

近50年气候变化背景下中国冰川面积状况分析

张明军¹, 王圣杰¹, 李忠勤^{1,2}, 王飞腾²

(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/天山冰川站, 兰州 730000)

摘要:根据近年来中国典型区域冰川面积变化遥感监测数据,结合139个地面站的气温、降水量与28个探空站的0℃层高度气象资料,分析了近50年气候变化背景下中国冰川面积状况。结果表明,研究区冰川面积从20世纪60-70年代的23982 km²减小到21世纪初的21893 km²,根据冰川分布进行加权计算后冰川面积退缩了10.1%,对时间插补后得到1960年以来的冰川面积年均变化率为0.3%·a⁻¹。就冰川面积变化的空间分布特征而言,天山的伊犁河流域、准噶尔内流水系、阿尔泰山的鄂毕河流域、祁连山的河西内流水系等都是冰川退缩程度较高的区域。近50年中国冰川区夏季地面气温与大气0℃层高度均呈上升趋势,而降水量的增幅却相对轻微,增长的降水量不足以抵消升温对冰川的影响,气候变暖是影响冰川面积变化的主要因素。

关键词:气候变化;冰川;气温;降水量;0℃层高度

1 引言

中国是中低纬度地区山岳冰川最发育的国家,根据中国冰川编目统计共有冰川46377条,总面积59425 km²,冰储量5600 km³^[1]。近几十年来,中国冰川普遍呈现出加速退缩的状态^[2-5]。冰川的消融与积累有其气候背景,气温与降水量及其组合是影响冰川发育的主要气候因子^[1]。对亚洲内陆典型冰川的研究表明,夏季气温升高1℃会引起冰川平衡线海拔高度升高52~152 m,年降水量增加100 mm会引起平衡线海拔降低9~85 m^[6]。但是,随着中国西部气温的持续升高,降水量变化对冰川的影响可能远不如气温显著升高带来的效应强烈^[7-8]。施雅风等^[9]综合考虑21世纪中国冰川对全球变暖响应,预计到2100年中国冰川面积和体积的减小率在30%到67%之间。谢自楚等^[10]假设升温率保持0.01 K·a⁻¹、0.03 K·a⁻¹与0.05 K·a⁻¹时,到21世纪末中国冰川面积将分别减少14%、40%与60%。

随着Landsat TM/ETM+、ASTER、SPOT等遥感影像的广泛应用^[11],加之中国长期气象观测记录的建立^[12],针对小区域内冰川变化与气候变化之间关系的研究越来越多^[13-15]。在小区域研究的基础上,一些学者开始进行总结,进而评估更大空间尺度上的冰川变化及其气候背景,如塔里木河流域^[16]、喜马拉雅山区^[17]、天山山区^[18]等。与此同时,针对整个中国冰川变化及其气候背景的评估也逐渐开展起来。有学者统计了20世纪60年代以后近30~40年内中

收稿日期: 2011-03-22; 修订日期: 2011-06-07

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计划(973)项目(2010CB951003); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-311); 西北师范大学知识与科技创新工程创新团队项目(NWNU-KJCXGC-03-66) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41161012; Program for New Century Excellent Talents in University by the Education Ministry of China, No.NCET-10-0019; Foundation for Young Innovative Scientists in Gansu Province; National Basic Research Program of China, No.2010CB951003; Knowledge Innovation Project of CAS, No.KZCX2-EW-311; Knowledge and Technological Innovation Project of Northwest Normal University, No.NWNU-KJCXGC-03-66]

作者简介: 张明军(1975-),男,教授,博导,中国地理学会会员(S110007775M),主要从事气候变化与冰川研究。

E-mail: mjzhang2004@163.com

国不同区域 5020 条冰川的面积变化^[3],研究表明其面积由 $(14424.4 \pm 679) \text{ km}^2$ 缩小了 $(654.3 \pm 27.2) \text{ km}^2$,退缩率为 4.5%。然而,之前的综合性讨论多侧重于冰川变化的事实对比,定量研究的采样区仍十分有限,且对近年的研究成果涉及较少。因此,本研究基于近 50 年来不同区域冰川变化情况评估中国冰川面积变化现状,并结合气象资料探讨其与气候的关系。

2 数据与方法

2.1 冰川变化资料

冰川面积作为冰川的基本属性之一,在一定程度上可以反映出局地乃至较大区域的气候变化^[18-19]。本研究收集了 2002 年以后,特别是近年发表的有关中国冰川面积变化的相关文献,以反映自 20 世纪 60-70 年代至 21 世纪初中国冰川面积的变化情况(表 1)。研究涉及冰川面积总计 $2.4 \times 10^4 \text{ km}^2$,占中国冰川总面积的 40.4%。参照中国冰川编目^[1]与各区域研究文献的丰富程度,将中国冰川大致划分为 3 个大区(即西北干旱区、青藏内流区与青藏外流区),共 10 个统计单元。其名称及冰川编目编码分别为中亚内陆流域(5X)、河西内流水系与柴达木内流水系(5Y4、5Y5)、塔里木内流水系(5Y6)、准噶尔内流水系与科布多河流域(5Y7、5Y1)、吐鲁番—哈密盆地内流水系(5Y8)、鄂毕河流域(5A)、青藏高原内流水系(5Z)、黄河流域(5J)、长江、湄公河与萨尔温江流域(5K、5L、5N)、恒河与印度河流域(5O、5Q)。

冰川面积的年均变化率(annual percentages of area changes,简称 APAC)已被广泛运用于不同时空尺度下冰川变化程度的比较^[3, 18]。由于变化率多为负值,以下冰川面积年均变化率一般指年均退缩率。设本研究涉及 i 个统计单元,每个统计单元下分别有 j 项研究文献,该研究文献内初始冰川面积为 S_{0j} ,冰川变化量为 ΔS_{ij} ,研究时段为 Δt_{ij} ,初始时间为 t_{0j} ,各统计单元内冰川的面积为 S_i ,其中 $i, j = 1, 2, 3, \dots$ 。根据在天山地区的初步研究^[18],本研究确定了如下的计算流程。在不考虑文献间研究时段差异的情况下,整个中国冰川面积退缩比例为:

