

doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2014.0164

Zhu Wanwan, Shanguan Donghui, Guo Wanqin, et al. Glaciers in some representative basins in the middle of the Tianshan Mountains: change and response to climate change[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(6): 1376–1384. [朱弯弯, 上官冬辉, 郭万钦, 等. 天山中部典型流域冰川变化及对气候的响应[J]. 冰川冻土, 2014, 36(6): 1376–1384.]

天山中部典型流域冰川变化及对气候的响应

朱弯弯, 上官冬辉*, 郭万钦, 许君利

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 利用2000年的Landsat5遥感数据、1970年和2009年的冰川编目数据, 对天山中段南坡开都河流域和北坡玛纳斯河流域的冰川变化进行了对比分析, 并结合地面气象站点数据分析了冰川对气候变化的响应及南北坡冰川变化的差异性。研究表明: 1970–2009年间, 两流域冰川面积减少了494.33 km², 占总面积的26.8% (0.8% · a⁻¹); 冰川储量减少了32.73 km³, 占总储量的27.9% (0.8% · a⁻¹)。其中, 2000–2009年冰川面积和冰储量年退缩率(1.3% · a⁻¹)比1970–2000年(0.6% · a⁻¹)大; 冰储量减少的速率略大于面积缩小的速率, 说明冰川面积缩小的同时, 其厚度在迅速减薄。1970–2000年和2000–2009年间, 玛纳斯河流域的冰川年均面积退缩率分别为0.5% · a⁻¹和1.4% · a⁻¹, 开都河流域的冰川年均面积退缩率为0.9% · a⁻¹和1.1% · a⁻¹, 显示出玛纳斯河流域冰川在2000年后呈加速萎缩趋势。影响研究区冰川变化的主因是气温, 而夏季升温幅度及降水的不同是造成南北坡冰川差异性变化的重要原因。

关键词: 冰川变化; 玛纳斯河流域; 开都河流域; 气温; 降水

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0240(2014)06-1376-09

0 引言

冰川是高寒地区多年积雪经过粒雪化、密实变质形成的冰川冰, 并在自重影响下具有运动特性的自然冰体。目前, 地球陆地面积约11%被冰川所覆盖, 全球约85%的淡水资源储存在冰川中^[1]。冰川是气候变化的产物, 也是气候变化灵敏的指示器^[2]。IPCC第五次评估报告指出^[3], 全球地表平均温度在1880–2012年期间上升了0.83℃, 山地冰川呈现普遍退缩。1971–2010年间全球海平面以平均2 mm · a⁻¹的速度上升, 冰川消融的贡献约为(29% ± 13%)^[4]。在对气候变化的响应中, 山地冰川比大陆冰盖更敏感^[5]。

天山是我国山岳冰川的主要分布地区之一, 也是南北疆暖温带和温带的分界线。Li等^[6]研究表明, 1963–2000年天山的冰川面积减少了12.5%。

素有“冰川活化石”之称的天山乌鲁木齐河源1号冰川, 是世界冰川监测服务处选定的全球10条代表性冰川之一^[7], 1959–2008年期间其物质平衡累积亏损–13.65 m水当量^[8], 如果保持过去50 a的平均升温趋势, 平衡线将以2.16 m · a⁻¹的速率继续升高^[9]。天山地区的冰川是中亚干旱区重要的淡水补给水源, 一些源于冰川区的河流, 冰川和积雪融水径流在总径流中的比例可达45%以上^[10–11]。冰川变化对当地水资源和生态环境有着至关重要的影响, 因此成为我国开展冰川变化研究的热点地区之一。

然而, 现有研究主要集中在单个冰川, 如乌鲁木齐河源1号冰川^[9], 或十来条冰川^[6], 尚缺乏流域冰川状况的调查和针对同一山系, 不同气候条件影响下的冰川差异性对比分析研究。本文选择位于天山中段的北坡玛纳斯河流域和南坡开都河流域的冰

收稿日期: 2014-03-06; 修订日期: 2014-10-09

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-GJ04); 科技部科技基础性工作专项(2013FY111400); 国家自然科学基金项目(41071047; 41130638)资助

作者简介: 朱弯弯(1989–), 女, 北京顺义人, 2011年毕业于邯郸学院, 现主要从事寒旱区遥感应用研究。

E-mail: zhuwanwan5407@sina.com

* 通讯作者: 上官冬辉, E-mail: dhguan@lzb.ac.cn

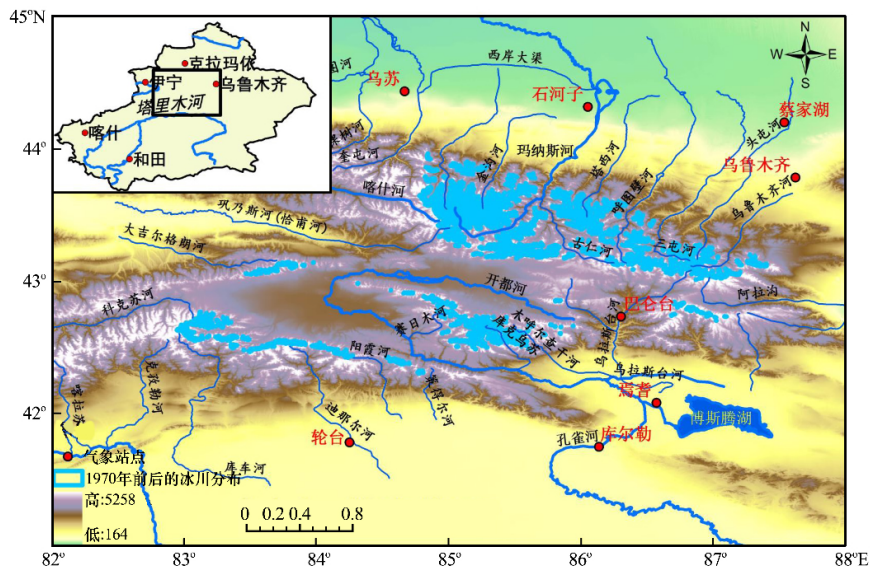


图 1 研究区概况

Fig. 1 Map showing the overview of the research regions

川为研究对象,对比分析两流域的冰川规模、分布和近 40 a 间的差异性变化,并结合附近气象站的相关数据,探讨研究区冰川对气候变化的响应及形成南北坡差异性变化的原因。

