

近40 a来天山台兰河流域冰川资源变化分析

怀保娟^{1,2}, 李忠勤^{1,3}, 孙美平³, 周 平¹

(1. 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;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 台兰河流域作为阿克苏河的支流, 是以冰川融水补给为主的河流, 流域面积为1 324 km²。结合1:5万地形图、Landsat ETM+遥感影像及数字高程模型数据, 通过综合计算机自动解译及目视解译的方法, 将面向对象图像特征提取方法应用到该流域冰川信息提取中, 并以影像叠加数字高程模型来提取表碛覆盖区的冰川末端边界, 最后参照专家指导意见进行边界的再次修订, 得到1972~2011年该流域的冰川变化数据, 并分析了过去近40 a来冰川变化特征及其对气候变化的响应过程。结果表明: 1972~2011年, 台兰河流域冰川退缩明显, 冰川总面积从435.44 km²退缩到385.38 km², 减少了50.06 km², 退缩率为11.50%, 年均减少约1.25 km², 平均单条冰川面积减小0.31 km²; 冰川总条数从113条减少到109条, 消失冰川10条, 有3条冰川分离成了9条, 其余100条冰川都呈减小趋势。结合阿克苏和拜城气象站气象资料分析认为, 台兰河流域冰川萎缩与该地区气温快速上升关系密切, 气温上升导致的冰川消融在一定程度上抵消了降水增加对冰川的补给。

关键词: 冰川变化; 退缩; 面向对象信息提取方法; Landsat ETM+; 台兰河流域

中图分类号: P343.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2014)02-0229-08

台兰河流域为阿克苏河的支流, 是以冰川融水补给为主的河流^[1]。台兰河灌区是新疆阿克苏地区的5个大型灌区之一, 由于所处地理位置、资源优势及其开发潜力, 使它在当地的经济发展中占有十分重要的地位^[2]。

根据前人研究^[1,3], 台兰河流域共发育现代冰川115条, 冰川总面积431 km², 冰川储量73.132 km³, 冰川平均雪线高度4 290 m。流域内长度超过10 km的冰川共4条, 总面积307.7 km², 占流域冰川总面积的71.2%, 流域内最大冰川为琼台兰冰川, 长度为21.4 km, 面积165.4 km², 流域内冰川末端最低海拔3 080 m, 最高海拔5 800 m, 冰川覆盖度为32.6%。

作为以冰川融水补给为主的河流, 研究表明^[4], 台兰河流域冰川融水占台兰站控制流量比率达65.3%, 冰川融水的变化对流域的水资源量影响是非常明显的。年平均气温变化1℃, 台兰河流域冰川物质平衡变化约300 mm, 引起的河流径流变化

可达10%。但到目前为止, 详细评估该流域冰川变化特征的资料却没有, 因此适时正确评估台兰河流域冰川变化, 填补该地区此项内容的空白, 揭示冰川变化对该地区河流径流量的影响, 对于该地区的经济发展和人民生活也有极其重要的意义。

1 流域概况

台兰河流域(80°21′44″E~81°10′14″E, 40°41′41″N~42°15′13″N)位于天山最高峰托木尔峰(海拔7 435.3 m)南坡, 新疆阿克苏地区温宿县境内, 发源于西南天山托木尔峰南麓, 全长90 km, 是一个独立水系, 多年平均径流量7.42×10⁸ m³, 河流最终注入塔里木盆地, 见图1。以台兰河水文站控制的流域面积1 324 km², 流域内冰川末端最低海拔3 080 m, 最高海拔5 800 m^[3]。

台兰河流域地处北温带干旱区, 气候干燥, 日照充足, 多风沙, 降水稀少, 蒸发较大, 昼夜温差大, 多年平均降水量为177 mm, 多年平均蒸发量

收稿日期: 2012-12-21; 修订日期: 2013-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(41121001, 41201065); 国家重点实验室自主项目(SKLCSS-ZZ-2012-01-01); 国家基金项目(91025012; 1141001040; 41101066)和中国科学院寒区旱区环境与工程研究所青年基金项目(51Y25B51)资助。