表 1 中国冰川面积变化数据来源
Tab. 1 Data sources of glacier area variation in China

地区	统计单元	采样率 / %	采样面积 / km^2	研究时段	近期遥感数据类型
西北干旱区	中亚内陆流域 ^[20]	13.0	266	1963-2004	ASTER
	河西内流水系与柴达木内流水系 ^[21-25]	22.4	715	1950s/1960s/1970s-2000s	TM/ETM+/ASTER
	塔里木内流水系 ^[20, 26-30]	56.8	11290	1960s/1970s-1999/2000s	TM/ETM+/ASTER/SPOT
	准噶尔内流水系与科布多河流域 ^[14, 20, 31]	14.1	318	1959/1960s/1970s-2000s	ETM+/ASTER/SPOT
	吐鲁番—哈密盆地内流水系 ^[14, 20]	62.6	158	1962/1970s-2000s	ETM+/ASTER
	鄂毕河流域 ^[31]	95.2	275	1959-2000	ETM+
青藏内流区	青藏高原内流水系 ^[13, 32-34]	9.1	715	1970s-2000s	ETM+/ASTER
	黄河流域 ^[22, 35]	94.6	164	1960s-2000s	TM/ETM+
青藏外流区	长江、湄公河与萨尔温江流域 ^[36-40]	56.7	2233	1957/1960s-1999/2000s	TM/ETM+
	恒河与印度河流域 ^[15, 32, 41-47]	40.1	7849	1970s/1980-2000s	TM/ETM+/ASTER/CBERS/ALOS
合计		40.4	23982		

$$\frac{\Delta S}{S_0} = \sum_{i=0}^n \left(\frac{S_i}{\sum_{i=0}^n S_i} \frac{\sum_{j=0}^n \Delta S_{ij}}{\sum_{j=0}^n S_{0ij}} \right) \quad (1)$$

利用插补的方法可以得到 1960 年以来各统计单元内冰川面积年均变化率为

$$APAC_i = \frac{\sum_{j=0}^n \frac{\Delta S_{ij}}{\Delta t_{ij}}}{\sum_{j=0}^n \left[S_{0ij} + (t_{0ij} - 1960) \frac{\Delta S_{ij}}{\Delta t_{ij}} \right]} \quad (2)$$

整个中国冰川面积年均变化率为

$$APAC = \frac{\sum_{i=0}^n \left\{ S_i \frac{\sum_{j=0}^n \frac{\Delta S_{ij}}{\Delta t_{ij}}}{\sum_{j=0}^n \left[S_{0ij} + (t_{0ij} - 1960) \frac{\Delta S_{ij}}{\Delta t_{ij}} \right]} \right\}}{\sum_{i=0}^n S_i} \quad (3)$$

2.2 气候变化资料

本研究使用的气候变化资料由中国气象局国家气象信息中心提供。为了反映中国冰川区 1960-2009 年间主要气候指标的变化情况, 本研究选取地面站 139 个, 探空站 28 个。地面站资料为夏季(6-8 月)的气温、降水量与降水日数, 探空站资料为夏季(6-8 月)北京时间 8 时大气 0 °C 层高度。气温、降水量、降水日数与 0 °C 层高度的年际变化趋势利用一元回归分析法进行分析^[18, 48]。

3 近 50 年中国冰川变化趋势及其气候背景

3.1 中国冰川变化的总趋势评估

对于典型冰川的变化情况一般可以通过长期的定位或半定位观测获知, 而对于大区域的冰川变化则需要借助遥感等技术手段才能完成。根据本研究整理的冰川面积遥感监测结果, 研究区冰川面积从 20 世纪 60-70 年代的 23982 km² 减小到 21 世纪初的 21893 km²。按照中国冰川编目^[1]对各统计单元的冰川面积进行加权, 结果表明自 20 世纪 60-70 年代至 21 世纪初中国冰川面积减小了 10.1%。

为使得结果具有较好的可比性, 并进一步对中国冰川面积年均变化程度进行评估, 本研究对不同文献间的时间差异进行了插补, 于是得到 1960 年以来的中国冰川面积年均变化率为 0.3% a⁻¹。与之前有关中国大范围冰川面积变化的研究^[2-3](研究时段的下界大多在 2000 年附近) 对比, 这一变化率要高于之前的报道。

3.2 气候变化趋势对冰川的潜在影响

气温决定冰川的消融, 降水量决定冰川的积累, 它们的组合共同决定着冰川的性质、发育和演化^[1]。与欧洲以冬季补给为主的冰川不同, 中国大多数山地冰川积累和消融同时发生在夏季^[1], 夏季的气候变化情况对冰川面积具有决定性的影响^[49]。因此, 本研究着重讨论夏季气候与冰川变化的关系。

1960-2009 年夏季的气象资料表明, 中国冰川区总体呈暖湿化趋势(图 1a、图 1b)。139 个地面站的平均气温倾向率为 0.22 °C·(10 a)⁻¹, 相当于近 50 年夏季气温升高了 1.1 °C; 平均

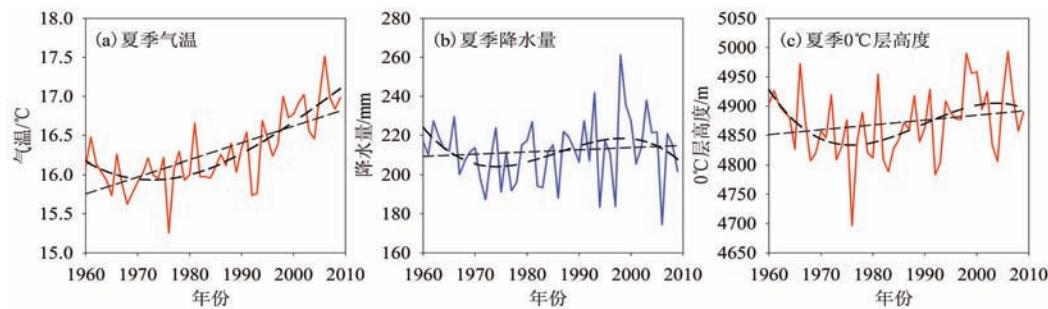


图1 1960-2009年夏季中国冰川邻近区域的气温(a)、降水量(b)与0℃层高度(c)的变化情况

Fig. 1 Variations of air temperature (a), precipitation (b) and 0°C isotherm height (c) in summer during 1960-2009 near the glacier area in China

