

基于高程变化及遥感影像的高亚洲地区跃动冰川

数据集

ISSN 2096-2223

CN 11-6035/N



文献 CSTR:

32001.14.11-6035.ncdc.2021.0006.zh

文献 DOI:

10.11922/11-6035.ncdc.2021.0006.zh

数据 DOI:

10.11922/sciencedb.00901

文献分类: 地球科学

收稿日期: 2021-07-05

开放同评: 2021-07-23

录用日期: 2022-02-22

发表日期: 2022-04-11

吕明阳^{1*}, 郭华东¹, 闫世勇², 李冠宇^{1,3}, 蒋迪^{1,3}, 张豪磊², 张子彦²

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 数字地球重点实验室, 北京 100094

2. 中国矿业大学, 环境与测绘学院, 江苏徐州 221116

3. 中国科学院大学, 北京 101408

摘要: 高亚洲地区包含了青藏高原与相邻的高山高原地区, 是地球两极地区以外冰川发育最多的地区。自 20 世纪末期起, 全球变暖致使高亚洲地区的山地冰川消融剧烈, 直接诱发了许多冰川相关灾害事件。冰川跃动作为冰川灾害的一种, 有着突发性、隐蔽性、难探测性等特点, 近来日益受到各国学者的重视。但高亚洲地区跃动冰川的发育特征及分布规律仍是研究空白, 亟需相应数据集填补。本团队通过配准及差分覆盖全部高亚洲地区的两批数字高程模型数据, 结合其他冰川表面高程变化数据以及从 20 世纪 70 年代至今的历史光学遥感影像, 确认了高亚洲地区 457 条跃动冰川, 其中包含 362 条在研究期内发生跃动的冰川和 95 条可能的跃动冰川。本数据集包含表述各跃动冰川位置、轮廓及相关属性信息的矢量文件, 以及带有跃动判定依据的描述文件。本数据集可作为深入研究高亚洲地区冰川跃动的基础数据, 也可作为该地区公共基础设施规划和建设的参考资料, 还可为预防冰川跃动造成当地居民生命财产损失提供可靠的研究支撑。

关键词: 高亚洲; 跃动冰川; 光学遥感影像; 数字高程模型; DEM 配准

数据库(集)基本信息简介

数据库(集)名称	基于高程变化及遥感影像的高亚洲地区跃动冰川数据集
数据作者	吕明阳、郭华东、闫世勇、李冠宇、蒋迪、张豪磊、张子彦
数据通信作者	吕明阳 (lvmy@aircas.ac.cn)
数据时间范围	1972 - 2019年
地理区域	地理范围为26° 42' 28" - 46° 5' 7" N, 65° 58' 14" - 104° 20' 31" E, 其中包括青藏高原、喀喇昆仑山脉、喜马拉雅山脉、兴都库什山脉、帕米尔高原、天山山脉等高山高原地区。
数据量	7.92 MB
数据格式	*.shp, *.xlsx
数据服务系统网址	http://dx.doi.org/10.11922/sciencedb.00901
基金项目	中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA19070202)

* 论文通信作者

吕明阳 (lvmy@aircas.ac.cn)

数据库（集）组成

本数据集为1个压缩文件，其中共包含5个数据文件：(1) STG_HMA.shp 是在研究期内发生过跃动事件的高亚洲地区跃动冰川矢量数据，数据量11.1 MB；(2) STGlikely_HMA.shp 是高亚洲地区可能的跃动冰川矢量数据，数据量2.18 MB；(3) HMA_regionshape.shp 是高亚洲地区各分区矢量数据，数据量45 KB；(4) Attributes of STG.xlsx 是在研究期内发生过跃动事件的高亚洲地区跃动冰川属性信息文件，包含跃动事件的判断依据，数据量97 KB；(5) Attributes of STGlikely.xlsx是高亚洲地区可能的跃动冰川属性信息文件，包含可能为跃动冰川的判断依据，数据量24 KB。