作者简介: 怀保娟(1988-), 山东济南人, 博士研究生, 研究方向: 冰川变化与地理信息技术。E-mail: huaibaojuan@126.com

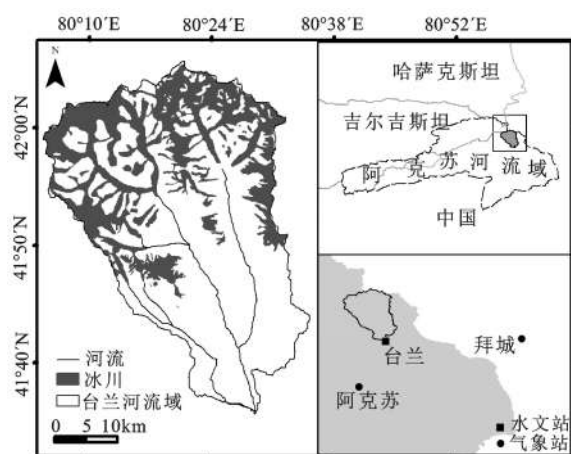


图1 台兰河流域位置

Fig.1 Location of the Tailan River Watershed

为 180 mm, 属典型干旱大陆性气候^[1]。根据气象观测和 1977~1988 年的科学考察, 本区山区的降水主要来自大西洋和北冰洋的暖湿气流补给, 6~8 月的降水量占全年的 50% 左右, 而 5~9 月占 70% 左右, 冰川及积雪的补给主要发生在暖季^[1]。

2 数据来源与处理

2.1 数据来源与预处理

本研究所用地形图数据共涉及 7 幅, 测绘于 20 世纪 70 年代初。1976 年出版的 1:5 万地形图, 用高精度扫描仪进行扫描, 并对地形图进行几何纠正, 几何纠正的均方根误差小于一个象元。所用遥感数据为 Landsat ETM+ 数字影像, 图像接收日期为 2011 年 9 月 10 日, 来自于 USGS (U.S. Geological Survey, <http://www.usgs.gov>) 的数据共享平台。数字高程模型来源于 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), 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, 空间分辨率 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 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。此外, 研究所用气象台站数据来自中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>)。

在 ENVI 软件支持下, 对 ETM+ 影像进行全色波段与多光谱波段融合处理, 使影像空间分辨率提高到 15 m。用几何纠正过的地形图来配准融合

后的影像数据, 并对地形图、遥感影像、数字高程模型以地形图作为参考坐标进行坐标归一化处理。均采用统一的 UTM 投影和 WGS84 椭球体建立坐标系统。影像处理过程中对校正后的影像进行了锐化增强处理, 这样可以更有效地区分雪斑和有积雪覆盖的冰川。

2.2 研究方法

在 ArcGIS9.3 的支持下, 对地形图进行矢量化, 得到 20 世纪 70 年代初一期的冰川分布数据。2011 年冰川分布数据通过综合计算机自动解译及目视解译的方法, 将面向对象图像特征提取方法应用到台兰河流域冰川信息提取中, 并以影像叠加数字高程模型来提取表碛覆盖区的冰川末端边界, 最后参照专家指导意见进行边界的再次修订。在 ArcGIS9.3 支持下获取冰川面积、平均长度、经纬度等属性信息; 利用 SRTM-DEM 得到冰舌末端高程、冰川平均高程、坡度、朝向等属性信息。此外, 对通过遥感影像数据得到的冰川边界的分条处理使用自动提取山脊线的方法。基于规则格网的 SRTM-DEM 数据, 利用平面曲率与坡形组合的算法来实现^[5]。首先利用 SRTM-DEM 数据提取地面的平面曲率及地面的正地形, 而正地形的平面曲率的最大值即为山脊, 由于平面曲率的提取比较繁琐, 而坡向变率在在一定程度上可以很好地表征平面曲率, 因此利用 ArcGIS9.3 来提取坡向变率来代替平面曲率, 提取山脊线, 最后参照地形图数据进行修改。

冰川变化分析通过 ArcGIS9.3 空间分析模块将地形图数据与 2011 年冰川分布数据进行叠加分析, 得到冰川面积变化规律, 具体流程如图 2。

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。并从地形图上选取 50 个高程同名点与 DEM 上的同名点进行比较, 来评价 DEM 的精度, 结果表明, 台兰河流域 DEM 的最大高程差为 +9.64 m。

