

近50 a 祁连山西段大雪山和党河南山的冰川变化

于国斌¹, 李忠勤^{1,2}, 王璞玉²

(1 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070;

2 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, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 以祁连山西段大雪山和党河南山冰川为例, 利用1957/1966航摄地形图、1994年Landsat TM遥感影像、2000年ASTER影像、2010年的SPOT5影像及数字高程模型, 运用RS和GIS对祁连山西段大雪山和党河南山冰川变化进行研究。结果表明: 1957/1966–2010年研究区冰川面积缩小了17.21%, 冰储量减小了24.1%。其中, 1957–2010年间大雪山冰川面积缩小了16.03%(0.30%/a), 平均每条冰川缩小0.133 km², 末端平均退缩181 m(3.4 m/a), 冰储量减小了22.4%; 1966–2010年间党河南山冰川面积缩小了18.32%(0.42%/a), 平均每条冰川缩小0.111 km², 末端平均退缩159 m(3.6 m/a), 冰储量减小了25.7%。大雪山南北坡冰川面积分别减小了22.82%和15.51%, 党河南山南北坡冰川面积分别减小了22.39%和16.76%, 总体来看, 南坡冰川退缩幅度强于北坡。分析认为, 气温上升是研究区冰川退缩的主导因素。与祁连山东、中部冰川变化相比, 研究区冰川面积缩小幅度相对较小, 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; 冰川变化; 区域差异性; 分形; 祁连山西段

中图分类号: P931.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6060(2014)02-0299-11(299~309)

气候变化对中低纬山岳冰川具有极强的影响, 同时冰川时空变化和冰川融水径流的波动被认为是气候变化的指示器^[1]。20世纪50年代以来, 随着全球气候变暖, 全球冰川在波动中呈稳定、持续后退的总趋势^[2]。众多研究^[3-8]表明, 冰川退缩在我国西北大部分地区普遍存在, 甚至在有些区域出现了冰川消失的现象。冰川呈现强烈消融趋势, 已成为国内外关注的热点之一。冰川除了可以揭示气候变化外, 还是一种重要的淡水资源, 在中国西部内陆河流域, 冰川的水资源效应尤显突出, 冰川融水补给对内陆干旱流域经济社会发展具有重要作用^[9-16]。因此, 开展冰川监测是全球变化和区域环境研究中不可缺少的内容之一。

20世纪50~70年代, 中国科学院在对祁连山区部分冰川进行野外考察的基础上, 以1956年航片为主要数据来源, 在1981年完成了《中国冰川目录

I—祁连山区》, 较为完整的获得了祁连山区各流域冰川的基本数量, 为甘肃省河西地区水资源的合理利用和区域环境变化研究等提供了最基础的资料 and 科学依据^[17-19]。90年代后, 遥感技术的快速发展对缺乏观测资料的区域进行长时间跨度、大尺度、可靠快速的冰川变化研究带来了便捷, 虽然对祁连山区冰川变化遥感研究较多^[2, 20-23], 但对于该山区西段冰川变化特征, 尤其是近年来的变化研究相对较少。刘时银等^[22]以遥感与地理信息系统(GIS)相结合的方法, 开展过祁连山西段冰川变化研究, 但由于高质量影像数量有限, 时间序列仅到1990年, 且1990年的冰川分布规模仅限于祁连山西段的大雪山。近年来随着气温的升高, 特别是自1990年以来升温幅度明显加速, 分布在该区的冰川表现出了强烈消融的现象。然而, 冰川的强烈消融在地域空间上呈现出了一定的差异性。揭示这种差异性

收稿日期: 2013-08-15; 修订日期: 2013-10-04

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2013CBA01801); 国家基金创新群体项目(41121001)

作者简介: 于国斌(1984-), 男, 甘肃武威人, 地图学与地理信息系统专业硕士研究生, 主要从事冰川变化研究。Email: gsyugb@foxmail.com

通讯作者: 李忠勤, 研究员, 博导, 主要从事冰川与环境方面的研究。Email: lizq@lzb.ac.cn

并分析造成这种差异的背景因素无疑具有很大的科学价值,对于区域冰川环境保护、水资源管理也具有一定的实际意义。鉴于此,本文主要以祁连山西段党河南山和大雪山区现代冰川为研究对象,选取3期遥感影像及冰川编目数据,结合RS和GIS技术,在前人研究方法的基础上^[24-26],研究该区域冰川过去50 a间的变化特征,以期干旱区冰川水资源评估,提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于祁连山西段,地理位置为 $95^{\circ}00' \sim 96^{\circ}30' \text{E}$; $38^{\circ}50' \sim 39^{\circ}30' \text{N}$ (图1),山峰海拔多在4 000~5 500 m,是祁连山西段主要河流疏勒河、党河、哈尔腾河等内陆水系水资源的形成区。研究区内山脉大致呈东南-西北走向,从南到北分别为党河南山和大雪山。该区主要受西风气流的影响,并且处于西风最东部,年降水量在150~400 mm之间,而祁连山区气温的分布呈东部较高,西部最冷的格局,所以该区冰川多以较大的冷储来维持冰川的存在。据1981年完成的《中国冰川目录 I—祁连山

区》统计表明,大雪山发育现代冰川203条,冰川面积162.833 km²,冰川流域编号分别为:5Y 447(A、H、I、J),5Y 448(A~D),5Y 449(A、E),5Y 452(F、G、H);党河南山发育现代冰川336条,冰川面积186.263 km²,冰川流域编号分别为:5Y 456G,5Y 457(A~G、I、K、L),5Y 458(A~J)。最大冰川位于老虎沟流域,编目为5Y 448D0012,全长10.8 km,面积约为21.9 km²,冰储量2.629 2 km³,上限海拔5 483 m,冰舌末端海拔4 250 m。

2 数据与方法

研究采用的数据有:地形图、遥感影像、数字高程模型(DEM)、气象数据。数据共涉及1:50 000航摄地形图19张(大雪山地区采用5幅1957年航摄地形图、党河南山地区采用14幅1966年航摄地形图);3期遥感影像,分别为30 m精度的Landsat TM(8/1994)、15 m精度的ASTER(7/2000)和5 m精度的SPOT5(8/2010)遥感影像资料;DEM数据比例尺1:50 000,格网尺度25 m。其中,Landsat TM数据来自USGS数据共享平台、ASTER、SPOT5、DEM数