引言

高亚洲地区是指亚洲中部包括青藏高原及周围的高山高原地区在内的海拔在 4000 - 5000 m 以上的高海拔区域，南北方向以喜马拉雅山南麓和天山山脉为边界，东西以青藏高原东端和兴都库什山脉为边界，这些山脉和高原环绕着中国新疆维吾尔自治区和西藏自治区，包括了尼泊尔和不丹全境，以及部分巴基斯坦和印度地区(图 1)。21 世纪以来，全球气候变化致使高亚洲地区山地冰川退缩剧烈，引起各国学者的广泛关注^[1-4]。高亚洲地区的冰川融水是亚洲内陆地区的重要淡水来源，尤其对于中国西北干旱区而言，该地区冰冻圈的变化会直接影响区域内部及下游的生态环境^[5-6]。除此之外，冰川的急剧变化也会诱发许多冰川相关灾害，如山洪、滑坡、泥石流、冰川垮塌、冰川跃动等，是各流域内居民生产生活的巨大安全隐患^[7-8]。冰川跃动作为一类冰川相关灾害，因其事件突发性、地点隐蔽性、过程难探测性等特点，长期以来是冰冻圈灾害研究的难点。

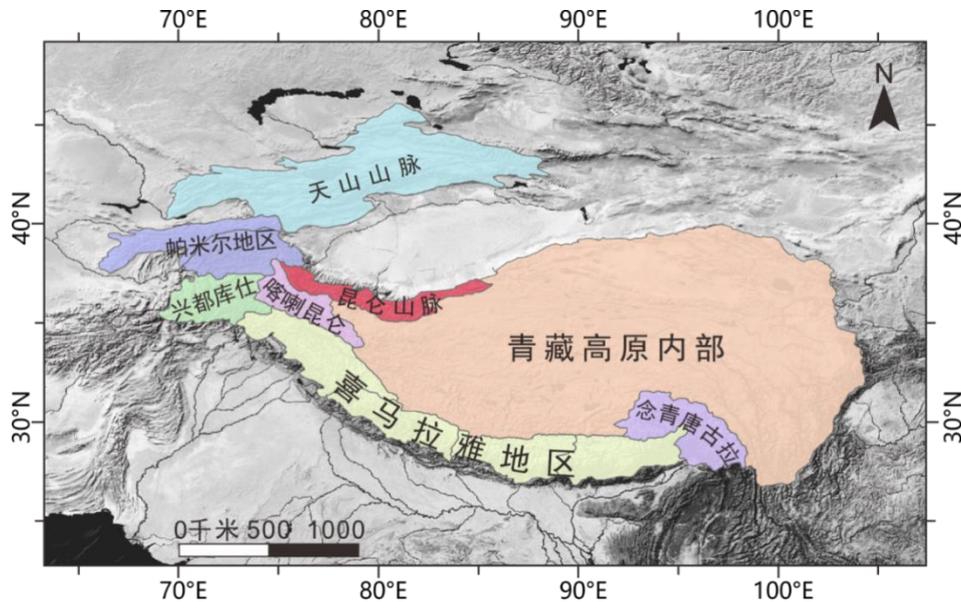


图 1 高亚洲地区研究分区图

Figure 1 Study sub-regions of the High Mountain Asia

冰川跃动是介于正常冰川流动和冰崩之间的一种特殊的周期性冰川运动现象。在跃动过程中，冰川泄冰区积累的大量冰会在短时间内迅速传输至冰川下部的冰补给区，多数情况下会引起冰川末端的前移。跃动通常会持续数月至数年，其间冰川的流速可以达到平静期流速的数十至数百倍^[9]。虽

然跃动冰川仅占全世界冰川数量的 1% 左右,但它们对于研究冰川作用过程、流动不稳定性等方面有着至关重要的作用^[10]。相关研究表明全球的冰川跃动趋于集中发生在一些特定地区, *Sevestre and Benn*^[10]通过总结已有文献记录,获得了包括全球跃动冰川分布情况,形成了基于文献整理的跃动冰川数据集,并以属性信息的形式收录于 *Randolph Glacier Inventory (RGI) 6.0* 版^[11]。值得注意的是,由于斯瓦尔巴群岛和阿拉斯加-育空等环北极地区研究历史悠久、相关文献较丰富, RGI 的跃动记录在这些区域具有很高的可信度。但是高亚洲地区冰川跃动研究起步较晚,相关文献不甚详尽,多数区域仍可能存在未被探明的跃动冰川。对于喀喇昆仑地区和帕米尔地区,有学者进行了细致的跃动冰川的空间观测识别工作^[12-14],但仅为区域性研究成果。许艾文等对喀喇昆仑地区乔戈里峰附近的跃动冰川进行了全面的遥感监测,并提出了导致跃动发生的可能原因^[15]。针对一些大型且造成灾害的跃动事件也有学者开展了详细的研究工作,例如 2015 年的帕米尔地区克拉牙依拉克冰川跃动^[16]、2014 - 2016 年喀喇昆仑地区的 *Hisper* 冰川跃动^[17]。国内相关团队已经开展了高亚洲地区的跃动冰川的识别工作,并已取得相关成果^[18],但目前尚未有覆盖高亚洲地区的跃动冰川数据集发布。

