

1960—2009年中国天山现代冰川末端变化特征^①李珊珊¹, 张明军^{1,2}, 李忠勤^{1,2}, 李慧林², 骆书飞¹

(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: 基于冰川定位观测、野外考察、航空摄影、遥感影像和地形图分析方法, 研究了1960—2009年中国天山8条冰川末端变化特征。结果表明: 1960—2009年, 在天山地区气温与降水呈上升趋势的背景下, 8条冰川均处于退缩状态, 退缩速率由西向东逐渐减缓, 其变化幅度因气候环境、地理位置、冰川规模和冰川形态等的不同而存在明显的区域性与阶段性差异。其中, 乌鲁木齐河源1号冰川1962—1973年冰川末端退缩速率为 $5.96 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 1973—1980年为 $3.28 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 1980—1993年为 $3.93 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 在1993年完全分离成东、西两支独立的冰川; 博格达峰四工河4号冰川末端1962—1981年退缩速率为 $6 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 1981—2006年为 $8.9 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 2006—2009年为 $13.3 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。表碛覆盖的青冰滩72号冰川和74号冰川末端1964—2009年退缩速率分别为 $41 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $30 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 远较无表碛覆盖的庙儿沟平顶冰川退缩迅速(1972—2007年冰川末端退缩速率为 $2.32 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$)。表面特征(表碛)亦是造成冰川变化差异的一个主要原因。

关键词: 冰川变化; 冰川末端; 气候变化; 表碛覆盖; 天山; 中国

冰川是气候的产物。冰川变化是气候变化的指示器, 在一定程度上反映冰川融水对河川径流的贡献量^[1]。20世纪中叶以来全球变暖, 中国冰川普遍发生了退缩, 80年代以后出现了加速消融趋势^[2], 对局地人民生活、生存环境及社会经济产生了深刻的影响, 这种影响在位于西北干旱区中心的天山地区尤为突出, 引起了人们的广泛关注^[3]。全球变暖导致山区径流在短期内增加, 长期内却在减少^[4], 在山脉众多的亚洲地区, 详细可靠的气候变化数据以及对冰冻圈的影响, 对于预测未来水资源是必要的^[5]。然而, 偏僻地区很难对冰川进行地面观测, 这使得绝大多数冰川的物质平衡数据难以获得, 因此科学家常将冰川后退与前进作为对气候变化响应的指标^[6-7]。此外, 山谷气温随着干绝热递减率而变化, 并且冰川末端冰崖明显低于冰川表面, 这都使得冰川末端消融在寒冷期维持调节流速及流量, 尤其夏初与夏末^[8]。另外, 冰川末端位置是对气候变化最为敏感的几何参数之一, 同时也最易进行实地测量和从地形图及遥感影像上提取, 该指标能够较为准确、直观地探究气候对冰川的影响情况, 进而为未来冰川及其水资源变化预测研究提供有力证据。

中国境内的天山横亘新疆维吾尔自治区全境, 东西绵延1700 km, 占天山山系总长度的2/3以上, 冰川广布^[9]。近年来, 该地区年平均气温和降水量存在着明显的线性增加趋势, 且年平均气温的增加快于年降水量的增加^[10-11]。20世纪80年代中后期, 在天山西部气候由暖干向暖湿转变尤为明显, 为未来冰川生命的健康发展提供了物质基础和环境条件^[12]。该地区积雪和冰川融水在饮用水、农业和水力发电方面占有重要的地位^[9]。自1958年开始, 我国学者对天山冰川进行了大规模考察和研究^[13-14], 众多研究是针对天山单条冰川或小流域的冰川末端变化展开^[15-17], 特别近10 a来, 借助于遥感影像研究该地区冰川变化对气候变化的响应情况^[18]。

1 研究区概况

选取中国天山8条定位、半定位监测冰川以及具有实地野外观测资料的冰川进行末端变化对比研究, 分析其对气候变化的响应速率异同, 进而探讨天山冰川变化对气候响应的区域性差异。这8条冰川自西向东分别为: 托木尔峰青冰滩72号冰川(72号

^① 收稿日期: 2012-03-29; 修订日期: 2012-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41161012); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0019); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB951003); 甘肃省高等学校基本科研业务费

作者简介: 李珊珊(1987-), 女, 硕士生, 主要从事全球环境变化方面的研究。E-mail: cexzzss1115@163.com

通讯作者: 张明军。E-mail: mjzhang2004@163.com

冰川)、托木尔峰青冰滩 74 号冰川(74 号冰川)、奎屯河哈希勒根 51 号冰川(哈希勒根 51 号冰川)、乌鲁木齐河源 1 号冰川(1 号冰川)、博格达北坡扇形分流冰川(扇形分流冰川)、四工河 4 号冰川、黑沟 8