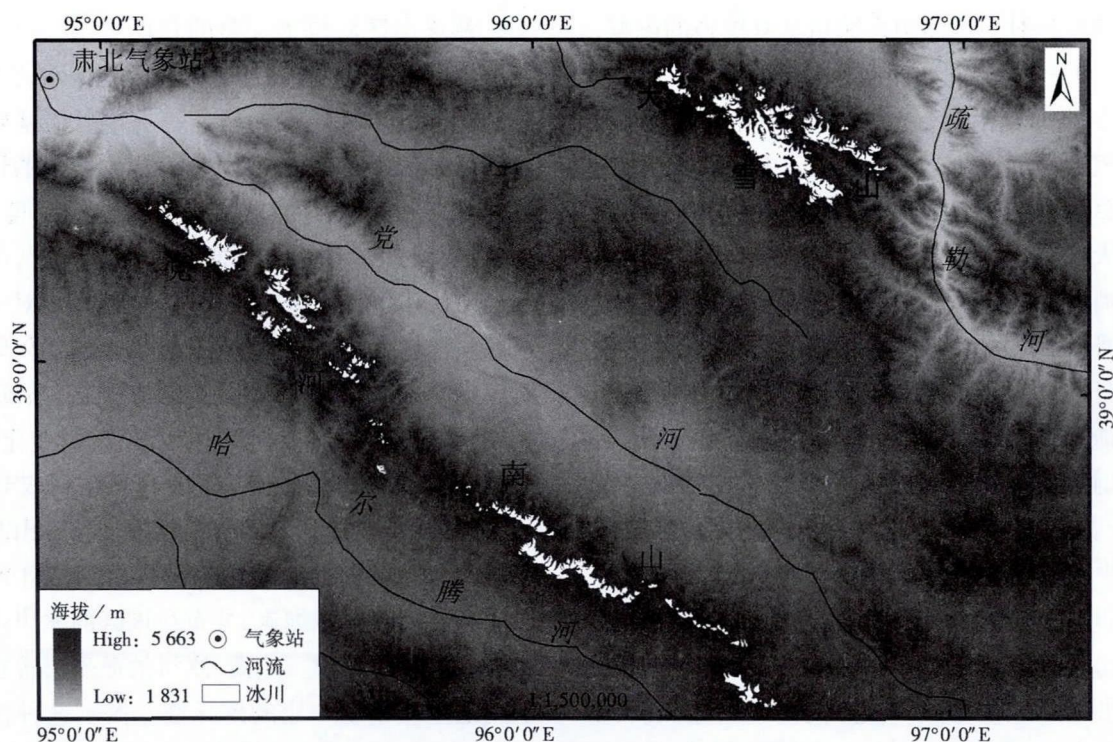


图1 研究区位置和冰川分布

注:图1依据DEM数据和1957/1966年地形图冰川数据制成

Fig.1 Location of the study area and distribution of glaciers

据均来源于甘肃省基础地理信息中心。

数据处理包括地形图和遥感影像处理两部分。首先对扫描后的地形图进行几何纠正,并控制几何纠正的均方根误差在一个像元之内,纠正后的地形图拼接作为地理底图。之后,依据《冰川编目规范》阐述的遥感影像处理流程对3期遥感影像进行处理。在ERDAS平台下,对遥感影像进行几何与辐射方面的校正后,选择在地形图和遥感影像上均可明显识别的特征地物点作为控制点,对遥感影像和地形图进行配准,并统一投影为UTM WGS84;同时,依据DEM对影像进行地形校正,以降低地形因素对冰川分类结果的影响,确保冰川信息提取的准确性;对校正好的影像进行锐化增强处理以增强冰川边界信息。

冰川信息提取过程中,1957/1966年的冰川范围由地形图直接数字化获得,1994、2000、2010年的冰川信息主要是结合DEM,在ArcGIS软件下通过人工目视解译的方法确定并提取相关冰川信息参数。虽然人工目视解译费时、费力,但据相关评估显示^[27],人工目视解译仍是现阶段提取冰川信息的最佳方法。鉴于部分冰川有积雪、云覆盖,因此只选取477条冰川作对比研究。解译过程中,对有表碛覆盖的冰川采取DEM叠加影像的方法提取冰川边界,同时参考地形图、冰川编目数据、Google Earth、专家知识,确保冰川信息提取的准确。最后,利用ArcGIS空间分析功能分别计算4期冰川相关数据并参考《中国冰川目录 I—祁连山区》获取4期冰川编目的各种属性信息,对比4期数据,分析冰川变化规律。

误差评价考虑了影响数据精度的多种因素。对于影像分辨率、影像几何配准技术等引起的误差,可以利用遥感影像不确定性评价公式对其误差进行评估。根据前人研究^[28-29],对于多幅影像而言,冰川长度和面积变化的不确定性可以用公式(1)(2)来表示:

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

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

式中: U_L 为长度不确定性; U_A 为面积不确定性; λ 为影像的空间分辨率; ε 为配准误差。通过公式

(1)、(2)计算出冰川末端位置在TM、ASTER、SPOT5影像中的不确定性分别为 ± 45.3 m、 ± 32.1 m、 ± 14.5 m,面积不确定性分别为 ± 0.004 km²、 ± 0.001 km²、 ± 0.0008 km²。对于遥感影像质量产生的误差,如积雪、表碛覆盖等对冰川边界提取带来的误差,可以通过定位观测或考察冰川对提取的数据进行验证和调整。通过综合误差分析和野外验证,估算冰川面积的误差约为 $\pm 1.5\%$ 。

