

中国西部冰川小冰期以来的变化 ——以天山乌鲁木齐河流域为例

蒙彦聪¹, 李忠勤^{1,2}, 徐春海^{2,3}, 怀保娟^{2,3}

(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; 3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 利用航拍地形图、TM 影像、spot5 及 landsat 8 影像,在遥感和地理信息技术的支撑下研究小冰期以来乌鲁木齐河流域冰川变化。对能够观察到小冰期最盛时期冰碛垄的 73 条冰川研究发现:小冰期到 2014 年冰川整体呈退缩趋势。相对于小冰期最盛期,面积共退缩了 37.22 km²,退缩率为 64.84%;总长度共退缩了 52 878.67 m,退缩率为 49.83%,1959 年以来,流域内的乌鲁木齐河源 1 号冰川一直处于退缩状态,物质平衡持续亏损。小冰期以来,海拔 3 400~4 000 m 之间的冰川退缩最明显,海拔 3 400~3 600 m 之间的冰川消失。冰川朝向分析表明,流域朝北向冰川多于其它方向,冰川在各个朝向上面积均呈退缩趋势,正东向冰川退缩最为严重。分析发现,流域冰川大幅度退缩的主要缘于该流域小冰川数量较多(小冰期冰盛期面积<1 km²的冰川数量达 75.3%),小冰川对气候变化的响应敏感,大西沟气象站气象资料分析表明,降水的增加无法弥补夏季气温的持续升高引起的冰川消融是该流域普遍冰川退缩的主要原因。

关键词: 冰川变化; 遥感解译; 乌鲁木齐河流域; 气候变化; 小冰期

中图分类号: P931.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6060(2016)03-0486-09(486~494)

DOI:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2016.03.004

冰川变化对气候变化具有很好的指示作用^[1],在世界范围内,冰川变化被广泛的监测是因为其对海平面的上升、水资源供给、渔业、水生生态系统有重要意义^[2]。近期的监测显示无论是极地还是热带,冰川都普遍处于退缩状态,而且出现加速趋势^[3]。我国是世界上中、低纬度地区冰川最为发达的国家^[4],冰川在干旱区具有及其重要的作用,它是维系绿洲经济发展和确保寒区生态系统稳定的重要保障^[5]。然而,我国西部冰川变化研究主要集中于近 50 a,涉及小冰期以来研究很少,天山乌鲁木齐河流域是我国西北干旱区的内陆河流域,近 30 a 来该流域建立了比较完善观测体系,并成为我国重要的内陆河研究基地^[6-7]。因此,以乌鲁木齐河流域为例分析中国西部冰川小冰期以来的变化具有很好的代表性。

学术界对于小冰期较为一致的看法是,小冰期发生的时段介于 1500-1920 年,世界各地的冰川在

此期间发生前进并形成 3 道终碛垄^[8-9]。在小冰期末期,大致是 19 世纪中叶,由于全球变暖冰川明显退缩。结合地形图、landsat 系列影像、spot5 影像、Google Earth 等,以乌鲁木齐河流域为例,分析小冰期最盛期以来的冰川变化特征,及有气候记录以来该地区冰川变化的气候背景。

1 研究区概况

乌鲁木齐河流域位于天山中段北坡(86°45'~87°56'E,43°00'~44°07'N),流域南起依连哈比尕山分水岭,北至古尔班通古特沙漠南缘东道海子,东面为板房沟流域,西面为头屯河流域(图 1)。乌鲁木齐河全长 214.30 km,面积 4 684 km²。流域的中、高山区是径流的形成区,面积为 1 070 km²,河道长 62.60 km,发育有现代冰川 155 条,面积为 48.04 km²。

收稿日期: 2015-12-04; 修订日期: 2016-02-24

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2013CBA01801);中科院重点部署项目(KJZD-EW-G03-01)

作者简介: 蒙彦聪(1992-),女,甘肃庄浪人,硕士研究生,研究方向:冰川变化与水资源. Email:563521833@qq.com

通讯作者: 李忠勤,男,研究员,博导,主要从事冰川与环境方面的研究. Email:lizq@lzb.ac.cn

冰川类型主要有悬冰川、冰斗冰川和冰斗—山谷冰川,乌鲁木齐河源1号冰川(以下简称1号冰川)是河源区最大的冰川,该冰川为冰斗—山谷冰川,自1959年以来该冰川系统的进行了物质平衡、运动速度、末端位置、冰川温度、冰川厚度、冰川面积、融水径流等观测,截止到2009年冰川的面积约为1.647 km²,储量约为8 334.1×10⁴ m³。乌鲁木齐河流域由乌鲁木齐河水系和东山水系组成:乌鲁木齐河水系包括南山的乌鲁木齐河和10条小河;东山水系包括源于东山的水磨沟、芦草沟、铁厂沟、白杨沟等15条小河和山泉。流域内较大的河流有乌鲁木齐河、板房沟、小东沟、水磨沟、铁厂沟,流域气候属中温带大陆性干旱气候,南部海拔高度2 000 m以上的山区年平均气温2℃,降水量500 mm,蒸发量953.40 mm;北部年均气温5~7℃,降水量150 mm,蒸发量2 200 mm^[10]。

