

近50年来中国天山冰川面积变化对气候的响应

王圣杰¹, 张明军^{1,2}, 李忠勤^{2,1}, 王飞腾², 李慧林², 李亚举¹, 黄小燕¹

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 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/天山冰川观测试验站, 兰州 730000)

摘要:基于1960年以来中国天山各流域冰川面积变化的统计分析,系统地研究了中国天山冰川面积变化对气候的响应情况。结果表明,近50年来中国天山冰川的面积缩小了11.5%,对研究时段统一化后发现面积年均退缩率为 $0.31\% \text{ a}^{-1}$ 。各流域冰川面积退缩速度存在一定差异,但冰川加速消融趋势明显。天山地区14个气象站的气温与降水量倾向率平均值分别为 $0.34 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 与 $11 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,气温在干季增幅大而在湿季增幅略小,降水量在干季增长缓慢而在湿季增长显著,这样的气候变化趋势有助于天山冰川的退缩。

关键词:天山;冰川变化;冰川面积;气候变化

1 引言

天山山脉横亘于亚洲内陆腹地,包括冰川15953条,冰川面积15416 km²,是世界上山岳冰川分布最多的山系之一^[1],一直以来都受到全球变化研究的重视^[2-6]。在全球气候变暖的背景下,包括天山冰川在内的山岳冰川普遍呈现出加速退缩的趋势^[7-12]。对天山冰川的监测有助于探究冰川变化与气候间的响应关系,从而为合理应对气候变化提供依据。

中国境内的天山东西绵延1700 km,占天山山系长度的2/3以上^[13],分布有冰川9035条,冰川面积9225 km²,冰储量1011 km³^[14]。自1958年我国开始大规模冰川考察以来,就注意到了冰川变化的问题^[15],但除乌鲁木齐河源1号冰川^[16]外在天山地区实现长期定位观测的冰川并不多,运用实测资料对冰川与气候变化关系的研究很有限。任炳辉^[15]曾根据1958-1988年间的部分观测资料,初步探讨了天山冰川与气候变化的关系。近年来,随着地理信息系统与遥感技术在冰川测绘中的广泛运用,对于天山冰川变化的信息处理量迅速增大^[17-18]。不少学者通过解译不同时期遥感影像中的冰川信息,并对比同期气象资料,讨论了局地冰川变化与气候变化间的耦合关系^[19-20]。

收稿日期: 2010-08-16; 修订日期: 2010-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(40701035; 40631001; 40571033; 40701034; J0630966); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0019); 陇原青年创新人才扶持计划项目; 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB951003; 2007CB411501); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-127); 冰冻圈科学国家重点实验室自主研究项目; 西北师范大学知识与科技创新工程创新团队项目(NWNU-KJXCXG-03-66) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40701035; No.40631001; No.40571033; No.40701034; No.J0630966; The Program for New Century Excellent Talents in University by the Ministry of Education of China, No.NCET-10-0019; The Foundation for Young Innovative Scientists in Gansu Province; The National Basic Research Program of China, No.2010CB951003; No.2007CB411501; The Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences, No.KZCX2-YW-127; The Independent Research Program of State Key Laboratory of Cryospheric Sciences of Chinese Academy of Sciences; The Knowledge and Technological Innovation Project of Northwest Normal University, No.NWNU-KJXCXG-03-66]

作者简介: 王圣杰(1987-),男,硕士生,主要从事全球变化与冰川研究。E-mail: geowang@126.com

通讯作者: 张明军(1975-),男,博士,教授,主要从事冰川与环境研究。E-mail: mjzhang2004@163.com

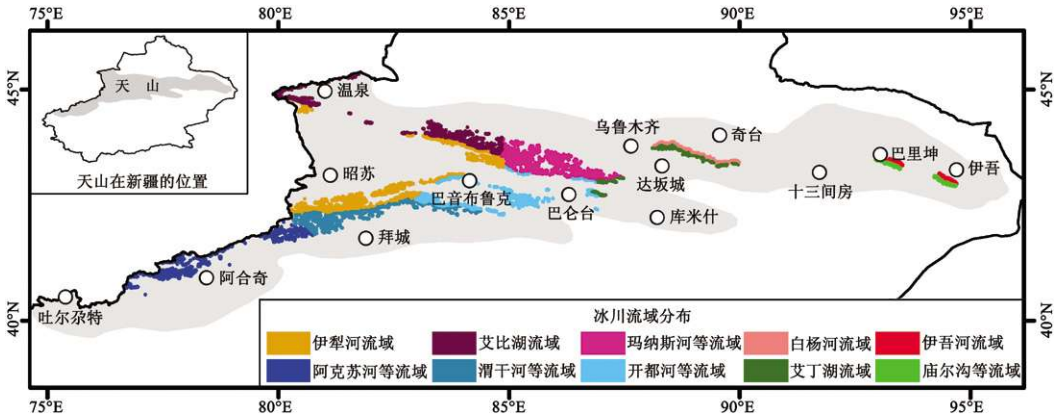


图1 中国天山冰川与气象站的分布

Fig. 1 Distribution of glaciers and meteorological stations in Chinese Tianshan Mountains

