



近期新疆东天山冰川退缩及其对水资源影响

李开明^{①③}, 李忠勤^{②③}, 高闻宇^②, 王林^③

① 兰州城市学院城市经济与旅游文化学院, 兰州 730070;

② 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730000;

③ 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

E-mail: lkm_wd@126.com

2011-04-29 收稿, 2011-07-26 接受

中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-311)、国家重点基础研究发展计划(2010CB951003)、国家自然科学基金重大研究计划(91025012)和国家自然科学基金(41001040, 41101066)资助

摘要 新疆东疆盆地属于资源性缺水地区. 流域内大部分河流的补给依赖于东天山高山区丰富的降水与冰川融水. 1981 年中日联合考察和 2009 年中国科学院天山冰川站对该区博格达峰 3 条冰川考察表明, 夏季消融强烈, 并有加速退缩趋势. 基于 1962/1972 年地形图及近期的 ASTER 和 SPOT5 遥感影像资料, 研究了博格达峰山脉 203 条冰川和哈尔里克山 75 条冰川的进退情况. 结果表明: 在 1962~2006 年间博格达峰地区冰川面积减小了 21.6%(0.49% a⁻¹), 长度平均退缩 181 m, 冰储量减小了 28%; 1972~2005 年间哈尔里克山冰川面积减小了 10.5%(0.32% a⁻¹), 长度平均退缩 166 m, 冰储量减小了 14%. 南坡冰川退缩快于北坡, 其中博格达峰山脉南北坡冰川面积分别减小了 25.3%和 16.9%, 哈尔里克山脉分别减小了 12.3%和 6.6%. 小于 0.5 km² 的冰川退缩最为强烈, 而大于 2 km² 的冰川将会成为未来径流的主要贡献者. 东疆盆地水系的冰川消融总体呈增强趋势, 水资源处在不断恶化之中. 该地区坎儿井数量及其水量的锐减, 以及有无冰川补给河流径流量的显著变化均与上游冰川退缩有关, 未来将会对下游的乌鲁木齐市和吐鲁番盆地的水资源产生影响.

关键词

冰川变化
东疆盆地
遥感
水资源
径流

全球气候变化是目前最为关注的热点之一, 也是关系人类自身生存环境的大事件. 近百年来随着全球温度升高, 高寒山地冰川退缩加速. 冰川表面消融甚至发生在一些高海拔的冰川^[1]. 全球淡水资源的 75%来自于冰川^[2], 冰川退缩将直接影响区域水资源平衡与经济可持续发展. 无论是人为因素还是自然界本身引起的全球变暖, 冰川强烈退缩已成为最直接的证据, 指示着冰川对全球气候变化敏感的响应性. 目前冰川退缩已成为全球性趋势^[3,4], 仅 1993~2003 年间因全球冰川退缩造成海平面上升就达 0.77±0.18 mm^[5], 估计到 2100 年冰川和冰帽消融造成的海平面上升将分别达到 0.046 和 0.051 m^[6]. 中国冰冻圈对海平面上升的潜在贡献量为 0.14~0.16 mm a⁻¹, 其中冰川贡献量约为 0.12 mm a⁻¹^[7]. 山地冰川的强烈

消融甚至会产生洪水、泥石流等地质灾害^[8,9], 影响居民生命财产安全. 而中亚地区冰川退缩可能会造成以冰川融水为主要补给的地区出现缺水危机.

高亚洲冰川退缩已经对中国西北干旱区水资源产生重大影响^[10,11]. 新疆东部地区作为极端干旱区, 处于高地的冰川“固体水塔”对该区域河川径流的补给量占有相当的比例. 吐鲁番-哈密盆地出现的片片绿洲, 更是受惠于高山区的冰川融水. 博格达峰山脉北坡冰川融水是白杨河流域的主要补给水源, 冰川径流占 37.6%^[12]; 南坡冰川融水是吐鲁番-哈密盆地和柴窝堡盆地可靠的补给水源, 如南坡黑沟冰川融水径流占 46.9%^[13]. 冰川在近数十年的快速退缩已经影响到了以冰川融水为主要补给的吐鲁番坎儿井的来水量, 使有水坎儿井的数量锐减. 因此, 对东疆盆地

水系的冰川变化监测研究,有利于该地区水资源的合理开发利用、生态脆弱性评估等。

近 50 年来新疆年降水量与年均气温总体呈上升趋势,其中年降水量平均增幅为 0.67 mm a^{-1} ,气温平均增长 $0.027^{\circ}\text{C a}^{-1}$ [14]。尤其自 20 世纪 80 年代中期以来,南疆、北疆及天山山区气温明显升高[15~18]。受此影响,大部分河流自 20 世纪 90 年代初水量明显增多,表现为春汛提前、夏汛推后和洪峰流量增大,而以冰川融水为主要补给形式的河流,夏汛峰值时间基本未变,但洪峰流量增大[19]。冰川与气候变化之间相互作用的关系复杂[20]。但上游冰川的存在,对河流径流具有稳定和调节作用[21]。东疆盆地水系大部分河流规模不大,主要由高山冰川融水、积雪融水和山区降水共同补给。因此,对该区气候变化、冰川与径流之间相互关系的研究很有必要。

1 研究区域与资料

东疆盆地地处亚洲大陆腹地,远离海洋,气候极端干旱,山麓地带南坡年降水量不足 100 mm,北坡也不超过 200 mm。但随海拔增高,降水量明显增大,冰川平衡线附近可达 600 mm 以上[22,23]。山脉大致呈东西走向,从东到西分别为哈尔里克山、巴里坤山和博格达山(图 1)。研究区冬季受强大的蒙古高压控制,寒冷而干燥;夏季高空盛行西风环流,降水较为集中。博格达山脉东西两头与巴里坤山脉和天格尔山脉之