从遥感影像上获取冰川边界的精度评价一直是十分重要却较难确定的问题。本研究从 3 方面来评价台兰河流域冰川边界提取的误差: ① 影像分辨率对冰川信息提取的误差。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, 据 Hall、Silvireio 等

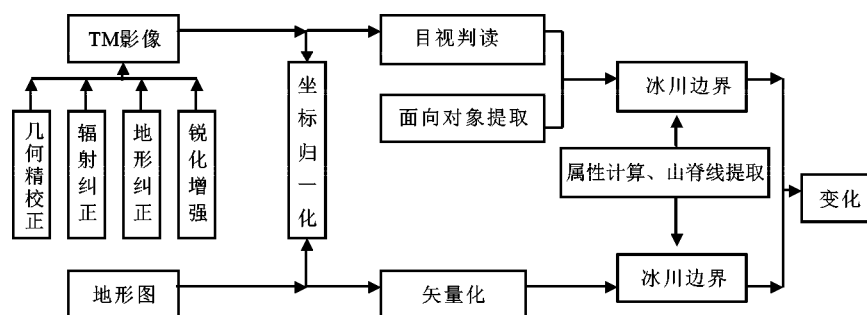


图2 研究技术流程

Fig.2 Technical flowchart

计算冰川长度和面积变化不确定性的公式^[6-8]:

$$U_T = \sqrt{\sum \lambda^2} + \sqrt{\sum \varepsilon^2}$$

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

式中, U_T 为长度不确定性; λ 为影像分辨率; ε 为配准误差; U_A 为面积不确定性, 计算得单条冰川面积的不确定性为 $\pm 0.001 \text{ km}^2$ 。② 台兰河流域冰碛覆盖型冰川较多, 对冰川边界的提取有一定影响。对于冰碛物覆盖的冰川区, 采用DEM叠加影像目视判别的方法对其进行修正。③ 影像的质量问题造成的误差, 如针对云、阴影等造成的影像不清晰问题, 对多幅影像对比分析选取最清晰的一景进行冰川的提取。

3 台兰河流域冰川变化分析

根据1972年一期地形图数据, 台兰河流域共发育现代冰川113条, 冰川总面积 435.44 km^2 , 冰川平均面积为 3.85 km^2 , 流域冰川覆盖率为 32.41% 。

流域内最大冰川为琼台兰冰川, 冰川编号5Y674B0028, 冰川面积达 167.43 km^2 , 流域内次大冰川为克其克铁列克苏冰川, 冰川编号5Y674C0013, 冰川面积为 100.31 km^2 。这2条冰川的总面积达 267.74 km^2 , 占该流域冰川总面积的 61.49% 。2011年, 通过影像解译得到台兰河流域共发育现代冰川109条(图3), 冰川总面积 385.38 km^2 , 冰川平均面积为 3.54 km^2 , 流域冰川覆盖率为 28.68% 。

3.1 冰川面积与条数变化

总体上, 台兰河流域冰川退缩明显(图4)。1972~2011年间, 冰川总面积从 435.44 km^2 减少到 385.38 km^2 ; 减少了 50.06 km^2 , 冰川平均面积减小 0.31 km^2 , 退缩率为 11.50% , 年均减少约 1.25 km^2 。

对台兰河流域1972年到2011年间冰川消增变化做了统计, 冰川总条数从113条减少到109条。消失冰川10条, 有3条冰川分离成了9条, 其余100条冰川都呈减小趋势。表明近40 a来台兰