根据中国冰川编目,中国天山冰川可以划分为4个二级流域,即巴尔喀什湖内流水系、塔里木内流水系、准噶尔内流水系和吐鲁番—哈密盆地内流水系(图1)。目前有关天山冰川变化的研究大多集中于塔里木内流水系与准噶尔内流水系,但是天山各区域冰川对于气候变化表现出的敏感性有着明显的空间差异^[21],我们仍然对中国天山冰川在当前气候暖湿化背景下的总体变化状况缺乏较为全面的认识。本文试图对近50年来中国天山冰川变化进行综合分析,初步探讨其对气候变化的响应情况。

2 数据与方法

2.1 冰川变化数据

对中国天山典型冰川的监测表明,冰川面积变化可以反映出气候的变化情况^[16, 20-21]。本研究收集了1960年以来天山冰川面积变化的相关文献(表1),涉及冰川约3000条。尽管运用不同时间尺度和详细程度的数据分析冰川面积变化可能存在一定局限性,但仍可以为评估大时空尺度的冰川变化提供重要依据^[13, 15, 17-18]。冰川面积年均变化率(annual percentages of area changes,简称APAC)是一种评价冰川面积变化程度的常见指标,可以较好地将不同时空尺度的冰川变化研究结果进行统一比较^[12, 17, 26]。其计算公式为:

$$APAC = \frac{\Delta S}{S_0 \Delta t} \tag{1}$$

表1 中国天山冰川面积变化数据来源说明

Tab. 1 Data sources of glacier area variation in Chinese Tianshan Mountains

二级流域	三级流域	研究区域
巴尔喀什湖内流水系 (5X0)	伊犁河流域 (5X04)	喀什河 ^[22] 、库克苏河流域 ^[18]
塔里木内流水系 (5Y6)	阿克苏河等流域 (5Y67)	阿克苏河流域 ^[18, 23]
	渭干河等流域 (5Y68)	土别格里齐冰川 ^[20]
	开都河等流域 (5Y69)	开都河流域 ^[2, 23]
准噶尔内流水系 (5Y7)	伊吾河流域 (5Y71)	哈尔里克山北坡 ^[19]
	白杨河流域 (5Y72)	博格达峰北坡 ^[18]
	玛纳斯河等流域 (5Y73)	乌鲁木齐河 ^[18, 24, 25] 、头屯河 ^[18, 24] 、三屯河 ^[24] 、呼图壁河流域 ^[24]
吐鲁番—哈密盆地内流水系 (5Y8)	艾比湖流域 (5Y74)	奎屯河 ^[18] 、四棵河流域 ^[22]
	艾丁湖流域 (5Y81)	博格达峰南坡 ^[18]
	庙尔沟等流域 (5Y82)	哈尔里克山南坡 ^[19]

(注: |流域名后括号内给出的是该流域在冰川编目中的编码。Electronic Publishing House. All rights reserved. http://w

式中, ΔS 为冰川变化面积 (km^2), S_0 为初始状态下冰川面积 (km^2), Δt 为研究时段的年限 (a)。

不同流域的冰川分布并不均匀, 算术平均可能会放大某些冰川规模偏小的流域所占比例, 因此对天山冰川变化进行总体评估时应考虑其权重。设本研究涉及 i 个三级流域, 每个三级流域下分别有 j 项研究文献, 该研究文献内初始冰川面积为 S_{0ij} , 冰川变化量为 ΔS_{ij} , 研究时段为 Δt_{ij} , 初始时间为 t_{0ij} , 其中 $i, j = 1, 2, 3, \dots$ 。在不考虑文献间研究时段差异的情况下, 整个天山冰川退缩比例为:

$$\frac{\Delta S}{S_0} = \sum_{i=0}^n \left(\frac{S'_i \sum_{j=0}^n \Delta S_{ij}}{S' \sum_{j=0}^n S_{0ij}} \right) \quad (2)$$

式中, S'_i 为该三级流域内冰川的面积, S' 为整个中国天山冰川的面积。 S'_i 与 S' 根据美国国家雪冰数据中心 (National Snow and Ice Data Center, 简称 NSIDC) 网站提供的世界冰川编目 (World Glacier Inventory, 简称 WGI) 资料计算而来。

假设单个文献中冰川在单位时间内面积变化量不变, 那么就可以利用差值的方法将各项研究中的时段统一化。从 1960 年至 T 年 ($1960 < T < 2010$, 如果取 $1990 \leq T \leq 2006$ 则可能更为可靠) 的冰川面积变化率即为:

$$\frac{\Delta S}{S_0} = \sum_{i=0}^n \left\{ \frac{S'_i \sum_{j=0}^n \left[\frac{\Delta S_{ij}}{\Delta t_{ij}} (T - 1960) \right]}{S' \sum_{j=0}^n \left[S_{0ij} + \frac{\Delta S_{ij}}{\Delta t_{ij}} (t_{0ij} - 1960) \right]} \right\} \quad (3)$$