为了填补这一研究数据空白,本团队通过配准及差分两批覆盖高亚洲地区的数字高程模型 (DEM),得到了一期冰川表面的高程变化数据,并结合 2000 - 2016 年冰川表面高程变化结果^[15]以及 20 世纪 70 年代至今的历史光学遥感影像,识别了该地区的跃动冰川。经过重新绘制跃动冰川的最大轮廓,补充和完善名称、地理位置、面积、高程、跃动判断依据等冰川属性信息,最终获得了高亚洲地区的跃动冰川数据集。相比 RGI 基于文献整理的跃动记录信息,本研究对于跃动冰川的筛选标准是统一的,而且本数据集提供详实的冰川跃动判断依据,以及最大跃动冰川轮廓。本数据集可作为深入研究高亚洲地区冰川跃动的基础数据,也可作为该地区公共基础设施规划和建设的参考资料,还可为预防冰川跃动造成居民生命财产损失提供可靠研究支撑。

基于研究的便利性考虑,依据冰川分布地区地理地形的差异,并结合前人的研究分区情况^[2],本研究将高亚洲拆为 8 个分区:天山山脉、帕米尔地区、兴都库什山脉、喀喇昆仑山脉、昆仑山脉、青藏高原内部地区、喜马拉雅地区、念青唐古拉山脉(图 1)。

1 数据采集和处理方法

1.1 数据源

本数据集的生成主要使用了 3 种数据类型:光学遥感影像、DEM、冰川编目数据。光学遥感影像主要用于冰川边缘轮廓提取、历史跃动事件的影像验证;DEM 主要用于冰川表面高程信息及高程变化提取;冰川编目数据主要用于冰川边界参照、DEM 配准辅助。

1.1.1 光学遥感影像

本研究收集了 1972-2019 年共 2904 景 Landsat 系列卫星影像,具体数据情况见表 1,影像的筛选原则为在确保数据时间连续性的前提下,尽量选择云量较少、季节性积雪覆盖较少的影像。Landsat 系列影像是通过 USGS 的地球资源观测科学中心(EROS, <http://glovis.usgs.gov/>)免费获取,为经过辐射校正和几何校正的 Level 1 级产品。谷歌地球高分辨率历史影像主要用于辅助 Landsat 影像识别冰川边缘轮廓和验证历史冰川跃动事件。

表 1 Landsat 系列卫星影像参数及使用的数据量

Table 1 Parameters and image numbers of used Landsat satellites

卫星	传感器	发射/结束年份	重访周期(天)	最优空间分辨率(m)	数据量(景)
Landsat 1	MSS	1972/1978	18	78	55
Landsat 2	MSS	1975/1981	18	78	215
Landsat 3	MSS	1978/1983	18	78	55
Landsat 4	TM/MSS	1982/1993	16	30	2
Landsat 5	TM/MSS	1984 至今	16	30	640
Landsat 7	ETM+	1999 至今	16	15	1266
Landsat 8	OLI/TIRS	2013 至今	16	15	671

1.1.2 DEM

本研究中使用了覆盖全高亚洲地区的 SRTM DEM 和 AW3D30 DEM 两套 DEM 数据，以及一期 DEM 差分数据。

SRTM DEM 是现存发布最早的覆盖全球陆表的 DEM 产品，是由 2000 年 2 月 11 日至 22 日奋进号航天飞机获取的 C 波段雷达数据处理而得，第三版 SRTM DEM 最优空间分辨率达 1 弧度秒(30 m)，其水平精度和垂直精度均优于 10 m^[19]。本研究选择以 SRTM DEM 代表 2000 年高亚洲地区冰川表面高程信息。可从美国宇航局(NASA)的 Earthdata 网站(<https://earthdata.nasa.gov/>)获得 SRTM DEM。