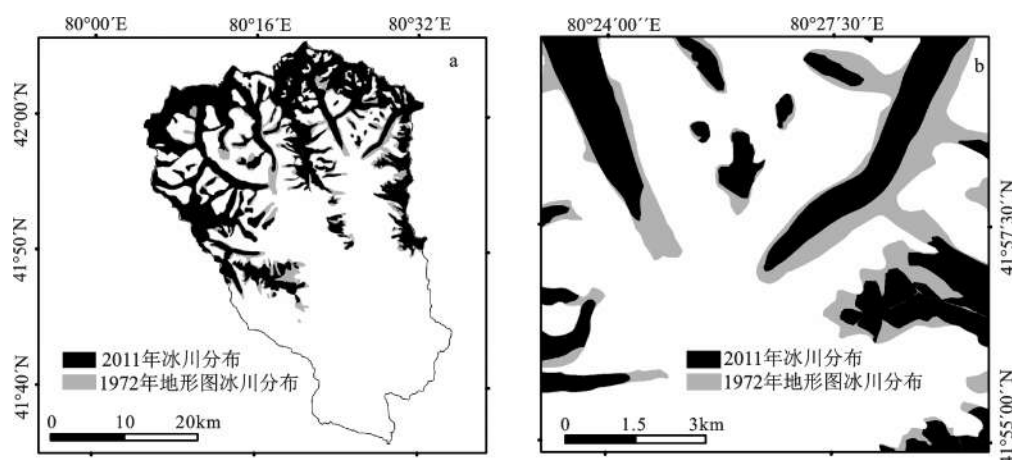


图3 台兰河流域1972年、2011年冰川提取结果

Fig.3 Glacier distribution in 1972 and 2011 in the Tailan River Watershed

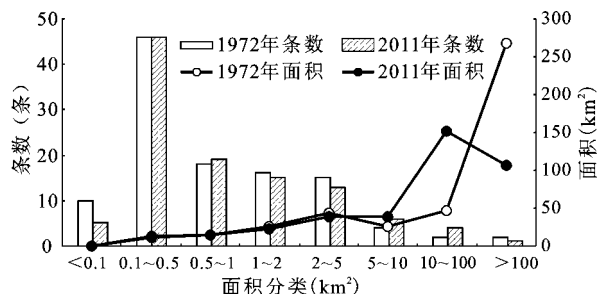


图4 1972~2011年台兰河流域冰川面积与条数变化

Fig.4 Change of glacier area and number of the Tailan River Watershed from 1972 to 2011

河流域冰川整体上呈现退缩趋势。

3.2 朝向、海拔变化

对冰川末端朝向进行了统计分析(图5), 20世纪70年代, 偏北向冰川(北、东北、西北朝向)的冰川共34条, 面积36.60 km², 条数与面积分别占该流域总数的30.08%和8.41%, 说明偏北向的冰川是以小冰川为主的; 偏南向冰川(南、东南、西南朝向)的冰川共49条, 面积348.94 km², 分别占总数的43.36%和80.14%, 这主要是该流域面积最大的琼台兰冰川为偏南向冰川。各个朝向的冰川条数分

布较均匀, 偏南向冰川(南、东南、西南朝向)的冰川稍多。

朝向变化分析表明, 朝南向(157.5°~202.5°)冰川的条数在此期间变化最大, 由14条变为10条, 而其它方向冰川条数变化不大。整体上偏南向(南、东南、西南朝向)冰川的面积减少明显, 共减少了157.11 km², 其中, 朝东南向(112.5°~157.5°)的冰川面积在1972年时为192.52 km², 而2011年为71.62 km²; 朝南向(157.5°~202.5°)的冰川面积减小26.74 km²; 朝西南向(202.5°~247.5°)的冰川面积减小9.47 km²。究其原因是琼台兰冰川在1972年为朝东南方向冰川, 但是2011年时已经成为2条冰川, 其中西琼台冰川依旧为东南朝向, 但是东琼台冰川为朝东向, 因此朝东方向冰川面积增大, 朝东向(67.5°~112.5°)冰川面积在这一时期内显著增加。

根据冰川的末端海拔, 以300 m为海拔梯度进行统计分析表明(见图5), 该区冰川末端海拔主要分布在3 600~3 900 m、3 900~4 200 m的海拔区间内; 3 000~3 300 m、3 900~4 200 m区间内冰川末端退缩变化较大, 末端上升明显; 末端海拔在3 600~3 900 m、3 900~4 200 m区域内冰川条数增加明