同时也可以得到冰川面积年均变化率为

$$APAC = \sum_{i=0}^n \left\{ \frac{S'_i \sum_{j=0}^n \frac{\Delta S_{ij}}{\Delta t_{ij}}}{S' \sum_{j=0}^n \left[S_{0ij} + \frac{\Delta S_{ij}}{\Delta t_{ij}} (t_{0ij} - 1960) \right]} \right\} \quad (4)$$

需要说明的一点是, 这样算出的冰川面积年均变化速率在不同年份是恒定的, 因为前面已假设单位时间内面积变化量不变。

2.2 气象数据

天山地区气象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据共享服务网提供, 年限取为 1960-2009 年。参考天山山脊线范围^[13], 我们选取了 14 个气象站 (分别为温泉、奇台、昭苏、乌鲁木齐、巴仑台、达坂城、十三间房、库米什、巴音布鲁克、拜城、吐尔尕特、阿合奇、巴里坤、伊吾), 以此反映天山地区近 50 年气温与降水量变化趋势 (图 1)。

本研究利用一元回归分析法进行气温与降水量变化的趋势分析, 并且在 ArcGIS 9.2 软件中通过反距离加权 (Inverse Distance Weighted, 简称 IDW) 插值法绘制出气候变化的空间分布图, 进行年际变化的空间差异分析。这种将一元回归分析与空间差值相结合的方法已广泛运用于祁连山^[27]、横断山脉^[28]等山区的气候变化研究中。

3 结果

3.1 近 50 年来天山冰川面积变化趋势

天山山脉涉及的冰川众多, 以所有冰川作为对象的面积变化研究在短期可能难以完成, 在实践中常选取部分冰川来估算整个天山冰川的状况。丁永建等^[17]分析了天山地区 960 条

冰川的面积变化情况,在20世纪60年代以后的30~40年天山冰川总面积减少了4.7%,略高于西部冰川平均水平(4.5%)。之后,李忠勤等^[18]研究了新疆1800条冰川(其中天山地区为1543条)的面积变化情况,20世纪60-70年代到本世纪初冰川总面积缩小了11.7%。

采用类似的方法,我们也将天山各三级流域冰川面积变化数据进行了统计(表1)。之前的研究对于冰川的分布差异考虑较少,在估算天山冰川退缩情况时往往并没有讨论各区域冰川的权重。本研究根据各三级流域内冰川面积分布进行加权,结果表明近50年天山冰川的缩小比例为11.5%。如果假设文献中冰川面积在单位时间内的变化量不变,对研究时段外的冰川面积状况进行差值,我们可以得到,1960年以来年均退缩率为 $0.31\% a^{-1}$ 。

3.2 天山冰川面积变化的空间差异

为了了解天山不同区域间冰川面积变化的差异,这里按照三级流域分别标示出了本研究涉及区域的冰川面积年均退缩率(图2)。刘潮海等^[22]的早期研究表明天山西段属于较活动的冰川区,冰川面积年均退缩率达 0.19% ,而准噶尔内流区、吐鲁番—哈密盆地内流区属于较少活动的冰川区,年均退缩率为 0.15% ;也有学者根据冰川面积年均退缩率的高低,以 $0.1\% a^{-1}$ 和 $0.2\% a^{-1}$ 作为界限将中国西部的典型河流源区及山区冰川划分为3个水平^[17]。但上述研究的测算时段较早,仅反映了2000年以前甚至更早的水平,图2中近年来测算的天山冰川面积年均退缩率则明显高于 $0.2\% a^{-1}$ 。考虑到天山冰川的加速退缩现状,冰川面积年均退缩率的高低与时间段的选取有很大的关系。一般来说,越接近当前的研究得出的年均退缩率越高,这在伊犁河流域^[18, 22]、艾比湖流域^[18, 22]等地均得到了印证。

以乌鲁木齐河流域为例(按照三级流域划分,属于准噶尔内流水系玛纳斯河等流域的一部分),该流域靠近乌鲁木齐,且建有中国科学院天山冰川观测试验站,历史研究丰富。1959-1993年间冰川面积减少了 $5.98 km^2$,退缩率为 13% ,年均退缩率为 $0.38\% a^{-1}$ ^[24];1964-1992年间的研究也得出了类似的结论(退缩率为 13.8% ,年均退缩率为 $0.49\% a^{-1}$)^[25];但新近的一项研究显示1964-2005年间退缩率为 34.2% ,年均退缩率为 $0.83\% a^{-1}$ ^[18]。这3次研究的区域区域基本一致,只是在时间范围上有差异,对比后不难看出乌鲁木齐河流域冰川呈现出明显的加速消融态势。

就天山北坡而言,中部的玛纳斯河等流域退缩速度较快,年均退缩率从早期量算的 $0.4\% a^{-1}$ 附近迅速跃升至 $0.8\% a^{-1}$ 附近,东部的伊吾河流域退缩速度相对较慢。而南坡退缩最快的区域出现在东南部的吐鲁番—哈密盆地内流水系(特别是艾丁湖流域),最大可达 $0.6\% a^{-1}$ 附近。这种差异的产生与气候状况、冰川规模等均有关系。

