaciers retreated by 258 m at a rate of 31.0%. The glacier changes exhibited obvious spatial differences, indicating that the reduction rate of glaciers to the west of the mainstream of the Heihe was larger than the east. In addition, rapidly rising air temperature is likely the major factor causing the shrinkage of the glaciers in the Heihe River basin. Compared with other glaciers in western China, glaciers in the Heihe River basin appeared to be decreasing more rapidly. Moreover, the glacier changes showed remarkable differences in the eastern, middle and western Qilian Mountains mainly due to climatic conditions and glacier sizes.

Key words: Remote sensing; Glacier change; Regional differences; Heihe River basin; Middle Qilian Mountains