号冰川与哈密庙儿沟平顶冰川(庙儿沟平顶冰川)。前两条冰川位于天山最西段,我国与吉尔吉斯斯坦及哈萨克斯坦的交界区域托木尔峰地区; 庙儿沟平顶冰川位于天山最东段的喀尔力克山(图 1)。

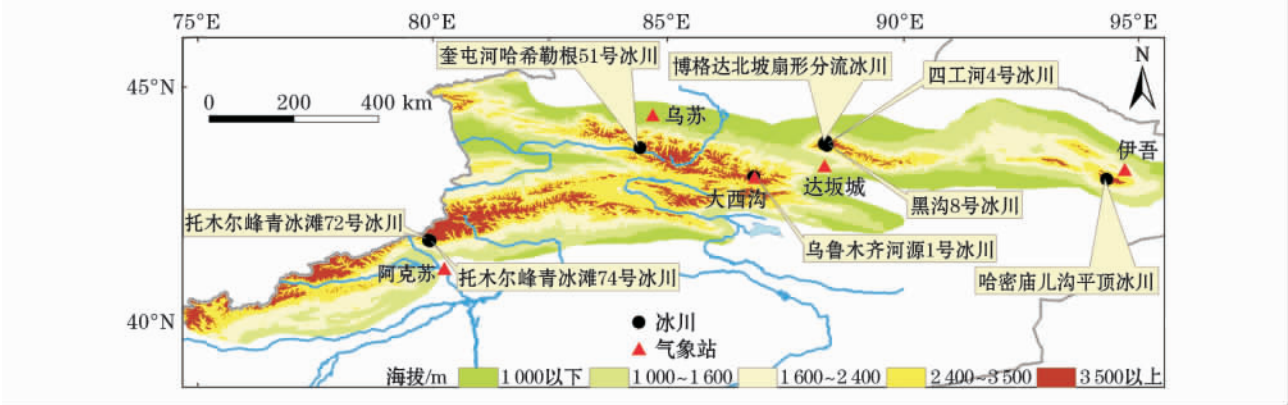


图 1 中国天山 8 条冰川及气象站分布

Fig. 1 Distribution of 8 glaciers and meteorological stations in the Tianshan Mountains, China

2 数据与方法

本研究使用的数据主要来源于冰川定位观测、野外考察、航空摄影、遥感影像和地形图分析。冰川定位观测具有时间连续与资料完整等优点,对定位观测的冰川进行研究与模拟有助于对整个区域的冰川响应气候变化的普遍认知⁽¹⁷⁾,但满足该条件的冰川数量较少。冰川末端变化通过野外定位观测或地形图与遥感影像相结合的方式获取。所采用遥感影像包括 5 m 分辨率 SPOT5 及 15 m 分辨率 ASTER。利用遥感影像解译计算末端变化时,主要采用主轴平行线法⁽¹⁹⁾,用与最长轴线平行的多线段切割冰川

末端,取每条线段变化的平均值。测算公式为:

$$Grs = \frac{\sum_{i=1}^n (L_{i-t_2} - L_{i-t_1})}{n(t_2 - t_1)}$$

式中: Grs 为冰川退缩平均速率; L_{i-t_2} 为基于 GIS 平台平行测量的 t_2 时段,第 i 条线段末端数据; t_1, t_2 分别为影像的起止时间(单位: a), n 为平行线段条数。文中所采用数据及其相关信息见表 1。

选取与冰川最近的 4 个国家级气象站(阿克苏站、乌苏站、达坂城站和伊吾站) 1960—2009 年的气象数据,进行冰川区气候变化的分析,该数据由中国气象局国家气象信息中心支持下的中国气象科学数

表 1 中国天山 8 条冰川末端变化数据来源

Tab. 1 Data sources of terminus change of 8 glaciers in the Tianshan Mountains, China