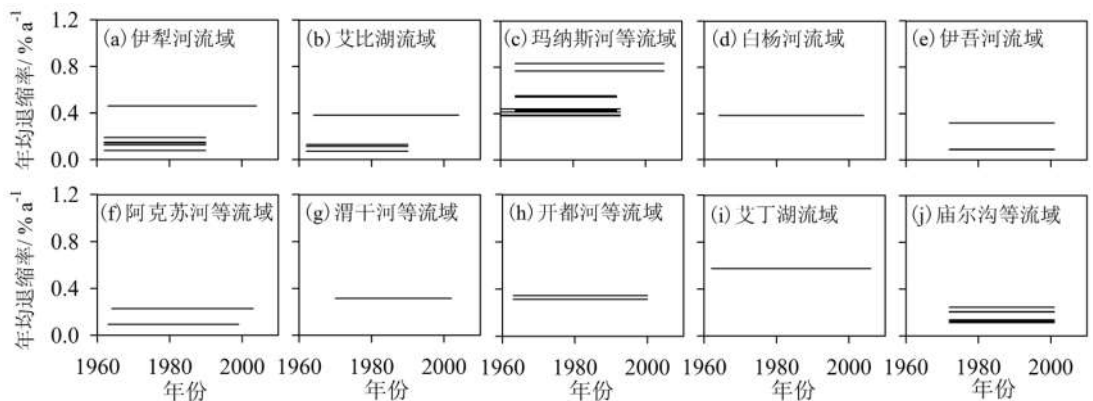


图2 1960-2009年间中国天山各流域冰川面积年均退缩率的变化情况

Fig. 2 APAC variations of glaciers in Chinese Tianshan Mountains for different drainage areas during 1960-2009

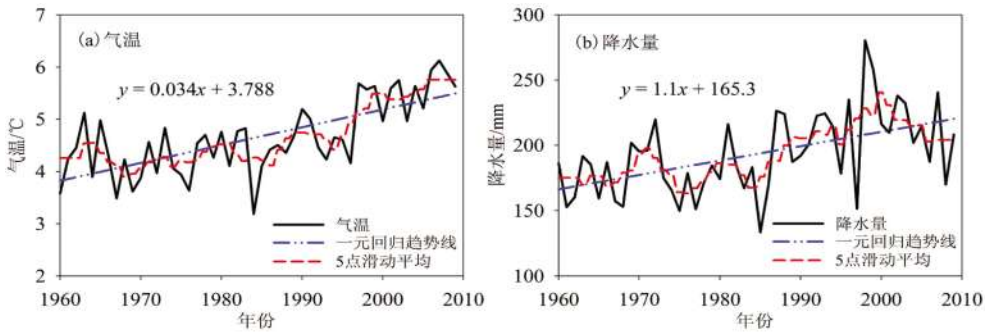


图3 1960-2009年间中国天山地区气温 (a) 与降水量 (b) 的变化情况

Fig. 3 Variations of temperature (a) and precipitation (b) in Chinese Tianshan Mountains during 1960-2009

4 讨论

4.1 气候变化趋势对冰川的影响

冰川面积变化受诸多因素的影响,但气候变化是其主导因素^[19, 19, 29-30]。研究表明,时间尺度愈长或空间范围愈大的冰川进退受气温的影响愈显著;降水量一般只对短时间尺度(如10年以下)和较小空间尺度的冰川进退有明显影响^[31]。近50年来,天山山区表现出明显的暖湿化趋势(图3)。14个气象站的气温倾向率平均值为 $0.34\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,也就是说近50年升高了 $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这一气温倾向率与新疆全境基本一致 $[0.33\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}]$,但明显高于全国平均值 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ^[32]。降水量倾向率平均值为 $11\text{ mm}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,相当于近50年增长了55 mm,倾向率略高于新疆全境平均值 $8.5\text{ mm}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ^[32]。

北半球山地冰川变化在大范围统计意义上滞后于气候变化12~13年左右^[33],但具体到天山冰川滞后期要短一些。20世纪50年代的低温多雨与60年代的高温少雨,造成了50年代末到70年代初的明显退缩^[15, 22];20世纪60年代末以后,气温与降水量都在波动中上升,70年代初到80年代部分冰川退缩速度减缓^[22],但总体上仍在退缩^[15],也有研究表明这一时期是冰川变化的一个转型时期^[34];20世纪90年代之后气温迅速上升,降水量的变化已经远远不能比拟气温升高带来的影响,冰川退缩幅度增大,且呈现出加速消融的态势^[22]。

4.2 干湿季气候差异对冰川的影响

冰川的消融存在着明显的季节性周期,因此有必要讨论不同季节气候变化对冰川产生的影响(图4)。参考天山乌鲁木齐河源1号冰川的研究,这里将4-10月划为湿季,11月-次年3月为干季^[35]。1960-2009年间,天山地区干季的气温倾向率平均值为 $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,高于湿季 $[0.25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}]$;而湿季降水量倾向率平均值为 $8.7\text{ mm}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,远高于干季 $[2.3\text{ mm}\cdot(10\text{ a})^{-1}]$ 。夏季平均气温降低和降水量增多相叠加是最有利于冰川发育的组合^[30]。一般来说,降水量显著增加有利于冰川的积累,而降落在冰川表面的固态降水增多,还可以增强反射率,抑制冰川消融^[30]。干季气温上升会缩短冰川积累期,增加消融期,而湿季对冰川消融的贡献则更为直接^[9]。长序列的气象资料表明,天山地区湿季气温仍在持续增长,而2000年以后降水量平均值开始回落,因此从总体上说降水量的增加远不能抵消升温对冰川变化带来的负面效应。