AW3D30 DEM 是基于 ALOS PRISM 传感器在 2006 - 2011 年拍摄的多视影像（约 300 万景）通过立体像对技术处理后得到的全球陆表 DEM 产品，空间分辨率为 1 弧度秒(30 m)，垂直精度约为 4.4 m。本研究使用的为 2.1 版本，相比于 ASTER GDEM，AW3D30 DEM 的数据精度更高，而且用于生成 DEM 的影像时间范围(2006-2011)确定，因此本研究选取其与 SRTM DEM 配准差分，获得 2000 - 2006~11 高亚洲地区冰川表面高程变化数据。本数据集中相关高程、坡度、坡向信息也是由 AW3D30 DEM 计算而来。AW3D30 DEM 可以通过日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)网站(<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>)申请获得。

法国学者 Fanny Brun 博士利用 Ames Stereo Pipeline(ASP)工具处理 ASTER Level 1A 级的 5 万多景影像，得到了 2000 - 2016 年高亚洲地区时序 DEM 数据集，通过配准及差分，得到了 2000 - 2016 高亚洲地区冰川表面高程变化数据^[20]。该 DEM 差分数据(FB DEM 差分数据)的分辨率为 30 m，基本能够覆盖高亚洲地区。

本研究将上述 2000 - 2006~11 和 2000 - 2016 两期 DEM 差分数据作为识别高亚洲地区跃动冰川的基础数据，用以初步筛选跃动冰川。使用的 DEM 数据量详情见表 2。

表 2 高亚洲地区跃动冰川识别使用的 DEM 数据量(幅)

Table 2 DEM used for surge-type glaciers identification in the High Mountain Asia

AW3D30 DEM(1° × 1°)	SRTM DEM(1° × 1°)	FB DEM 差分数据(1° × 1°)
592	592	132

1.1.3 冰川编目数据

本研究使用的冰川编目数据为 RGI 6.0 版本。RGI 中的冰川轮廓的勾绘主要依据 1999 - 2010 年的遥感数据，其首要目的是确保覆盖地球上所有冰川，约 198000 条冰川总面积为 726800±34000 平方千米(km²)，面积误差主要来自对单一冰川面积的不确定性评估，以及与其他冰川编目的对比结果，对季节性积雪和冰碛物覆盖的误判是导致误差的主要原因^[21]。RGI 可在网站 <http://www.glims.org/RGI> 免费获取。

由于冰川表面高程变化数据仅用于定性识别泄冰区和冰补给区的冰量得失，因此直接使用 RGI 的冰川轮廓辅助 DEM 配准工作，不需要对冰川轮廓进行修正。而本数据集提供的冰川轮廓矢量文件是以 RGI 冰川轮廓为基础，依据跃动冰川在历史影像中的最大轮廓重新勾绘而成。

1.2 数据采集方法

本研究识别跃动冰川并生成数据集的步骤如下：(1)以 SRTM DEM 代表 2000 年地表高程、AW3D30 DEM 代表 2006~11 年地表平均高程，通过 DEM 配准得到 2000 - 2006~11 年冰川表面 DEM 差分结果。结合 2000 - 2006~11 年和 2000 - 2016 年冰川表面 DEM 差分结果(FB DEM 差分数据)，挑选表面存在异常升降现象的冰川为可能的跃动冰川。(2)针对这些潜在的跃动冰川，通过目视解译冰川表面特征变化和末端的演化情况，逐一识别冰川跃动事件，进而确认跃动冰川。(3)最终利用 ArcGIS 软件勾绘跃动冰川的最大轮廓，计算位置、面积、高程、坡度、坡向等冰川属性信息，合并 RGI 中相关属性信息，得到高亚洲地区跃动冰川数据集(图 2)。