冰川名称	地理位置	冰川面积及相应时间	研究时段	数据来源	资料来源
托木尔峰青冰滩 72 号冰川	41°45' N, 79°54' E	5. 62 km ² ; 2008 年	1964—2008	地形图数据	文献 (20)
			2008—2009	野外实地测量数据	
托木尔峰青冰滩 74 号冰川	41°44' N, 79°56' E	8. 15 km ² ; 2009 年	1964—2009	—	文献 (17)
奎屯河哈希勒根 51 号冰川	43°43' N, 84°24' E	1. 36 km ² ; 2006 年	1964—1999	地形图与 GPS 数据	文献 (21)
			1999—2006	野外实地测量数据	
乌鲁木齐河源 1 号冰川	43°06' N, 86°49' E	1. 68 km ² ; 2001 年	1962—1974, 1974—1980	地形图数据	文献 (22)
			1980—2006	野外实地测量数据	文献 (17)
博格达北坡扇形分流冰川	43°48' N, 88°20' E	—	1962—2006	—	文献 (17)
四工河 4 号冰川	43°49' N, 88°21' E	2. 98 km ² ; 2006 年	1962—1981	地形图数据	文献 (13)
			1981—2006	野外实地测量数据	文献 (17)
			2006—2009	ASTER 遥感数据	文献 (23)
黑沟 8 号冰川	43°46' N, 88°22' E	5. 63 km ² ; 2009 年	1962—1980	地形图数据	文献 (13)
			1980—2009	野外实地测量数据	文献 (17)
哈密庙儿沟平顶冰川	43°03' N, 94°19' E	3. 28 km ² ; 2005 年	1972—2005	地形图数据	文献 (17)
			2005—2007	野外实地测量数据	

据共享服务网提供。此外,1号冰川区采用1960—2008年大西沟气象站($43^{\circ}06'N$, $86^{\circ}50'E$, 海拔3 539 m)资料。

3 结果与分析

3.1 1号冰川末端变化

1号冰川从1980年起有连续的冰川末端年退缩速率实测资料,1962—1980年冰川末端退缩情况可通过1962年、1973年及1980年3期地形图资料分段获取(图2)。结果表明,1号冰川近40余年来持续呈萎缩状态。其中1962—1973年冰川末端年均退缩速度为 $5.96 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 1973—1980年,退缩速度明显变缓($3.28 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$),1980—1993年冰川以 $3.93 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速度后退,冰川退缩又有所加快,在1993年完全分离成东、西两支独立的冰川。但东、西支的末端退缩速度存在很大的差异,其中西支($5.8 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$)是东支($3.5 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$)的1.7倍,西支延续了1号冰川的退缩势头,并且退缩速度明显加速,东支的退缩速率明显小于西支,可能是由于冰舌受表碛覆盖,从而抑制了冰川的退缩(西支末端坡度陡并有冰裂作用,都是末端退缩快的原因)。1号冰川末端持续退缩,造成其面积的大幅减少,2001年考察发现,其面积仅为 1.68 km^2 。从图2不难看出,20世纪60—70年代初,冰川退缩幅度大,70年代中期到80年代初,退缩速度大幅减缓,80年代中期到90年代初,冰川末端基本处于稳定状态,但近十几年来冰川末端退缩波动较大。