间的天然缺口,使气流穿越天山在此处形成丰沛的降水,成为冰川发育的有利条件。东天山作为新疆东部内陆干旱区的“湿岛”,对水循环和区域环境起着调节作用,也影响着南北坡气候差异和景观结构的不同[22]。

根据冰川编目资料[23],博格达山脉分布 469 条冰川,冰川数量在东疆盆地诸山系中最多。其中北坡 213 条冰川(属于准噶尔盆地),面积是 91.5 km^2 ,冰储量 4.2 km^3 ,冰川平均面积 0.43 km^2 ;南坡 256 条冰川(属于吐鲁番盆地),面积 122.35 km^2 ,储量 6.16 km^3 ,冰川平均面积是 0.48 km^2 。巴里坤山脉分布 57 条冰川,哈尔里克山脉分布 122 条冰川。其中南坡冰川属于东疆吐鲁番-哈密盆地水系,而北坡冰川融水流入准噶尔盆地诸河流。包括天格尔山和阿拉沟山属于东疆盆地水系的 96 条冰川,东疆盆地水系共有 446 条冰川(表 1)。在东天山诸山脉中,博格达山脉虽然冰川数量较多,但平均面积只有 0.46 km^2 ,而巴里坤山和哈尔里克山冰川平均面积分别是 0.53 和 1.03 km^2 。

选择博格达山和哈尔里克山作为研究区域基于以下原因。(1) 两个区域均有实地考察冰川(博格达峰四工河 4 号冰川、黑沟 8 号冰川和扇形冰川)或定位监测冰川(庙尔沟冰帽),有利于了解区域冰川的消融和分布情况;(2) 博格达山脉主峰博格达峰 5445 m,是天山东部的最高峰和最大的冰川作用中心,峰区周围集中了博格达山脉全部冰川面积的 75%。它是

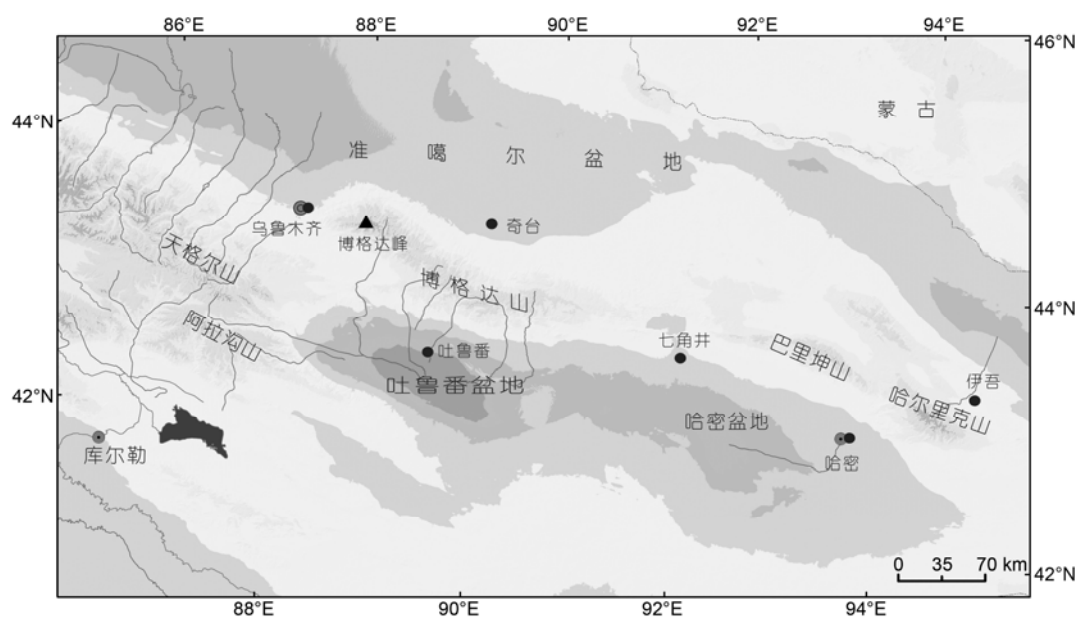


图 1 研究区地理位置

表 1 东疆盆地水系上游山脉及本研究中冰川分布

山脉	吐鲁番-哈密盆地水系				准噶尔盆地水系				总计			
	编目资料		本研究		编目资料		本研究		编目资料		本研究	
	条数	面积(km ²)	条数	面积(km ²)	条数	面积(km ²)	条数	面积(km ²)	条数	面积(km ²)	条数	面积(km ²)
博格达山	256	122.4	104	81.3	213	91.5	99	62.8	469	213.9	203	144.1
巴里坤山	21	12.1			36	17.9			57	30.0		
哈尔里克山	73	76.6	50	66.3	49	49.3	25	32.0	122	125.9	75	98.3
天格尔山	67	29.2							67	29.2		
阿拉沟山	29	12.5							29	12.5		
总计	446	252.8	174	147.6	298	158.7	124	94.8	744	411.5	278	242.4

天山东部散流内流区冰川数量最多的一条山脉, 分别占该区冰川总条数和总面积的 63%和 52%; (3) 哈尔里克山位于天山的最东端, 其南、北、东外围是气候十分干燥的荒漠戈壁, 同时它也是东面的太平洋、印度洋水汽和西面北冰洋、大西洋两种水汽的交界地带, 地理位置特殊^[24]; (4) 两个研究区域冰川平均规模相差较大, 分别为 0.46 和 1.03 km², 可了解不同规模冰川对气候变暖响应的差异性. 了解这两个区域冰川变化特征, 可对东疆盆地冰川退缩及对水资源的影响有基本的认知.