2 数据与方法

冰芯气候环境记录、乌鲁木齐河流域小冰期年代主要参考文献记载和树木年龄资料等都反映出

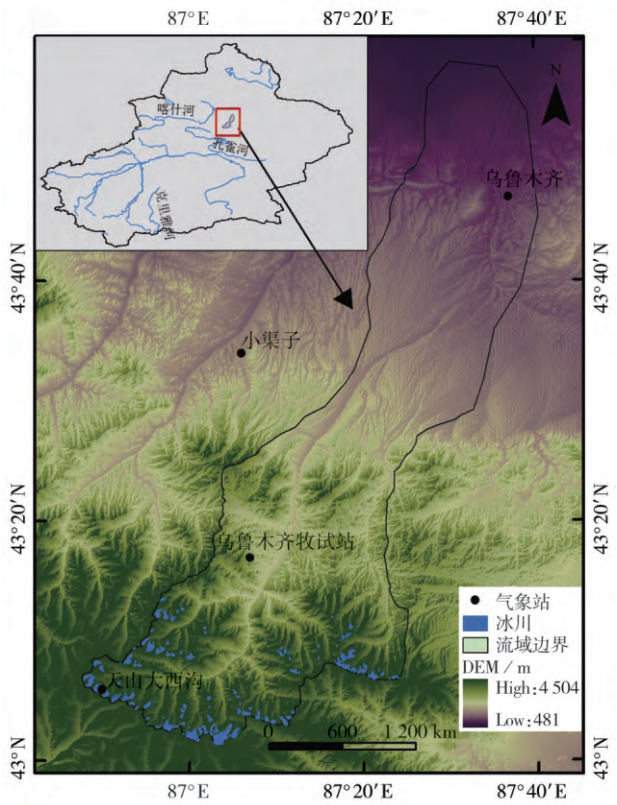


图1 乌鲁木齐河流域位置图

Fig.1 Location of the Urumqi River Watershed

该地区三次小冰进时期分别对应于(1 538 ± 20)年,(1 777 ± 20)年和(1 871 ± 20)年^[11],与祁连山敦德冰芯记录中小冰期三次冰碛中第一、第三道冰碛年龄基本一致,但第二道冰碛年龄晚于郭德冰芯第二期近百年,这可能与18世纪降水增加有关。这三个时段以冷湿—冷干为主,有利于冰川前进并形成冰碛垄。冰进过程中并不一定是后一次冰进超过前一次冰进,其中第二次冰进持续时间最长,冰川规模可能为最大^[12]。

2.1 数据源

本文所用的数据有:1:50 000地形图、spot5影像、Landsat 影像、数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)及气象数据。研究区共涉及地形图6张,航摄于1964年,1967年调绘,1973年出版第一版,其坐标系是1954北京坐标系和1956黄海高程系。为了获取冰碛垄信息,收集和购买了Spot5高分辨率影像,该影像全色波段分辨为2.5 m或5 m,多光谱波段分辨率为10 m,影像接收日期为2005年9月7日,编号为5 217-262/8 05/09/07 04:57:24 2 A。

所用 landsat 影像来自于 USGS (<http://www.usgs.gov>)的数据共享平台(表1)。数字高程模型来源于 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, <http://www.gscloud.cn>)。由美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量。使用修订版V4.1版本,分辨率90 m,该版本由CIAT(国际热带农业中心)利用新的插值算法得到的SRTM地形数据,此方法更好的填补了SRTM90的数据空洞。该数据标称绝对高程精度是±16 m,绝对平面精度是±20 m。研究区气温、降水数据源于大西沟气象站(43°06'N, 86°50'E)。

2.2 方法

对地形图的处理包括扫描,配准,拼接。对地形图扫描后,在ENVI4.8中按照公里网格校正,几何纠正的均方差均小于一个单元格,然后再进行地形图拼接。所用的Landsat卫星影像已进行过系统辐

表1 乌鲁木齐河流域影像数据

Tab.1 Image of the Urumqi River Watershed

影像	接收日期	传感器	分辨率	轨道号
LT41430301989230XXX01	1989-08-18	TM	30	143/30
LC81430302014243LGN00	2014-08-31	OLI_TIRS	30/15	143/30



图2 1号冰川小冰期冰盛期冰碛垄的位置

Fig.2 Position of the little ice age moraine of Urumqi No.1 glacier

射校正和地面控制点几何校正,并且利用DEM数据进行了地形校正,其大地测量校正依赖于精确的地面控制点和高精度的DEM数据,已有研究论证USGS所提供的经过正射校正后的Landsat遥感影像具有相当高的精度^[13],因此本文未做进一步校正。为方便不同时期冰川范围(边界)进行矢量化处理,对拼接好的地图数据和spot5影像以2014年的Landsat8影像为基准,进行几何精校正,所有数据均采用统一的UTM(45N带)投影和WGS84椭球体建立坐标系。影像在提取冰川边界时会受到云、表碛物,积雪,地形图误差等影响。为消除这些影响,选择影像基于以下条件:(1)选择没有云层遮挡的影像,以消除云的影像;(2)所有影像都取自消融期末,消除积雪影响,同时,对影像进行锐化处理,这样可以更有效的区分雪斑和有冰雪覆盖的冰川。

小冰期时期冰川变化信息基于spot影像,在spot影像上勾绘出冰碛垄,同时参考Google Earth、航摄地形图、TM影像提高冰川边界提取的精度(图2);1964年冰川边界是在ArcGIS10支撑下,对地形图数字化获取;1989年、2005年和2014年冰川边界通过目视解译,并以影像叠加数字高程模型来进行目视修正获取,该方法是目前获取冰川边界精度最高的方式^[14]。