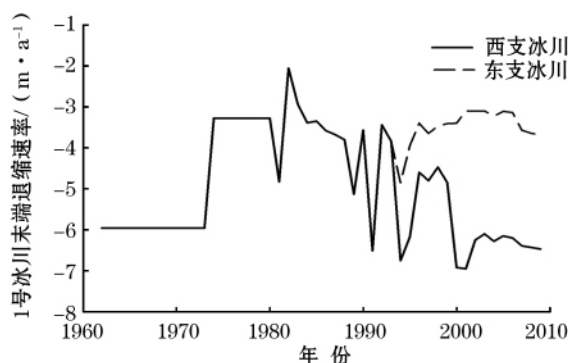


图2 1号冰川末端退缩速率

Fig. 2 Terminus retreat rate of Glacier No. 1

3.2 其他冰川末端变化

图3显示,20世纪60年代以来,72号冰川、74号冰川、哈希勒根51号冰川、扇形分流冰川、四工河

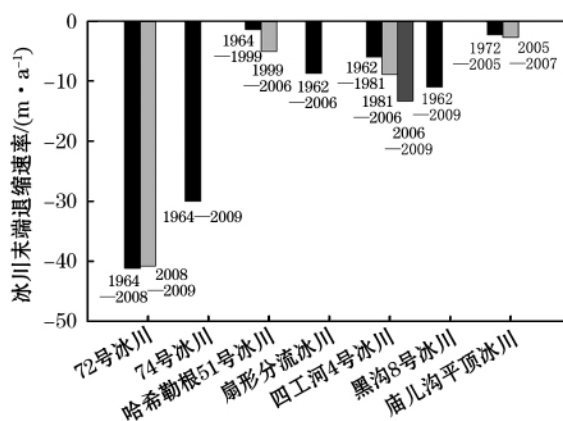


图3 中国天山7条冰川末端退缩速率

Fig. 3 Terminus retreat rate of seven glaciers in the Tianshan Mountains, China

4号冰川、黑沟8号冰川和庙儿沟平顶冰川均处于退缩状态,其退缩速率表现出明显的区域差异性及阶段性。位于天山最西段的72号冰川末端退缩速率最快,1964—2009年为 $41 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$,表现出明显的消融。2008年对72号冰川进行了野外观测,发现它以每天3~5 cm水当量的速度发生急速消融,2008—2009年,末端退缩40.8 m(沿主流线方向)。其次是74号冰川,1964—2009年以 $30 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速度后退,这与康尔泗等^[24]关于天山西段的托木尔峰地区是我国天山现代冰川作用最强烈地区的观点相一致。同时,2008年测得72号冰川面积为 5.62 km^2 ,2009年74号冰川面积为 8.15 km^2 。王璞玉等^[20]对比分析了1964年地形图、Google Earth以及野外照片(2008年和2009年),发现72号冰川和74号冰川面积的减少主要发生在消融区,由末端退缩造成。冰川末端变化最小的是天山中部地区的哈希勒根51号冰川,1964—2006年末端年均退缩2.01 m。1964—1999年冰川末端退缩了49 m,年平均退缩量为1.40 m;1999—2006年退缩了35.51 m,年平均退缩量为5.07 m,是前者的3倍之多,冰川末端退缩呈现越来越明显的趋势。位于天山最东段的庙儿沟平顶冰川(退缩速率 $2.32 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$)略快于哈希勒根51号冰川,虽从2005年起其退缩速率有所加速,但与1972—2005年相比变化不大,表现相对稳定。庙儿沟平顶冰川是典型的冰帽,末端海拔(3 840 m)较其他冰川高,消融缓和是其退缩速度较慢的主要原因。

扇形分流冰川、四工河4号冰川和黑沟8号冰川是位于博格达峰的3条冰川,2009年对这3条冰川进行了野外考察。根据李忠勤等^[17]关于博格达

峰的研究,位于南坡的黑沟 8 号冰川($11 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$)明显比北坡的扇形分流冰川($8.7 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$)和四工河 4 号冰川($8 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$)退缩快。其中,四工河 4 号冰川自 20 世纪 60 年代初以来末端加速退缩且退缩速率阶段性显著。具体来说,1962—1981 年年平均退缩速率为 $6.0 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[13],1981—2006 年退缩速率为 $8.9 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$,2006—2009 年以 $13.3 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速度退缩,其速率接近 1962—2006 年的 2 倍。四工河 4 号冰川面积在 1962 年为 3.33 km^2 ,2006 年为 2.98 km^2 ,40 多年来由末端退缩引起冰川面积大幅减小^[23]。扇形分流冰川变化主要以连续退缩为特征^[13],退缩速度与四工河 4 号冰川相近,这主要是由于二者所处地理位置相近,水热条件相似。黑沟 8 号冰川是博格达南坡最长的山谷冰川,1962—1980 年冰川无明显变化^[13],但 20 世纪 80 年代以来退缩加剧。这 3 条冰川末端的变化差异,造成了其不同程度的面积萎缩。

4 讨 论

4.1 气候变化对冰川变化的影响

气温和降水量的变化是冰川变化的主要影响因素,因此有必要讨论气候环境差异对不同冰川产生的影响(表 2)。

表 2 各气象站点的气温和降水量数据

Tab.2 Data of temperature and precipitation at the meteorological stations

气象站	平均气温/℃		平均降水量/mm	
	夏季 (6—8 月)	年平均	冬季(12 月 至翌年 2 月)	年平均
阿克苏	23.03	10.38	6.42	73.60
乌苏	25.22	8.09	20.99	169.94
大西沟	4.27	-5.07	8.75	456.99
达坂城	20.32	6.64	3.06	70.44
伊吾	17.68	3.95	2.64	96.39

根据阿克苏气象站资料,该研究区域夏季平均气温最高达 $23.03 \text{ }^{\circ}\text{C}$,对气温的升高贡献很大;年平均降水量却仅为 73.6 mm ,其冬季降水为 6.42 mm 。天山中部地区的乌苏站,1960—1999 年平均气温为 $7.87 \text{ }^{\circ}\text{C}$,1999—2009 年平均气温为 $8.97 \text{ }^{\circ}\text{C}$,21 世纪以来气温升高导致哈希勒根 51 号冰川末端退缩加速;但冬季降水和年降水分别多达 20.99 mm 和 169.94 mm ,丰沛的降水弥补了气温升高所引起的冰川消融,导致其冰川退缩速率较缓。大西沟气象