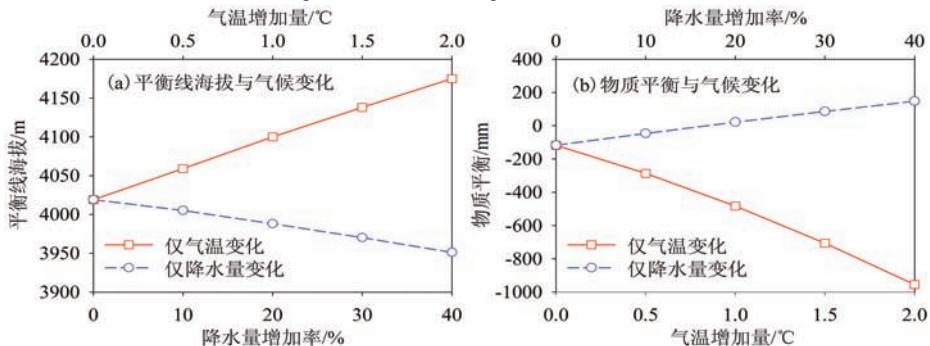


图2 天山乌鲁木齐河源1号冰川平衡线海拔(a)与物质平衡(b)对气温、降水量变化的响应情况^[7]

Fig. 2 Effect of air temperature and precipitation change on equilibrium line altitude (a) and mass balance (b) of Glacier No.1 at the headwaters of Urumqi River in Tianshan Mountains^[7]

降水量倾向率为 $1.1 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,相当于近50年增加了5.7 mm。气温在20世纪80年代之后处于持续的增加状态,1960年以来的气温年代际平均值分别为 16°C (1960-1969年)、 16°C (1970-1979年)、 16.1°C (1980-1989年)、 16.4°C (1990-1999年)与 16.9°C (2000-2009年)。与之对应,降水量的年代际平均值分别为214.6 mm、203.6 mm、210.1 mm、217.4 mm与213.9 mm,呈现出较为微弱的波动。

冰川的进退对气温与降水量变化的响应是有差异的(图2)。以天山乌鲁木齐河源1号冰川^[7]为例,如果气温升高 0.5°C ,平衡线将从4019 m上升到4059 m,若以降水量的增加来使平衡线恢复至原海拔位置则需要增加25%的降水量;当气温升高 1°C 时,对应的降水量则需要增加47%。若以物质平衡代替平衡线海拔计算,其结果类似,气温升高 0.5°C 对应降水量增加25%,气温升高 1°C 对应着降水量增加56%。在中国西部,近50年气温增长 1°C 的区域十分常见,而降水量升高50%以上的站点却相对很少。尽管这样的估算仅根据单条冰川进行,但参考中国冰冻圈其他几条冰川的类似研究^[6]来看,这一趋势是必然的。就本研究中的139个地面气象站而言,中国冰川区的夏季气温上升明显,而降水量的增幅轻微。在此气候背景下,冰川的退缩是难免的。

大气 0°C 层受到观测场环境影响较少,其变化能较好地反映该区域气候变化特征^[50-51]。28个探空站的资料表明(图1c),1960-2009年间 0°C 层高度总体呈现出上升趋势,倾向率为 $8.3 \text{ m} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。具体说来,20世纪60-70年代大致呈下降趋势,其中,60年代平均值为4880 m,70年代则降低至4838.4 m。20世纪80年代以后 0°C 层高度开始持续回升,80年代为4852.1 m,90年代为4887.7 m,2000年以后则上升至4898.8 m。若以1960-1989年的30年作为基准,1990-2009年间 0°C 层高度比基准值升高了36.4 m。这与之前在新疆的研究结果^[51]是类似的。

0 °C 层高度的变化强烈地影响着中低纬高海拔地区冰川^[52-53]。在天山乌鲁木齐河源 1 号冰川^[50]开展的研究表明, 夏季 0 °C 层高度与冰川的零平衡海拔、消融区面积、纯物质消融量和融水径流深正相关, 而与积累区面积、纯积累量、纯物质平衡总量、纯物质平衡值负相关。在祁连山七一冰川^[54]开展的研究也表明, 夏季 0 °C 层高度与冰舌末端温度的相关系数为 0.927, 与冰舌消融量相关系数为 0.771, 即夏季 0 °C 层高度越高, 冰舌消融量越大。1960-2009 年间夏季 0 °C 层平均高度为 4871.4 m, 近 10 年来这一高度在 4805 m 与 4993.4 m 之间波动。实际上, 中国有不少冰川区(特别是西北干旱区)的雪线都在这一平均值以下^[1]。

4 中国冰川变化的空间差异及其气候背景

4.1 近年来冰川变化遥感监测研究现状

近年来运用遥感技术监测冰川变化已经普及, 在中国冰川区开展了大量研究。这里按照西北干旱区、青藏内流区与青藏外流区, 分别对近年冰川变化遥感监测的现状做一概述。

本研究中的西北干旱区大致包括冰川编目中的中亚内陆流域、东亚内陆流域和鄂毕河流域, 其中, 东亚内陆流域又被划分为河西内流水系与柴达木内流水系、塔里木内流水系、准噶尔内流水系与科布多河流域、吐鲁番—哈密盆地内流水系等统计单元。由于冰川水资源在中国西北干旱区具有重要的现实意义, 因此冰川与气候变化一直以来都是这一区域的研究热点^[55]。根据冰川编目^[1], 该区域分布有冰川 22086 条, 面积 27922 km², 冰储量 2814 km³, 分别占到全国总量的 48%、47% 和 50%, 冰川平均面积 1.3 km², 大多属于亚大陆型冰川, 极大陆型冰川也有分布。中亚内陆流域冰川在中国境内主要分布于伊犁河上游, 近年来在其所属的喀什河流域^[55]与库克苏河流域^[20]先后进行过研究。河西内流水系与柴达木内流水系位于青藏高原东北部, 区域北部的祁连山区研究较为丰富^[21-25, 56], 流域南部的新青峰冰帽、马兰冰帽(部分属青藏高原内流区)也有少量报道^[57]。塔里木内流水系的研究也一直较多^[20, 26-30], 塔里木盆地周边各区域都有覆盖。准噶尔内流水系南部(即天山北坡)近年来出现了不少研究^[14, 20, 55, 58], 水系北部以及科布多河流域冰川规模很小, 个别研究也有涉及^[31]。吐鲁番—哈密盆地内流水系位于天山东段南坡, 相关研究在博格达峰南坡^[20]、哈尔里克山南坡^[14, 58]都有所开展。鄂毕河流域在中国境内即为额尔齐斯河流域, 近期有学者对该区域的冰川变化作了较为全面的研究^[31]。西北干旱区 65 个地面站与 15 个探空站 1960-2009 年间的气象资料表明, 气温倾向率平均值为 0.22 °C·(10 a)⁻¹, 0 °C 层高度倾向率平均值为 7.5 m·(10 a)⁻¹, 降水量倾向率平均值为 3.7 mm·(10 a)⁻¹, 降水日数倾向率平均值为 0.3 d·(10 a)⁻¹。