3 研究结果

3.1 研究区总体冰川变化

根据上述方法,对地形图与遥感影像资料进行分析整理,得到研究区冰川面积的变化如表1所示。1957/1966、1994、2000和2010年研究区冰川面积分别为332.48 km²、309.16 km²、292.67 km²和275.27 km²。1957/1966到2010年研究区冰川面积共减少57.20 km²,占1957/1966年冰川面积的17.20%,平均每年缩小0.35%。但是在不同时间段,研究区内冰川面积的退缩比率是不同的,从1957/1966–1994年冰川面积减少23.32 km²,平均每年退缩0.22%;1994–2000年冰川面积减少16.49 km²,平均每年退缩0.89%;2000–2010年冰川面积减少了17.40 km²,平均每年退缩0.59%。结果显示,过去50 a来研究区内冰川面积大幅缩小,退缩速度较快,且1994–2010年时段退缩速度明显快于1957/1966–1994年时段。1957/1966–2010年研究区共有18条冰川消失,消失冰川总面积5.49 km²,占1957/1966冰川面积的1.7%。同时冰川由于强烈消融导致面积大幅减小,并伴随储量的显著变化。冰川面积(S)和储量(V)之间有如下关系^[30-31]:

$$(1 + P_V) = (1 + P_S)^\lambda \quad (3)$$

式中: P_V 为储量变化率, P_S 为面积变化率, λ 取1.36时为冰川,1.25时为冰帽。由此计算出冰川储量的变化率 P_V :

$$P_V = (1 + P_S)^\lambda - 1 \quad (4)$$

将研究区冰川按从南到北划分为党河南山和大雪山进行对比,以分析不同位置冰川变化的差异。南部党河南山地区在1966–2010年间冰川面积

表1 1957/1966–2010年研究区冰川变化数据

Tab.1 Changes of glaciers in the study area from 1957/1966 to 2010

统计年份	研究区				大雪山				党河南山			
	面积 /km ²	面积退 缩/%	年速率 /%·a ⁻¹	储量变 化率/%	面积 /km ²	面积退 缩/%	年速率 /%·a ⁻¹	储量变 化率/%	面积 /km ²	面积退 缩/%	年速率 /%·a ⁻¹	储量变 化率/%
1957/1966	332.48				162.19				170.29			
1957/1966–1994	309.16	7.01	0.22	9.7	152.16	6.18	0.17	8.5	156.99	7.80	0.28	10.7
1994–2000	292.67	5.33	0.89	7.3	144.25	5.20	0.87	7.1	148.41	5.47	0.91	7.5
2000–2010	275.27	5.94	0.59	8.2	136.18	5.59	0.56	7.7	139.09	6.28	0.63	8.6
1957/1966–2010		17.20	0.35	24.1		16.03	0.30	22.4		18.32	0.42	25.7

缩小了18.32%,年退缩比率0.42%,储量减少25.7%;北部大雪山地区在1957–2010年间冰川面积缩小了16.03%,年退缩比率0.30%,储量减少22.4%。对比发现,南部党河南山冰川面积和储量变化均大于北部大雪山。

3.2 大雪山冰川变化

(1) 冰川变化。大雪山共分布冰川203条,面积162.833 km²,平均面积0.802 km²。本研究中选择在遥感影像上可清晰识别的196条作重点研究(1957年地形图数据),面积162.19 km²,平均面积0.827 km²。

从表1可以看出大雪山冰川在过去的53 a间整体呈退缩趋势,面积退缩了16.03%,年均退缩速率为0.30%,减少面积为26.01 km²,平均每条冰川缩小0.13 km²,但各时段年均退缩速率不同,大体经历了“慢—快—慢”的变化过程,1957–1994年为0.17%/a,1994–2000年为0.87%/a,2000–2010年为0.56%/a。同时从图2(a)可以看出,约占冰川条数(17%)、面积(14%)的<0.10 km²的冰川面积减少了1.35 km²(57.2%),而占冰川条数(19%)、面积(43%)的1.00~

5 km²的冰川面积减少了9.19 km²(13.21%),表明小冰川具有较大的变化率和较小的绝对变化量,冰川规模越小,对气候变化的敏感性越强。

(2) 南北坡差异。大雪山区冰川规模总体较小,冰川萎缩趋势明显。南坡冰川退缩速率较北坡快,1957–2010年的53 a间南坡34条冰川面积减少了22.82%,北坡162条冰川面积减少了15.51%。造成南北坡差异的原因一方面是南坡受太阳辐射时间长,具有冰川强烈消融的外部驱动因素;另一方面南北坡不同等级的冰川分布结构也影响了冰川退缩的水平(图2(b)),南坡<1.00 km²的冰川条数占了94%、面积占了60%,北坡<1.00 km²的冰川条数占76%、面积占22.4%。显然,南坡<1.00 km²的冰川数量和面积比例大于北坡的分布特征造成南北坡冰川退缩的差异。

(3) 描述冰川变化的另一重要指标是冰川长度变化。统计显示,1957年大雪山冰川平均长度1 190 m,2010年冰川平均长度1 009 m,1957–2010年所统计的196条冰川末端平均后退了181 m,年均退缩量3.4 m/a,所统计的196条冰川中<1 km的

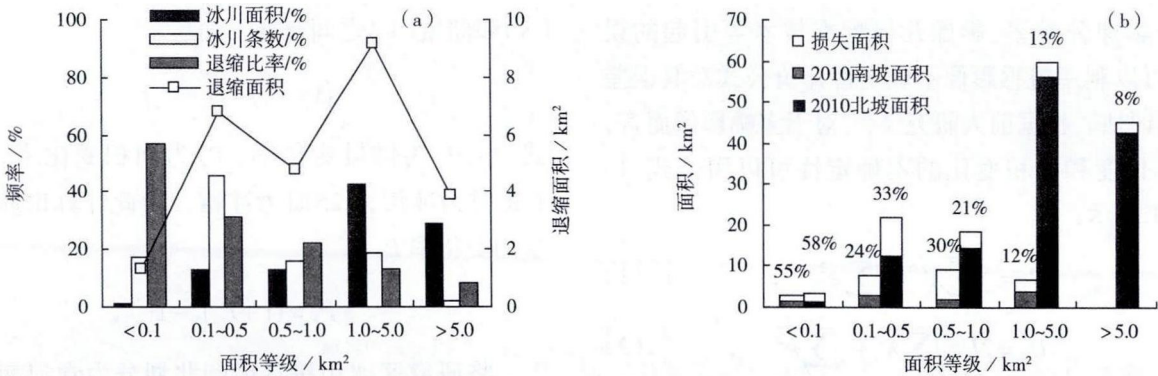


图2 1957–2010年大雪山地区不同面积等级冰川变化

Fig.2 Relative changes of glaciers with different area classes from1957to 2010 in the Daxue Mountain

有113条,长度平均缩短了183 m,长度缩短比率为32%,1.0~2.0 km的有58条,长度平均缩短了169 m,长度缩短比率为12%,>2 km的有23条,长度平均缩短了205 m,长度缩短比率为7%。在1957~2010年南坡冰川末端平均后退了201 m,年平均退缩量3.8 m/a,北坡冰川末端平均后退了177 m,年平均退缩量3.3 m/a。