站资料显示,乌鲁木齐河源区年均气温最低,且年降水最多,这直接造成了 1 号冰川较其他冰川退缩慢。达坂城站夏季平均气温和年均气温与乌苏站相差不大,1960—1981 年年均气温为 $6.25 \text{ }^{\circ}\text{C}$,1981—2006 年为 $6.87 \text{ }^{\circ}\text{C}$,2006—2009 年为 $7.57 \text{ }^{\circ}\text{C}$,气温升高趋势和阶段性明显,与四工河 4 号冰川末端退缩的阶段性相对应;而冬季降水量与年降水量明显低于乌苏站,使博格达峰冰川退缩较哈希勒根 51 号冰川快。天山东段喀尔力克山北坡的伊吾气象站,年均气温($3.95 \text{ }^{\circ}\text{C}$)与夏季平均气温($17.68 \text{ }^{\circ}\text{C}$)均最低,但年降水量却较阿克苏站多 22.79 mm ;此外,西风气流夏半年为该区带来较多的降水,蒙古—西伯利亚气流多在冬季侵入,带来更低的气温^[9],这也可能是该地区冰川变化比较缓慢的原因之一。

4.2 冰川规模与退缩速度的关系

不同规模冰川对气候变化的响应过程存在差异^[25]。全球范围内,大冰川(长度大于 5 km)对气温的响应滞后 8 a 左右;小冰川(长度小于 5 km)对气候的响应滞后 2 a 左右^[26]。本研究以冰川面积及长度为例,来讨论冰川规模与冰川退缩的关系(图 4)。分析发现,冰川末端变化与冰川长度具有很好的相关性($R=0.83, P=0.01$),即冰川的长度越长,冰川的退缩就越快^[17]。虽然二者并没有因果关系,但二者良好的相关性在一定程度上反映了这样的事实:大规模的冰川往往延伸到海拔更低的区域,其末端更容易表现出强烈消融的特征。72 号冰川和 74 号冰川即是如此。然而,冰川面积与冰川末端的相关性($R=0.58, P=0.13$)较差,因其与冰川末端的关系较为复杂,总体来看,冰川面积越小,末端变化相应越小。冰川长度与面积的不同组合,同样可能造成冰川末端变化的区域差异。

4.3 表碛覆盖对冰川变化的影响

托木尔峰地区冰川表碛的分布十分广泛,其面积约占托木尔峰冰川消融区总面积的 51.4% ^[27]。由于表碛覆盖区的地表反照率(相对于冰雪面)降低,增加了地面辐射热量的吸收,以临界厚度为准,小于它时能够促进冰面消融,反之抑制冰面消融^[28]。表碛覆盖是托木尔峰地区冰川变化不得不考虑的因素之一。72 号冰川是典型的复合型山谷冰川,冰川下部厚度薄,冰面起伏不平,冰温较高(接近 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$),运动速度较快(最高达到 $70 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$),其冰舌部分大都分布在山谷底部,且表面具有较厚的表碛,主要分布在冰川两侧,厚度由西向东减薄。

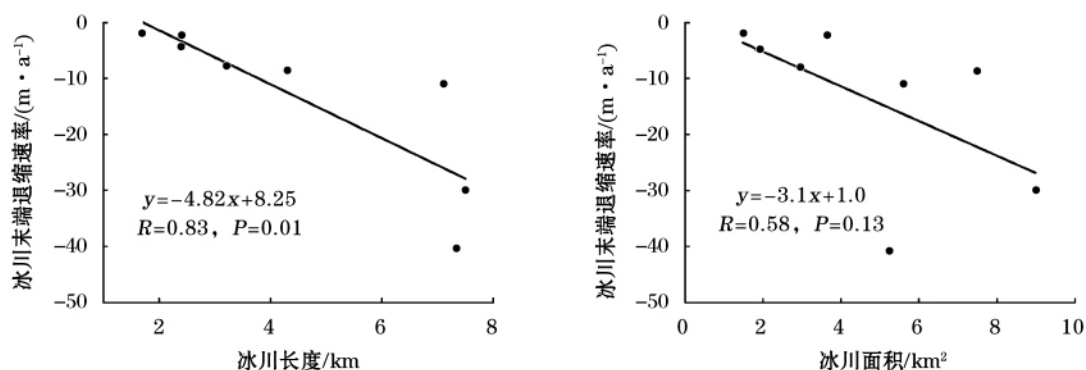


图4 冰川末端年均退缩速度与冰川长度、冰川面积的关系

Fig. 4 Relationship between the glacier terminus retreat rate and the glacier length and area