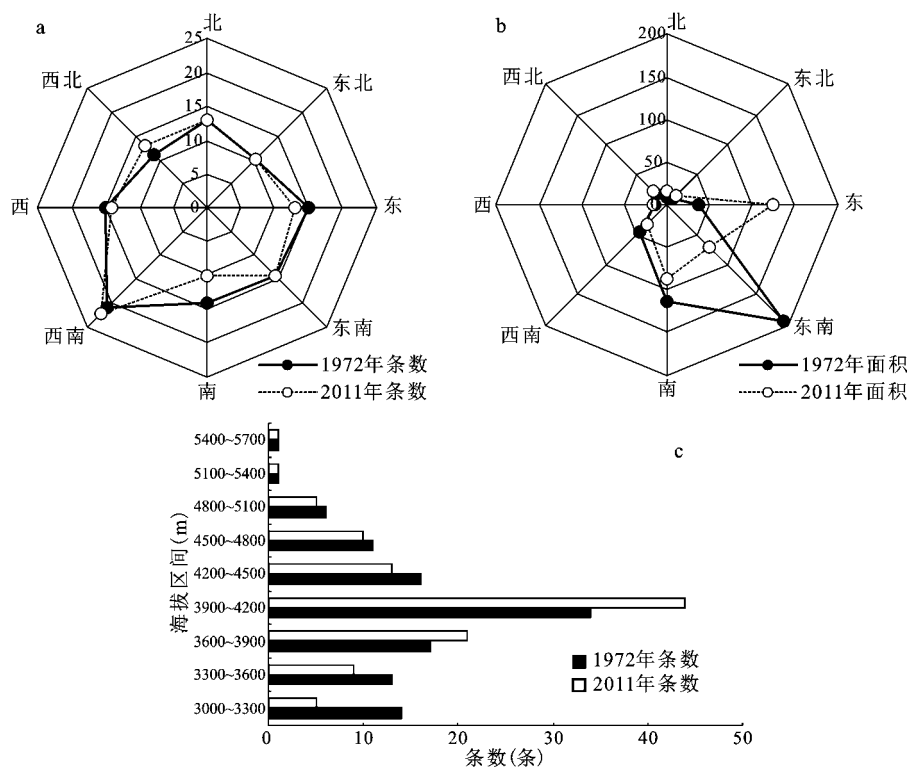


图5 1972~2011年台兰河流域冰川朝向、海拔变化

Fig.5 Change of glacier aspect and terminal elevation of the Tailan River Watershed from 1972 to 2011

显,表明末端海拔在3 000~3 300 m、3 900~4 200 m区间内的冰川很多上升到3600~3900 m、3900~4200 m区间内;其他海拔区间内冰川数量变化不大。海拔区间上的冰川变化事实表明,低海拔区域存在明显的冰川末端升高趋势。

3.3 典型冰川变化情况

流域内最大冰川为琼台兰冰川,为树枝状山谷冰川,冰川下部被厚层表碛所覆盖,20世纪70年代,冰川面积达167.43 km²。根据文献记载^[9, 10],1942年前,东、西台兰冰川相连,1978年再次测量时发现,西台兰冰川已与东台兰冰川脱离。70年代中期,中国科学院登山科考队利用卫星照片实地判读方法,测得1942~1976年西台兰冰川后退600 m,1997年再次对该冰川的冰舌部分进行摄影测量,发现该冰川仍处在较强烈的后退之中,面积仍在缩小^[3, 4, 10]。2011年,根据遥感解译结果(见表1),发现琼台兰冰川除分离为东琼台兰冰川和西琼台兰冰川外,另有2条小冰川从琼台兰冰川脱离出来,现东琼台兰冰川面积为40.23 km²,西琼台兰冰川107.13 km²。

流域内次大冰川为克其克铁列克苏冰川,冰川面积为100.31 km²。2011年,克其克铁列克苏冰川面积为81.89 km²,并有1条小冰川(面积8.06 km²)从该冰川上脱离,近40 a该冰川共退缩10.36 km²。此外,编号为5Y674C0022的冰川40 a来退缩了6.34 km²,并分离出2条小冰川。该3条冰川20世纪70年代的面积分别为167.43 km²、100.31 km²、31.72 km²,对应冰川退缩率为7.39%、10.33%、15.77%,明显反应出冰川变化与冰川规模的关系,冰川规模越小,退缩越明显,大冰川对气候的敏感