无论是干季还是湿季,中国天山东段增温都更为明显,而西段升温相对较弱(图4)。湿季降水量变化在空间分布上呈现出东段增幅小于西段、南坡增幅小于北坡的基本特征,天山东南部的吐鲁番-哈密盆地北缘是增幅最低的区域。天山水汽一方面源自西风气流携带的大西洋水汽,另一方面源自准噶尔西部山地缺口进入的北冰洋水汽,这也就导致天山北坡降水量多于南坡,西段多于东段^[13]。而上述气候变化的时空格局,会进一步加剧天山地区气温与降水量的分布差异。

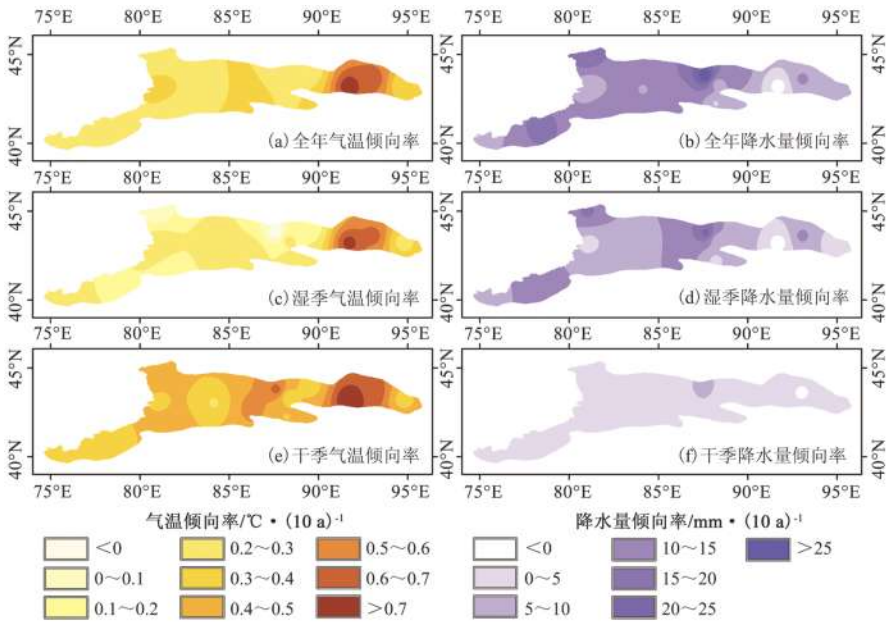


图4 1960-2009年间中国天山地区气温与降水量变化趋势分布图

Fig. 4 Distribution of temperature and precipitation variations in Chinese Tianshan Mountains during 1960-2009

4.3 气候变化空间差异对冰川的影响

尽管天山地区各三级流域在1960-2009年间普遍呈暖湿化趋势(图5),但天山山区东西相距较远,南北坡气候特征也有差异。图5表明,南坡的气温一般高于北坡,而降水量则普遍低于北坡。自20世纪80-90年代以来,各三级流域普遍开始快速升温,东南部的吐鲁番—哈密盆地内流水系近年来气温增幅更大。降水量亦呈增加趋势,20世纪90年代是一个降水量较高的时段,2000年以后大多数流域(除伊犁河流域外)降水量均保持稳定或略有回落。

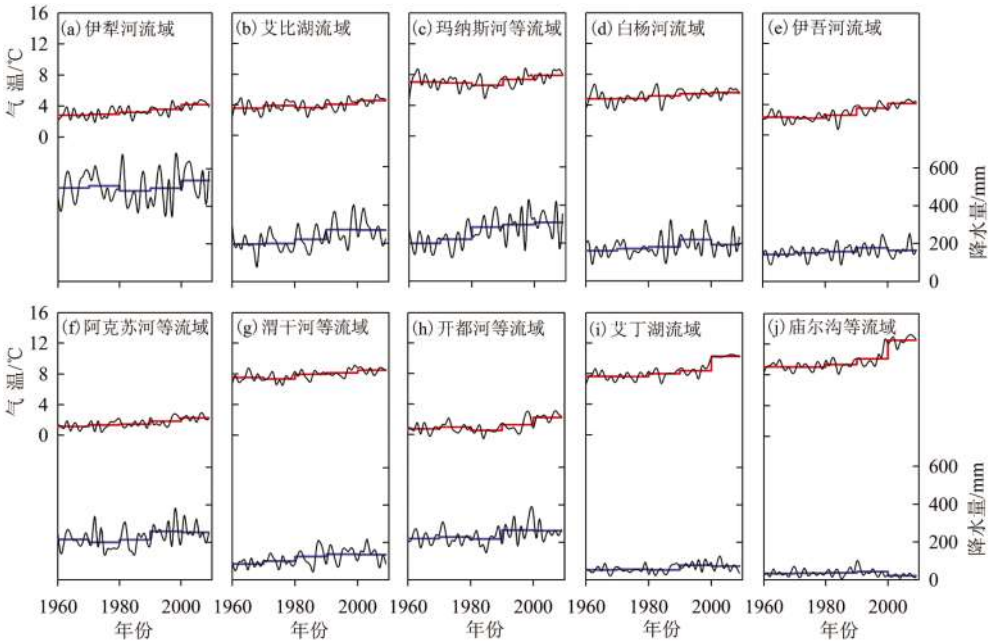


图5 1960-2009年间中国天山各流域气温与降水量变化情况(阶梯线段为年代际均值)