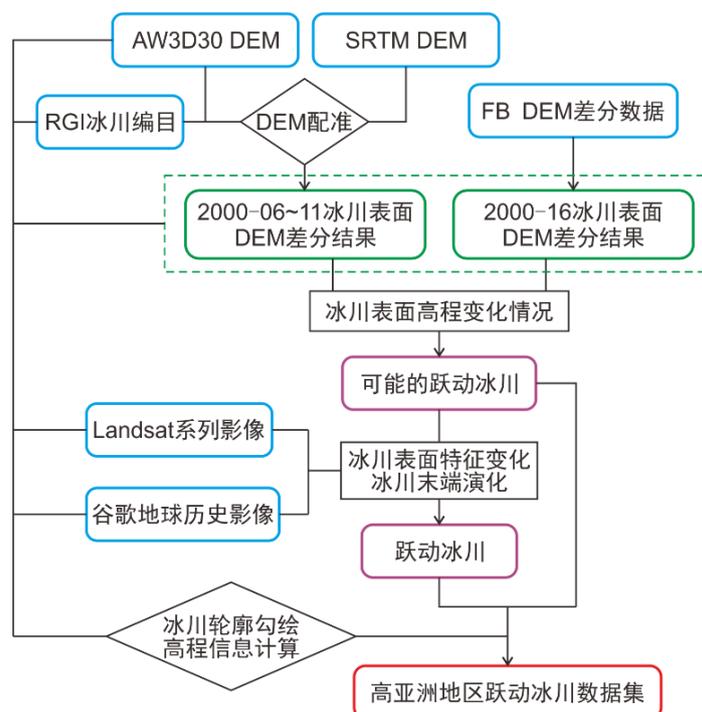


图 2 生成高亚洲地区跃动冰川数据集流程图

Figure 2 Flow chart of generating the surge-type glacier inventory in the High Mountain Asia

1.2.1 跃动冰川空间观测识别标准

20 世纪中期, Meier and Post^[22]在对北美洲西部冰川跃动的研究中指出跃动过程中冰川流速会急剧增加, 可高出其平静期流速的十倍至百倍; 跃动事件后, 流速远低于周围非跃动冰川。Meier and Post^[22]将冰川末端的快速剧烈前移也作为冰川跃动事件的判断标准之一, 但末端位置的变化仅可作为判断参考, 因为在后期学者的研究中发现并不是所有冰川跃动都会导致末端的前移^[9,14]。此外, 因流速快慢变化而形成的地貌特征也可作为冰川跃动识别标准之一, 例如水滴状表面冰碛物特征、纵横交错的冰裂隙、翻卷褶皱的冰碛物、蛇形丘等^[10,23-24]。以上标准即为 Sevestre and Benn^[10]在筛选全球冰川跃动记录所用的判断标准。需要注意的是, 由于可用文献有限, 其冰川跃动记录中并不是所有冰川均包含流速异常的记录。

冰川跃动会将上部泄冰区的大量冰体传输至下部的冰补给区, 这种冰川系统的冰量重新分布会直接导致泄冰区高程降低、冰补给区高程增加, 部分情况下冰补给区会冲出原有冰川末端边界, 导致冰川末端前移和冰川面积增加。跃动事件结束后, 泄冰区开始新一轮冰量积累、高程增加, 而冰补给区在跃动期间接收的冰体会在平静期内逐渐消融、高程降低。在相同的气候条件下, 临近区域正常冰川的冰量变化和流速变化不会出现明显的差异, 因此, 某一时段内的冰川表面高程变化不仅可用于识别该时段内发生的跃动事件, 也可用于识别可能在该时段前发生跃动的冰川。本研究通过对比不同时间泄冰区和冰补给区的高程变化差异, 初步挑选可能的跃动冰川。考虑到跃动前后, 冰川表面高程变化存在相同的可能, 而且不同 DEM 在不同地区数据质量不同, 仅使用一期冰川表面高程数据来判别跃动冰川存在遗漏的可能。因此本研究使用了 2000 - 2006~11 年和 2000 - 2016 年两期 DEM 差分结果, 以确保跃动冰川初步筛选的完备性。图 3a、b 和图 4a、b 给出了 kk149035_32 和 pm150033_17 跃动冰川的两期表面高程变化, 可见冰川跃动会导致冰川表面高程发生明显变化。目前已有部分区域性研究采用通过 DEM 差分结果识别跃动冰川, 并得到了较好的识别效果^[13]。

针对初步筛选的跃动冰川, 本研究通过目视解译 1972 - 2019 年的遥感影像中与跃动相关的表面特征变化, 确认发生过的冰川跃动事件。跃动相关的图像特征变化具体是指与临近冰川相比, 目标冰川末端是否经历过快速前移、是否存在由流动快慢振荡导致的冰川表面特征变化(图 3a、b; 图 4c、d)。冰川流速的异常变化也常被作为跃动的识别标准之一^[22,25]。在高亚洲地区的冰川跃动过程中, 冰川流速急剧增加, 会高出正常流速的十倍甚至百倍, 并在跃动后明显降低^[8,14], 这是唯一可以量化的判别跃动冰川的标准, 但考虑到现有覆盖高亚洲地区的冰川流速产品较少, 且其时空分辨率尚不能较好满足跃动过程的识别, 因此本数据集的生成并未涉及相关的冰川流速数据。对于跃动事件开始和结束时间的判断, 则是通过解译历史遥感影像中冰川表面裂隙、冰碛物覆盖、冰川末端等冰川特征开始前移和停止前移的时间而确认。若日后加入较理想的冰川流速产品, 满足识别冰川跃动的时空分辨率, 将有助于完善本数据集。