3.3 党河南山冰川变化

(1) 冰川变化。党河南山山区遥感影像覆盖冰川281条(1966年地形图数据),总面积170.29 km²,冰川平均面积0.606 km²。这些冰川在1966~1994年间面积减少了7.80%,年均减小率为0.28%;1994~2000年间面积减少了5.47%,年均减小率为0.91%;2000~2010年间面积减少了6.28%,年均减小率为0.63%;44 a间面积减少了18.32%,年均减小率为0.42%(表1)。

将党河南山冰川根据面积分为<0.10 km², 0.10~0.50 km², 0.50~1.00 km², 1.00~3.00 km², >3.0 km² 5个等级,图3(a)结果显示:44 a间5个等级的冰川面积缩小比率依次为44.93%、31.66%、17.39%、13.29%、3.05%,面积缩小比率标准差依次为25.10、28.47、21.72、21.10、10.98,冰川面积变化率和变化率的标准差反映了相同的结论,即冰川面积减小率的高低与冰川面积的大小呈反相关关联。数量众多且相对面积变化较大的小冰川易于消失,党河南山共消失冰川15条,其中7条<0.10 km²,其余8条介于0.10~1.00 km²,南坡5条,北坡10条。消失冰川北坡多于南坡的原因主要是北坡<0.10 km²的冰川(76条)多于南坡(17条)。

(2) 党河南山山区1966~2010冰川平均单条面积减小0.111 km²,所统计的282条冰川末端平均后退了159 m,年平均退缩3.6 m/a。南坡冰川末端平均后退142 m,年平均退缩3.2 m/a,北坡冰川末端平均后退161 m,年平均退缩3.7 m/a。

党河南山山区不同面积分类的平均最高海拔随冰川面积的增大而增高,平均最低海拔随冰川面积的增大而降低,冰川面积减小率按冰川面积增大而降低(图3b)。规模较大的冰川,末端一般分布较低,对气温升高的适应性较强,面积缩小比率相对较小;而规模较小的冰川,末端海拔一般较高,大部分冰川面积缩小幅度较大。在气温持续上升的背景下,一些中小规模冰川的末端会退缩至较高的海拔,或保持稳定,或趋于消失,而朝向、坡度、冰川类型和补给类型等是其内在的影响因素。

4 讨论

4.1 气候变化对冰川变化的影响

从祁连山的气候变化,表明祁连山及其北侧的中西段地区是气候由暖干向暖湿转型的显著区域^[32-34],自20世纪50年代以来气温总体上呈波动上升趋势,进入90年代以后加速上升,同时降水量也呈增加趋势^[35]。冰川变化是气候变化的必然结果。在气象要素中,温度和降水对冰川变化起决定作用,而夏季温度与年降水是其中两个最重要的因素,夏季气温直接决定冰川消融量,年降水影响冰川积累量^[36-37]。根据研究区所在的位置,选取肃北气象站(94°53'E, 39°30'N,海拔2 200 m)气象数据

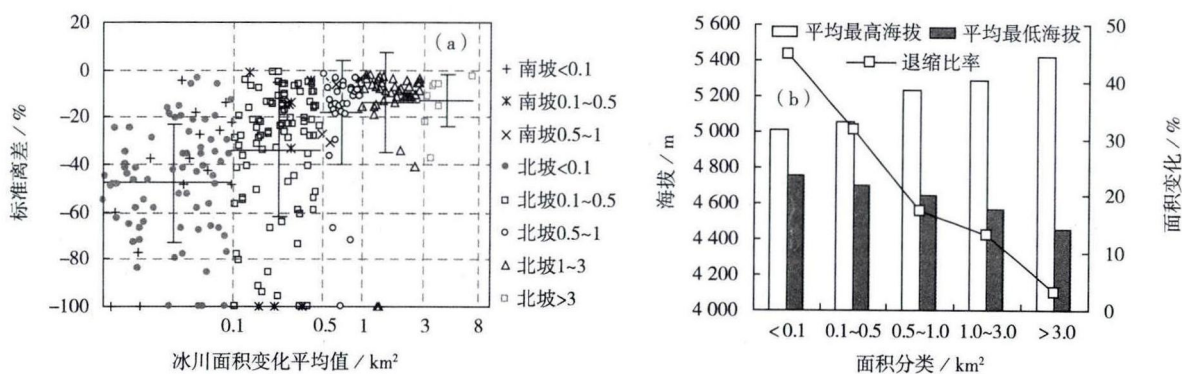


图3 1966~2010年党河南山地区不同面积等级冰川变化

Fig.3 Relative changes of glaciers with different area classes from 1966 to 2010 in the Danghenan Mountain

作近似比较。通过统计肃北气象站逐日逐年气温、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)。气象站具体位置如图1所示。根据气象资料的统计分析,1960–2005年夏季(6~8月)平均气温增幅为 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,冬季(12月~次年2月)平均气温增幅为 $0.53\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。同时段年降水量增幅为 $12.18\text{ mm}/10\text{ a}$,夏季降水量增幅为 $3.8\text{ mm}/10\text{ a}$,冬季降雪量增幅为 $1.55\text{ mm}/10\text{ a}$ 。大量的降水为冰川物质平衡收入的增加创造了良好的条件。但据前人研究即使降水增多,也不会降低因温度上升所引起的冰川物质亏损。研究区冰川的主要积累时期在夏季,虽然研究区年降水和夏季降水上升显著,但仍然引起冰川的显著消融,主要原因是夏季温度上升会导致冰川消融增强、冰川积累区面积减少,同时夏季温度上升会引起高海拔地区液态降水的增加,使得冰川消融量增加的同时积累量在减小,而且冬季的积累量不足以弥补冰川物质的亏损,使得冰川退缩速度加快。因此,研究区冰川退缩主要是由于气候变暖造成的。

研究区年均温和年均降水量的年际变化总体呈上升趋势,对冰川的消融有促进作用。其中,1995年年均温距平为 $-0.45\text{ }^{\circ}\text{C}$,是1994年以来的最低温度年份,1997–1999年发生了一次增温突变,1998年出现异常高温,年均温距平为 $1.38\text{ }^{\circ}\text{C}$,是1990年以来的最高温度年份,2005年年均温距平为 $0.59\text{ }^{\circ}\text{C}$,是1995年以来的次极小温度。这与研究区冰川在1994–2000年变化较大,2000–2010年变化较小的趋势相吻合。