表碛厚度与冰川消融的临界值为 $4\text{ cm}^{[29]}$, 其厚度小于 4 cm 的表碛分布较广, 导致这些区域冰川消融不减反增。这印证了表碛覆盖下且表面凹凸不平的冰川退缩速率较高这一结论^[30]。而 74 号冰川与 72 号冰川所处的地理位置相近, 因而具有一定的相似性, 表碛几乎覆盖整个冰舌部分, 其同样处于强烈退缩中。与之相比, 天山东段的庙儿沟平顶冰川无表碛, 因此东西段冰川退缩的差异受表面特征(表碛)的影响明显。

4.4 其他影响冰川末端变化的因素

冰川末端的退缩不仅是由气候环境、冰川规模引起, 同时与冰川的形态、地理位置以及运动速度等因素有关^[31-33]。1 号冰川、庙儿沟平顶冰川末端海拔分别为 $3\,736\text{ m}$ 和 $3\,840\text{ m}$, 明显高于 72 号冰川 ($3\,560\text{ m}$)、74 号冰川 ($3\,680\text{ m}$)、扇形分流冰川 ($3\,540\text{ m}$)、四工河 4 号冰川 ($3\,600\text{ m}$)、黑沟 8 号冰川 ($3\,380\text{ m}$), 海拔较高是其末端退缩较这 5 条冰川慢的原因之一。庙儿沟平顶冰川, 末端海拔较高, 运动速度较慢, 冰川温度比较低, 退缩速度较慢。哈希勒根 51 号冰川末端海拔为 $3\,400\text{ m}$, 较 1 号冰川和庙儿沟平顶冰川低, 规模相似, 但退缩速度较慢, 可能是局地气候特征导致的结果。而位于博格达峰的扇形分流冰川、四工河 4 号冰川与黑沟 8 号冰川表现出不同的退缩状况, 主要是由于博格达峰的南北坡存在很大的差异。每条冰川的形态特性不同, 也会使冰川的消融的速度不同。其中, 黑沟 8 号冰川位于博格达峰南坡, 海拔较低, 属于山谷冰川, 退缩速度较快。

5 结 论

(1) 1960—2009 年, 在天山地区气温与降水基

本呈上升趋势的背景下, 中国天山 8 条冰川处于退缩状态, 由西向东冰川末端退缩速率逐渐减小。

(2) 近 50 a 来, 中国天山冰川的变化因气候环境、地理位置、冰川规模和冰川形态等因素而存在明显的区域差异性与阶段性。1 号冰川 1962—1973 年冰川末端退缩速率为 $5.96\text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 1973—1980 年为 $3.28\text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 1980—1993 年为 $3.93\text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 在 1993 年完全分离成东、西两支独立的冰川; 1962—1981 年四工河 4 号冰川末端退缩速率 $6\text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 1981—2006 年为 $8.9\text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 2006—2009 年为 $13.3\text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(3) 1964—2009 年表碛覆盖的青冰滩 72 号冰川和 74 号冰川末端退缩速率分别为 $41\text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $30\text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 远较无表碛覆盖的庙儿沟平顶冰川退缩迅速(1972—2007 年冰川末端退缩速率为 $2.32\text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$)。表面特征(表碛)亦是造成冰川变化差异的一个主要原因。

参考文献(References):

- (1) 康尔泗, 程国栋, 董增川. 中国西北干旱区冰雪水资源与出山径流(M). 北京: 科学出版社, 2002. (Kang Ersi, Cheng Guodong, Dong Zengchuan. Glacier-Snow Water Resources and Mountain Runoff in the Arid Area of northwest China (M). Beijing: Science Press, 2002.)
- (2) 姚檀栋, 刘时银, 蒲健辰, 等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响(J). 中国科学 D 辑, 2004, 34(6): 535-543. (Yao Tandong, Liu Shiyin, Pu Jianchen, et al. Recent glacial retreat in High-Asia in China and its impact on water resources in northwest China (J). Science in China: Series D, 2004, 34(6): 535-543.)
- (3) Wang S J, Zhang M J, Li Z Q, et al. Glacier area variation and climate change in the Chinese Tianshan Mountains since 1960 (J). Acta Geographica Sinica, 2011, 21(2): 263-273.
- (4) Rees H G, Collins D N. Regional differences in response of flow in