2.3 不确定性分析

对处理后的数据进行误差评价,地形图纠正误差在一个像元以内;ETM+影像几何精纠正的误差为0.5个像元。本研究所用ETM+影像空间分辨率15 m,遥感影像的空间分辨率与均方根误差都影响到测量的准确性,跟据Hall、Silvreo等^[15-16]计算冰川面积和长度变化不确定性的公式来确定冰川信息提取的误差:

$$U_T = \sqrt{\sum \lambda^2} + \sqrt{\sum \varepsilon^2} \quad (1)$$

$$U_A = 2U_T \sqrt{\sum \lambda^2} + \sqrt{\sum \varepsilon^2} \quad (2)$$

式中: U_T 为长度不确定性; λ 为影像分辨率; ε 为各期影像图与基准影像的配准误差; U_A 为面积不确定性。结果表明,相对于2014年遥感影像,提取冰川的长度不确定性为 ± 43.6 m,面积不确定性是 ± 0.003 km²。

3 结果与讨论

3.1 冰川面积、长度和条数的变化

对五期冰川边界叠加(图3),可以看出流域冰川自小冰期以来普遍处于退缩状态。统计表明,小冰期到1964年退缩15.86 km²,退缩率27.63%;1964年到1989年退缩13.62 km²,退缩率30.53%;1989年到2005年退缩6.42 km²,退缩率20.71%;2005年到2014年退缩4.39 km²,退缩率17.87%。小冰期到1989年,73条都处于退缩中(图4a),大部分冰川(44条)的退缩率介于30%~60%;有21条冰川的退缩率超过60%,1989-2014年冰川退缩更加明显,有12条冰川消失,47条冰川的退缩率超过10%。同时为分析不同面积规模的冰川变化特征,将冰川分为4个等级(图4b):小冰期到2014年,面积<0.1 km²的冰川完全消失,平均减小0.065 km²。面积规模为2~5 km²的冰川退缩率最小。由此可见,小冰川通常具有较小的绝对变化量和较大的变化率,说明小冰川对气候变化的响应较大冰川更加敏感^[17],这是因为能量交换对于体积较小的冰川的作用较大冰川更为强烈^[18]。标准差反映数据的离散程度,在一定程度上反映冰川变化的波动性,对外界条件变化

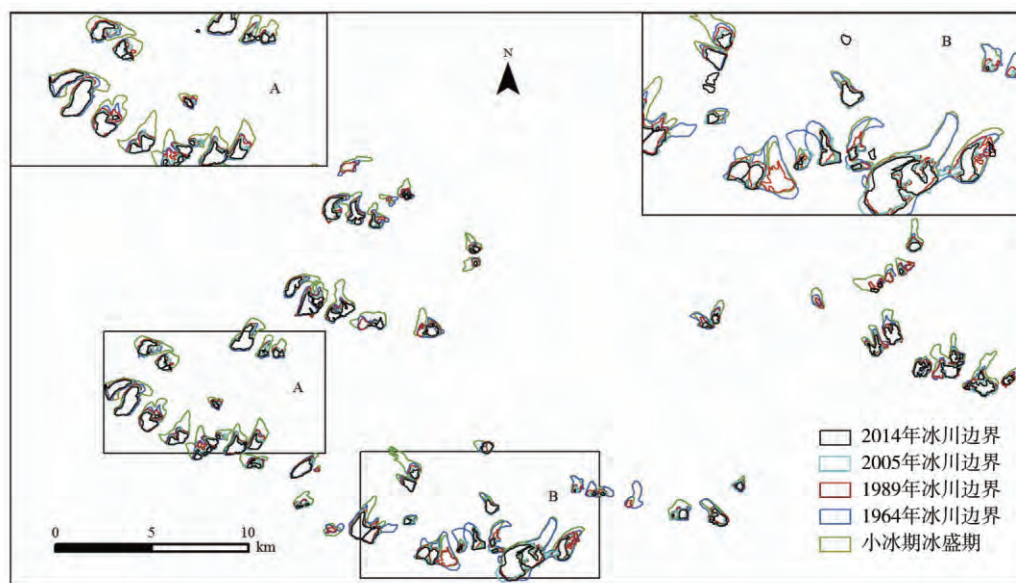


图3 乌鲁木齐河流域冰川退缩情况

Fig.3 Glacier shrinkage in the Urumqi River Watershed

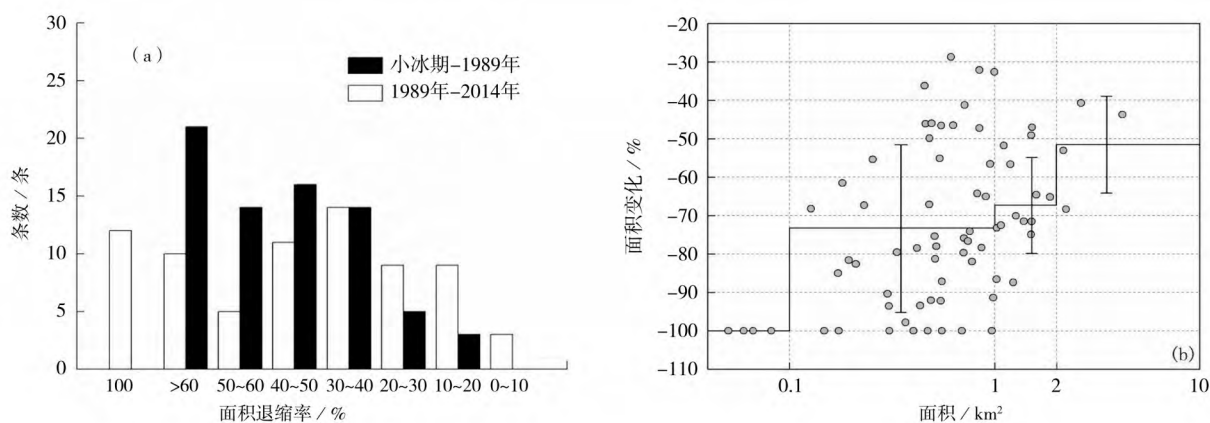


图4 乌鲁木齐河流域小冰期冰盛时期以来冰川条数和面积的变化

Fig.4 Changes of number and area of the the Urumqi River Watershed since the little ice age