4.2 冰川空间形态对冰川变化的影响

冰川具有复杂的空间结构,当外界气候发生变化时,冰川空间结构的不同将影响冰川消融的强弱。同时由于其复杂的空间结构,常规空间统计方法往往无法准确模拟某些冰川特性多尺度、多过程的空间异质性。分形理论是一种描述非常复杂但标度不变性系统的非线性科学理论,Mandelbrot曾对分形(fractal)给出了一个容易理解的定义:部分以某种形式与整体相似,即分形体的一个重要特征是自相似性或标度不变性。由于分形理论具有处理复杂系统的优势,该理论已经在地理学领域得到了广泛的应用^[38],并且为冰川变化研究的创新提供了新的理论支撑。不同冰川有不同的空间图形特征,同一冰川在不同演化阶段,其空间形状也有差异。而由冰川的类型、大小、形状、边界特征、空间位置关系决定的冰川空间格局,更蕴含着冰川变化丰富的时空演变信息。基于此,可以利用分形方法,以期通过确定分形维数与稳定性指数及二者之间的关系,更加全面的了解冰川变化的特征。

基于1957/1966和2010年冰川相关信息,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,并通过线性拟合确定分形维数和稳定性指数。在冰川变化应用中,若令 $A(r)$ 代表以 r 为量度的冰川面积, $P(r)$ 为同一冰川周长,对应的分维公式定义为:

$$P(r)^{1/D} = k \times r^{(1-D)/D} \times A(r)^{1/2}, \quad (5)$$

通过取自然对数公式(5)可变换为:

$$\ln A(r) = (2/D) \ln P(r) + C, \quad (6)$$

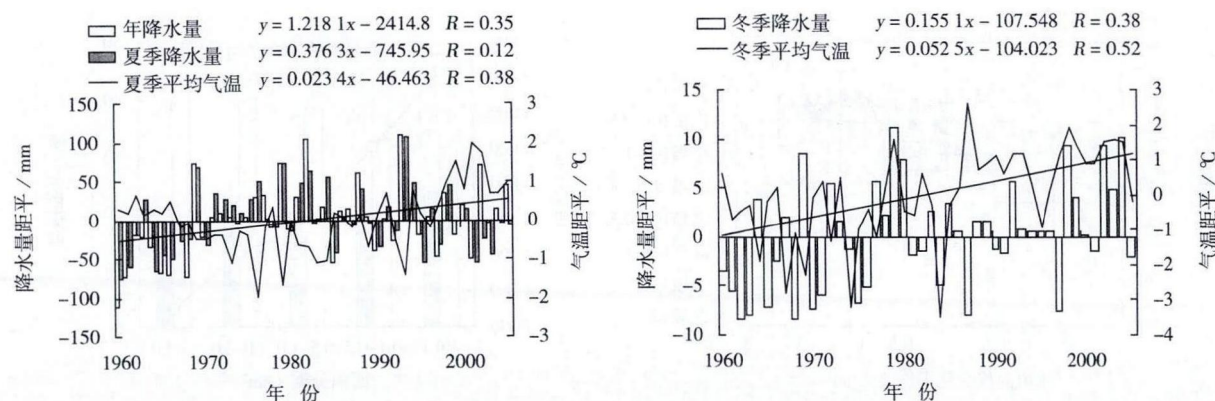


图4 1960–2005年肃北气象站气温和降水量变化

Fig.4 Variation of mean temperature and precipitation at the Subei Meteorological Station between 1960 and 2005

公式(6)为不同面积等级冰川“周长-面积”分维公式,分维值 D 为斜率 K 的倒数乘以2。 D 值的大小反映了冰川的复杂性和稳定性, D 值越大,表示空间结构越复杂。当 $D = 1.50$ 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。换言之,就是 D 值越接近 1.50 就表示空间结构越不稳定,并且据此定义一个稳定性指数:

$$SK = |1.5 - D| \quad , \quad (7)$$

SK 越大空间结构越稳定。

不同等级冰川分维值的具体计算方法是,首先,在 ArcGIS 软件中计算不同时期每一等级冰川图斑的面积和周长,将每个冰川图斑的面积和周长依次带入对数公式;然后,对每一组数据在 Excel 中做散点图,并进行线性拟合。最后,通过斜率 K 与分维值 D 的关系得出每个等级冰川的分形维数。图5分别为 1957/1966 年和 2010 年等级为 $< 0.10 \text{ km}^2$ 的冰川取对数后的散点图,表2列出了研究区不同等级冰川的分维数和稳定性指数。

从表2可以看出研究区不同等级的冰川存在着分形特征,4期数据对比分析结果显示:面积等级

0.10 km^2 的冰川稳定性指数在 53 a 间进一步减小,空间结构进一步趋近于不稳定状态,表明 $< 0.10 \text{ km}^2$ 的冰川对气候变化将会更为敏感,直到完全消失; $> 5.00 \text{ km}^2$ 的冰川在 53 a 间分形指数与稳定指数变化在五个分区间统计中变化最小,其空间形态变化不大; $0.10 \sim 0.50 \text{ km}^2$ 的冰川 D 值分别为 1.556、1.454、1.539、1.638,离随机运动状态的值 1.50 比较接近,说明该等级的冰川是 5 个等级冰川中结构最不稳定的,也是 53 a 间变化运动程度最大的,同时 $0.10 \sim 0.50 \text{ km}^2$ 的冰川稳定性指数增加 0.082,空间形态有向稳定状态转化的趋势; $0.50 \sim 1.00 \text{ km}^2$ 的冰川稳定性指数变化最大、分维值最大,说明其空间结构最为复杂,空间稳定性指数将会进一步减小; $1.00 \sim 5.00 \text{ km}^2$ 的冰川稳定性指数变化较小,一定程度上反映出大冰川对气候变化的敏感性要低于小冰川。

4.3 对比分析

表3列出了研究区冰川变化与祁连山其它区域冰川变化的情况,比较表3中数据可以发现:研究区冰川变化表现出的面积减少、冰储量下降、条数减少的趋势,与其他区域冰川变化所表现出的总趋势相吻合。但是,对比祁连山东、中、西段冰川变化可