- glacier-fed Himalayan rivers to climatic warming (J). *Hydrological Processes*, 2006, 20(2): 157 – 2169.
- (5) Immerzeel W W, Van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian water towers (J). *Science*, 2010, 328: 1382 – 1385.
 - (6) Michael Z. *Global Glacier Change: Facts and Figures* (M). Zurich: UNEP, 2008.
 - (7) Oerlemans J. Extracting a climate signal from 169 glacier records (J). *Science*, 2005, 308(5722): 675 – 677.
 - (8) Lewis K J, Fountain A G, Dana G L. How important is terminus cliff melt: A study of the Canada Glacier terminus, Taylor Valley, Antarctica (J). *Global and Planetary Change*, 1999, 22: 105 – 115.
 - (9) 胡汝骥. 中国天山自然地理 (M). 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 1 – 14, 180 – 198. (Hu Ruji. *Physical Geography of the Tianshan Mountains in China* (M). Beijing: China Environmental Science Press, 2004: 1 – 14, 180 – 198.)
 - (10) 袁晴雪, 魏文寿. 中国天山山区近 40 a 来的年气候变化 (J). *干旱区研究*, 2003, 23(1): 115 – 118. (Yuan Qingxue, Wei Wenshou. Annual climate change in the Tianshan Mountainous since recent 40 years (J). *Arid Zone Research*, 2003, 23(1): 115 – 118.)
 - (11) 陈颖, 张俊岚. 近 45 a 阿克苏地区干湿程度演变分析 (J). *干旱区研究*, 2007, 24(5): 686 – 690. (Chen Ying, Zhang Junlan. Analysis on the evolvement of dryness/wetness in Aksu prefecture in recent 45 years (J). *Arid Zone Research*, 2007, 24(5): 686 – 690.)
 - (12) 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊. 新疆雪冰水资源的环境评估 (J). *干旱区研究*, 2003, 20(3): 187 – 191. (Hu Ruji, Jiang Fengqing, Wang Yajun. Assessment on the glacial water resources in Xinjiang, China (J). *Arid Zone Research*, 2003, 20(3): 187 – 191.)
 - (13) 伍光和, 张顺英, 王仲祥. 天山博格达峰现代冰川的进退变化 (J). *冰川冻土*, 1983, 5(3): 143 – 152. (Wu Guanghe, Zhang Shunying, Wang Zhongxiang. Retreat and advance of modern glaciers in Bogda, Tianshan (J). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, 5(3): 143 – 152.)
 - (14) 中国科学院兰州冰川冻土研究所托木尔峰冰川考察组. 天山托木尔峰地区冰川的基本特征 (J). *中国科学 B 辑*, 1982, 12(8): 736 – 744. (Study Group of Glaciers in Mt. Tomur of Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. The characteristics of glaciers in Mt. Tomur District of Tianshan Mountains (J). *Scientia Sinica: Series B*, 1982, 12(8): 736 – 744.)
 - (15) 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 (J). *冰川冻土*, 1996, 18(4): 331 – 336. (Chen Jianming, Liu Chaohai, Jin Mingxie. Application of the repeated aerial photogrammetry to monitoring glacier variation in the drainage area of the Urumqi River (J). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(4): 331 – 336.)
 - (16) 李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 等. 冰川消融对气候变化的响应: 以乌鲁木齐河源 1 号冰川为例 (J). *冰川冻土*, 2007, 29(3): 333 – 342. (Li Zhongqin, Shen Yongping, Wang Feiteng, et al. Response of glacier melting to climate change: Take Urumqi Glacier No. 1 as an example (J). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(3): 333 – 342.)
 - (17) 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. (Li Zhongqin, Li Kaiming, Wang Lin. Study on recent glacier changes and their impact on water resources in Xinjiang, northwestern China (J). *Quaternary Sciences*, 2010, 30(1): 96 – 106.)
 - (18) Li B L, Zhu A X, Zhang Y C, et al. Glacier change over the past four decades in the middle Chinese Tian Shan (J). *Journal of Glaciology*, 2006, 52(178): 425 – 432.
 - (19) 聂勇, 张锦铨, 刘林山, 等. 近 30 a 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. (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.)
 - (20) 王璞玉, 李忠勤, 曹敏, 等. 近 45 a 来托木尔峰青冰滩 72 号冰川变化特征 (J). *地理科学*, 2010, 30(6): 962 – 967. (Wang Puyu, Li Zhongqin, Cao Min, et al. Variation of Qingbingtan glacier No. 72 in Mt. Tuomuer region during past 45 years (J). *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(6): 962 – 967.)
 - (21) 焦克勤, 井哲帆, 成鹏, 等. 天山奎屯河哈希勒根 51 号冰川变化监测结果分析 (J). *干旱区地理*, 2009, 32(5): 733 – 738. (Jiao Keqin, Jing Zhefan, Cheng Peng, et al. Monitoring results on the glacier No. 51 at Haxilegen in the Kuytun River Basin, Tianshan Mountains (J). *Arid Land Geography*, 2009, 32(5): 733 – 738.)
 - (22) 张祥松, 孙作哲, 张金华, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的变化及其与气候变化的若干关系 (J). *冰川冻土*, 1984, 6(4): 1 – 12. (Zhang Xiangsong, Sun Zuozhe, Zhang Jinhua, et al. Some relationships of the fluctuation of glacier No. 1 with climatic change at the source of Urumqi River, Tianshan (J). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1984, 6(4): 1 – 12.)
 - (23) 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 – 470. (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 – 470.)
 - (24) 康尔泗, 朱守森, 黄明敏. 托木尔峰地区的冰川水文 (J). *冰川冻土*, 1980, 2(4): 18 – 21. (Kang Ersi, Zhu Shousen, Huang Mingmin. Glacio-hydrological in Mt. Tuomuer District, Tianshan (J). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1980, 2(4): 18 – 21.)
 - (25) 叶柏生, 丁永建, 刘潮海. 不同规模山谷冰川及其径流对气候变化的响应过程 (J). *冰川冻土*, 2001, 23(2): 103 – 110. (Ye Baisheng, Ding Yongjian, Liu Chaohai. Response of valley glaciers in various size and their runoff to climate change (J). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(2): 103 – 110.)
 - (26) Ding Y J. Global glacial fluctuations in response to climatic change in the past 40 years (J). *Science in China: Series D*, 1996, 39(1): 66 – 73.
 - (27) 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川目录 III: 天山山区 (西南部塔里木内流区) (M). 北京: 科学出版社, 1987. (Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. *China Glacier Catalogue III: Tianshan Mountains (Southwest Tamarik Internal Drainage Area)* (M). Beijing: Science Press, 1987.)