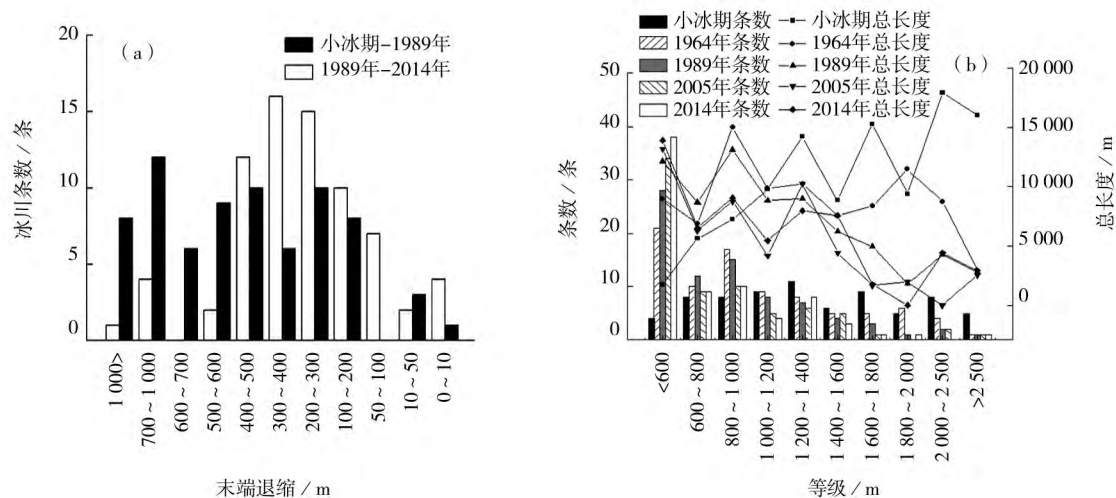


图5 乌鲁木齐河流域小冰期冰盛时期以来冰川长度和条数的变化

Fig.5 Changes of length and number of the the Urumqi River Watershed from little ice age

缩率49.83%。小冰期到1989年(图5),冰川平均退缩558.3 m,62%的冰川的退缩率超过400 m,1989–2014年,72%的冰川退缩率在100~500 m之间,大多数冰川(45条)末端退缩速率超过 $8\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。为研的差异性^[19]。结果显示,面积规模为 $0.1\sim 1\text{ km}^2$, $1\sim 2\text{ km}^2$, $2\sim 5\text{ km}^2$ 的冰川面积退缩比率的标准差依次为21.41、12.55、12.42,即小面积冰川退缩的标准差越大。

长度上,小冰期到2014年共退缩52 878.7 m,探究不同长度等级的冰川末端变化特征,将所研究的73条冰川长度分为10个等级: $<600\text{ m}$; $600\sim 800\text{ m}$; $800\sim 1\,000\text{ m}$; $1\,000\sim 1\,200\text{ m}$; $1\,200\sim 1\,400\text{ m}$; $1\,400\sim 1\,600\text{ m}$; $1\,600\sim 1\,800\text{ m}$; $1\,800\sim 2\,000\text{ m}$; $2\,000\sim 2\,500\text{ m}$; $>2\,500\text{ m}$ (图5);冰川长度 $<600\text{ m}$ 的条数从小冰期至2014年显著增多,主要是大冰川在退缩过程中分裂为小冰川,导致此范围内条数增多,总长度增加。冰川长度 $>1\,200\text{ m}$ 的条数减少,总长度减少。以上事实说明冰川退缩,长度减少。

在乌鲁木齐河流域内取得了8条代表性冰川,编号为:5Y730B0042、5Y730D0030、5Y730C0029、5Y730C0008、5Y730B0040、5Y730C0016、5Y730D0024和5Y730D0023,对它们的五期长度变化做统计(图6)。1号冰川(5Y730C0029)自1959年以来一直处于退缩状态,物质平衡持续减小,平衡线不断上升(图7),尤其20世纪是90年代中期以来出现了明显的加速趋势^[20–21]。从世界范围来看,1号冰川近50 a的变化幅度介于许多极大陆型和海洋型山岳冰川之间,与亚洲尤其是中亚地区的冰川较为一致^[21]。乌鲁木齐河源1号冰川小冰期至2014年面积退缩率为40.91%,长度退缩率为39.98%。

3.2 不同海拔梯度变化特征

基于STRM-DEM数据,以100 m为海拔梯度,对冰川面积进行统计(图8a)。各海拔区间内冰川普遍退缩,海拔 $3\,400\sim 4\,000\text{ m}$ 之间的冰川的冰川退缩最为明显,小冰期以来,面积介于 $3\,400\sim 3\,600\text{ m}$ 之间的冰川消失,冰川在不同海拔梯度内的面积变化率表明:随着全球气候变暖,乌鲁木齐河流域冰川面积减小,雪线上升,末端海拔升高。

3.3 冰川朝向变化

冰川朝向是指冰川面对的方向^[22],按北(N)、东北(NE)、东(E)、东南(SE)、南(S)、西南(SW)、西(W)和西北(NW)8个方位进行统计。冰川朝北向上面