Fig. 5 Temperature and precipitation variations for different drainage areas in Chinese Tianshan Mountains during 1960-2009

上述差异也在一定程度上反映在了冰川变化特征上。例如艾丁湖流域,北接白杨河流域,西连开都河等流域,三个流域在空间上相邻,单条冰川的平均面积差别不大,分别为 0.47 km^2 、 0.43 km^2 和 0.56 km^2 。三者的气温倾向率分别为 $0.56 \text{ }^\circ\text{C}\cdot(10 \text{ a})^{-1}$ 、 $0.21 \text{ }^\circ\text{C}\cdot(10 \text{ a})^{-1}$ 和 $0.33 \text{ }^\circ\text{C}\cdot(10 \text{ a})^{-1}$;降水量倾向率分别为 $6.2 \text{ mm}\cdot(10 \text{ a})^{-1}$ 、 $11.3 \text{ mm}\cdot(10 \text{ a})^{-1}$ 与 $11.5 \text{ mm}\cdot(10 \text{ a})^{-1}$ 。而从近年量算的面积年均退缩率来看,艾丁湖流域明显要高于其他二者。当然,这种对应性并非简单适用于整个天山冰川,这主要是因为天山是一个复杂的山地自然地理综合体^[13],天山冰川的变化受到多方面因素的影响。另外,气象站点的代表性也可能影响分析结果。

4.4 冰川规模与退缩速度

不同规模的冰川对气候变化的敏感性存在差异^[36]。全球范围内,大冰川(长度大于5 km)对气温的响应滞后8年左右;小冰川(长度小于5 km)对气候的响应滞后2年左右^[37]。对比本研究涉及的文献资料中单条冰川平均面积与年均退缩率的关系(图6),可以看出年均退缩率的高值多出现在规模较小的冰川区,特别是单条面积小于 1 km^2 的冰川。在当前全球气候变暖的背景下,小冰川消融速度加剧。有研究预测,未来20~40年内天山北麓诸河流域中面积小于 1 km^2 的冰川将趋于消失^[18]。实际上,天山地区的10个三级流域中,仅塔里木内流水系西部的阿克苏河、渭干河等流域的单条冰川平均面积略大于 2 km^2 ,其余各流域均低于 1 km^2 。因此,基于这样的冰川规模体系,天山冰川的加速消融也在所难免。

5 结论与展望

统计天山地区各流域约3000条冰川的面积变化情况,运用面积权重法计算的结果表明近50年来天山冰川面积缩小了11.5%。尽管天山冰川面积变化与气候状况、冰川规模等因素都存在一定关系,但近50年升温是导致天山冰川加速消融的主要原因。

山岳冰川的进退是气候变化的重要指示剂。天山作为新疆的主要河流发源地,在生产生活中有着重要的地位。(1)在当前中国冰川普遍退缩的趋势下,应加强对不同类型冰川的定位或半定位观测,获取高精度的第一手资料,加之合理的模型估计,进一步丰富对天山冰川变化的认识。(2)在冰川影像解读的过程中常缺乏完全统一的标准,或在标准执行过程中仍存在着某些操作上的差异,从而对同一资料可能解读出不同的信息,这在一定程度上影响了结论的可交流性。因此,技术手段上的完善也对冰川变化信息解读有很大帮助。(3)定期开展大范围的冰川调查是十分必要的。中国冰川编目的完成是对我国冰川基本情况的首次普查,而近年来开展的中国冰川资源及其变化调查项目将对当前新疆天山地区气候暖湿化背景下冰川变化研究提供重要的依据^[38]。

参考文献 (References)

- [1] Liu Chaohai. Glacier resources and distributive characteristics in the Central Asia Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, 17(3): 193-203. [刘潮海. 中亚天山冰川资源及其分布特征. *冰川冻土*, 1995, 17(3): 193-203.]
- [2] Li Baolin, Zhu Axing, Zhang Yichi et al. Glacier change over the past four decades in the middle Chinese Tien Shan. *Journal of Glaciology*, 2006, 52(178): 425-432.
- [3] Aizen V B, Kuzmichenok V A, Surazakov A B et al. Glacier changes in the central and northern Tien Shan during the last 140 years based on surface and remote-sensing data. *Annals of Glaciology*, 2006, 43(1): 202-213.