青藏高原内流区北起昆仑山, 南至冈底斯山, 分布有冰川 5341 条, 面积 7836 km², 冰储量 777 km³, 分别占到全国的 12%、13% 和 14%, 冰川平均面积 1.5 km², 以极大陆型冰川为主, 也包括部分亚大陆型冰川^[1]。目前的冰川变化研究主要集中于 2 个地区, 即念青唐古拉山西北坡的纳木错流域^[13, 32-33]与西喜马拉雅山北坡的玛旁雍错流域^[34, 59-60]。根据这一区域 4 个地面站 1960-2009 年间的气象资料分析可得, 气温倾向率平均值为 0.14 °C·(10 a)⁻¹, 降水量倾向率平均值为 8.6 mm·(10 a)⁻¹, 降水日数倾向率平均值为 1.2 d·(10 a)⁻¹。

本研究中的青藏高原外流区大致包括黄河、长江、湄公河、萨尔温江、恒河与印度河流域, 分布有冰川 18950 条, 面积 23667 km², 冰储量 2009 km³, 分别占到全国的 41%、40% 和 36%, 冰川平均面积 1.2 km², 海洋型、亚大陆型、极大陆型冰川均有分布^[1]。目前, 冰川变化遥感监测研究在黄河、长江与恒河流域开展较多。其中, 黄河流域的研究主要分布于黄河源区阿尼玛卿山^[35, 61]与祁连山东段冷龙岭南坡^[22-23]; 在长江流域的各拉丹冬地区^[36-37, 61]、冬克玛底地区^[40]、玉龙雪山^[38]和贡嘎山地区^[39]都有相关研究; 恒河流域冰川变化的遥感监测多出现在珠峰周边地区^[15, 41-43, 62-63]、纳木那尼峰地区(北坡为青藏高原内流区的玛旁雍错流域)^[46-47, 63-64]以及雅鲁藏布江流域^[32, 44-45]等。根据这一区域 70 个地面站与 13 个探空站 1960-2009 年间的气

象资料可得,气温倾向率平均值为 $0.21^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 0°C 层高度倾向率平均值为 $9.2\text{ m}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,降水量倾向率平均值为 $-1.7\text{ mm}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,降水日数倾向率平均值为 $-0.6\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 。

尽管上述各研究区的气候条件与冰川属性不尽相同,但将冰川变化记录与器测气象资料进行对比分析后,大多数研究都将冰川面积的缩小归因于近几十年来明显升高的气温以及增长相对缓慢或略微下降的降水量。

4.2 中国冰川与气候变化的空间格局

根据上述不同统计单元冰川变化的事实,可以得到统计单元尺度下冰川面积年均变化率的空间分布情况(图3a)。天山的伊犁河流域、准噶尔水系、阿尔泰山的鄂毕河流域、祁连山的河西内流水系等都是冰川退缩程度相对较高的区域。总体来讲,青藏高原内部冰川变化程度处于中低水平,而周边山地的冰川变化幅度则相对较大。王欣等^[19]曾将中国冰川系统对气候变暖的响应依敏感程度进行过划分。综合考虑统计单元设置的差异与文献源的代表性,我们得到的这一分布情况与之前的研究^[19]是基本符合的。

中国冰川临近区139个气象站1960-2009年夏季气温仅在极个别站点的倾向率为负,绝大多数站点气温表现出升高的趋势且倾向率大于 $0.15^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ (图3b)。在139个气象站点中,气温变化倾向率低于 $-0.15^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 的仅有3个。夏季 0°C 层高度降低的区域比地面气温降低的区域略有扩大(特别是在塔里木盆地西部),但是升温仍是大多数站点的变化趋势(图3c)。显然,夏季大气 0°C 层高度升高后,冰川环境温度上升,冰川消融加快,积累将会减少^[50]。大多数站点夏季降水量呈现出增多的趋势,但在青藏高原南部出现了变干区域与变