1 研究区概况

天山是中亚地区构造活跃的巨大山系,东西绵延长约 2 500 km,其中,1 700 km 横亘于我国的新疆,是南北疆重要的地理分界线,它由一系列平行山脉组成,分北、中、南三带。研究区位于天山中部,包括依连哈比尔尕山、萨阿尔明山、波尔托乌拉山等山脉。其中,依连哈比尔尕山东西长约 320 km,南北宽约 110 km,山体一般在海拔 4 000 m 以上^[12]。本文选取的研究流域北坡的玛纳斯河流和南坡的开都河都发源于依连哈比尔尕山(图 1)。

天山地区的降水主要受西风气流和北冰洋气团的水汽影响,降水量山坡大于山麓,北坡大于南坡。位于天山中段北坡的玛纳斯河,是准噶尔内陆区冰川数量最多、规模最大的一条河流,属中温带大陆性干旱气候^[12-13];位于天山中部南坡的开都河,是我国最长的内陆河塔里木河流域的四大源流之一,属于暖温带大陆性干旱气候^[14-15]。为了分析研究区冰川对气候变化的响应,根据国家气象局提供的资料进行了周边地面气象观测点的选取(图 1)。

2 数据及方法

2.1 数据

2002 年完成的第一次冰川编目数据源为 1970 年前后的航片及出版的地形图。2009 年初步完成的第二次冰川编目数据源为 Landsat 系列卫星所搭载的 TM 和 ETM+ 数据,所有数据均从美国地质调查局(USGS)获取,影像校正精度在 1/2 个像元左右^[16-17]。2009 年冰川编目,首先,选用已经完成正射的 USGS 的 Landsat TM 和 ETM+ 数据影像在 ENVI 软件下利用 B3/B5 的波段比值法对冰川与非冰川进行分类;然后采用人工目视解译进行数字化和修订^[16,18]。其次,以流域边界为基础,并以山脊线两侧地形坡向差为地表曲率的代用指标,删除闭合流域边界中不具有山脊线特征的边界线段,从而得到将连片的大面积冰体分割为向不同方向流动的独立冰川的山脊线^[19]。最后,将划分好的冰川在 ArcGIS 软件中结合数字高程模型得到冰川参数^[20]。2000 年的冰川数据来自于 Landsat5 数据制作流程与 2009 年冰川编目数据相同。

利用 ArcGIS 中的缓冲区方法来计算 2000 年数据的误差为 2.3%;而针对同一时期的遥感影像,冰川解译的不确定性则受冰川大小的影响,总体规律为冰川越小,不确定性越大。如面积 $< 2^{-2} \text{ km}^2$ 的冰川其不确定性可达 15%,但面积 $> 2^4 \text{ km}^2$ 的不确定性则 $< 1\%$ 。

误差传播则采用公式:

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2} \quad (1)$$

式中: δ_i 为各分量的误差; δ 为总误差.

因此,根据式(1),计算得出 1970–2000 年、2000–2009 年和 1970–2009 年的冰川变化的误差为 2.7%、3.3% 和 2.9%.

2.2 方法

为研究天山中段玛纳斯河流域和开都河流域的冰川变化及其差异性,对不同时期的冰川数据,采用对比分析的方法,分析研究区的冰川数量、面积、海拔分布等特征,得出天山中段南北坡的冰川分布及冰川变化的差异性.在此基础上,结合附近气象站的相关数据,分析研究区冰川对气候的响应,探究研究区南北坡冰川变化差异性原因.

由于本文采用 1970 年、2000 年和 2009 年的冰川数据进行分析,期间的冰川变化需要一个统一单位的参数进行对比.因此,在统计冰川面积变化中,本文利用年均面积退缩率 r 来统计,计算公式如下:

$$S_2 = S_1(1+r)^n \quad (2)$$

式中: S_1 为早期的冰川面积(km^2); S_2 为近期的冰川面积(km^2); r 为年均面积退缩率; n 为两期冰川经历的年数(a).

为了评估冰川变化对河川径流的影响,需要一个直观的数据来获取冰川变化对水资源补给的影响,而冰储量的变化能直观显示冰川的融水量对径流的影响.因此,本文采用了天山山区冰川平均厚度(H)与相应的冰川面积(F)相关关系计算公式: $H = -11.32 + 53.21F^{0.3[12]}$ 和冰川面积与冰储量的关系式:

$$V = (-11.32F + 53.21F^{1.3})/1000 \quad (3)$$

式中: F 为冰川面积(km^2); V 为冰川储量(km^3).