在遥感影像选择时, 一是考虑其空间分辨率, 二是消除影响影像质量的因素, 包括季节性积雪、云量等, 以保证冰川边界清晰. 博格达峰和庙尔沟地区分别采用 15 m 精度的 ASTER(9/2006)和 5 m 精度的 SPOT5(8/2005)遥感影像资料. 早期冰川信息以 1962/1972 年航空照片和 1:50000 地形图数据为基础, 以 600 dpi 分辨率对地形图进行扫描, 并进行几何纠正, 使均方根误差小于 1 个像元. 遥感影像依据纠正后的地形图进行几何精校正, 并经过 GPS 实地测量采集地面标识物控制点的方法进行正交化处理, 使均方根误差在 x, y 方向均控制在 1 个像元内, 满足遥感影像几何校正精度的要求.

在软件 ArcGIS9.2 支持下, 进行冰川边界矢量化处理, 生成冰川边界的矢量图层. 利用空间分析功能, 分别计算各期冰川面积, 分析冰川变化结果. 山地冰川由于受地形的影响, 导致当地太阳入射角和高度角的变化影响冰川分类精度. 利用该地区地形图提取的数字高程模型(DEM)对遥感影像进行地形纠正处理, 纠正后的遥感影像清晰度明显提高. 对 ASTER 和 SPOT5 遥感影像校正及冰川参数提取, 参

照目前国内外较为成熟的方法进行^[25,26]. 本研究中冰川的分类解译, 全部采用人工目视判读的方法. 尽管该方法费时费力, 但它是冰川边界确定的有效方法, 尤其对表碛覆盖的冰川.

误差评价考虑了影响数据精度的各种因素. 一是遥感影像判读冰川边界时存在误差, 其大小与所用影像的空间分辨率、影像校正及配准误差有关^[27,28]. 以具有地理位置信息的地形图为基准, 遥感影像与 1:50000 地形图(精度为 5 m)进行配准, 计算出冰川末端位置在 ASTER, SPOT5 影像中的不确定性分别是±31 和±12 m, 面积不确定性分别为±0.0009 和±0.0001 km². 二是由遥感影像质量产生的误差. 由于冰川所处的高山区, 积雪覆盖现象普遍, 少量冰川末端有表碛覆盖, 会对冰川边界提取带来一定的误差. 以分辨率较高的 SPOT5 和 ASTER 影像反映冰川现状信息, 再以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多次野外验证, 估算冰川面积的误差约为±2%.

2 研究结果

2.1 博格达峰区冰川变化

(i) 冰川变化. 博格达山脉共分布冰川 469 条, 面积 213.9 km², 平均面积为 0.46 km²(表 1). 本研究中遥感影像仅覆盖该山脉的 203 条冰川(1962 年地形图数据), 面积 144.1 km², 平均面积 0.71 km², 大于博格达山脉平均冰川规模(0.46 km²). 到 2006 年时, 冰川面积减小为 112.9 km², 面积减小了 21.6%, 年减小率为 0.5%. 研究区小于 1 km²的冰川占了 84%. 小冰川对气候变化响应时间较短, 而大冰川对气候变

化响应时间较长^[29,30]。数量众多且相对面积变化较大的小冰川易于消失。研究区共有 12 条小于 0.2 km^2 的冰川完全消失(图 2)。末端分布较低的冰川,一般是规模较大的冰川,对气温升高的适应性较强,面积相对减小率小;而规模较小的冰川一般分布在较高的海拔,大部分冰川面积减小幅度较大。不同规模的冰川响应气候变化时表现不同,但总趋势是面积大于 2.0 km^2 的冰川变化较为稳定,平均面积减小率为 8%。此外,处于 $1.0\sim 2.0 \text{ km}^2$ 等级的冰川面积减小了 16.3%,而数量众多的小于 1.0 km^2 的冰川,面积损失了 33%。

四工河 4 号冰川(5Y725D4)是坡度比较平缓的具有典型粒雪盆的冰斗山谷冰川。冰川长度 3.2 km,面积 2.96 km^2 。根据终碛垅位置的变化测得 1959~1962 年冰舌平均退缩速度为 12 m a^{-1} , 1962~1981 年间平均退缩速度为 6 m a^{-1} ^[31]。遥感监测资料表明 1962~2006 年末端共退缩了 336 m, 平均退缩 7.6 m a^{-1} , 即 1981~2006 年间平均退缩速度增大为 8.9 m a^{-1} 。

四工河 5 号(5Y725D5)和古班博格达河 11 号(5Y812B11)冰川是分别流向博格达峰北坡和南坡的同一条冰川,统称为“博格达扇形分流冰川”。扇形分流冰川直接发源于博格达峰,并占据了峰体北坡。冰川长度 4.7 km,面积 10.94 km^2 ,其中消融区约占总面积的 31%。冰川最大高度接近于博格达峰顶(5445 m a.s.l.),西侧地形陡峭,为雪崩区,是该冰川重要的物质补给源。四工河 5 号冰川和古班博格达河 11 号冰川分属于

不同的流域,向北流入四工河,向南流入古班博格达河。伍光和等人^[31]根据冰舌末端终碛湖的变化,认为自 20 世纪 30 年代以来冰川变化主要以退缩为特征,其中南流末端退缩量为 7.6 m a^{-1} ,北流末端退缩量为 5.0 m a^{-1} 。遥感资料表明在 1962~2006 年间,南部的古班博格达河 11 号冰川退缩约 509 m, 即 11.6 m a^{-1} ,北部的四工河 5 号冰川退缩 272 m, 退缩速率为 6.2 m a^{-1} 。