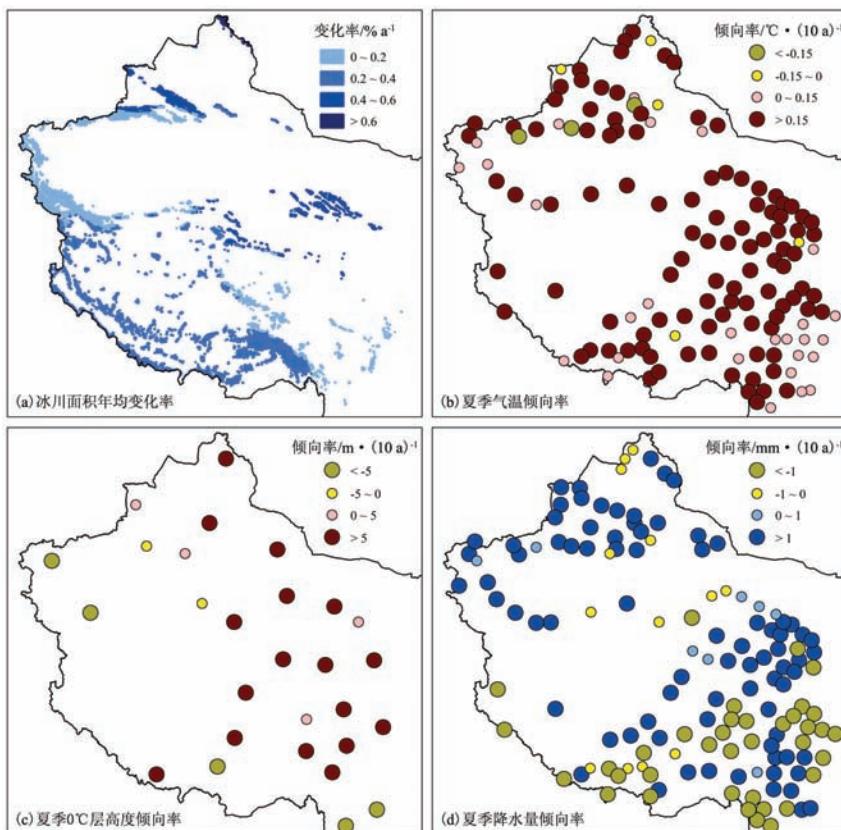


图3 1960-2009年间中国冰川面积年均变化率(a)以及夏季气温(b)、 0°C 层高度(c)与降水量(d)线性倾向率的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of APAC of glacier in China (a), linear trend of air temperature (b), 0°C isotherm height (c) and precipitation (d) in summer during 1960-2009

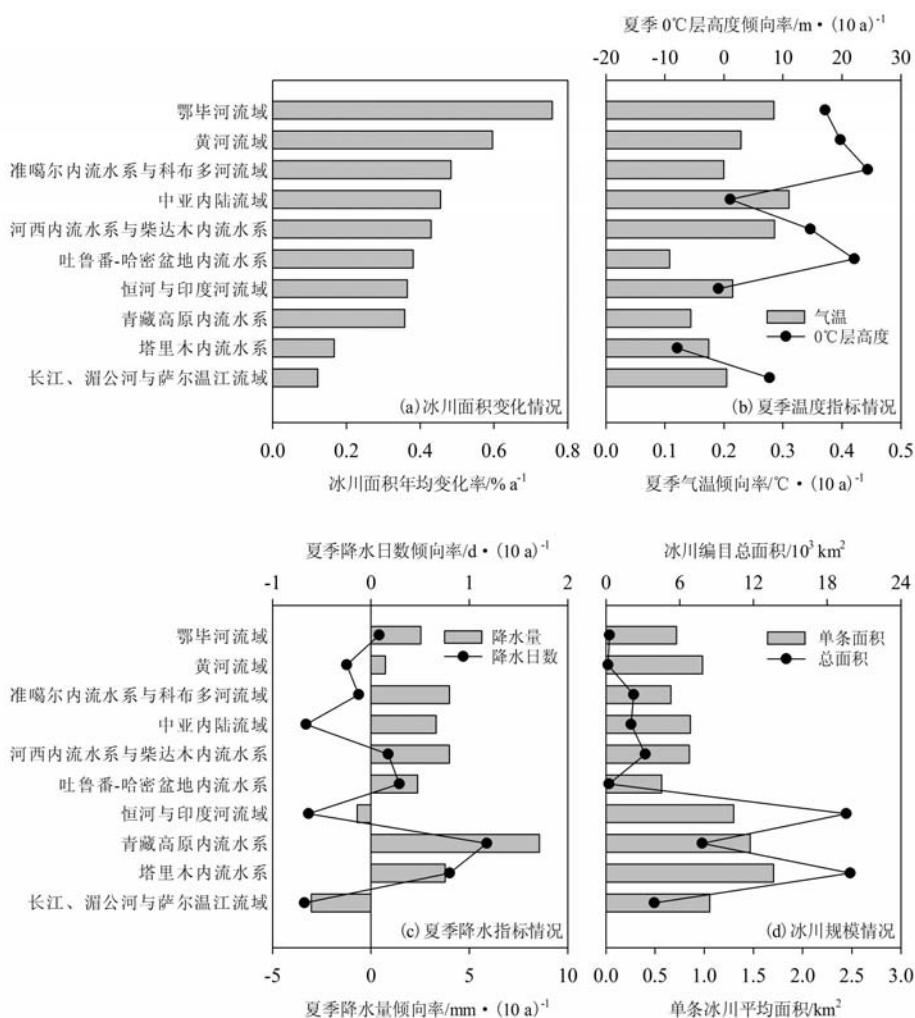


图4 各统计单元的冰川面积年均退化率(a)、1960-2009年间夏季气温与0℃层高度(b)、降水量与降水日数(c)线性倾向率、冰川编目中单条冰川平均面积与区域总面积(d)的对比

Fig. 4 Comparisons of APAC of glacier (a), linear trend of air temperature and 0 °C isotherm height (b), amount and days of precipitation (c) in summer during 1960-2009, and GIC-based mean area of single glacier and the total area of glaciers (d) for different subdivided regions in China

湿区域交错的现象(图3d)。考虑到青藏高原西南部海洋型冰川较多,而海洋型冰川对于气候变化较为敏感,因此从长远而言该区域冰川消融将较为显著。

4.3 不同统计单元冰川与气候变化的关系

就气温与0℃层高度(图4b)而言,中国冰川区的升温是较为普遍的。所有的统计单元在1960-2009年间夏季气温都呈现出增长趋势,增长幅度最低的吐鲁番—哈密盆地内流水系也为 $0.11 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,中亚内陆流域甚至可达 $0.31 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。在大多数统计单元,夏季0℃层高度都处在增长趋势中,这与冰川面积年均变化率的排序(图4a)也存在一定的相似性。当然,气象站数量与分布对这一结果也有影响,例如青藏高原内流水系就缺乏探空站的长期记录。就降水情况(图4c)而言,青藏高原内流水系降水量与降水日数均增长较快,西北干旱区各统计单元也多处于气候暖湿化的区域内,降水量倾向率大多在 $2 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 以上。然而,西南地区降水量略有减少,长江、湄公河与萨尔温江流域的降水量倾向率为 $-3 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。除了气候因素外,冰川变化与冰川本身的属性也有很大的关系(图4d)。一般来说,