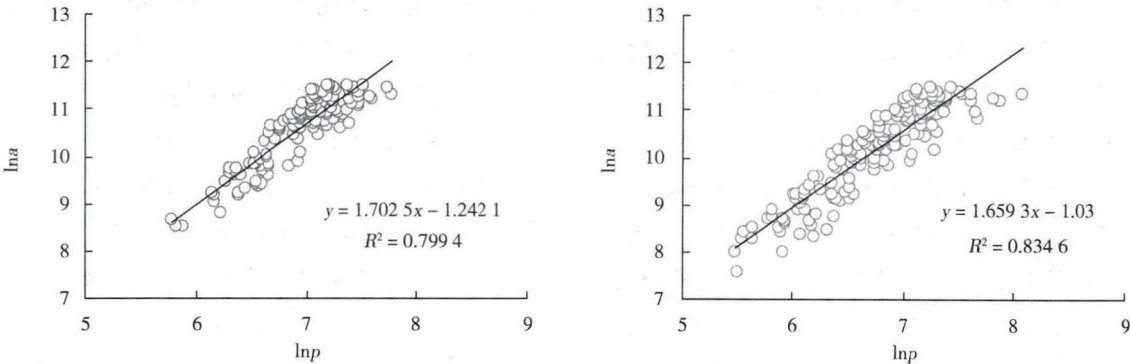


图5 研究区 1957/1966 和 2010 年 $< 0.10 \text{ km}^2$ 冰川面积周长取对数散点图

Fig.5 Scatter plot of the $< 0.10 \text{ km}^2$ glacier $\ln a - \ln p$ relationship in the study area, 1957/1966 and 2010

表2 研究区不同面积等级冰川稳定性变化

Tab.2 Changes of stability indexes of glaciers with different sizes in the study area									
面积等级 / km^2	1957/1966		1994		2000		2010		1957/1966-2010 指数变化
	分形维数	稳定性指数	分形维数	稳定性指数	分形维数	稳定性指数	分形维数	稳定性指数	
< 0.10	1.175	0.325	1.189	0.311	1.201	0.299	1.205	0.294	0.031
$0.10 \sim 0.50$	1.556	0.056	1.454	0.047	1.539	0.039	1.638	0.138	-0.082
$0.50 \sim 1.00$	2.628	1.128	2.466	0.966	2.350	0.850	2.327	0.827	0.301
$1.00 \sim 5.00$	2.021	0.521	2.010	0.510	2.003	0.503	1.995	0.495	0.026
> 5.0	1.329	0.171	1.340	0.160	1.367	0.133	1.352	0.148	0.023

表3 祁连山区冰川近几十年变化比较
Tab.3 Comparison of glacier changes of Qilian Mountains in recent decades

研究区	时期	冰川 条数	冰川退缩量 / km ²	面积退缩率 / %	年退缩比率 / %·a ⁻¹	资料来源
祁连山东段(冷龙岭)	1972-2007	244	24.29	-23.57	-0.67	曹泊 ^[20]
祁连山中段(野牛沟流域)	1956-2003	165	16.22	-25.71	-0.55	阳勇 ^[21]
祁连山中段(黑河流域)	1950s/1970s-2003	335	32.41	-29.60	-	王璞玉 ^[2]
祁连山西段(疏勒南山)	1970-2006	279	55.00	-12.80	-0.36	张华伟 ^[21]
祁连山西段(大雪山、党河南山)	1957/1966-2010	477	57.21	-17.20	-0.35	本研究
祁连山西段(疏勒河、党河、北大河、哈拉湖)	1956-1990	1 731	151.90	-10.30	-0.30	刘时银 ^[22]

以发现,研究区冰川退缩速率要比东段和中段相对偏低。此外,刘时银等人^[22]研究发现,祁连山西段大雪山冰川在1956-1990年间面积缩小了4.8%(0.14%/a),本研究发现1957-1994年大雪山冰川缩小了6.18%(0.17%/a),二者结果相近。

在全球变暖背景下,祁连山区气温自20世纪80年代中后期持续升高,90年代以后明显变暖,但由于区域间气候差异,其变化特征又不尽相同。据贾文雄等人^[35]研究,祁连山东、中、西部气温的变化存在空间分异,西部年均气温和夏季气温增长幅度分别为0.27℃/10 a、0.24℃/10 a,而中部和东部分别为0.33℃/10 a、0.27℃/10 a和0.30℃/10 a、0.27℃/10 a,西部年均气温和夏季气温增长幅度均低于中、东部,同时年均气温还表现出南北差异,即中东部的增温幅度从南到北呈增大趋势,而西部的增温幅度从南到北呈减小趋势;祁连山区年降水量呈波动变化,降水量经历了“少—多—少—多”的变化过程,年降水量东、中、西相差不大。由此可见,在降水量呈波动变化的情况下,研究区冰川消融强度较中、东部偏低的主要原因之一是西部升温幅度相对较小,而西部的增温幅度从南到北呈减小趋势是党河南山冰川退缩幅度大于大雪山的一个主要原因。

研究区冰川消融强度较中、东部偏低的另一重要原因是冰川规模相对较大。2010年研究区冰川平均面积0.60 km²,2003年祁连山中部黑河流域冰川平均面积为0.25 km²,2007年祁连山东段冷龙岭冰川平均面积为0.36 km²。此外,研究区冰川末端平均海拔较中东部高。党河南山1966年冰川末端平均海拔为4 681 m,大雪山冰川1957年末端平均海拔为4 568 m。

5 结 论

(1) 冰川变化:研究区1957/1966年冰川面积为332.48 km²,到1994年冰川面积退缩了23.32 km²,平均每年退缩0.22%;1994-2000年冰川面积退缩了16.49 km²,平均每年退缩0.89%;2000-2010年冰川面积退缩了17.40 km²,平均每年退缩0.59%;1957/1966-2010研究区冰川共消失18条,面积减少17.21%,冰储量减少24.1%。冰川平均面积较大的大雪山地区在1957-2010年面积减少了26.004 km²,年减小率为0.30%,冰储量减少22.4%。而冰川平均面积较小的党河南山地区在1966-2010年面积减少了31.201 km²,年减小率为0.42%,冰储量减少25.7%。南北坡冰川退缩表现出较大的差异性,大雪山南坡冰川面积减少了22.82%,北坡冰川面积减少了15.51%;党河南山南坡冰川面积减少了22.39%,北坡冰川面积减少了16.76%。末端退缩速率存在差异,大雪山地区冰川末端平均后退181 m,退缩比率15%(3.4 m/a),党河南山地区冰川末端平均后退159 m,退缩比率16%(3.6 m/a)。综合分析表明,研究区冰川呈退缩趋势,尤其在20世纪90年代退缩显著,2000年后退缩速率较90年代有所下降;冰川变化存在区域差异性,党河南山冰川面积缩小及末端退缩幅度均强于大雪山。