性比小冰川要小。

4 讨 论

4.1 中国西部山地冰川退缩情况

气候变暖背景下全球山地冰川呈现总体退缩趋势^[11, 12],而近年来高分辨率卫星影像数据在冰川动态监测中得到广泛应用,使研究大区域内冰川变化成为可能^[13-15]。为了进一步研究台兰河流域冰川变化的特征,选取中国西部典型山区及流域的冰川变化情况与本研究做对比(表2)。表明:台兰河流域变化趋势与其他区域冰川所表现的趋势,即条数减少、面积变小的趋势相吻合。Oerlemans的研究估计在21世纪山地冰川将失去1/3至1/2^[16];施雅风院士^[11]根据21世纪升温前景和小冰期盛时以来升温和冰川面积减少的经验关系,忽略不确定性的前提下预估21世纪中国冰川对全球变暖响应,冰川面积将减少1 800~4 000 km²,相当于冰储量减少1 690~3 760 km³。对比1963~1999年的阿克苏河流域冰川退缩速率为-0.09%/a^[17],本研究得到1972~2011年台兰河流域冰川退缩速率为-0.29%/a,2000年后该流域冰川退缩速率显著增加,这与Oerlemans、施雅风预测21世纪冰川在全球变暖大环境下,加速退缩趋势是吻合的。

4.2 冰川变化的气候背景

水(降水)、热(气温)及其组合是影响冰川发育的主要气候因子,二者年际变化共同决定冰川的性质、发育和演化^[21],温度决定消融,降水影响积累^[22]。为分析气温和降水对该地区冰川变化的影响,根据研究区的位置,选择阿克苏和拜城2个气象站资料作为研究区冰川变化气候背景参考。由

表1 台兰河流域典型冰川退缩状况

Table 1 Retreat of typical glaciers of the Tailan River Watershed from 1972 to 2011

冰川编号	分离后的冰川	朝向	末端海拔(m)	面积(km ²)	退缩面积(km ²)	退缩率%
5Y674B0028(琼台兰冰川)	西琼台兰冰川	E	3390	107.13	12.36	7.39
	东琼台兰冰川	SE	3440	40.23		
	小冰川1	N	3660	2.20		
	小冰川2	W	3870	5.56		
5Y674C0013(克其克铁列克苏冰川)	5Y674C0013	S	3260	81.89	10.36	10.33
	小冰川	E	3910	8.06		
5Y674C0022	5Y674C0022	SW	3160	18.44	6.34	15.77
	小冰川1	NW	3900	4.21		
	小冰川2	NW	3940	2.73		

表2 典型西部山地冰川退缩情况

Table 2 Retreat of typical mountain glaciers in west region

研究区域	面积变化(km ²)	面积变化率%	退缩速率%/a	数据源	解译方法	研究时段(年)	来源
开都河流域	-38.5	-11.6	-0.31	地形图、TM/ETM+	目视解译	1963~2000	刘时银 ^[17]
阿克苏河流域	-58.6	-3.3	-0.09	航片、TM/ETM+	目视解译	1963~1999	刘时银 ^[17]
朋曲流域	-131.24	-8.98	-0.30	地形图、ASTER	目视解译	1970s~2000	晋锐 ^[18]
乌鲁木齐河流域	-6.65	-13.8	-0.45	航片、地形图	航空摄影测量	1962~1992	陈建明 ^[19]
祁连山野牛沟流域	-16.22	-25.71	-0.54	航片、地形图	目视解译	1956~2003	阳勇 ^[20]
台兰河流域	-50.06	-11.50	-0.29	地形图、ETM+	目视解译	1972~2011	本研究

2 个气象站 1960~2010 年逐年平均气温和降水数据分析可看出(图 6):近 40 a 来台兰河流域年均气温的升高趋势明显,增温幅度为 0.45℃/10a(通过显著性水平 0.001 检验),高于全球平均升温率(0.148℃/10a)^[23~25]。1995 年以后升温趋势更为明显,较 1995 年之前升高了 0.95~2.7℃。年降水量变化幅度较大,亦呈上升趋势,平均增加量为 8.41mm/10a。根据康尔泗对高亚洲地区 12 条冰川平衡线(ELA)和夏季气温关系分析,夏季平均气温升高 1℃,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%以上,甚至需增加约 1 倍^[26~28]。显然,研究区这种组合气候变化背景下,虽然降水量增加,但冰川对气温的敏感性大,随着该区域气温升高,雪线上升,冰川融水量持续增加,固态降水增加对冰川的补给无法弥补冰川消融所带来的物质损失,导致台兰河流域冰川普遍萎缩。