小冰川对于气候变化更加敏感,大量遥感监测也都证实了这一规律^[39, 42]。

将各统计单元内气象站1960-2009年间夏季气温(T)、0℃层高度(H)、夏季降水量(P)的线性倾向率以及单条冰川平均面积(K)等参数标准化后进行多元回归,可以得到 $APAC = 0.59 T + 0.73 H + 0.25 P + 0.13 K - 0.04$,复相关系数为0.81。尽管这一估计仅考虑了几个影响冰川变化的常见指标,但其趋势仍是十分明显的,即表征气候变暖的0℃层高度与地面气温对冰川面积变化的关系最大。

5 结论

本研究统计了近年来发表的中国冰川面积变化数据,分析了当前气候变化背景下冰川变化的时空特征,得到以下结论:

(1) 运用面积加权法的计算结果表明,自20世纪60-70年代至21世纪初中国冰川面积退缩了10.1%。在对时间进行插补后,可以得到1960年以来的年均面积变化率为 $0.3\% \text{ a}^{-1}$ 。这一退缩程度高于之前的相关研究,印证了中国冰川的普遍消融态势。

(2) 冰川面积变化具有明显的空间分布差异,天山的伊犁河流域、准噶尔内流水系、阿尔泰山的鄂毕河流域、祁连山的河西内流水系等都是冰川退缩速度相对较快的冰川区。

(3) 近50年以来中国冰川的退缩格局有着深远的气候背景。中国冰川区的夏季气温上升明显,而降水量的增幅却极为轻微。从气温与降水量对冰川的影响来讲,增长的降水量不足以抵消升温对冰川消融的作用,气温变化是影响冰川面积变化的主要因素。

致谢:中国冰川编目的电子图件由世界数据中心(WDC)兰州冰川冻土学科中心提供,特此感谢。

参考文献 (References)

- [1] Shi Yafeng. Concise Glacier Inventory of China. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2008: 1-205.
- [2] Yao Tandong, Wang Youqing, Liu Shiyin et al. Recent glacial retreat in High Asia in China and its impact on water resource in Northwest China. *Science in China (Series D)*, 2004, 47(12): 1065-1075.
- [3] 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.
- [4] Xiao Cunde, Liu Shiyin, Zhao Lin et al. Observed changes of cryosphere in China over the second half of the 20th century: An overview. *Annals of Glaciology*, 2007, 46(1): 382-390.
- [5] Li Xin, Cheng Guodong. Cryospheric change in China. *Global and Planetary Change*, 2008, 62(3/4): 210-218.
- [6] Zhang Yinsheng, Fujita K, Ageta Y et al. The response of glacier ELA to climate fluctuations on High Asia. *Bulletin of Glacier Research*, 1998, 16: 1-11.
- [7] Liu Shiyin, Xie Zichu, Wang Ninglian et al. Mass balance sensitivity to climate change: A case study of Glacier No.1 at Urumqi Riverhead, Tianshan Mountains, China. *Chinese Geographical Science*, 1999, 9(2): 134-140.
- [8] 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.]
- [9] Shi Yafeng, Liu Shiyin. Estimation on the response of glaciers in China to the global warming in the 21st century. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(7): 668-672.
- [10] Xie Zichu, Wang Xin, Feng Qinghua et al. Modeling the response of glacier systems to climate warming in China. *Annals of Glaciology*, 2006, 43(1): 313-316.
- [11] Zhang Guoliang, Wang Jie, Pan Baotian et al. Progress in research on glacier changes using remote sensing. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2010, 46(6): 1-10. [张国梁, 王杰, 潘保田 等. 冰川变化遥感监测的研究进展. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2010, 46(6): 1-10.]
- [12] Ren Guoyu, Guo Jun. Climate changes of China's mainland over the past half century. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63 (6): 942-956. [任国玉, 郭军. 近50年中国地面气候变化基本特征. *气象学报*, 2005, 63(6): 942-956.]
- [13] 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.

- [14] Wang Yetang, Hou Shugui, Liu Yaping. Glacier changes in the Karlik Shan, eastern Tien Shan, during 1971/72-2001/02. *Annals of Glaciology*, 2009, 50(53): 39-45.
- [15] 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.
- [16] Shangguan Donghui, Liu Shiyin, Ding Yongjian et al. Glacier changes during the last forty years in the Tarim interior river basin, Northwest China. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(6): 727-732.
- [17] Zhang Dongqi, Xiao Cunde, Qin Dahe. Himalayan glaciers fluctuation over the latest decades and its impact on water resources. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(5): 885-895. [张东启, 效存德, 秦大河. 近几十年来喜马拉雅山冰川变化及其对水资源的影响. 冰川冻土, 2009, 31(5): 885-895.]
- [18] Wang Shengjie, Zhang Mingjun, Li Zhongqin et al. Glacier area variation and climate change in the Chinese Tianshan Mountains since 1960. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(2): 263-273.
- [19] 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.
- [20] 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.]
- [21] Yang Yong, Chen Rensheng, Ji Xibin. Variations of glaciers in the Yenigou Watershed of Heihe River Basin from 1956 to 2003. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(1): 100-106. [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. 冰川冻土, 2007, 29(1): 100-106.]
- [22] Zhao Liqiang. A study of glacier changes and surface dust on Lenglongling glacier in the Qilian Mountains[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008. 36-46. [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, 2008. 36-46.]
- [23] Cao Bo, Pan Baotian, Gao Hongshan et al. Glacier variation in the Lenglongling Range of eastern Qilian Mountains from 1972 to 2007. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(2): 242-248. [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. 冰川冻土, 2010, 32(2): 242-248.]
- [24] Zhang Huawei. Glacier change in the Shulen Mountain monitored by remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(1): 8-13. [张华伟. 祁连山疏勒南山地区冰川变化的遥感研究. 冰川冻土, 2011, 33(1): 8-13.]
- [25] 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. *Resources Science*, 2011, 33(3): 399-407. [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. 资源科学, 2011, 33(3): 399-407.]
- [26] Shangguan Donghui, Liu Shiyin, Ding Yongjian et al. Glacier changes at the head of Yurungkax River in the West Kunlun Mountains in the past 32 years. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 855-862. [上官冬辉, 刘时银, 丁永建等. 玉龙喀什河源区32年来冰川变化遥感监测. 地理学报, 2004, 59(6): 855-862.]
- [27] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Shangguan 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.
- [28] 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.
- [29] Cai Dihua, Ma Jinhui, Nian Yanyun et al. The study of glacier change using remote sensing in Mt. Muztagta. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2006, 42(1): 13-17. [蔡迪花, 马金辉, 年雁云等. 慕士塔格峰冰川变化遥感研究. 兰州大学学报: 自然科学版, 2006, 42(1): 13-17.]
- [30] Xu Junli, Liu Shiyin, Zhang Shiqiang et al. Glaciers fluctuations in the Karamilan-Keriya River Watershed in the past 30 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(3): 312-318. [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30 a来的冰川变化研究. 冰川冻土, 2006, 28(3): 312-318.]
- [31] Wang Shuhong, Xie Zichu, Dai Yanan et al. Structure, change and its tendency of glacier systems in Altay Mountains. *Arid Land Geography*, 2011, 34(1): 115-123. [王淑红, 谢自楚, 戴亚南等. 阿尔泰山冰川系统结构、近期变化及趋势预测. 干旱区地理, 2011, 34(1): 115-123.]
- [32] Shangguan Donghui, Liu Shiyin, Ding Liangfu et al. Variation of glaciers in the western Nyainqntanglha Range of Tibetan Plateau during 1970-2000. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(2): 204-210. [上官冬辉, 刘时银, 丁良福等. 1970-2000年念青唐古拉山脉西段冰川变化. 冰川冻土, 2008, 30(2): 204-210.]
- [33] Chen Feng, Kang Shichang, Zhang Yongjun et al. Glaciers and lake change in response to climate change in the Nam Co Basin, Tibet. *Journal of Mountain Science*, 2009, 27(6): 641-647. [陈锋, 康世昌, 张拥军等. 纳木错流域冰川和湖泊变化对气候变化的响应. 山地学报, 2009, 27(6): 641-647.]
- [34] Ye Qinghua, Yao Tandong, Chen Feng et al. Response of glacier and lake covariations to climate change in Mapam Yumco Basin on Tibetan Plateau during 1974-2003. *Journal of China University of Geosciences*, 2008, 19(2): 135-145.