1.2.2 数据预处理

SRTM DEM 和 AW3D30 DEM 有不同的投影坐标系统, 空间信息的不匹配会使得 DEM 配准过程失败。因而, 在配准前, 需将这两套 DEM 数据以三次卷积内插的方式重采样至 30 m, 并投影于 WSG84 World Mercator 坐标系。用于目视解译的 Landsat 系列卫星影像均为经过正射校正的影像。为凸显冰川边缘, 在后期对图像进行了增强处理。

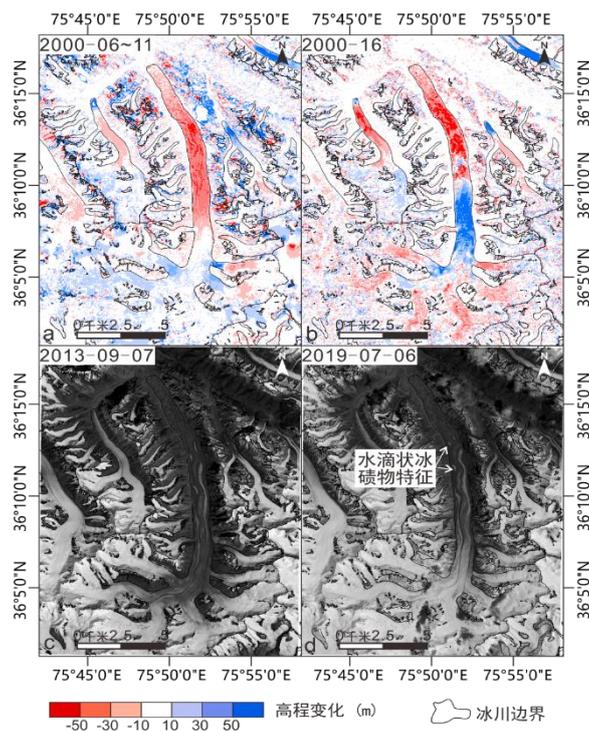


图 3 编号 kk149035_32 的跃动冰川在 2000-06~11 年段的高程变化(a)和 2000-16 年段的高程变化(b), 以及跃动开始(c)和跃动结束(d)时的 Landsat 8 波段 8 影像。

Figure 3 Elevation changes of Glacier kk149035_32 during the periods of 2000-06~11 (a) and 2000-16 (b), and Landsat 8 images (band 8) acquired at the beginning (c) and the end (d) of its surge.

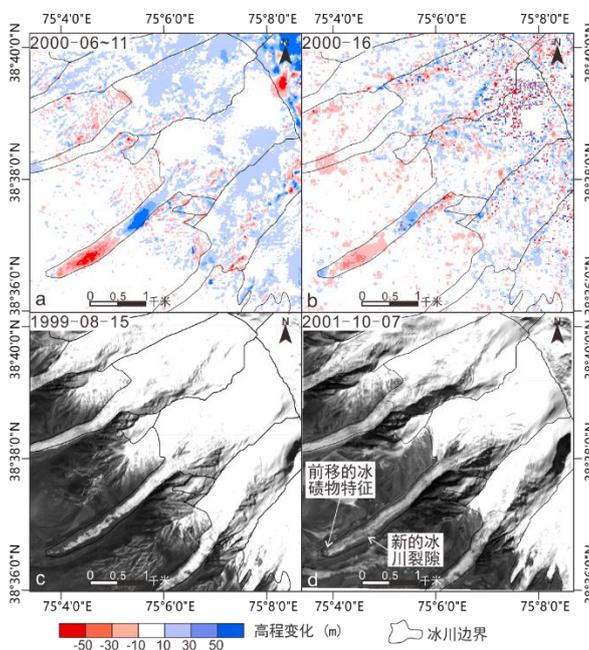


图 4 编号 pm150033_17 的跃动冰川在 2000-06~11 年段的高程变化(a)和 2000-16 年段的高程变化(b), 以及跃动开始(c)和跃动结束(d)时的 Landsat 7 波段 8 影像。

Figure 4 Elevation changes of Glacier pm150033_17 during the periods of 2000-06~11 (a) and 2000-16 (b), and Landsat 7 images (band 8) acquired at the beginning (c) and the end (d) of its surge.