积大于其他朝向(图8),其中冰川在偏北向(N、NW和NE)2014年面积 17.31 km^2 ,占总面积的85.78%。偏南向(S、SW和SE)2014年面积 1.24 km^2 ,占总面积的6.14%。南北向冰川面积的比值(S/N)为0.07,表明乌鲁木齐河流域冰川分布呈现明显的不对称性,朝北向冰川多于朝南向冰川。这是由于北坡接收的太阳辐射少,有利于冰川发育。

小冰期以来冰川朝向的五次统计(图8),其中正北向上面积从小冰期冰盛时期到2014年减少率54.47%;正南向上减少率为71.61%;东北向面积减少率为75.74%;正东向面积减少率为86.98%;东南向面积减少率为83.11%;西南方向面积减少率为53.97%;正西向面积减少率为73.20%;西北向面积减少率为65.86%。冰川面积在各个朝向上都处于减少趋势,西南方向面积变化较其他地方较小,主要是由于该方向冰川正迎西风带水汽输送的主要方向,冰川发育的降水条件优于其他方向冰川所造成。

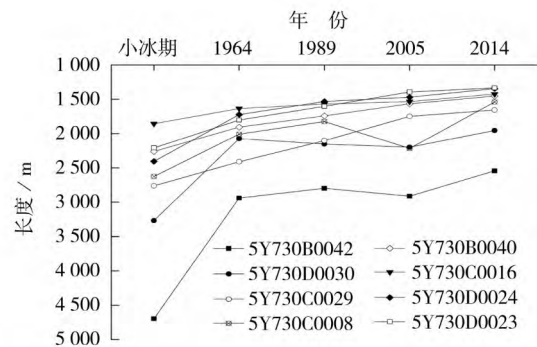


图6 乌鲁木齐河源典型冰川长度变化
Fig.6 Changes of length of the the typical glaiaiers in Urumqi River Watershed from little ice age

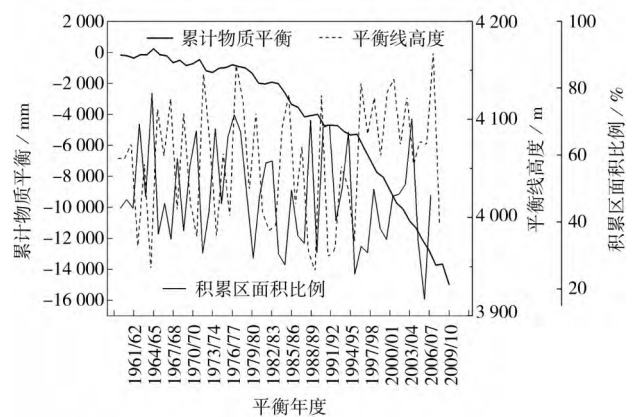


图7 1号1959–2010年间冰川累计物质平衡、平衡线高度和积累区面积比率变化
Fig.7 Cumulative mass balance,accumulation area ratio, and equilibrium line altitude of Urumqi NO.1 glacier

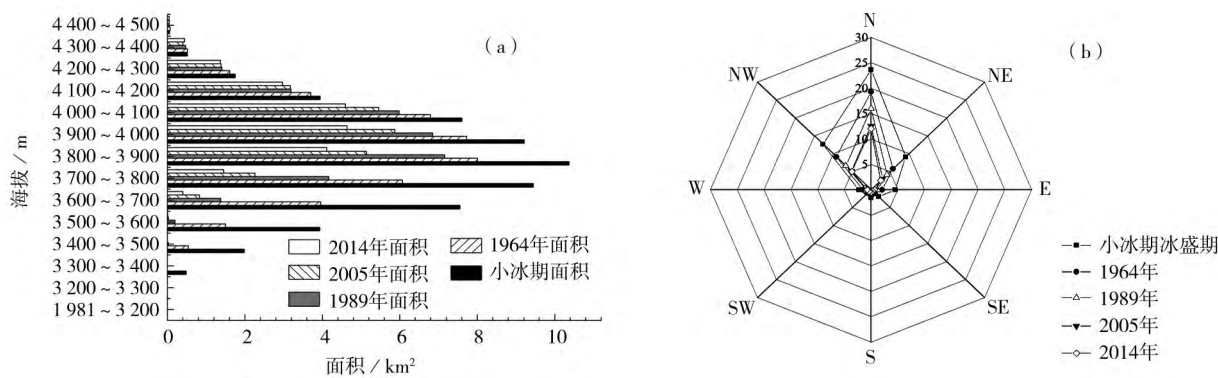


图8 乌鲁木齐河流域冰川海拔、朝向变化

Fig.8 Change of glacier aspect and terminal elevation of the Urumqi River Watershed

4 讨论

4.1 典型山地冰川退缩对比分析

山地冰川在全球气候变暖背景下总体处于退缩趋势,近些年高分辨率卫星影像数据在冰川监测中得到广泛应用,使研究大区域内冰川变化成为可能^[23]。为进一步研究乌鲁木齐河流域冰川变化特征,选择中国西部典型山区冰川变化情况与本研究进行对比。在考虑到研究时段的情况下,结合学者们对疏勒河流域、党河流域、北大河流域、哈拉河流域小冰期到1956年冰川变化的对比分析(表2)^[24],乌鲁木齐河流域小冰期到1964年冰川面积退缩率为27.63%,长度退缩率为15.10%。相对比中国西部其他冰川而言,乌鲁木齐河流域冰川变化幅度呈较大趋势。冰川退缩速度如此之快,首先是受到水热组合情况的影响,单条冰川面积的大小也是影响其退缩的主要原因,小冰期冰盛时期该区 $<1\text{ km}^2$ 的冰川有55条,占整个区域冰川总条数的75.34%,面积越小对于气候变化越敏感^[25]。