- [35] Liu Shiyin, Lu Anxin, Ding Yongjian et al. Glacier fluctuations and the inferred climate changes in the A'Nyêmaqên Mountains in the source area of the Yellow River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(6): 701-707. [刘时银, 鲁安新, 丁永建等. 黄河上游阿尼玛卿山区冰川波动与气候变化. *冰川冻土*, 2002, 24(6): 701-707.]
- [36] Lu Anxin, Yao Tandong, Liu Shiyin et al. Glacier change in the Geladandong Area of the Tibetan Plateau monitored by remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(5): 559-562. [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. *冰川冻土*, 2002, 24(5): 559-562.]
- [37] Ye Qinghua, Kang Shichang, Chen Feng et al. Monitoring glacier variations on Geladandong mountain, central Tibetan Plateau, from 1969 to 2002 using remote-sensing and GIS technologies. *Journal of Glaciology*, 2006, 52(179): 537-545.
- [38] Song Bo. Application study in China's monsoonal temperate glacier region based on GIS and remote sensing [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2008. [宋波. GIS 和遥感在我国海洋型冰川区的应用研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.]
- [39] Zhang Guoliang, Pan Baotian, Wang Jie et al. Research on the glacier change in the Gongga Mountain based on remote-sensing and GPS from 1966 to 2008. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(3): 454-460. [张国梁, 潘保田, 王杰等. 基于遥感和GPS的贡嘎山地区1966-2008年现代冰川变化研究. *冰川冻土*, 2010, 32(3): 454-460.]
- [40] Qiao Chengjun. Remote sensing monitoring of glacier changes in Dongkemadi Region of Tanggula Mountain. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(14): 7703-7705. [樵程骏. 唐古拉山冬克玛底地区冰川变化遥感监测. *安徽农业科学*, 2010, 38(14): 7703-7705.]
- [41] Wei Hong, Ma Jinzhu, Ma Mingguo et al. Study on changes of glaciers and glacial lakes in the Pumqu Basin based on RS and GIS. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*. 2004, 40(2): 97-100. [魏红, 马金珠, 马明国等. 基于遥感与GIS的朋曲流域冰川及冰湖变化研究. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2004, 40(2): 97-100.]
- [42] Jin Rui, Che Tao, Li Xin et al. Glacier variation in the Pumqu Basin derived from remote sensing data and GIS technique. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(3): 261-266. [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. *冰川冻土*, 2004, 26(3): 261-266.]
- [43] Ye Qinghua, Zhong Zhenwei, Kang Shichang et al. Monitoring glacier and supra-glacier lakes from space in Mt. Qomolangma Region of the Himalayas on the Tibetan Plateau in China. *Journal of Mountain Science*, 2009, 6(3): 211-220.
- [44] Xin Xiaodong, Yao Tandong, Ye Qinghua et al. Study of the fluctuations of glaciers and lakes around the Ranwu Lake of Southeast Tibetan Plateau using remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(1): 19-26. [辛晓冬, 姚檀栋, 叶庆华等. 1980-2005年藏东南然乌湖流域冰川湖泊变化研究. *冰川冻土*, 2009, 31(1): 19-26.]
- [45] Ye Qinghua, Zhu Liping, Zheng Hongxing. Glacier and lake variations in the Yamzhog Yumco basin, southern Tibetan Plateau, from 1980 to 2000 using remote-sensing and GIS technologies. *Journal of Glaciology*, 2007, 53(183): 673-676.
- [46] Ye Qinghua, Chen Feng, Yao Tandong et al. Tupu of glacier variations in the Mt. Naimona'nyi Region, western Himalayas, in the last three decades. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(4): 511-520. [叶庆华, 陈锋, 姚檀栋等. 近30年来喜马拉雅山脉西段纳木那尼峰地区冰川变化的遥感监测研究. *遥感学报*, 2007, 11(4): 511-520.]
- [47] Wang Yiting, Chen Xiuwan, Bo Yanchen et al. Monitoring glacier volume change based on multi-source DEM and multi-temporal remote sensing images. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(1): 126-132. [王祎婷, 陈秀万, 柏延臣等. 多源DEM和多时相遥感影像监测冰川体积变化. *冰川冻土*, 2010, 32(1): 126-132.]
- [48] Li Zongxing, He Yuanqing, Wang Chunfen et al. Spatial and temporal trends of temperature and precipitation during 1960-2008 at the Hengduan Mountains, China. *Quaternary International*, 2011, 236(1/2): 127-142.
- [49] Kang Ersi, Cheng Guodong, Dong Zengchuan. Glacier-snow Water Resources and Mountain Runoff in the Arid Area of Northwest China. Beijing: Science Press, 2002: 14-54. [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. 北京: 科学出版社, 2002: 14-54.]
- [50] Zhang Guangxing, Sun Shufang, Zhao Ling et al. The response of the Glacier No.1 to the height change of the 0°C level in summer at the riverhead of the Urumqi River, Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(6): 1057-1062. [张广兴, 孙淑芳, 赵玲等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川对夏季0℃层高度变化的响应. *冰川冻土*, 2009, 31(6): 1057-1062.]
- [51] Zhang Guangxing, Sun Shufang, Ma Yufen et al. The response of annual runoff to the height change of the summertime 0°C level over Xinjiang. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(6): 833-847.
- [52] Bradley R S, Keimig F T, Diaz H F et al. Recent changes in freezing level heights in the Tropics with implications for the deglaciation of high mountain regions. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36, L17701, doi: 10.1029/2009GL037712.
- [53] Zhang Yinsheng, Guo Y. Variability of atmospheric freezing-level height and its impact on the cryosphere in China. *Annals of Glaciology*, 2011, 52(58): 81-88.
- [54] Cheng Ying, Li Dongliang. Relationship between glacial thaw of Qilian Mountain and upper temperature. *Plateau Meteorology*, 2002, 21(2): 217-221. [程瑛, 李栋梁. 祁连山冰川消融与高空气温变化的关系. *高原气象*, 2002, 21(2): 217-221.]