3 分析与结果

3.1 冰川特征分析

3.1.1 研究区冰川分析

根据 1970 年前后的第一次冰川编目资料,玛纳斯河流域和开都河流域发育有冰川 2 691 条,冰川总面积 1 847.33 km^2 . 其中,冰川面积最大的一条是位于玛纳斯河流域,冰川编目编码为 5Y738C0052 的冰川,冰川面积为 40.34 km^2 . 图 2 为将冰川面积划分等级后各等级的总条数和总面积. 面积在 $2^{-3} \sim 2^{-2}$ km^2 的冰川数量最多,有 591 条,占研究区冰川总条数的近 22%; 面积为

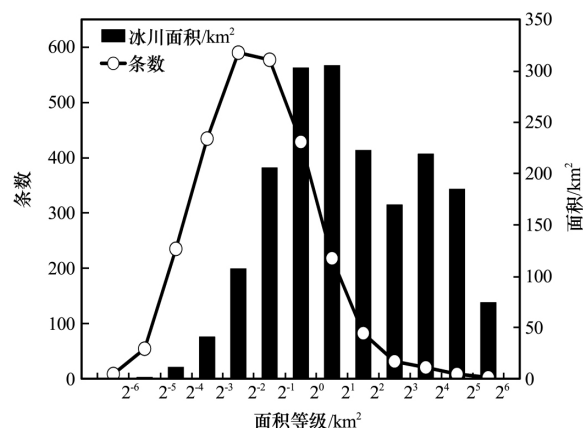


图 2 面积和条数分等级统计

Fig. 2 Glacier number and glacierized area changing with area grade

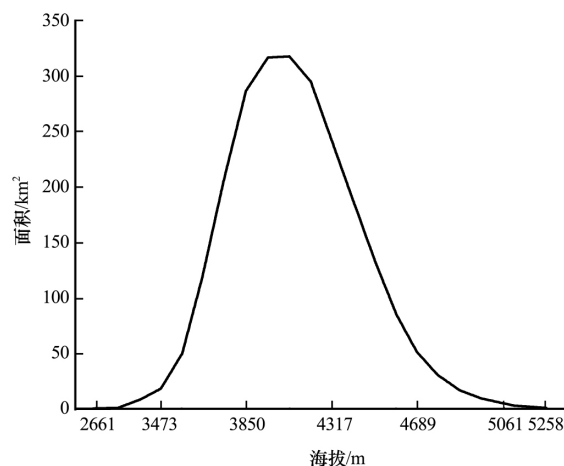


图 3 冰川面积随海拔分布

Fig. 3 Glacierized area changing with altitude

107.32 km^2 , 仅占研究区总面积的 5.8%. 而面积在 $2^1 \sim 2^6$ km^2 的冰川, 有 143 条, 仅占研究区冰川总量的 5.3%, 其面积为 871.35 km^2 , 占研究区冰川总面积的 47.2%. 研究区 $< 2^1$ km^2 的冰川数量众多, 但面积却主要集中于 $> 2^1$ km^2 的冰川.

图 3 是利用 1970 年的冰川矢量数据对 DEM 做掩膜, 得到研究区冰川的 DEM 数据, 进而计算高程值和各海拔的冰川总面积. 如图 3 所示, 研究区冰川分布海拔为 2 661 ~ 5 258 m, 面积最大的高度带约为 4 000 m.

3.1.2 南北坡冰川特征分析

冰川系统结构是指冰川系统中各个要素, 如数量、面积、高度等之间的关系特征^[21]. 由于冰川结构的不同, 导致冰川变化的不同. 为此, 本文采用冰川的系统结构要素特征对南北坡的冰川及冰川变化进行统计, 分析南北坡冰川变化的原因. 主要分

表 1 天山中部冰川规模统计
Table 1 Glacierized area , number and ice storage in the middle of the Tianshan Mountains

统计项目	面积 /km ²	条数	冰储量 /km ³
北坡(MRB)	1 356.65	1 921	92.14
南坡(KRB)	490.68	770	25.25
合计	1 847.33	2 691	117.39

析面积、数量及分布的结构。

研究区南坡开都河流域(KRB) 和北坡玛纳斯河流域(MRB) 1970 年前后的冰川面积、条数以及根据式(3) 计算得到的冰储量见表 1 所示, 南坡的

面积、数量和冰储量均小于北坡。MRB 的冰川总面积是 KRB 的冰川总面积的 3 倍多, 冰川总条数也是 KRB 冰川的近 3 倍。图 4(a) 、(b) 分别为 1970 年天山中段 KRB 和 MRB 冰川的面积等级-冰川条数的关系, 数量最多的冰川等级集中在面积 $2^{-3} \sim 2^{-1} \text{ km}^2$ 之间。

图 5(a) 、(b) 、(c) 、(d) 分别为 1970 年南坡开都河流域和北坡玛纳斯河流域冰川经向末端海拔分布情况和纬向末端海拔情况。KRB 冰川末端海拔高度主要集中在海拔 3 500 ~4 000 m 之间, 冰川末端的最低海拔是 3 355 m。MRB 冰川的末端海拔

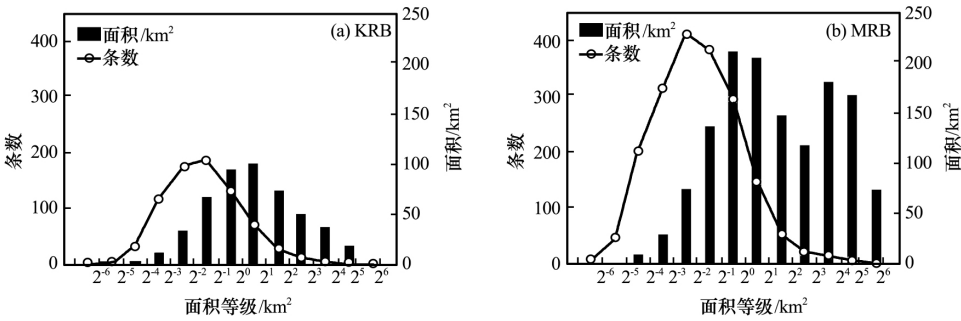


图 4 1970 年前后冰川面积和条数分等级统计
Fig. 4 Glacier number and glacierized area of different area grades around 1970 in KRB (a) and MRB (b)