4.2 冰川变化的气候背景

降水、气温及其组合是影响冰川发育的主要因素,两者的年际变化决定冰川性质,发育和退缩^[26-28]。冰川退缩与温度升高和消融期延长有关,据乌鲁木

齐河源1号冰川的相关研究,冰川的消融量与夏季平均气温之间有良好的相关性,冰川区气温的普遍上升,特别是夏季气温的升高加速了冰川的消融强度和速率^[20,28]。

为分析该区域冰川退缩情况,选取大西沟气象站1959–2013年气象资料(图9)。可以看出年夏季平均气温升高超过 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ (通过显著性水平0.001检验),1990年以后气温增幅更加明显。与气温变化类似,冬季降水变化略呈上升趋势。据王宗太的研究,天山大西沟小冰期以来的年均温度为 $-6.8\sim-6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量为474~489 mm,明显低于近50 a来大西沟站的年均气温,小冰期以来的气候变化,是在几次波动中逐渐趋于暖干^[11]。根据康尔泗对高亚洲12条冰川平衡线ELA与夏季气温关系的分析,夏季平均气温升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,冰川平衡线升高可达100~160 m的高差,如保持平衡线不变,需要固态降水增加幅度在40%到100%^[29]。显然,乌鲁木齐河流域在这种气候背景之下,虽然降水量有所增加,但无法弥补对冰川的补给无法弥补冰川消融所带来的物质损失。

5 结论

本文研究了乌鲁木齐河流域小冰期以来冰川变化信息,得到以下结论:

(1)对能够观察到小冰期最盛时期冰碛垄的73条冰川进行分析,小冰期最盛时期面积是 57.40 km^2 ,2014年面积是 20.18 km^2 ,共退缩 37.22 km^2 ,退缩比率64.84%,平均每条冰川面积退缩 0.47 km^2 。小冰期时期冰川总长度106 122.85 m,2014年总长度53 244.18 m,共退缩52 878.67 m,退缩比率49.83%。

表2 典型山地冰川变化对比
Tab.2 Comparison of typical glacier shrinkage

流域	1956年冰川面积 / km^2	小冰期冰川面积 / km^2	LIA-1956 面积变化 / km^2	变化率 / %	长度改变量 / m	长度变化率 / %
疏勒河	440.1	509.0	-63.6	-14.5	-84	-7.0
党河	59.3	66.8	-9.0	-15.2	-85	-9.1
北大河	66.9	66.9	-14.0	-20.9	-93	-16.5
哈拉河	72.4	97.4	-21.0	-16.9	-177	-13.3

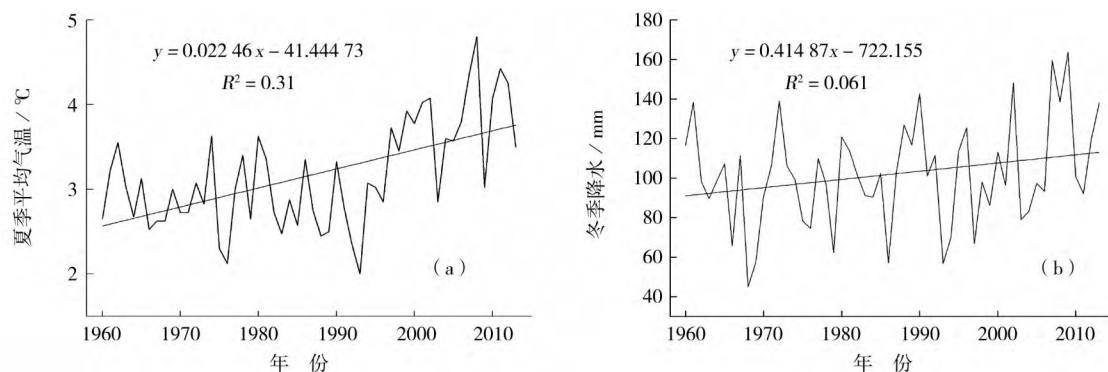


图9 大西沟气象站气温、降水变化

Fig.9 Average temperature and total precipitation of meteorological stations near the Urumqi River Watershed

(2) 乌鲁木齐河流域冰川分布及变化存在着显著的区域差异性:冰川在 3 300 ~ 3 900 m 海拔区间内面积退缩明显,而 4 100 ~ 4 400 m 海拔区间内面积退缩不明显。乌鲁木齐河流域冰川面积减少,雪线上升,末端海拔升高。

(3) 对冰川朝向分析表明,乌鲁木齐河流域冰川在各个朝向上冰川面积均呈退缩趋势,朝北向冰川多于其他方向,是因为接受太阳辐射少,有利于冰川发育。

(4) 大西沟和乌鲁木齐两个气象台站气温、降水变化分析表明,1959–2013 年该区域冰川气温呈显著上升趋势,固态降水量亦有增加。气温升高,降水增加对冰川的补给无法弥补冰川消融带来的物质损失,是乌鲁木齐河流域冰川萎缩的主要原因。

参考文献 (References)