- [55] 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(S1): 64-71.
- [56] 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. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 233-243. [刘时银, 沈永平, 孙文新等. 鄯连山西段小冰期以来的冰川变化研究. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 233-243.]
- [57] Liu Shiyin, Shangguan Donghui, Ding Yongjian et al. Variation of glaciers studied on the basis of RS and GIS: A reassessment of the changes of the Xinqingfeng and Malan Ice Caps in the northern Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(3): 244-252. [刘时银, 上官冬辉, 丁永建等. 基于RS与GIS的冰川变化研究: 青藏高原北侧新青峰与马兰冰帽变化的再评估. *冰川冻土*, 2004, 26(3): 244-252.]
- [58] Wang Yetang, Hou Shugui, Lu Anxin et al. Response of glacier variations in the eastern Tianshan Mountains to climate change, during the last 40 years. *Arid Land Geography*, 2008, 31(6): 813-821. [王叶堂, 侯书贵, 鲁安新等. 近 40 年来天山山东段冰川变化及其对气候的响应. *干旱区地理*, 2008, 31(6): 813-821.]
- [59] Ye Qinghua, Yao Tandong, Zheng Hongxing et al. Glacier and lake co-variations and their responses to climate change in the Mapam Yumco Basin on Tibet. *Geographical Research*, 2008, 27(5): 1178-1190. [叶庆华, 姚檀栋, 郑红星等. 西藏玛旁雍错流域冰川与湖泊变化及其对气候变化的响应. *地理研究*, 2008, 27(5): 1178-1190.]
- [60] Guo Liuping, Ye Qinghua, Yao Tandong. The glacial landforms and the changes of glacier and lake area in the Mapam Yumco Basin in Tibetan Plateau based on GIS. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(4): 517-524. [郭柳平, 叶庆华, 姚檀栋. 基于 GIS 的玛旁雍错流域冰川地貌及现代冰川湖泊变化研究. *冰川冻土*, 2007, 29(4): 517-524.]
- [61] Yang Jianping, Ding Yongjian, Liu Shiyin et al. Glacier change and its effect on surface runoff in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(5): 595-602. [杨建平, 丁永建, 刘时银等. 长江黄河源区冰川变化及其对河川径流的影响. *自然资源学报*, 2003, 18(5): 595-602.]
- [62] Jin Rui, Li Xin, Che Tao et al. Glacier area changes in the Pumqu river basin, Tibetan Plateau, between the 1970s and 2001. *Journal of Glaciology*, 2005, 51(175): 607-610.
- [63] Ye Qinghua, Chen Feng, Stein A et al. Use of a multi-temporal grid method to analyze changes in glacier coverage in the Tibetan Plateau. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(7): 861-872.
- [64] Ye Qinghua, Yao Tandong, Kang Shichang et al. Glacier variations in the Naimona'nyi region, western Himalaya, in the last three decades. *Annals of Glaciology*, 2006, 43(1): 385-389.

Variation of Glacier Area in China against the Warming in the Past 50 Years

ZHANG Mingjun¹, WANG Shengjie¹, LI Zhongqin^{1,2}, WANG Feiteng²

(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 730070, China)

Abstract: According to the remote sensing records on glacier area in the typical regions of China, as well as the meteorological data of air temperature and precipitation at 139 stations and the 0 °C isotherm height at 28 stations, the variation of glacier area in China and its climatic background in the past 50 years was discussed. The initial glacier area calculated in this study was 23982 km² in the 1960s/1970s, but the present area was only 21893 km² in the 2000s. The area-weighted shrinking rate of glacier was 10.1%, and the temporal-interpolated annual percentage of area changes (APAC) of glacier was 0.3% a⁻¹ since 1960. The high APAC was found at the Ili River Basin and the Junggar Interior Basin around the Tianshan Mountains, the Ertix River (a tributary of the Ob River) Basin around the Altay Mountains, the Hexi Interior Basin around the Qilian Mountains, etc. The retreat of glaciers was affected by climatic background, and the influence on glaciers of the slightly-increased precipitation is counteracted by the significant warming in summer.

Key words: climate change; glacier; air temperature; precipitation; 0 °C isotherm height