黑沟 8 号冰川位于博格达峰南坡黑沟河源头,全长 7.1 km,面积 5.61 km^2 ,最高海拔 5445 m a.s.l. ,冰舌末端 3380 m a.s.l. ,粒雪线 4100 m a.s.l. ,属于双粒雪盆山谷冰川。该冰川属于雪崩补给型,每年雪崩总量约 $3.0\times 10^6 \text{ m}^3$,占冰川总补给的一半左右。作为博格达峰南坡较大的冰川,黑沟 8 号冰川冰舌狭长且朝向正南,1962~1980 年末端无明显变化^[31]。遥感资料表明 1962~2006 年间末端退缩了 230 m,面积减小了 1.3%。相比于以前的观测资料,该冰川末端退缩主要发生在 20 世纪 80 年代以后。虽然形态变化比较稳定,但观测事实表明该冰川表面消融要强于北坡冰川。冰川表面由于剧烈的差别消融造成微地貌发育显著,表面减薄幅度大。根据王宗太的研究^[32],1986 年采用 B-1 型测厚雷达测量的黑沟 8 号冰川距末端 3250 m 处最大厚度为 192 m,距末端 120 m 处厚度仅为 35 m。2009 年 8 月,采用 pulse EKKO PRO 100A 增强型探地雷达,按原测量路线对该冰川再次进行了厚度测量,在距末端 3250 m 处最大厚度为 157 m。两次测量对比表明,约减薄了 35 m。

(ii) 南北坡差异。博格达山脉冰川总体规模小,退缩强烈。南坡冰川相比于北坡退缩更甚。博格达峰地区南坡 104 条冰川面积减小了 25.3%,而北坡 99 条冰川面积减小了 16.9%。造成这种差异的原因之一是南坡受较多的太阳辐射,具有冰川强烈消融的外部驱动因素。此外,博格达山脉南北两翼不对称,北坡短而陡,南坡长而缓^[23]。这种地形一方面较有利于冰川的发育和保存,另一方面也会使冰川的大部分暴露于消融区,加速冰川的消融。

图 3(a)表明随冰川规模增大,面积减小比率减小。南坡冰川平均面积减小率在 6%~55%,北坡冰川平均面积减小率在 5%~50%。从不同等级冰川的面积分布看,南坡冰川面积在 $0.1\sim 2 \text{ km}^2$ 等级大于北坡,而其他等级则是北坡大于南坡。小冰川对升温的响应要快于大冰川。因此,不同等级的冰川分布结构也影响了区域冰川退缩的水平。消失的 12 条冰川都小于 0.2 km^2 ,

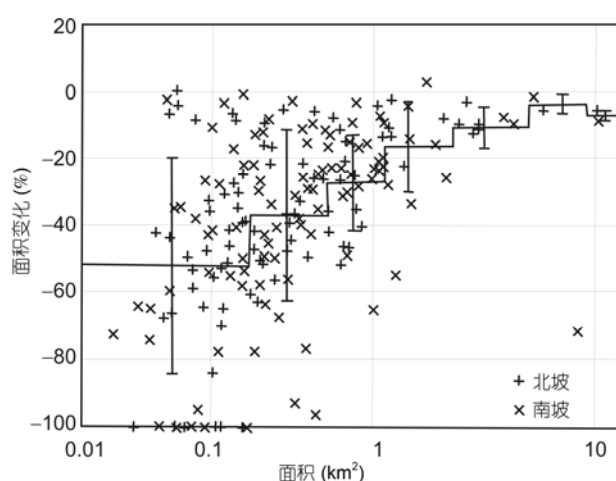


图 2 冰川面积及面积变化率的散点分布

水平线表示冰川面积变化的平均值, 直条表示标准离差(冰川按等级分为 <0.1 , $0.1\sim 0.5$, $0.5\sim 1$, $1\sim 2$, $2\sim 5$, $5\sim 10$, >10)

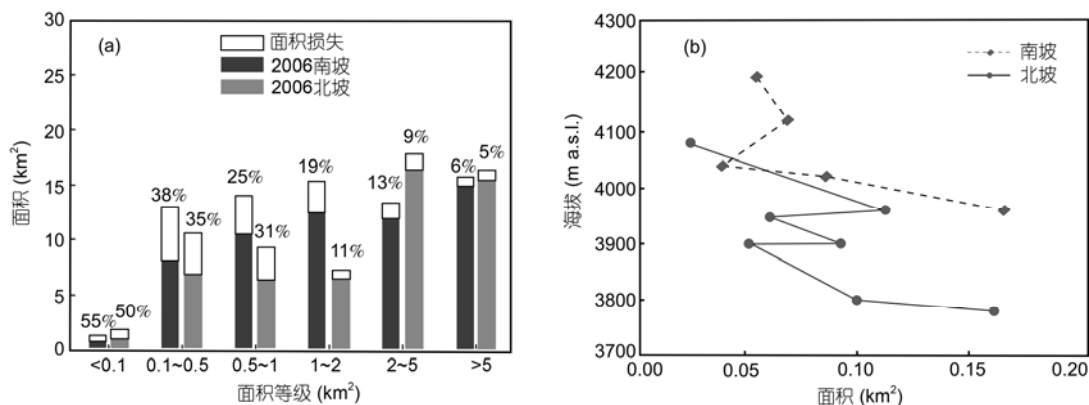


图3 博格达峰地区冰川变化的南北坡差异性

(a) 冰川面积分布及面积变化; (b) 消失冰川高度分布

其中南坡 5 条(海拔 3900~4200 m a.s.l.), 北坡 7 条(海拔 3700~4100 m a.s.l.)(图 3(b)). 显然, 北坡小于 0.1 km^2 的冰川数量多于南坡的分布特征造成南北坡消失冰川数量的差异. 在持续升温背景下, 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.

描述冰川变化参数除面积外, 冰川长度变化是最直接而又易于获取的参数. 长度变化是冰川对气候变化延迟的响应^[33], 累积长度退缩是可观测到的过去气候变化最直接的证据. 博格达峰区北坡冰川平均长度 1022 m, 南坡冰川平均长度为 1169 m, 南坡冰川平均长度较北坡长 147 m. 南北坡地形差异对冰川形态有一定的影响, 长而缓的南坡地形发育了较多的狭长型冰川. 在 1962~2006 年间, 南坡冰川末端退缩了 200 m, 年平均退缩量为 4.5 m a^{-1} , 而北坡冰川退缩了 160 m, 年平均退缩量为 3.6 m a^{-1} .