- my of Sciences. Glacier Inventory of China III. Tianshan Mountains (Interior Drainage Area of Tarim Basin in Southwest) [M]. Beijing: Science Press, 1987.)
- (28) 韩海东, 丁永建, 刘时银. 表碛下冰面消融的模拟与估算 (J). 冰川冻土, 2005, 27(3): 329–336. (Han Haidong, Ding Yongjian, Liu Shiyin. Estimation of ice ablation under a debris cover (J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(3): 329–336.)
- (29) Wang L, Li Z Q, Wang F T. Spatial distribution of the debris layer on Glaciers of the Tuomuer Peak, western Tian Shan (J). Journal of Earth Science, 2011, 22(4): 528–538.
- (30) Scherler D, Bookhagen B, Strecker M R. Spatially variable response of Himalayan glaciers to climate change affected by debris cover (J). Nature Geoscience, 2011, 4: 156–159.
- (31) 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(1): 131–135.
- (32) Evans I S. Local aspect asymmetry of mountain glaciation: A global survey of consistency of favoured directions for glacier numbers and altitudes (J). Geomorphology, 2006, 73: 166–184.
- (33) Evans I S, Cox N J. Climatic north–south asymmetry of local glaciers in Spitsbergen and other parts of the Arctic (J). Annals of Glaciology, 2010, 51(55): 16–22.

Variation of Glacier Terminuses in the Tianshan Mountains, China, during the Period of 1960–2009

LI Shan-shan¹, ZHANG Ming-jun^{1,2}, LI Zhong-qin^{1,2}, LI Hui-lin², LUO Shu-fei¹

(1. College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences & Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The terminus variation of eight glaciers in the Tianshan Mountains, China, during the period of 1960–2009 was studied based on the located observation, field survey, aerial photography, remote sensing and topography analysis. Results showed that the eight glaciers kept retreat during the period of 1960–2009 under the background of the increase of both temperature and precipitation in the Tianshan Mountains, China, and the retreat rate reduced gradually from west to east. There were the regional and periodical changes of the glacier terminuses owing to climate change and the differences of geographical locations and glacier scales and types. Thereinto, the retreating rate of Glacier No. 1 at headwaters of the Urumqi River was $5.96 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ during the period of 1962–1973, it was decreased to $3.28 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ during the period of 1973–1980, increased slightly ($3.93 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$) during the period of 1980–1993, and the glacier was divided into two independent ones in 1993. The retreating rate of Glacier No. 4 in the Sigong River Basin in the Bogda Peak region was $6 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ during the period from 1962 to 1981, increased to $8.9 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ during the period of 1981–2006 and to $13.3 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ during the period of 2006–2009. Furthermore, Qingbingtang Glacier No. 72 and No. 74 covered by superglacial moraine retreated with rates of $41 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ and $30 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ during the period of 1964–2009, these rates were much higher than that ($2.32 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$) of the Miaoergou Flat-topped Glacier without superglacial moraine during the period of 1972–2007. The surface morphology (superglacial moraine) is another cause resulting in the difference of glacier change in the Tianshan Mountains.

Key words: glacier variation; glacier terminus; climate change; superglacial moraine; Tianshan Mountains; China