(2) 冰川变化的影响因素:冰川的规模(面积和长度)是冰川退缩的主要内部因素,冰川退缩比率的高低与冰川的规模呈反相关,冰川的稳定性变化分析进一步证实冰川规模越小,冰川变化越显著。温度的上升尤其是夏季气温的升高是冰川退缩最主要的外部驱动因素。

(3) 与祁连山其他区域冰川变化的比较及差异

的原因:研究区冰川变化的趋势与其他区域冰川变化趋势吻合,即面积和条数减少,储量下降。研究区冰川退缩幅度较祁连山东、中部偏小,初步认为是研究区温度上升幅度较中、东部偏低,冰川规模大、末端海拔相对高的原因。

参考文献(References)

- [1] 施雅风. 中国冰川与环境——现在、过去和未来[M]. 北京:科学出版社,2000.[SHI Yafeng. Glacier and environment in China: present, past and future[M]. Beijing: Science Press, 2000.]
- [2] 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.[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.]
- [3] 李忠勤. 天山乌鲁木齐河源1号冰川近期研究与应用[M]. 北京:气象出版社,2011.[LI Zhongqin. Progress and application of research on glacier NO1 at headwaters of Urumqi River, Tianshan, China[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2011.]
- [4] 王璞玉,李忠勤,曹敏,等. 近50 a来天山博格达峰地区四工河4号冰川表面高程变化特征[J]. 干旱区地理,2011,34(3):464–469.[WANG Puyu, LI Zhongqin, CAO Min, et al. Ice surface elevation changes of glacier No.4 of Sigong River in Bogda, Tianshan Mountains, during the last 50 years[J]. Arid Land Geography, 2011, 34(3): 464–469.]
- [5] 姚永慧,励惠国,张百平. 近30年来天山托木尔峰东侧分水岭处冰川变化[J]. 干旱区地理,2009,32(6):828–833.[YAO Yonghui, LI Huiguo, ZHANG Baiping, et al. Glacier changes in the past 30 years at the east watershed of Mt Tomor[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(6): 828–833.]
- [6] 王叶堂,侯书贵,鲁安新,等. 近40年来天山东段冰川变化及其对气候的响应[J]. 干旱区地理,2008,31(6):813–819.[WANG Yetang, HOU Shuigui, LU Anxin. Response of glacier variations in the eastern Tianshan Mountains to climate change, during the last 40 years[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(6): 813–819.]
- [7] 高闻宇,李忠勤,李开明,等. 基于遥感与GIS的库克苏河流域冰川变化研究[J]. 干旱区地理,2011,34(2):252–258.[GAO Wenyu, LI Zhongqin, LI Kaiming, et al. Glacier variation in the Kukesu River basin during 1963–2004 based on remote sensing data and GIS techniques[J]. Arid Land Geography, 2011, 34(2): 252–258.]
- [8] 鲁安新,姚檀栋,刘时银,等. 青藏高原各拉丹东地区冰川变化的遥感监测[J]. 冰川冻土,2002,24(5):559–562.[LU Anxin, YAO Tandong, LIU Shiyin, et al. Glacier change in the Geladan–dong area of the Tibetan Plateau monitored by remote sensing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 559–562.]
- [9] 杨珍娘,曾群柱. 冰川水文学[M]. 重庆:重庆出版社,2001:1–40.[YANG Zhenliang, ZENG Qunzhu. Glacier hydrology[M]. Chongqing: Chongqing Press, 2001: 1–40.]
- [10] 丁宏伟,魏余广,李爱军,等. 疏勒河出山径流量变化特征及趋势分析[J]. 干旱区研究,2001,18(3):48–53.[DING Hongwei, WEI Yuguang, LI Aijun, et al. The change characteristics and the trend prediction of streamflow at the debouchure of Shulehe River[J]. Arid Zone Research, 2001, 18(3): 48–53.]
- [11] 陈亚宁,杨青,罗毅,等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理,2012,35(1):1–8.[CHENG Yaning, YANG Qing, LUO Yi, et al. Ponder on the issues of water in the arid region of northwest China[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(1): 1–8.]
- [12] 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影响[J]. 冰川冻土,2001,23(3):244–250.[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.]
- [13] CHAI Huixia, CHENG Weiming, ZHOU Chenghu, et al. Climate effects on an inland alpine lake in Xinjiang, China over the past 40 years[J]. Journal of Arid Land, 2013, 5(2): 188–198.
- [14] LING Hongbo, XU Hailiang, FU Jinyi, et al. Surface runoff processes and sustainable utilization of water resources in Manas River Basin, Xinjiang, China[J]. Journal of Arid Land, 2012, 4(3): 271–280.
- [15] FAN Yuting, CHEN Yaning, LI Weihong, et al. Impacts of temperature and precipitation on runoff in the Tarim River during the past 50 years[J]. Journal of Arid Land, 2011, 3(3): 220–230.
- [16] WANG Zhichao. The changes of Lop Nur Lake and the disappearance of Loulan[J]. Journal of Arid Land, 2010, 2(4): 295–303.
- [17] 王宗太,刘朝海,蒲健辰,等. 中国冰川目录(1):祁连山区[M]. 兰州:中国科学院兰州冰川冻土研究所,1981.[WANG Zongtai, LIU Chaohai, PU Jianchen, et al. Glacier Inventory (1): Qilian Mountains [M]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Chinese Academy of science, 1981.]
- [18] 中国科学院高山冰雪利用研究队. 祁连山现代冰川考察报告(第一号)[M]. 北京:科学出版社,1959:290–291.[Investigation Team of the Ice/Snow Utilization of Chinese Academy of Science. Report of the investigation of modern glaciers in the Qilian Mrs. No.1[M]. Beijing: Science Press, 1959: 290–291.]
- [19] 谢自楚,伍光和,王立伦. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊,第5号(祁连山冰川变化及利用)[M]. 北京:科学出版社,1985:82–90.[XIE Zichu, WU Guanghe, WANG Lilun. Memoirs of Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Science, No.5[M]. Beijing: Science Press, 1985: 82–90.]