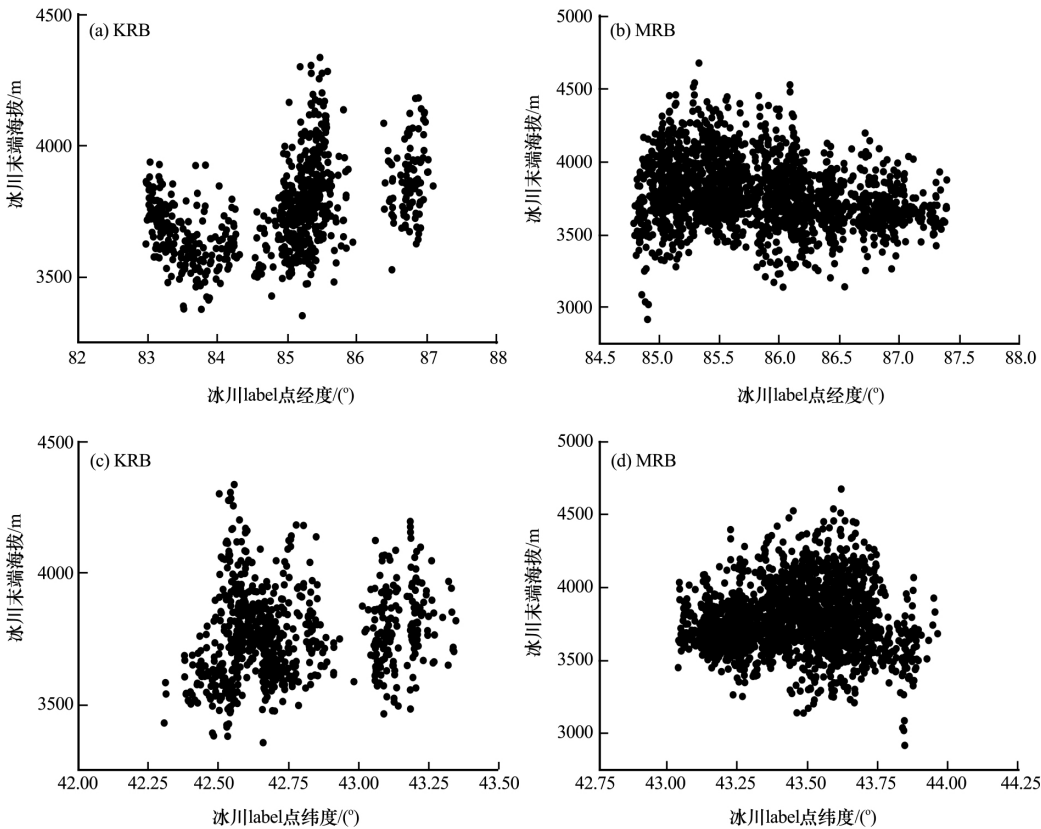


图 5 流域冰川末端海拔随经纬度变化分布
Fig. 5 Glacier terminus altitude changing with longitude (a , b) and latitude (c , d) in KRB (a , c) and MRB (b , d)

主要集中在海拔 3 500 ~ 4 500 m 之间,冰川末端的最低海拔是 2 920 m. 可见,相比而言北坡 MRB 的冰川末端海拔落差较大,南坡 KRB 的冰川末端落差较小.

3.2 冰川变化分析

3.2.1 研究区冰川变化分析

由于遥感影像分辨率在冰川识别过程中的不确定性因素的影响,因此,面积 $< 2^{-5}$ km² 的冰川不计入面积和条数的变化分析中. 从 1970 - 2009 年整体变化来看,冰川总体退缩减薄. 从图 6(a)、(b)可以看出,40 a 间冰川在不同面积等级的条数和面积的变化: 面积 $< 2^{-3}$ km² 的冰川数量增加了 177 条,面积 $> 2^{-3}$ km² 且 $< 2^2$ km² 的冰川数量明显减

少,而 $> 2^2$ km² 的冰川条数减少不明显. 从不同面积等级的面积变化来看,总体来说,面积在减小,而且面积减少最大的是 $2^{-1} \sim 2^1$ km² 之间的冰川;但面积 $< 2^{-3}$ km² 的冰川面积有略微增加. $2^2 \sim 2^3$ km² 的冰川数量和面积在 2000 年下降,却在 2009 年又上升. 这可能是因为由于 2000 年之后气候继续变暖,面积等级高于 2^3 km² 的一些冰川退缩到这个面积等级上的缘故.

3.2.2 南北坡冰川变化对比

表 2 显示了 40 a 间冰川数量、面积和体积要素的情况. 冰川体积的计算是由式(3)得到的,年均变化率是由式(2)计算得到的. 结果表明,近 40 a 来,两流域的冰川储量的变化率都要大于冰川面积