- [1] KÄÄB A, CHIARLE M, RAUP B, et al. Climate change impacts on mountain glaciers and permafrost [J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 56(1): vii–ix.
- [2] KOCH J, MENOUNOS B, CLAGUE J J. Glacier change in Garibaldi Provincial Park, southern Coast Mountains, British Columbia, since the Little Ice Age [J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 66(3): 161–178.
- [3] BARRY R G. The status of research on glaciers and global glacier recession: a review [J]. *Progress in Physical Geography*, 2006, 30(3): 285–306.
- [4] 施雅风. 简明中国冰川目录 [M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005: 25–32. [SHI Yafeng. Concise glacier inventory of China [M]. Shanghai: Shanghai popular science press, 2005: 25–32.]
- [5] 高闻宇, 李忠勤, 李开明, 等. 基于遥感与 GIS 的库克苏河流域冰川变化研究 [J]. *干旱区地理*, 2011, 34(2): 252–261. [GAO Wenyu, LI Zhongqin, LI Kaiming, et al. Glacier variation in the Kukesu River Basin during 1963–2004 based on remote sensing data and GIS techniques [J]. *Arid Land Geography*, 2011, 34(2): 252–261.]
- [6] 杨怀仁, 邱淑彰. 乌鲁木齐河上游第四纪冰川与冰后期气候波动 [J]. *地理学报*, 1965, 31(3): 194–211. [YANG Huairan, QIU Shuzhang. Quaternary Glaciations and the postglacial climatic fluctuations in the region of upper Urumqi valley, Sinkiang [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1965, 31(3): 194–211.]
- [7] 施雅风, 苏珍. 天山乌鲁木齐河源冰川的形态特征与历史演变 [C] // 天山乌鲁木齐河冰川与水文研究. 北京: 科学出版社, 1965: 83–87. [SHI Yafeng, SU Zhen. The glaciers features and the glaciers evolution history at the headwater of the Urumqi River, Tianshan Mountains [C] // The Study of Glaciers and Hydrology of Urumqi River, Tianshan Mountains. Beijing: Science Press, 1965: 83–87.]
- [8] 施雅风, 崔之久, 苏珍, 等. 中国第四纪冰川与环境变化 [M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2005: 148–289. [SHI Yafeng, CUI Zhijiu, SU Zhen, et al. The Quaternary Glaciations and environmental variations in China [M]. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Publishing House, 2005: 148–289.]
- [9] 蒲健辰, 姚檀栋, 王宁练, 等. 普若岗日冰原及其小冰期以来的冰川变化 [J]. *冰川冻土*, 2002, 24(1): 87–92. [PU Jianchen, YAO Tandong, WANG Ninglian, et al. Puruogangri Ice Field and its variations since the Little Ice Age of the north Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(1): 87–92.]
- [10] 周平, 张明军, 李忠勤, 等. 中国天山冰川区降水、积雪 pH 和电导率季节变化特征分析 [J]. *干旱区地理*, 2010, 33(4): 518–524. [ZHOU Ping, ZHANG Mingjun, LI Zhongqin, et al. Seasonal variations of the pH and electrical conductivity in precipitation and snow on the glaciers of Tianshan Mountains, China [J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(4): 518–524.]
- [11] 王宗太. 天山中段及祁连山东段小冰期以来的冰川及环境 [J]. *地理学报*, 1991, 46(2): 160–168. [WANG Zongtai. The glacier and environmental in the middle sector of Tianshan and the eastern sector of Qilianshan since the Little Ice Age [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1991, 46(2): 160–168.]