- [20] 曹泊,潘保田,高红山,等. 1972-2007年祁连山东段冷龙岭现代冰川变化研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 242-246. [CAO Bo, PAN Baotian, GAO Hongshan, et al. Glacier variation in the Lenglongling range of eastern Qilian Mountains from 1972 to 2007 [J]. Journal of Glaciology And Geocryology, 2010, 32(2): 242-246.]
- [21] 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): 8-11. [ZHANG Huawei, LU Anxin, WANG Lihong, et al. Glacier change in the Shulenan Mountain monitored remote sensing[J]. Journal of Glaciology And Geocryology, 2011, 33(1): 8-11.]
- [22] 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. [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[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 227-233.]
- [23] 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. [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.]
- [24] PAUL F, KÄÄB A, MAISCH M, et al. The new remote sensing derived Swiss glacier inventory: I. Methods[J]. Annuals of Glaciology, 2002, 34: 355-361.
- [25] KHROMOVA T E, OSIPOVA G B, TSVETKOV D G, et al. Changes in glacier extent in the eastern Pamir, Central Asia, determined from historical data and ASTER imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 102: 24-32.
- [26] BOLCH T, KAMP U. Glacier mapping in high mountains using DEMs, Landsat and ASTER data[J]. Grazer Schriften für Geographie und Raumforschung, 2006, 41: 37-48.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] HALL D K, BAYR K J, SCHFNER 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.
- [30] BAHR D B, MEIER M F, PECKHAM S D. The physical basis of glacier volume-area scaling[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102 (B9), 43: 20355-20362.
- [31] LIU S Y, SUN W X, SHEN Y P, et al. Glacier changes since the little ice age maximum in the west Qiliang Shan, Northwest China, and consequences of glacier runoff for water supply[J]. Journal of Glaciology, 2003, 49: 117-124.
- [32] 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[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226. [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[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 219-226.]
- [33] 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北部气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164. [SHI Yafeng, SHEN Yongping, LI Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 152-164.]
- [34] 李栋梁,魏丽,蔡英,等. 中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 135-142. [LI Dongliang, WEI Li, CAI Ying, et al. The present facts and the future tendency of the climate change in Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 135-142.]
- [35] 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. [JIA Wenxiong, HE Yuanqing, LI Zongxing, et al. The regional difference and catastrophe of climate change in Qilian Mt. Region[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(3): 257-269.]
- [36] 刘燕,李小龙,胡安焱. 河川径流对降水变化的响应研究——以渭河为例[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 49-52. [LIU Yan, LI Xiaolong, HU Anyan, et al. Response of runoff to precipitation changes: A case of Weihe[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(1): 49-52.]
- [37] 崔宇,袁玉江,金海龙,等. 乌鲁木齐河源467年春季降水的重建与分析[J]. 干旱区地理, 2007, 30(4): 496-500. [CUI Yu, YUAN Yujiang, JIN Hailong, et al. Reconstruction and analysis of 467 year spring precipitation series in the Urumqi River Head[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(4): 496-500.]
- [38] 董山,徐建华,陈亚宁,等. 塔里木盆地年平均气温的分形特征研究[J]. 干旱区地理, 2009, 32(1): 17-22. [DONG Shan, XU Jianhua, CHEN Yaning, et al. Fractal characteristics of annual mean temperature of the Tarim Basin[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(1): 17-22.]

Glacier changes at the Daxue Mountain and Danghenan Mountain of west Qilian Mountains in recent 50 years

YU Guo-bin¹, LI Zhong-qin^{1,2}, WANG Pu-yu²

(1 College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2 The State Key Laboratory of Cryospheric Sciences/Tianshan Glaciological station, Cold and Arid Regions Environment and Engineer in g Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Mountain glaciers are sensitive climate indicators and thus subject to monitoring of environmental and climate changes. Furthermore, glacier runoff is the major contributor to water resources that are used to support the sustainable development of the environment, industry, and agriculture in arid region. Most researches of glacier changes in the Qilian Mountains are focused on the East and Middle of Qilian Mountains. Research on large-scale and long-time glacier fluctuations in the West Qilian Mountain region is limited despite the fact that the glaciers in this region provide important water resources for local economic development. During the past decades, glaciers in the Western Qilian Mountains have experienced rapid shrinking primarily due to climatic warming. Impacts of the glaciers shrinkage on water resources have drawn wide attention. Taking this into account, glaciers in the Daxue Mountain and Danghenan Mountain were selected to study in this paper. Based on 1: 50 000 topographic maps in 1957/1966 (5 in 1957, 14 in 1966), satellite images (Landsat TM in 1994, ASTER in 2000 and SPOT5 in 2010) and digital elevation model (DEM), the selected glaciers was extracted by using the remote sensing image processing and analyzing method, and the changes of glaciers in the study area were analyzed under the support of the geographic information systems technology. The results indicate that from 1957/1966 to 2010, the total area and ice volume for the investigated glaciers in the study area have reduced by 17.21% and 24.1%. It is also found that from 1957 to 2010, the total area and ice volume for the investigated glaciers (196) in the Daxue Mountain have reduced by 16.03% (0.30%/a) and 22.4%, with a mean reduction of 0.133 km² for the individual glacier, the glaciers retreated by 258 m (3.4 m/a). From 1966 to 2010, the total area and ice volume for the investigated glaciers (281) in the Danghenan Mountain have reduced by 18.32% (0.42%/a) and 25.7%, with a mean reduction of 0.111 km² for the individual glacier, the glaciers retreated by 159 m (3.6 m/a). The rate of glacier retreat on south slopes was faster than that on the north slopes. The area of glaciers in South and North slope of Daxue Mountain have reduced by 22.82% and 15.51%, the area of glaciers in South and North slope of Danghenan Mountain have reduced by 22.39% and 16.76%, respectively. By analyzing the general trend of climatic change of the study area, it was found that rapidly rising air temperature is likely to be the major factor causing the shrinkage of the glaciers in the study area. Compared with other glaciers in the Eastern and Middle Qilian Mountains, glaciers in the western Qilian Mountains appeared to be decreasing more slowly. The differences of glacier changes in the Eastern, Middle and Western Qilian Mountains are mainly due to the combination of climatic conditions and glacier sizes.

Key Words: Remote sensing; Glacier change; Regional differences; Fractal; Western Qilian Mountains