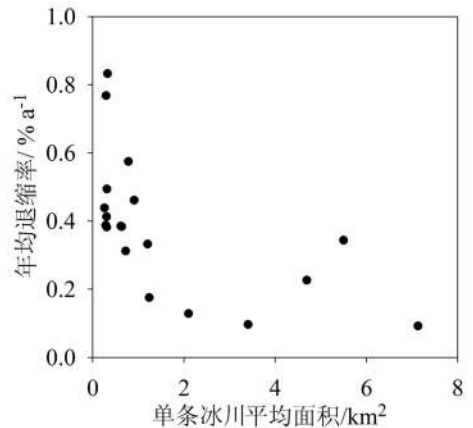


图6 单条冰川平均面积与年均退缩率的关系
Fig. 6 Relationship between mean area for single glacier and APAC

- [4] Bolch T. Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data. *Global and Planetary Change*, 2007, 56(1-2): 1-12.
- [5] Kutuzov S. Glacier retreat and climatic variability in the eastern Terskey-Alatau, inner Tien Shan between the middle of the 19th century and beginning of the 21st century. *Global and Planetary Change*, 2009, 69(1/2): 59-70.
- [6] Narama C, Kaab A. Spatial variability of recent glacier area changes in the Tien Shan Mountains, Central Asia, using Corona (~1970), Landsat (~2000), and ALOS (~2007) satellite data. *Global and Planetary Change*, 2010, 71(1-2): 42-54.
- [7] Haeberli W, Hoelzle M, Paul F et al. Integrated monitoring of mountain glaciers as key indicators of global climate change: the European Alps. *Annals of Glaciology*, 2007, 46(1): 150-160.
- [8] Hoelzle M, Chinn T, Stumm D et al. The application of glacier inventory data for estimating past climate change effects on mountain glaciers. *Global and Planetary Change*, 2007, 56(1-2): 69-82.
- [9] Wu Yanhong, Zhu Liping. The response of lake-glacier variations to climate change in Nam Co Catchment, central Tibetan Plateau, during 1970-2000. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(2): 177-189.
- [10] Li Zongxing, He Yuanqing, Wang Shijin et al. Changes of some monsoonal temperate glaciers in Hengduan Mountains Region during 1900-2007. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1319-1330. [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. *地理学报*, 2009, 64(11): 1319-1330.]
- [11] Bolch T, Menounos B, Wheate R. Landsat-based inventory of glaciers in western Canada, 1985-2005. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(1): 127-137.
- [12] Nie Yong, Zhang Yili, Liu Linshan et al. Glacial change in the vicinity of Mt. Qomolangma (Everest), central high Himalayas since 1976. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(5): 667-686.
- [13] Hu Ruji. *Physical Geography of the Tianshan Mountains in China*. Beijing: China Environmental Science Press, 2004: 1-14, 180-198. [胡汝驥. 中国天山自然地理. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 1-14, 180-198.]
- [14] Shi Yafeng. *Glaciers and Related Environments in China*. Beijing: Science Press, 2008: 42-51.
- [15] Ren Binghui. Existing glacier fluctuation and its relation to the climatological changes in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1988, 10(3): 244-249. [任炳辉. 我国现代冰川变化及其与气候变化的关系. *冰川冻土*, 1988, 10(3): 244-249.]
- [16] Li Zhongqin, Han Tianding, Jing Zhefan et al. A summary of 40-year observed variation facts of climate and Glacier No.1 at headwater of Urumqi River, Tianshan, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 117-123. [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40 a观测事实. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 117-123.]
- [17] Ding Yongjian, Liu Shiyin, Li Jing et al. The retreat of glaciers in response to recent climate warming in western China. *Annals of Glaciology*, 2006, 43(1): 97-105.
- [18] Li Zhongqin, Li Kaiming, Wang Lin. Study on recent glacier changes and their impact on water resources in Xinjiang, Northwestern China. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(1): 96-106. [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. *第四纪研究*, 2010, 30(1): 96-106.]
- [19] Wang Yetang, Hou Shugui, Liu Yaping. Glacier changes in the Karlik Shan, eastern Tien Shan, during 1971/72-2001/02. *Annals of Glaciology*, 2010, 50(53): 39-45.
- [20] Yao Yonghui, Li Huiguo, Zhang Baiping. Glacier changes in the past 30 years at the east watershed of Mt. Tomor. *Arid Land Geography*, 2009, 32(6): 828-833. [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. *干旱区地理*, 2009, 32(6): 828-833.]
- [21] Wang Xin, Xie Zichu, Li Qiaoyuan et al. Sensitivity analysis of glacier systems to climate warming in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(2): 190-200.
- [22] Liu Chaohai, Kang Ersi, Liu Shiyin et al. Study on the glacier variation and its runoff responses in the arid region of Northwest China. *Science in China: Series D*, 1999, 42(suppl.): 64-71.
- [23] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Shanguan Donghui et al. Glacier retreat as a result of climate warming and increased precipitation in the Tarim River Basin, Northwest China. *Annals of Glaciology*, 2006, 43(1): 91-96.
- [24] Kang Ersi. A study on changes of the glacier system and its runoff at the north flank of the Tianger Mountain in the Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(suppl.): 60-74. [康尔泗. 天山天格尔山北坡冰川系统及其径流变化研究. *冰川冻土*, 1996, 18(增刊): 60-74.]
- [25] Chen Jianming, Liu Chaohai. Application of the repeated aerial photogrammetry to monitoring glacier variation in the drainage area of the Urumqi River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(4): 331-336. [陈建明, 刘渤海. 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. *冰川冻土*, 1996, 18(4): 331-336.]
- [26] Wang Shuhong, Xie Zichu, Li Qiaoyuan. Comparison study of glacier variations in East and West Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(6): 946-953. [王淑红, 谢自楚, 李巧媛. 近期东西天山冰川变化的对比研究. *冰川冻土*, 2008, 30(6): 946-953.]
- [27] Jia Wenxiang, He Yuanqing, Li Zongxing et al. The regional difference and catastrophe of climatic change in Qilian Mt.