- [12] HALL D K, BAYR K J, SCHNER W, et al. Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from ground and space (1893–2001) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(4): 566–577.
- [13] 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. [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.]
- [14] 白金中, 李忠勤, 张明军, 等. 1959–2008年新疆阿尔泰山友谊峰地区冰川变化特征[J]. *干旱区地理*, 2012, 35(1): 116–124. [BAI Jinzhong, LI Zhongqin, ZHANG Mingjun, et al. Glacier changes in Youyi Area in the Altay Mountains of Xinjiang during 1959–2008 [J]. *Arid Land Geography*, 2012, 35(1): 116–124.]
- [15] SILVERIO W, JAQUET J M. Glacial cover mapping (1987–1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(3): 342–350.
- [16] YE Q, KANG S, CHEN F, et al. Monitoring glacier variations on Geladandong Mountain, central Tibetan Plateau, from 1969 to 2002 using remote-sensing and GIS technologies [J]. *Journal of Glaciology*, 2006, 52(179): 537–545.
- [17] JOHANNESSON T, RAYMOND C, WADDINGTON E D. Time-scale for adjustment of glaciers to changes in mass balance [J]. *Journal of Glaciology*, 1989, 35(121): 355–369.
- [18] GRANSHAW F D. Glacier change in the North Cascades National Park Complex, Washington State USA, 1958–1998 [D]. Portland: Portland State University, 2002.
- [19] 何毅, 杨太保, 冀琴, 等. 中亚阿拉套地区冰川退缩与气候变化关系研究[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(5): 908–915. [HE Yi, YANG Taibao, JI Qin, et al. Glacier shrinkage and its dependence on climate in the Central Asia Alatau Region [J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(5): 908–915.]
- [20] 张国飞, 李忠勤, 王文彬, 等. 乌鲁木齐河源1号冰川2009年出现物质正平衡[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(2): 263–268. [ZHANG Guofei, LI Zhongqin, WANG Wenbin, et al. A positive mass balance appeared at Urumuqi Glacier No.1 in 2009 [J]. *Arid Land Geography*, 2013, 36(2): 263–268.]
- [21] 杨惠安, 李忠勤, 叶佰生, 等. 过去44年乌鲁木齐河源一号冰川物质平衡结果及其过程研究[J]. *干旱区地理*, 2005, 28(1): 76–80. [YANG Huian, LI Zhongqin, YE Baisheng, et al. Study on mass balance and process of Glacier No.1 at the headwaters of the Urumqi River in the past 44 years [J]. *Arid Land Geography*, 2005, 28(1): 76–80.]
- [22] 姚晓军, 刘时银, 郭万钦, 等. 近50年来中国阿尔泰山冰川变化——基于中国第二次冰川编目成果[J]. *自然资源学报*, 2010, 27(10): 1734–1745. [YAO Xiaojun, LIU Shiyin, GUO Wanqin, et al. Glacier change of Altay Mountain in China from 1960 to 2009: Based on the Second Glacier Inventory of China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 27(10): 1734–1745.]
- [23] 王叶堂, 侯书贵, 鲁安新, 等. 近40年来天山东段冰川变化及其对气候的响应[J]. *干旱区地理*, 2009, 31(6): 813–821. [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 [J]. *Arid Land Geography*, 2009, 31(6): 813–821.]
- [24] 刘时银, 沈永平, 孙文新, 等. 祁连山西段小冰期以来的冰川变化研究[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 227–233. [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 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 227–233.]
- [25] 怀保娟, 李忠勤, 孙美平, 等. 近50年黑河流域的冰川变化遥感分析[J]. *地理学报*, 2014, 69(3): 365–377. [HUI Baojuan, LI Zhongqin, SUN Meiping, et al. RS analysis of the glacier change in the Heihe River Basin in the last 50 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(3): 365–377.]
- [26] 于国斌, 李忠勤, 王璞玉. 近50a祁连山西段大雪山和党河南山的冰川变化[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(2): 209–309. [YU Guobin, LI Zhongqin, WANG Puyu. Glacier changes at the Daxue Mountain and Danghenan Mountain of west Qilian Mountains in recent 50 years [J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(2): 209–309.]
- [27] 李忠勤, 沈永平, 王飞腾等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川消融对气候变化的响应[J]. *气候变化研究进展*, 2007, 3(3): 132–137. [LI Zhongqin, SHEN Yongping, WANG Feiteng, et al. Response of melting ice to climate change in the Glacier No.1 at the Headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountain [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(3): 132–137.]
- [28] 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.]
- [29] 康尔泗. 高亚洲冰冻圈能量平衡特征和物质平衡变化计算研究[J]. *冰川冻土*, 1996, 18(1): 12–22. [KANG Ersi. Energy balance characteristics and mass balance change calculation research of cryosphere in High Asia [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(1): 12–22.]

Glacier change of Western China since the Little Ice Age: a case of the Urumqi River Watershed

MENG Yan-cong¹, LI Zhong-qin^{1,2}, XU Chun-hai^{2,3}, HUA I Bao-juan^{2,3}

(1 College of Geography and Environmental 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 730070, Gansu, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Change in the extent of glaciers are among the best natural indicators of climatic change. Current glacier fluctuations have important implications for water supply, fisheries, aquatic ecosystems, and sea-level change. However, most studies of glacier variations in western China focus on the recent 50 years, the researches involve in glacier changes since the Little Ice Age is relatively less. The Urumqi River Watershed is a typical northwest inland basin, the glaciers in this region provide important resources for local economic development and drinking water for man use. So this river basin has become one of the most important continental river research base. Thus, a case study of glacier changes in the Urumqi Basin since the Little Ice Age is representative. Based on 1:50 000 topographic maps in 1964, Landsat TM remote sensing image in 1989, Spot5 images in 2005, Landsat8 image in 2014 and digital elevation model (ASTER-DEM), the study regions of glaciers were extracted by using remote sensing and the changes of glaciers in the study area were analyzed under the support of the geographic information systems technology. According to spot5 images, the glacier boundary of the Little Ice Age were extracted. At the same time, referring to Google earth, topographic map and TM images to improve the accuracy of the boundary. The glacier boundary in 1964 were based on ArcGIS10 to digitization the topographic map. The glacier boundaries in 1989, 2005 and 2014 were extracted through visual interpretation, meanwhile, images overlay DEM to visual amend. This method is the highest accuracy to achieve the boundary of glaciers at present. The result indicate that the analysis of 73 glaciers in which moraine ridge can be easily observed during the Little Ice Age Maximum shows that the total area of glaciers decreased 37.22 km², at a rate of 64.84% in the period LIA-2014, and the total length of glaciers decreased 52 878.67 m at a rate of 49.83%. Since 1959, the observed mass balance of Urumqi No.1 glacier continued losses. In the altitude of 3 300–4 000 m, the area of glaciers decreased significantly, the glaciers at an altitude of 3 400–3 600 had disappeared. The orientation analysis of glaciers shows that the glaciers in north direction were more than those in other directions. The area of glaciers decreased in all the directions and deceased relatively small in southwest direction, the reduction rate of glaciers to the east slope of Urumqi River Basin was largest. Analysis showed that the reasons of the large change rate of glaciers is caused by the large proportion of small glaciers, whose glaciers smaller than 1 km² account for 75.3% in the investigated glaciers. And those glaciers have the highest degree of response to climate change. The analysis of the meteorological data from Daxigou weather stations from 1959 to 2013 shows that the main reason of the glacier shrinkage in Urumqi River watershed is that the glacier mass supply of increased precipitation could not fill the gap of the huge glacier mass loss caused by rising temperature.

Key Words: glacier changes; RS interpretation; Urumqi River Watershed; climate change; Little Ice Age