1.2.3 DEM 配准

由于传感器不稳定、DEM 处理方法局限、实地勘测情况不充分、后期 DEM 处理步骤差异等，会导致不同源 DEM 数据之间存在偏差，主要体现在三个方面：地理定位的偏差、高程扭曲的偏差、卫星轨道模式相关的偏差^[26]。本研究采用一种三步修正法，逐步修正 AW3D30 DEM 和 SRTM DEM 之间的偏差^[26]。在地形配准工作前，冰川覆盖地区的 DEM 需要使用 RGI 将其排除在外，批量配准工作通过 Ames Stereo Pipeline 的 dem_align 工具完成^[27]。

2 数据样本描述

高亚洲地区跃动冰川数据集包含 5 个数据文件，其中 3 个矢量文件(STG_HMA.shp、STGlikely_HMA.shp、HMA_regionshape.shp)、2 个表格文件(Attributes of STG.xlsx、Attributes of STGlikely.xlsx)。

HMA_regionshape.shp 为高亚洲地区各分区矢量文件，可在其属性表中查看各分区名称。

每个跃动冰川的最大轮廓均以多边形的形式记录于 STG_HMA.shp 文件中，并带有相应的属性信息(表 3)。需要说明的是 STG_HMA_ID 为本数据集对各跃动冰川的命名，命名规则为 XXZZZZZZ_YY。XX 为该冰川所处研究分区名称缩写；ZZZZZZ 为覆盖该冰川位置的 Landsat 影像的行列号，即全球参考系 World Wide Reference System(WRS)行列号；YY 为该行号区域中跃动冰川的序号。例如 kk148035_04 代表在喀喇昆仑地区 148 列 35 行 Landsat 影像中识别的第 4 条跃动冰川。Attributes of STG.xlsx 为 STG_HMA.shp 对应的跃动冰川属性信息表格文件，其中包含对各跃动事件的判断依据。

STGlikely_HMA.shp 中记录可能的跃动冰川轮廓。由于在历史影像中未观测到跃动事件，因此其属性信息中未包含表 3 中的 Ini_date、Ter_date 和 Surge_dur。对于可能的跃动冰川命名规则为 likelyXXZZZZZZ_YY，具体规则同上。Attributes of STGlikely.xlsx 为 STGlikely_HMA.shp 对应的属性信息表格文件，其中包含判断其为可能的跃动冰川的依据。

表 3 STG_HMA.shp 文件中的属性信息类别

Table 3 Attribute information category of STG_HMA.shp

属性名	单位	备注
STG_HMA_ID	/	本数据集中各跃动冰川的命名
GLIMS_ID	/	对应的 GLIMS 编号，部分冰川对应多个 GLIMS 中记录的冰川
Longitude	东经(° E)	冰川中心位置的经度
Latitude	北纬(° N)	冰川中心位置的纬度
Area	平方千米(km ²)	冰川跃动后的最大面积
Zmin	米(m)	冰川跃动后的最低海拔高度，由 AW3D30 DEM 计算得到
Zmax	米(m)	冰川跃动后的最高海拔高度，由 AW3D30 DEM 计算得到
Zmed	米(m)	冰川跃动后的中值海拔高度，由 AW3D30 DEM 计算得到
Slope	度(°)	冰川跃动后的坡度，由 AW3D30 DEM 计算得到

属性名	单位	备注
Aspect	度(°)	冰川跃动后的坡向, 由 AW3D30 DEM 计算得到
Ini_date	年	跃动事件开始年份, 发生多次跃动的冰川以逗号间隔每次跃动
Ter_date	年	跃动事件结束年份, 发生多次跃动的冰川以逗号间隔, 顺序与 Ini_date 对应
Surge_dur	年	跃动事件持续时间, 发生多次跃动的冰川以逗号间隔, 顺序与 Ini_date 对应
Name	/	记录于 RGI 6.0 中的冰川名称