- Region. *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. *地理学报*, 2008, 63(3): 257-269.]
- [28] Li Zongxing, He Yuanqing, Xin Huijuan et al. Spatio-temporal variations of temperature and precipitation in Mts. Hengduan Region during 1960-2008. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(5): 563-579. [李宗省, 何元庆, 辛惠娟 等. 我国横断山区 1960-2008 年气温和降水时空变化特征. *地理学报*, 2010, 65(5): 563-579.]
- [29] Duan Jianping, Wang Lily, Ren Jiawen et al. Progress in glacier variations in China and its sensitivity to climatic change during the past century. *Progress in Geography*, 2009, 28(2): 231-237. [段建平, 王丽丽, 任贾文 等. 近百年来中国冰川变化及其对气候变化的敏感性研究进展. *地理科学进展*, 2009, 28(2): 231-237.]
- [30] Kang Ersi. *Glacier-snow Water Resources and Mountain Runoff in the Arid Area of Northwest China*. Beijing: Science Press, 2002: 33-37. [康尔泗. 中国西北干旱区冰雪水资源与出山径流. 北京: 科学出版社, 2002: 33-37.]
- [31] Gao Xiaoqing, Tang Maocang. Discussion on the relationship between glacial fluctuation and climate change. *Plateau Meteorology*, 2000, 19(1): 9-16. [高晓清, 汤懋苍. 冰川变化与气候变化关系的若干探讨. *高原气象*, 2000, 19(1): 9-16.]
- [32] Liu Bo. Characteristics of climate changes in Xinjiang from 1960 to 2005. *Climatic and Environmental Research*, 2009, 14 (4): 414-426. [刘波. 1960~2005 年新疆气候变化的基本特征. *气候与环境研究*, 2009, 14 (4): 414-426.]
- [33] Wang Ninglian. Mountain glacier fluctuations and climatic change during the last 100 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1992, 14(3): 242-250. [王宁练. 近百年来山地冰川波动与气候变化. *冰川冻土*, 1992, 14(3): 242-250.]
- [34] Dyurgerov M B, Meier M F. Twentieth century climate change: Evidence from small glaciers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2000, 97(4): 1406-1411.
- [35] Li Zhongqin, Wang Wenbin, Wang Feiteng. Characteristics of ionic concentration and $\delta^{18}\text{O}$ and their variability in dry-season and wet-season snow on Urumqi glacier No.1, eastern Tien Shan. *Annals of Glaciology*, 2008, 49(1): 217-223.
- [36] Ye Baisheng, Ding Yongjian, Liu Chaohai. Response of valley glaciers in various sizes and their runoff to climate change. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(2): 103-110. [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. *冰川冻土*, 2001, 23(2): 103-110.]
- [37] Ding Yongjian. Global glacial fluctuations in response to climatic change in the past 40 a. *Science in China(Series D)*, 1996, 39(1): 66-73.
- [38] Shi Yafeng, Liu Chaohai, Kang Ersi. The Glacier Inventory of China. *Annals of Glaciology*, 2010, 50(53): 1-4.

Response of Glacier Area Variation to Climate Change in Chinese Tianshan Mountains in the Past 50 Years

WANG Shengjie¹, ZHANG Mingjun^{1,2}, LI Zhongqin^{2,1}, WANG Feiteng²,
LI Huilin², LI Yaju¹, HUANG Xiaoyan¹

(1. College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences/Tianshan Glaciological Station,

Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the statistics of glacier area variation measured in Chinese Tianshan Mountains since 1960, the response of glacier area variation to climate change is discussed systematically. Results show that the total area of the glaciers has reduced by 11.5% in the past 50 years, which is a weighted percentage according to the glacier areas of 10 drainage areas divided by Glacier Inventory of China. The annual percentage of area changes (APAC) of glaciers in the Tianshan Mountains is 0.31%, after the standardization of the study period. According to the 14 meteorological stations in the Tianshan Mountains, both the temperature and precipitation display a marked increasing tendency from 1960 to 2009 with a rate of $0.34\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ and $11\text{ mm}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, respectively. The temperature in dry seasons (from November to March) increases rapidly with a rate of $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, but the precipitation grows slowly at $2.3\text{ mm}\cdot(10\text{ a})^{-1}$; while the temperature in wet seasons (from April to October) grows with a rate of $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, but the precipitation increases at $8.7\text{ mm}\cdot(10\text{ a})^{-1}$.

Key words: Tianshan Mountains, glacier variation, glacier area, climate change