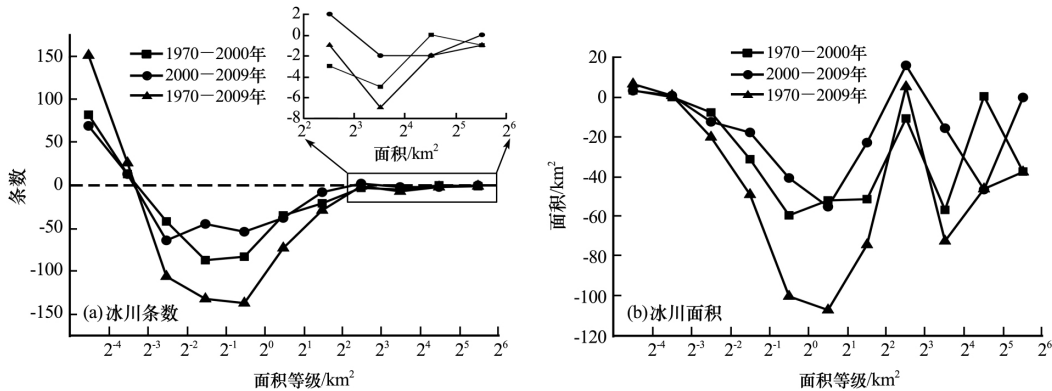


图 6 不同面积等级的冰川条数(a)和面积(b)的变化

Fig. 6 Glacier number (a) and glacierized area (b) changing with area grades

表 2 近 40 a 间天山中部冰川退缩情况

Table 2 Information about glacier shrinkage on the middle of the Tianshan Mountains in recent 40 years

统计项目	年份	MRB	KRB	合计
冰川条数变化	1970 - 2009 年	208	103	312
面积变化 /km ²	1970 - 2000 年	183.77	119.06	302.83
	2000 - 2009 年	151.28	40.22	191.50
	1970 - 2009 年	335.05	159.28	494.33
面积变化率 /%	1970 - 2009 年	24.7	32.5	26.8
面积年变化率 /%	1970 - 2000 年	0.5	0.9	0.6
	2000 - 2009 年	1.4	1.1	1.3
	1970 - 2009 年	0.7	1.0	0.8
储量变化 /km ³	1970 - 2000 年	13.73	6.84	20.57
	2000 - 2009 年	10.19	1.97	12.16
	1970 - 2009 年	23.92	8.81	32.73
体积变化率 /%	1970 - 2009 年	26.0	34.9	27.9
储量年变化率 /%	1970 - 2000 年	0.5	1.0	0.6
	2000 - 2009 年	1.4	1.1	1.3
	1970 - 2009 年	0.7	1.0	0.8

的变化率. 因此, 在天山中段上述两流域的冰川在面积减小的同时, 冰川的厚度也迅速减薄. 此外, MRB 的冰川条数、面积和冰储量在数量上的变化比 KRB 的冰川变化大. 然而, KRB 的面积变化率、年均面积退缩率和冰储量变率都比 MRB 的冰川变率大.

从前 30 a 和后 10 a 的变化来看, 由于 1970 – 2000 年的时间间隔比较长, 面积和体积的绝对变化量比 2000 – 2009 年变化大. 但从相对变化量来看, 1970 – 2000 年, MRB 年均面积、冰储量变化率分别为 $0.5\% \cdot a^{-1}$ 和 $0.5\% \cdot a^{-1}$; KRB 年均面积、冰储量变化率分别为 $0.9\% \cdot a^{-1}$ 和 $1.0\% \cdot a^{-1}$. 2000 – 2009 年, MRB 年均面积、冰储量变化率分别为 $1.4\% \cdot a^{-1}$ 和 $1.4\% \cdot a^{-1}$; KRB 年均面积、冰储量变化率分别为 $1.1\% \cdot a^{-1}$ 和 $1.1\% \cdot a^{-1}$. 综上所述, 2000 – 2009 年间两流域冰川面积和体积变化均有加速萎缩减薄的趋势, 而且 MRB 的加速趋势更明显.

图 7 是冰川面积随海拔的分布图, 根据图 7 可以看出, 无论在 KRB 还是在 MRB, 其冰川面积最大的海拔在 40 a 间均有略微的抬升. 40 a 间, 北坡

MRB 冰川面积较大和变化较大的海拔范围均在海拔 3 900 ~ 4 300 m; 而南坡 KRB 冰川面积较大和变化较大的海拔范围在海拔 3 850 ~ 4 100 m 之间. 但两流域冰川面积在海拔 4 700 m 以上的冰川变化都很微弱. 因此, 冰川面积变化量与冰川的海拔以及冰川在该海拔分布的面积大小同时有关. 即海拔较低的冰川最先融化萎缩, 但冰川面积本来不大, 因此, 其冰川面积绝对变化量也不会太大.

3.3 冰川对气候的响应

冰川变化和气候波动关系复杂, 且冰川对气候的响应具有滞后性^[21-22]. 对山地冰川来说, 一般小冰川对气候变化反应比较灵敏, 滞后时间一般是数年到十多年^[5]. 由于研究区的冰川规模以小冰川为主, 因此, 研究认为冰川变化对气候响应的滞后时间不会太长. 由于山区条件较差, 气象站点分布不多, 而且无论是位置还是海拔上都不均匀, 本文选取研究区域周边的气象站观测点(图 1).