2.2 庙尔沟地区冰川变化

庙尔沟地区遥感影像共覆盖 75 条冰川, 平均面积 1.31 km^2 , 略大于整个哈尔里克山冰川平均规模 (1.03 km^2)(表 1). 其中哈尔里克山南坡有冰川 50 条, 北坡 25 条. 同博格达峰冰川分布相似, 南坡冰川数量和规模均大于北坡. 这些冰川在 1972~2005 年间面积减小了 10.5%, 年面积减小率为 0.3% . 其中约占冰川总数 20% 的小于 0.1 km^2 的冰川面积减小了 0.43 km^2 (或 43.6%), 而只占冰川总数 5.3% 的大于 5 km^2 的冰川面积减小了 1.77 km^2 (或 7.8%). 冰川面积变化绝对量最大的等级为 1~5 km^2 的冰川, 面积由 59.0 km^2 减

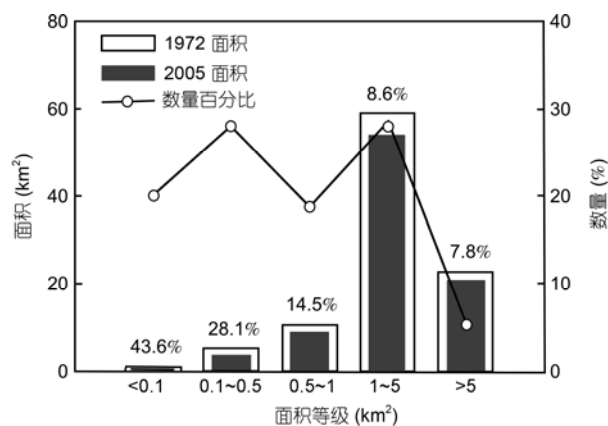


图4 庙尔沟地区冰川数量及面积的分布

小到 53.9 km^2 , 或 8.6%(图 4). 表明对水资源贡献较大的不是相对变化大的小冰川, 而是规模较大的冰川. 如小于 0.1 km^2 的冰川平均单条面积仅减小 0.029 km^2 , 而大于 5 km^2 的冰川平均单条面积减小 0.441 km^2 . 庙尔沟地区冰川平均单条面积减小 0.137 km^2 , 末端退缩 5.0 m a^{-1} ^[34].

庙尔沟南坡和北坡的冰川面积, 在过去 33 年间分别减小了 12.3% 和 6.6%. 南坡冰川退缩明显大于北坡. 庙尔沟冰帽(5Y822C3)是哈尔里克山南坡的一条定位监测冰川. 观测结果表明^[35], 在 1981~2007 年间该冰川厚度在海拔 4295~4357 m a.s.l.处平均减薄了 5 m 左右, 减薄主要发生在冰帽中下部, 而顶端减薄不明显. 冰芯钻取资料也表明冰川消融加剧发生在最近 20~30 年. 应用 2005 年 5 m 分辨率的 SPOT5 遥感影像资料和 1972 年的地形图数据对庙尔沟冰帽对比分析表明, 冰川面积由 3.64 km^2 缩小到

3.28 km², 面积减小了 0.36 km² (9.9%). 冰川末端退缩 77 m, 年退缩量为 2.3 m a⁻¹.

3 讨论

3.1 区域差异性

不同流域冰川退缩受水汽来源、温度及地形条件的差异而不同. 如 1963~2000 年间在吉尔吉斯斯坦境内北天山的 Sokoluk 地区, 冰川面积减小了 28%, 在 20 世纪 80 年代后冰川退缩出现明显的加速趋势^[36]. Aizen 等人^[37]研究表明, 1943~2003 年间, Akshiirak 和 Ala Archa 的冰川面积分别减小了 12.8%和 15.8%, 20 世纪 70 年代后夏季温度的升高是冰川退缩的主要原因; Bolch^[38]研究认为 1959~1999 年间 Zailiyskiy 和 Kungey Alatau 地区冰川面积减小了 32%, 冰川退缩与温度升高和消融期延长有关; Narama 等人^[39]认为天山山区夏季温度的升高导致近几十年来冰川强烈消融退缩, 而造成变化的区域差异性与局域气候条件、冰川分布高度以及不同等级冰川分布比例有关. 在我国的青藏高原, 不同区域的冰川也呈现不同幅度的退缩趋势^[40,41]. 尽管不同的研究结果与研究时段和研究资料有关, 但冰川退缩的趋势和区域变化的差异性 is 显然的.

在影响区域冰川变化的内部因素中, 冰川规模对平均面积变化率影响最为显著. 博格达峰和庙尔沟冰川平均面积分别为 0.71 和 1.31 km². 小冰川分布数量较多的博格达峰地区对升温较敏感, 消融强烈. 冰川面积 A 与其年平均变化率 y 之间近似满足非线性的关系: $y = a \cdot A^b$. 式中 a 和 b 是拟合参数. 冰川的年面积减小率随面积增大而趋于减小(图 5). 冰川规模较小的博格达峰地区年变化率要大于庙尔沟地区. 随冰川消融的加剧, 大冰川趋小化, 部分小冰川则会趋于消失. 而冰川规模趋小化使得冰川对气候变化

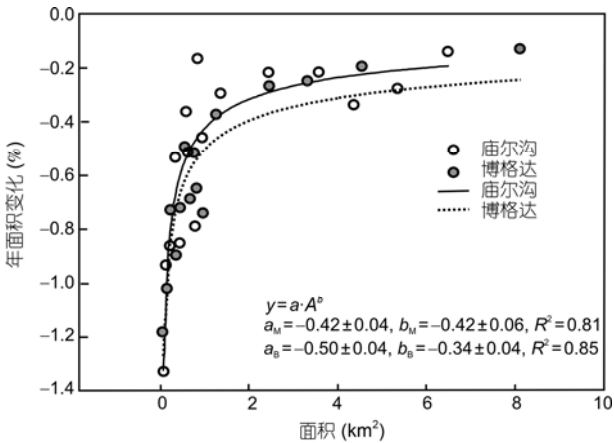


图 5 冰川面积与年面积变化率之间的非线性关系
下标 M 表示庙尔沟地区, B 表示博格达峰地区; 曲线是图中点的非线性拟合

的响应时间相应地缩短, 将会加速其消融.