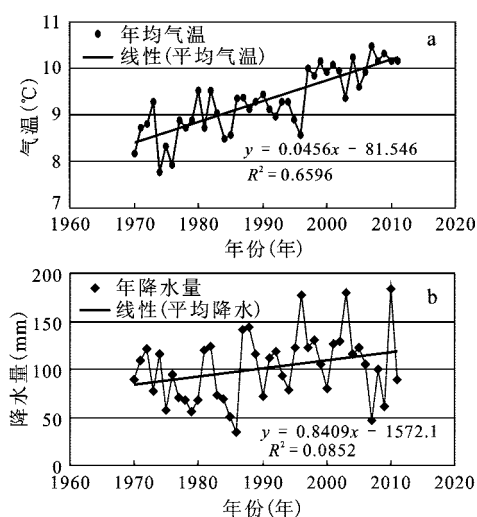


图 6 研究区近 40 a 气温与降水的变化

Fig.6 Temperature and precipitation change in the last 40 years in study area

5 结 论

1) 本文通过运用 1972 年地形图和 2011 年 Landsat ETM+影像结合数字高程模型,对台兰河流域冰川变化情况进行了分析。研究结果表明,1972~2011 年,台兰河流域冰川面积由 435.44 km² 退缩到 385.38 km²,条数由 113 条减少到 109 条,近 40 a 来冰川总面积共退缩 50.06km²,退缩率为 11.50%,平均每年退缩 0.94 km²,冰川平均面积减小 0.31 km²,表明该地区冰川退缩趋势强烈。

2) 根据遥感解译的 2011 年冰川分布特征及时空变化分析表明,流域内冰川主要分布在海拔 3 900~4 200 m 的区间内;且流域内偏东向的冰川面积占据绝大部分。

3) 结合阿克苏和拜城气象站 1960~2010 年逐年平均气温和降水数据分析表明,近 50 a 来台兰河流域年平均气温升高趋势明显,年降水量亦呈增加趋势,分析认为,台兰河流域冰川萎缩与该地区气温快速上升关系密切,气温上升导致的冰川消融在一定程度上抵消了降水增加对冰川的补给。

4) 此外,在利用遥感影像提取冰川数据的过程中,受遥感影像分辨率、“异物同谱”现象、山体阴影等的影响,本研究提取的冰川数据还存在一定的误差,考虑将来结合实地考察来提高冰川数据提取的准确性。

致 谢:感谢中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)所提供的气象数据,对于 USGS(U.S. Geological Survey, <http://www.usgs.gov>)数据共享平台提供的 Landsat ETM+影像一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 中国科学院登山科学考察队. 天山托木尔峰地区的冰川与气象[C].乌鲁木齐:新疆人民出版社, 1985: 99~119.