根据 8 个气象站点的月平均气温, 得到相应站点冬季(12 月、1 – 2 月)和夏季(6 – 8 月)的平均气温; 进而得到南北坡各 4 个站点的冬季和夏季的平均气温及气温变化(图 8). 从气温来看, 无论冬季

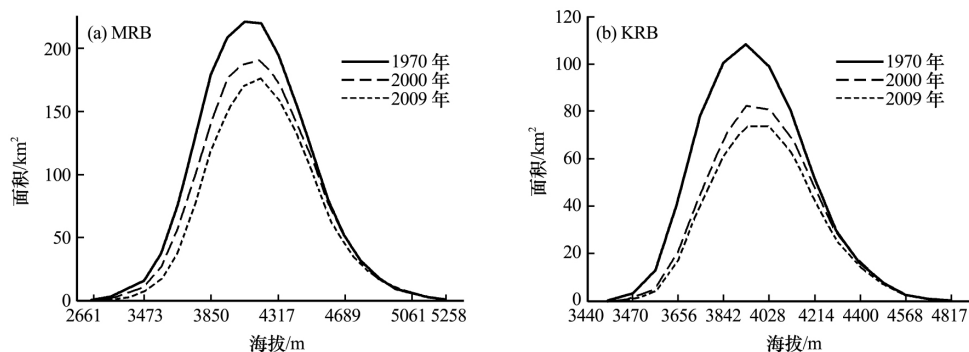


图 7 冰川面积随海拔分布

Fig. 7 Glacierized area changing with altitude in MRB (a) and in KRB (b)

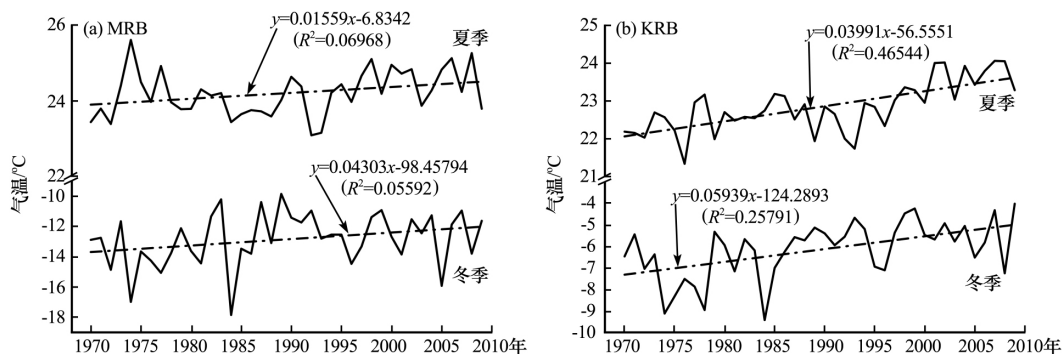


图 8 夏季和冬季气温变化

Fig. 8 Variations of annual mean air temperatures in summer and in winter in MRB (a) and KRB (b)

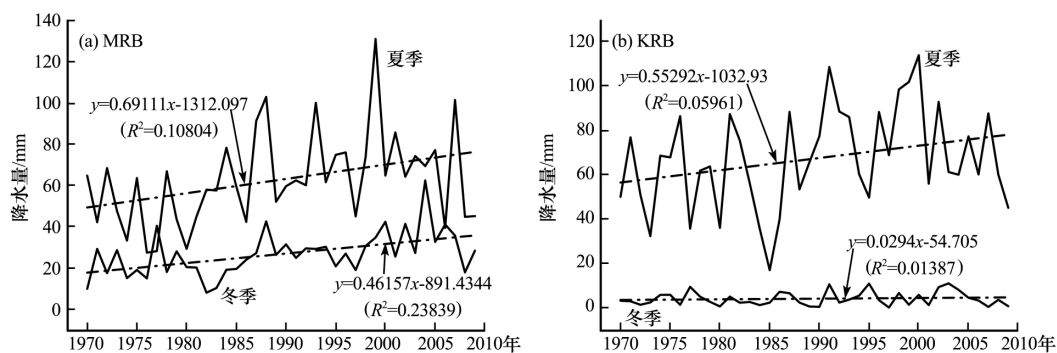


图9 夏季和冬季平均降水量

Fig.9 Variations of annual mean precipitations in summer and in winter in MRB (a) and KRB (b)

还是夏季,南坡 KRB 的气温较高。在 40 a 间,北坡夏季升温趋势较弱,升温不明显,冬季升温趋势显著,升温较高,而且 R^2 值较小,北坡冬夏季的气温波动较大。南坡冬季和夏季升温都比较明显,而且 R^2 值较大,冬夏季的气温波动相对较小,线性升温趋势明显。

根据 8 个气象站点的月降水量,得到相应站点冬季和夏季的降水量,进而得到南北坡各四个站点的冬季和夏季的平均降水量(图 9)。MRB 在冬季和夏季的降水量的增长趋势均比较明显, R^2 值较大,线性趋势较强;KRB 在夏季的降水量增长趋势比较明显,在冬季的降水量增长趋势不显著。

总体上看,研究区温度上升,降水量也有一定的增加。温度上升,加快冰川消融;而冬季降水量的增加有利于冰川发育。因此,研究区冰川退缩主要受气温上升的控制,尽管 MRB 夏季气温上升不明显。但造成南北坡冰川变化差异的原因包括气温和降水。南坡的气温较高,且冬、夏季气温升温都比较大,升温趋势比较明显,并且 R^2 值较大,线性升温趋势明显,南坡冰川退缩速度较快;北坡的气温较低,升温趋势较弱,气温波动性较大,且升温主要是冬季,对冰川退缩作用不大。降水对南北坡的冰川分布及变化差异也有很大程度的影响。北坡受到北冰洋气团和西风气流的影响,而且北坡是迎风坡,加之北坡气温较低,其冰川分布的最低海拔较南坡来说比较低。北坡冬季和夏季降水增加都较多,且冬季降水多为固态,对冰川退缩有一定的减慢作用;南坡夏季降水增量较大,但冬季降水增加趋势不明显,夏季多为液态降水,加之南坡暖季升温快,并不能减缓冰川退缩。因此,北坡冰川退缩速度较慢,南坡冰川退缩速度较快。

4 结论

通过对 1970 年、2000 年、2009 年天山中部南坡开都河流域和北坡玛纳斯河流域的冰川数据做统计对比分析,得到以下结论:

(1) 1970 年研究区天山中段北坡玛纳斯河流域和南坡开都河流域的冰川主要分布在海拔 2 661 ~ 5 258 m,共发育冰川 2 691 条,总面积是 1 847.33 km²。北坡玛纳斯流域发育冰川 1 921 条,总面积 1 356.65 km²,数量规模大;南坡开都河流域发育冰川 770 条,总面积 490.48 km²,数量规模小。

(2) 1970 - 2009 年研究区冰川共减少 312 条,面积减小 26.8%,冰储量减小 27.9%,表明冰川面积在缩小的同时还在迅速减薄。研究区 1970 - 2009 年、1979 - 2000 年和 2000 - 2009 年的面积年均退缩率分别为 0.8% · a⁻¹、0.6% · a⁻¹ 和 1.3% · a⁻¹。而且 40 a 间,面积 < 2⁻³ km² 的冰川数量和冰川面积有所增加,但面积大的冰川整体呈现数量减少、面积萎缩的趋势。冰川集中发育在海拔 3 850 ~ 4 200 m 之间,且在此海拔区间面积变化最大,但在海拔 4 700 m 以上的冰川变化都很微弱;冰川面积的变化与冰川所在海拔的面积大小以及海拔高度两个因素同时相关。

(3) 在 1970 - 2009 年间,北坡玛纳斯河流域冰川减少 208 条,面积减少 335.05 km²,面积变化率为 24.7%,年均面积退缩率为 0.7% · a⁻¹。其中,1970 - 2000 年和 2000 - 2009 年间的年均面积退缩率分别为 0.5% · a⁻¹ 和 1.4% · a⁻¹,2000 年后冰川退缩加速趋势明显。而南坡开都河流域冰川减少 103 条,面积减少 159.28 km²,面积变化率为 32.5%,年均面积退缩率为 1.0% · a⁻¹。其中,

1970–2000 年和 2000–2009 年间, 面积年均退缩率分别为 $0.9\% \cdot a^{-1}$ 和 $1.1\% \cdot a^{-1}$, 冰川退缩加速不显著。在数量上北坡冰川变化的面积和冰储量要大于南坡, 但在 40 a 间南坡退缩速度较快。

(4) 从冰川分布来看, 北坡水汽来源较多, 加之气温较低, 因此, 冰川分布的最低海拔较南坡来说比较低。从冰川变化来看, 气温影响研究区冰川变化, 而且夏季气温上升趋势对冰川退缩影响较大; 冬季的降水变化对冰川变化的影响较大。KRB 夏、冬季气温升温明显, 夏季降水增加明显但冬季无明显变化, 导致 KRB 冰川退缩较快; 而 MRB 冬季升温明显但夏季升温不明显, 且冬季降水增加明显, 对冰川退缩起到减缓的作用。因此影响研究区冰川变化的主要因素是气温, 而造成南北坡冰川变化差异的主要原因是夏季升温幅度及冬季降水。

致谢: 感谢中国气象局提供的地面气象站的气候数据。

参考文献 (References):