冰川进退变化和区域气候密切相关, 而温度和降水的变化直接影响冰川积累量和消融量. 如当温度升高 1 K, 需要降水增加 25%才能弥补由升温造成的物质亏损^[3]. 冰川变化反映气候变化的历史. 冰川物质平衡是与气候变化相关的自然变量, 其变化可以提供气候变化的量化信息. 在本区选取了 6 个气象站(表 2), 其中奇台和伊吾站位于山脉北部, 乌鲁木齐站位于西北部, 哈密和吐鲁番站位于其南部, 而七角井位于博格达山和巴里坤山脉断陷处(图 1). 不同位置气象站资料的对比分析表明, 温度和降水都有不同幅度的升高. 北坡温度低于南坡, 而降水分布则相反; 西部的降水和温度均高于东部. 如吐鲁番年平均温度达到 14.4℃, 而其降水仅为 16.3 mm. 处于同一经度北疆的奇台, 年平均温度为 5.2℃, 降水为 193.1 mm. 西部的乌鲁木齐年均温度为 7.1℃, 降水量为 262 mm, 而东部伊吾年平均温度只有 3.8℃. 总体来讲, 东疆盆地温度分布呈南高北低, 东高西低,

表 2 气象站基本信息及温度和降水变化趋势(1959~2002)

站名	位置	海拔(m a.s.l.)	平均温度(℃)	升温速率(℃ 10 a ⁻¹)	降水(mm)	降水增幅(mm 10 a ⁻¹)
奇台	44°01'N, 89°34'E	794	5.2	0.25	193.1	24.8
伊吾	43°16'N, 94°42'E	1729	3.8	0.22	97.1	8.5
乌鲁木齐	43°47'N, 87°39'E	935	7.1	0.18	262.6	47.3
吐鲁番	42°56'N, 89°12'E	345	14.4	0.42	16.3	0.8
哈密	42°49'N, 93°31'E	738	9.9	0.13	37.8	3.9
七角井	43°13'N, 91°44'E	721	9.7	0.53	37.6	2.1

降水以南少北多, 东少西多的格局。

3.2 储量变化

过去 20~30 年东天山冰川由于强烈消融使面积出现大幅减小, 并伴随储量的显著变化。冰川储量和面积之间有如下关系^[42,43]: $V=c \cdot S^\gamma$, γ 取 1.36 时为冰川, 1.25 时为冰帽。该式的应用受到经验常数 c 的限制。Bahr 等人^[44]对上式进行变换后消除了常数 c , 从而使冰川储量变化的估算仅依赖于面积变化率:

$$(1+P_V) = (1+P_S)^\gamma,$$

其中 P_V 为体积变化率, P_S 为面积变化率。由此计算出冰川体积的变化率 P_V :

$$P_V = (1+P_S)^\gamma - 1.$$

博格达峰地区冰川面积在 1962~2006 年间减小 21.6%, 其中南坡和北坡冰川面积减小率分别为 25% 和 17%。由此可近似估算冰储量在过去 44 年间减少 28%, 南坡和北坡冰川储量分别减小 32% 和 22%。庙尔沟地区冰川面积在 1972~2005 年间缩小 10.5%, 估算的储量减小 14%, 其中南坡和北坡冰储量分别减少 16% 和 9%。博格达山脉冰川规模小, 易受气候波动变化的影响。与之相应的冰储量在过去 44 年间以 $0.6\% \text{ a}^{-1}$ 的速率在减少, 南坡冰川储量减小速率达到 $0.7\% \text{ a}^{-1}$ 。持续的冰川物质亏损对东疆盆地短缺的水资源将是一个危险的信号。

3.3 区域水资源影响

新疆东疆盆地是水资源非常缺乏的地区。吐鲁番地区地表水资源量是新疆各地州中最少的, 哈密地区地表水资源量也仅列倒数第三。本区(包括哈密地区和吐鲁番地区)共有河流 89 条, 主要以径流量小于 $0.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的小河流为主^[45]。这些分散的小河流大部分以高山冰川融水、积雪融水和山区降水为主要补给源。陈亚宁等人^[19]的研究表明, 东疆地区在 1985 年后增温趋势显著, 降水也呈现出持续增长的趋势。我们的分析结果表明东天山冰川在近 40 年来退缩明显, 尤其以南坡冰川退缩最为强烈。在目前升温趋势下, 小于 0.5 km^2 的冰川消融正盛, 以其数量优势补给河流。从长远看, 这部分固态水资源对河流的补给作用将会大大减弱。而规模较大的冰川随面积萎缩、储量不断减小, 由大冰川变为小冰川, 对未来升温的抵御能力减弱。大于 1 km^2 的冰川在未来几十年将是

河川径流补给的主要力量, 但其对河流的调节作用将会减弱。大冰川数量少, 面积减小绝对量大, 单条冰川对径流量的影响较大; 小冰川数量多, 面积减小绝对量小, 单条冰川对径流量的影响有限。但小冰川由于绝对的数量优势, 一旦消失殆尽无疑会对区域水资源有较大影响。