- [2] 王桂智,唐德善.改进 GM(1,1)模型在台兰河灌区引水量预测中的应用[J].水利科技与经济,2012,18(2):28~30.
- [3] 沈永平,刘时银,丁永建,等.天山南坡台兰河流域冰川物质平衡变化及其对径流的影响[J].冰川冻土,2003,25(2):124~129.
- [4] 沈永平,王顺德.塔里木盆地冰川及水资源变化研究新进展[J].冰川冻土,2002,24(6): 819.
- [5] 韦玉春,汤国安,杨昕等.遥感数字图像处理教程[M].北京:科学出版社,2007.
- [6] Hall D K, Bayr K, Schfner 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: 566 ~ 577.
- [7] 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.
- [8] Ye Q H, Kang S C, Chen F, et al. Monitoring glacier variation 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.
- [9] 中国科学院兰州冰川冻土研究所.中国冰川目录.III,天山山区(西南部塔里木内流区)[M].北京:科学出版社,1987.
- [10] 蓝永超,沈永平,吴素芬,等.近 50 年来新疆天山南北坡典型流域冰川与冰川水资源的变化[J].干旱区资源与环境,2007,21(11):1 ~ 8.
- [11] 施雅风,刘时银.中国冰川对 21 世纪全球变暖响应的预估[J].科学通报,2000,45(4): 434 ~ 438.
- [12] Haeberli W, Cihlar J, Barry R G. Glacier monitoring within the Global Climate Observing System[J].Annals of Glaciology, 2000:241~246.
- [13] 聂 勇,张镱锂,刘林山,等.近 30 年珠穆朗玛峰国家自然保护区冰川变化的遥感监测[J].地理学报, 2010, 65(1):13~28.
- [14] 叶庆华,陈 锋,姚檀栋.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[J].遥感学报, 2007, 11(4): 511~520.
- [15] 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[J].冰川冻土,2002,24(5): 559~562.
- [16] Oerlemans J. Quantifying global warming from the retreat of glaci-ers[J]. Science, 1994, 264:243~245.
- [17] 刘时银,丁永建,张勇等.塔里木河流域冰川变化及其对水资源影响[J].地理学报, 2006, 61(5): 482 ~ 490.
- [18] 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[J].冰川冻土,2004, 26(3): 261~266.
- [19] 陈建明,刘潮海,金明燮.重复航空摄影测量方法在乌鲁木齐河流域冰川变化监测中的应用[J].冰川冻土, 1996,18(4):331~336.
- [20] 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[J].冰川冻土,2007,29(1): 100 ~106.
- [21] 谢自楚,刘潮海.冰川学导论[M].上海:上海科学普及出版社, 2010: 425.
- [22] 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 40a 观测事实[J].冰川冻土,2003,25(2): 117~123.
- [23] IPCC. The Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on the Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 1~996.
- [24] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会.第二次气候变化国家评估报告[M].北京:科学出版社,2011: 46.
- [25] 施雅风. 2050 年前气候变暖冰川萎缩对水资源影响情景预估[J]. 冰川冻土,2001,23(4):333~341.
- [26] 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(增刊 1):12~22.
- [27] 姚檀栋,刘时银,蒲健辰,等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响[J]. 中国科学 D 辑, 2004, 34(6): 535~543.
- [28] 刘潮海,康尔泗,刘时银,等. 西北干旱区冰川变化及其径流效应研究[J]. 中国科学 D 辑,1999,29(增刊 1):55~62.

Glaciers Change in the Tailan River Watershed in the Last 40 Years

HUAI Bao-juan^{1,2}, LI Zhong-qin^{1,3}, SUN Mei-ping³, ZHOU Ping¹

(1.State Key Laboratory of Cryospheric Sciences,Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000,China;2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;3.College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070,China)

Abstract: The Tailan River Watershed, a branch of the Aksu River Basin, is a glacier-melt runoff river and has a drainage area of 1 324 km². So far, there is still no detailed assessment of changes of the characteristics of the glaciers. Therefore, timely and correct assessment of glacier changes in the Tailan River to fill gaps in this region is urgent, and it has an extremely important significance for the Tailan River Watershed's economic development and people's livelihood. 1:50 000 topographic map data, Landsat ETM+ remote sensing images and digital elevation model data were used in this research. Through integrated computer automatic interpretation and visual interpretation methods, the object-oriented image feature extraction method is applied to extract glacier information. And the images overlying digital elevation model was used to extract the debris-covered glacier terminal in this region. At last, the expert guidance was referenced to revise the glacier outline again. Glacier change data in 1972-2011 were derived from this research, and analyses the glacier variation characteristics and its response to climate change in the past nearly 40 a. The results show that: between 1972 and 2011, the Tailan River watershed's glaciers had an evident retreat trend, the total area of glaciers was from 435.44 km² to 385.38 km²; shrinking at a rate of 11.50%, with the average annual decrease was approximately 1.25 km² and the average single glacier area decrease was 0.31 km². Glacier total number decreased from 113 to 109, 10 glaciers were disappeared and three glaciers separated into nine remaining. Other 100 glaciers were presenting decreasing trend. In 2011, according to the results of object-oriented image feature extraction method of glacier distribution and temporal variation, glaciers in this basin are mainly distributed in an elevation of 3 900-4 200 m range, and aspect of the glacier terminal toward the east occupy the vast majority in this basin. By analyzing Aksu and Baicheng weather stations' annual average temperature and precipitation data from 1960 to 2010, the mean annual temperature increased significantly and the annual precipitation also showed an increasing trend. The study concluded that glacier shrinkage is closely related with temperature rising and glacier melting caused by rising temperatures offsets the supply by increased precipitation to some extent.

Key words: glacier change; shrink; object-oriented image feature extraction method; Landsat ETM+; the Tailan River Watershed