- [1] Gao Shu, Zhang Jie. Modern Geomorphology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 1–374. [高抒, 张捷. 现代地貌学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 1–374.]
- [2] Che Tao, Li Xin, Mool P K, *et al.* Monitoring glaciers and associated glacial lakes on the east slopes of Mount Xixiabangma from remote sensing images [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(6): 801–805. [车涛, 李新, Mool P K, 等. 希夏邦马峰东坡冰川与冰川湖泊变化遥感监测 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(6): 801–805.]
- [3] IPCC. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Summary for Policymakers [R]. New York: Cambridge University Press, 2013: 1–28.
- [4] Gardner A S, Moholdt G, Cogley J G, *et al.* A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009 [J]. Science, 2013, 340: 852–857.
- [5] Su Zhen, Wang Zhichao. The advance and retreat fluctuation of modern glaciers and their response to the climatic changes in the Karakorum-Kunlun Mts. [C]//Symposium on the Tibetan Plateau and Global Change. Beijing: China Meteorological Press, 1995: 80–87. [苏珍, 王志超. 喀喇昆仑山-昆仑山现代冰川进退变化及其对气候波动的响应 [C]//青藏高原与全球变化研讨会论文集. 北京: 气象出版社, 1995: 80–87.]
- [6] Li Baolin, Zhang Yichi, Zhou Chenghu. Remote sensing detection for glacier changes in Tianshan Mountains for the past 40 years [J]. Journal of Geographical Sciences, 2004, 14(3): 296–302.
- [7] Gu Yanling, Shi Xuewei, Zhu Jianbo, *et al.* Vertical distribution pattern of the archaea community within the permafrost active layer in front of the Glacier No. 1 at headwaters of Ürümqi River, Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3): 761–769. [顾燕玲, 史学伟, 祝建波, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川前沿冻土活动层古菌群落的垂直分布格局 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 761–769.]
- [8] Zhang Guofei, Li Zhongqin, Wang Wenbin, *et al.* Change processes and characteristics of mass balance of the Ürümqi Glacier No. 1 at the headwater of the Ürümqi River, Tianshan Mountains, during 1959–2009 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(4): 1301–1309. [张国飞, 李忠勤, 王文彬, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 1959–2009 年物质平衡变化过程及特征研究 [J]. 冰川冻土, 2012, 34(4): 1301–1309.]
- [9] Dong Zhiwen, Qin Dahe, Ren Jiawen, *et al.* Variations in the equilibrium line altitude of Ürümqi Glacier No. 1, Tianshan Mountains, over the past 50 years [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(36): 4776–4783.
- [10] Feng Fang, Feng Qi, Liu Xiande, *et al.* A study of hydrochemical characteristics of meltwater runoff of the Ürümqi Glacier No. 1, Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 183–191. [冯芳, 冯起, 刘贤德, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川融水径流水化学特征研究 [J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 183–191.]
- [11] Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, *et al.* The responses of glacier and snow cover to climate change in Xinjiang (II): Hazards effects [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1355–1370. [沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候的响应 (II): 灾害效应 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1355–1370.]
- [12] Lai Zuming, Cao Zhentang, Liu Chaohai, *et al.* Glacier Inventory of China III: Tianshan Mountains: Interior Drainage Area of Junggar Basin in Northwest [M]. Beijing: Science Press, 1986: 1–201. [赖祖铭, 曹真堂, 刘潮海, 等. 中国冰川编目 III: 天山山区: 西北部准格尔内流区 [M]. 北京: 科学出版社, 1986: 1–201.]
- [13] Zou Quan, Wang Guoya, He Bin, *et al.* Responding of summer runoff and flood processes to extreme climate event in Manas River basin, Tianshan Mountains during 1957–2010 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3): 733–740. [邹全, 王国亚, 贺斌, 等. 1957–2010 年天山玛纳斯河流域夏季径流及洪水过程对极端气候事件的响应 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 733–740.]
- [14] Li Xuemei, Li Lanhai, Bai Lei, *et al.* Reconstruction of climatic data in the Kaidu River basin based on climatic data of Central Asia [J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(11): 1918–1930. [李雪梅, 李兰海, 白磊, 等. 基于中亚气候数据的开都河流域历史气候资料重建 [J]. 自然资源学报, 2012, 27(11): 1918–1930.]
- [15] Zhang Yichi, Li Baolin, Cheng Weiming, *et al.* Hydrological response of runoff to climate variation in Kaidu catchment [J]. Resource Sciences, 2004, 26(6): 69–76. [张一驰, 李宝林, 程维明, 等. 开都河流域径流对气候变化的响应研究 [J]. 资源科学, 2004, 26(6): 69–76.]
- [16] Guo Wanqin, Liu Shiyin, Xu Junli, *et al.* Monitoring recent surging of the Yulinchuan Glacier on north slopes of Muztag Range by remote sensing [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(4): 765–774. [郭万钦, 刘时银, 许君利, 等. 木孜塔格西北坡鱼鳞川冰川跃动遥感监测 [J]. 冰川冻土, 2012, 34(4): 765–774.]
- [17] Frey H, Paul F, Strozzi T. Compilation of a glacier inventory for the western Himalayas from satellite data: methods, challenges, and results [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 124: 832–843.
- [18] Xu Junli, Zhang Shiqiang, Han Haidong, *et al.* Change of the surface velocity of Koxkar Baxi Glacier interpreted from remote sensing data, Tianshan Mountain [J]. Journal of Glaciology and

- Geocryology, 2011, **33**(2): 268–275. [许君利, 张世强, 韩海东, 等. 天山托木尔峰科其喀尔巴西冰川表面运动速度特征分析[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(2): 268–275.]
- [19] Guo Wanqin, Liu Shiyin, Yu Pengchun, *et al.* Automatic extraction of ridgelines using on drainage boundaries and aspect difference[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, **36**(6): 210–212. [郭万钦, 刘时银, 余蓬春, 等. 利用流域边界和坡向差自动提取山脊线[J]. 测绘科学, 2011, **36**(6): 210–212.]
- [20] Paul F, Kääb A, Maisch M, *et al.* The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory: I. Methods[J]. Annals of Glaciology, 2002, **34**: 355–361.
- [21] Krenke A N. Mass Exchange of Glacier Systems in Territory of USSR Territory [M]. Leningrad, USSR: Hydrometeoizdat, 1982: 1–288.
- [22] Ding Y, Liu S, Li J, *et al.* The retreat of glaciers in response to recent climate warming in western China[J]. Annals of Glaciology, 2006, **43**: 97–105.

Glaciers in some representative basins in the middle of the Tianshan Mountains: change and response to climate change

ZHU Wanwan, SHANGGUAN Donghui, GUO Wanqin, XU Junli

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Glacier change was investigated by using Landsat TM5 and glacier inventory from 1970 to 2009 in the Kaidu River Basin (KRB) in the southern slope and in the Manas River Basin (MRB) in the northern slope of the Tianshan Mountains. Then, combining with records from weather stations, the differences of glaciers and glacier change between the two basins are analyzed. It is found that there were 2 522 glaciers with glacierized area of 1 356.1 km² in the study regions in 2009. And in the period of 1970–2009, glaciers had shrunk 494.33 km² in area, accounting for 26.8% ($0.8\% \cdot a^{-1}$); ice storage had decreased 32.73 km³, accounting for 27.9% ($0.8\% \cdot a^{-1}$). Shrinking ratio of ice storage was slightly greater than that of glacierized area decreasing. In addition, both the area shrinkage and the storage decrease from 2000 to 2009 ($1.3\% \cdot a^{-1}$) were larger than those from 1970 to 2000 ($0.6\% \cdot a^{-1}$). The area shrinking ratios from 1970 to 2000 and from 2000 to 2009 were 0.5% and 1.4% in MRB, and 0.9% and 1.1% in KRB, respectively. Thus, the glacier shrinking acceleration was greater in MRB than that in KRB from 2000 to 2009. Based on climatic records, glacier retreat was mainly controlled by air temperature rising, and the differences in precipitation and temperature variations were the key factors to glaciers retreating in MRB slower than that in KRB.

Key words: glacier change; Kaidu River Basin (KRB); Manas River Basin (MRB); air temperature; precipitation