冰川覆盖度较高的塔里木河流域径流自 1990 年后明显增加^[46]。东疆盆地冰川数量不多, 冰川融水对径流的影响不同于塔里木河流域。径流变化受到冰川覆盖度、温度与降水变化的影响。研究表明^[47]: 哈密地区头道沟不受冰川融水补给, 河流年径流变幅加大, 洪枯水量悬殊, 径流量受降水和气温影响明显; 上游受小冰川补给的故乡河, 由于冰川退缩使径流量自 2000 年后出现明显的水量增加趋缓的过程; 有较大冰川补给的榆树沟, 目前基本维持水量增加态势, 但增幅在减小。上游冰川对径流具有重要的调节作用。高山带冰川在冷季/湿季时将降水以固态的形式保存下来, 而在暖季/干季时以融水的形式释放出来对河流进行补给, 从而保持河流径流量年变差系数稳定。对于无冰川融水补给的河流, 其径流量年变差系数变幅较大, 也易发生突发性洪水、泥石流等灾害。

东疆盆地以及乌鲁木齐市的水资源问题一直是困扰该区经济发展和正常生活用水的瓶颈。被誉为“地下长城”的吐鲁番坎儿井, 主要由博格达山脉冰川融水及高山区丰富的降水渗入戈壁汇成潜流为坎儿井提供丰富的地下水源。近年来由于生态系统的恶化以及水资源短缺造成地下水位下降, 坎儿井的数量从 20 世纪 50 年代的 1700 多条减少为现在的 1108 条, 其中有水坎儿井仅剩 278 条(截止 2009 年底)。此外, 博格达山区还是 260 多万人口的乌鲁木齐市水源之一。随城市用水量增加, 乌鲁木齐市有些年份甚至出现用水量接近可供水量的极限。柴窝堡盆地水系的水资源主要贡献来自于博格达山冰川, 它是乌鲁木齐市外理想的水源地^[48]。自 1992 年开始每年向柴窝堡湖调水 $0.3 \times 10^8 \text{ m}^3$, 以缓解乌鲁木齐市用水紧张问题。如果气候持续变暖, 冰川消融加速, 其储量会大幅减小, 危及未来区域经济发展及人类生存安全。

4 结论与展望

冰川平均规模较小的博格达峰地区, 面积减小

了 21.6%, 年减小率为 0.5%, 相应的冰储量减小了 28%。而冰川平均规模较大的庙尔沟地区, 面积减小了 10.5%, 年减小率为 0.3%, 相应的冰储量减小了 14%。南北坡冰川退缩表现出很大的差异性。其中博格达峰地区南坡冰川面积减小了 25.3%, 北坡冰川面积减小了 16.9%; 庙尔沟地区南坡和北坡冰川面积分别减小了 12.3% 和 6.6%。东疆盆地气温在过去 50 年中有了明显的升高, 尤其在近 20 年以来升温幅度比较大。降水也有增加的趋势, 但增加的降水无法弥补由升温造成的消融, 冰川退缩是过去 40 多年的主要趋势。

冰川的强烈消融在短期内会造成径流量增加, 易产生洪水灾害等突发性事件。从长期看, 将会大幅减小固态水储量, 大大削弱冰川对河流的调节作用。上游无冰川补给的河流, 其径流主要受降水控制, 年际变化大, 出现明显减小趋势; 而上游有冰川补给的

河流, 气温和降水共同影响径流量的变化, 径流的年际变化稳定, 但开始出现增幅减小的趋势。随冰川萎缩趋势增强, 大冰川向小冰川过渡速度加快, 流域冰川对气候变化敏感性增强, 这无疑又会加速冰川消融的速度。

东疆盆地是资源性缺水区域, 对高山区冰川融水的依赖性很高。了解该区水资源状况有利于水资源合理开发利用和未来区域经济发展规划。本文对不同规模冰川面积缩小作了定量的分析, 但对冰川储量的估算仅依赖于经验公式, 冰川对下游河川径流的影响也限于定性的分析推断。今后更详细的研究还要借助于更多定位冰川的长期观测来提供可靠的数据源。对未来径流变化应建立模拟预测体系, 以明确冰川变化与径流变化之间的数量关系以及未来冰川退缩对径流的影响程度。

致谢 本研究工作是中国科学院天山冰川站工作人员合作的结晶, 离不开野外工作人员辛苦的数据采集工作。

参考文献

- 1 Kehrwald N M, Thompson L G, Yao T, et al. Mass loss on Himalayan glacier endangers water resources. *Geophys Res Lett*, 2008, 35, doi:10.1029/2008GL035556
- 2 Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996
- 3 Oerlemans J. Extracting a climate signal from 169 glacier records. *Science*, 2005, 308: 675–677
- 4 Dyrgerov M B, Meier M F. Twentieth century climate change: Evidence from small glaciers. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2000, 97: 1406–1411
- 5 IPCC. *Climate change 2007: The physical science basis*. In: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- 6 Raper S C B, Braithwaite R J. Low sea level rise projections from mountain glaciers and icecaps under global warming. *Nature*, 2006, 439: 311–313
- 7 任贾文, 叶柏生, 丁永建, 等. 中国冰冻圈变化对海平面上升潜在贡献的初步估计. *科学通报*, 2011, 56: 1084–1087
- 8 Ding Y, Liu J S. Glacier lake outburst flood disasters in China. *Ann Glaciol*, 1992, 16: 180–184
- 9 Huggel C, Kääb A, Haeblerli W, et al. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: A case study in the Swiss Alps. *Can Geotech J*, 2002, 39: 316–330
- 10 姚檀栋, 刘时银, 蒲建辰, 等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34: 535–543
- 11 王润, Ernst G, 高前兆. 近期博斯腾湖水位变化及其原因分析. *冰川冻土*, 2003, 25: 60–64
- 12 康尔泗. 天山博格达峰北坡的冰川融水径流及其对河流的补给. *冰川冻土*, 1983, 5: 113–122
- 13 胡小刚, 李念杰, 邓世明. 博格达山南坡黑沟冰川融水径流. *冰川冻土*, 1990, 12: 71–82
- 14 薛燕, 韩萍, 冯国华. 半个世纪以来新疆降水和气温的变化趋势. *干旱区研究*, 2003, 20: 127–130
- 15 普宗朝, 张山清, 李景林, 等. 近 36 年来新疆天山山区气候暖湿变化及其特征分析. *干旱区地理*, 2008, 31: 409–415
- 16 胡汝骥, 樊自立, 王亚俊, 等. 近 50 年来新疆气候变化对环境影响评估. *干旱区地理*, 2001, 24: 97–103
- 17 姜逢清, 胡汝骥. 近 50 年来新疆气候变化与洪、旱灾害扩大化. *中国沙漠*, 2004, 24: 35–40
- 18 杜刚, 魏守忠, 常绪正, 等. 新疆三工河流域气候暖湿化特征分析. *干旱区研究*, 2005, 22: 111–115
- 19 陈亚宁, 徐长春, 杨余辉, 等. 新疆水文水资源变化及其对区域气候变化的响应. *地理学报*, 2009, 64: 1331–1341
- 20 Oerlemans J, Reichert B. Relating glacier mass balance of Meteorological data by using a seasonal sensitivity characteristic. *J Glaciol*, 2000, 46: 1–6

- 21 Casassa G, López P, Pouyaud B, et al. Detection of changes in glacial run-off in alpine basins: Examples from North America, the Alps, Central Asia and the Andes. *Hydrol Process*, 2009, 23: 31–41
- 22 伍光和, 上田丰, 仇家琪. 天山博格达山脉的自然地理特征及冰川发育的气候条件. *冰川冻土*, 1983, 5: 5–16
- 23 王银生, 刘潮海, 丁良福, 等. 中国冰川目录(Ⅲ)—天山山区(东部散流内流区). 北京: 科学出版社, 1986. 1–83
- 24 Tian L D, Yao T D, MacClune K, et al. Stable isotopic variations in west China: A consideration of moisture sources. *J Geophys Res*, 2007, doi: 10.1029/2006JD007718
- 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. *Remote Sens Environ*, 2006, 102: 24–32
- 26 Bolch T, Kamp U. Glacier mapping in high mountains using DEMs, Landsat and ASTER data. *Grazer Schriften Geogr Raumforschung*, 2006, 41: 37–48
- 27 Williams R, Hall D K, Sigurosson O, et al. Comparison of satellite-derived with ground-based measurements of the fluctuations of the margins of Vatnaj kull, Iceland, 1973–1992. *Ann Glaciol*, 1997, 24: 72–80
- 28 Hall D K, Bayr K J, Schnier W, et al. Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from the ground and space (1893–2001). *Remote Sens Environ*, 2003, 86: 566–577
- 29 Bahr D B, Pfeffer W T, Sassolas C, et al. Response time of glaciers as a function of size and mass balance: 1.Theory. *J Geophys Res*, 1998, 103: 9777–9782
- 30 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: 103–110
- 31 伍光和, 张顺英, 王仲祥. 天山博格达峰现代冰川的进退变化. *冰川冻土*, 1983, 5: 143–152
- 32 王宗太. 博格达峰黑沟 8 号冰川发育若干问题浅析. *冰川冻土*, 1991, 13: 141–158
- 33 Haeberli W. Glacier fluctuations and climate change detection. *Geogr Fis Dinam Quat*, 1995, 18: 191–195
- 34 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: 96–106
- 35 李忠勤, 王飞腾, 朱国才, 等. 天山庙尔沟平顶冰川的基本特征和过去 24 a 间的厚度变化. *冰川冻土*, 2007, 29: 61–65
- 36 Niederer P, Bilenko V, Ershova N, et al. Tracing glacier wastage in the Northern Tien Shan (Kyrgyzstan/Central Asia) over the last 40 years. *Clim Change*, 2008, 86: 227–234
- 37 Aizen V B, Kuzmichenok V A, Surazakov A B, et al. Glacier changes in the Tien Shan as determined from topographic and remotely sensed data. *Glob Planet Change*, 2007, 56: 328–340
- 38 Bolch T. Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data. *Glob Planet Change*, 2007, 56: 1–12
- 39 Narama C, Kääb A, Duishonakunov M, et al. Spatial variability of recent glacier area changes in the Tien Shan Mountains, Central Asia, using Corona (~1970), Landsat (~2000), and ALOS (~2007) satellite data. *Glob Planet Change*, 2010, 71: 42–54
- 40 杨威, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 近期藏东南帕隆藏布流域冰川的变化特征. *科学通报*, 2010, 55: 1775–1780
- 41 杨威, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 青藏高原东南部岗日嘎布地区冰川严重损耗与退缩. *科学通报*, 2008, 53: 2091–2095
- 42 Bahr D B, Meier M F, Peckham S D. The physical basis of glacier volume-area scaling. *J Geophys Res*, 1997, 43: 557–562
- 43 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 Glaciol*, 2003, 49: 117–124
- 44 Bahr D B, Dyurgerov M, Meier M F. Sea-level rise from glaciers and ice caps: A lower bound. *Geophys Res Lett*, 2009, 36, doi: 10.1029/2008GL036309
- 45 周聿超. 新疆河流水文水资源. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1999. 101–110
- 46 高鑫, 叶柏生, 张世强, 等. 1961–2006 年塔里木河流域冰川融水变化及其对径流的影响. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40: 654–665
- 47 高建芳, 骆光晓. 气候变化对新疆哈密地区河川径流的影响分析. *冰川冻土*, 2009, 31: 748–758
- 48 施雅风, 曲耀光. 柴窝堡-达坂城地区水资源与环境. 北京: 科学出版社, 1989