本数据集确认了高亚洲地区发育的 457 条跃动冰川, 总的跃动冰川面积为 42906.46 km²。在研究期内发生过跃动的跃动冰川有 362 条, 其中天山地区 32 条, 帕米尔地区 134 条, 兴都库什地区 6 条, 喀喇昆仑地区 127 条, 昆仑山地区 20 条, 青藏高原内部地区 35 条, 喜马拉雅地区 7 条, 念青唐古拉地区 1 条。这 362 条跃动冰川从 20 世纪 70 年代至今发生了 421 次冰川跃动事件。另外还有 95 条可能的跃动冰川, 其中天山地区 5 条, 帕米尔地区 5 条, 兴都库什地区 8 条, 喀喇昆仑地区 37 条, 昆仑山地区 13 条, 青藏高原内部地区 23 条, 喜马拉雅地区 4 条(图 5)。

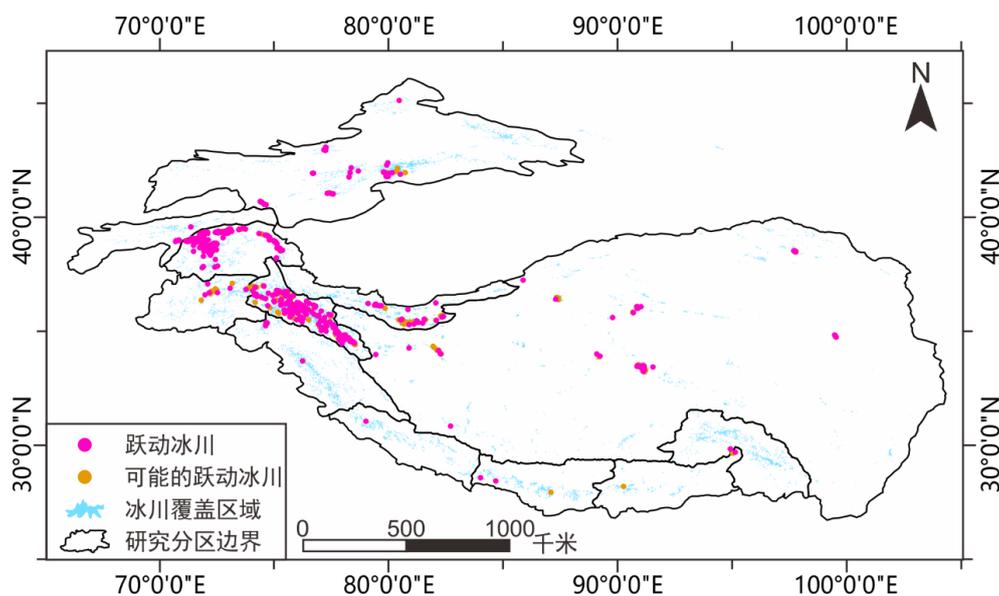


图 5 高亚洲地区跃动冰川的分布图

Figure 5 Distribution of surge-type glaciers in the High Mountain Asia

3 数据质量控制和评估

由于本研究使用的 DEM 数据和光学遥感影像分辨率较低, 对于面积大于 5 km² 的跃动冰川具有较好的识别效果, 但对于面积小于 5 km² 的跃动冰川识别效果较差。本研究尽可能多地获取遥感影像, 以控制跃动事件起止年份的识别误差在一年之内, 但由于可用遥感影像有限和人工识别的误差, 对于少部分跃动事件起止年份的识别可能会超过一年。

本研究使用的 SRTM DEM 水平精度和垂直精度均优于 10 m^[19], AW3D30 DEM 垂直精度约为

4.4 m。在高亚洲的高山高原地区，现有 DEM 产品的总体精度会相对低于其他地区，但已有研究表明通过配准 AW3D30 DEM 和 SRTM DEM 来识别跃动冰川是可行的^[13]。为了去除 AW3D30 DEM 和 SRTM DEM 之间的偏差，本研究采用 Nuth and Kaab 的方法，对两套 DEM 之间的地理定位的偏差、高程扭曲的偏差、卫星轨道模式相关的偏差配准进行配准校正^[26]。配准结果的精确与否直接决定了冰川高程变化结果的可信度。假设非冰川区域在研究期内应无明显变化，那么配准后非冰川区域的偏差将直接反映配准的质量。图 6 为 AW3D30 DEM - SRTM 和 FB DEM 差分数据的两期数据在非冰川区域的对比图。经统计，这两期 DEM 差分结果在非冰川区域的标准差均接近 0 值。虽然在不同 DEM 数据在山地区域的配准结果存在较明显偏差，但并不影响对个体冰川表面高程变化的定性识别 (图 3、图 4)。

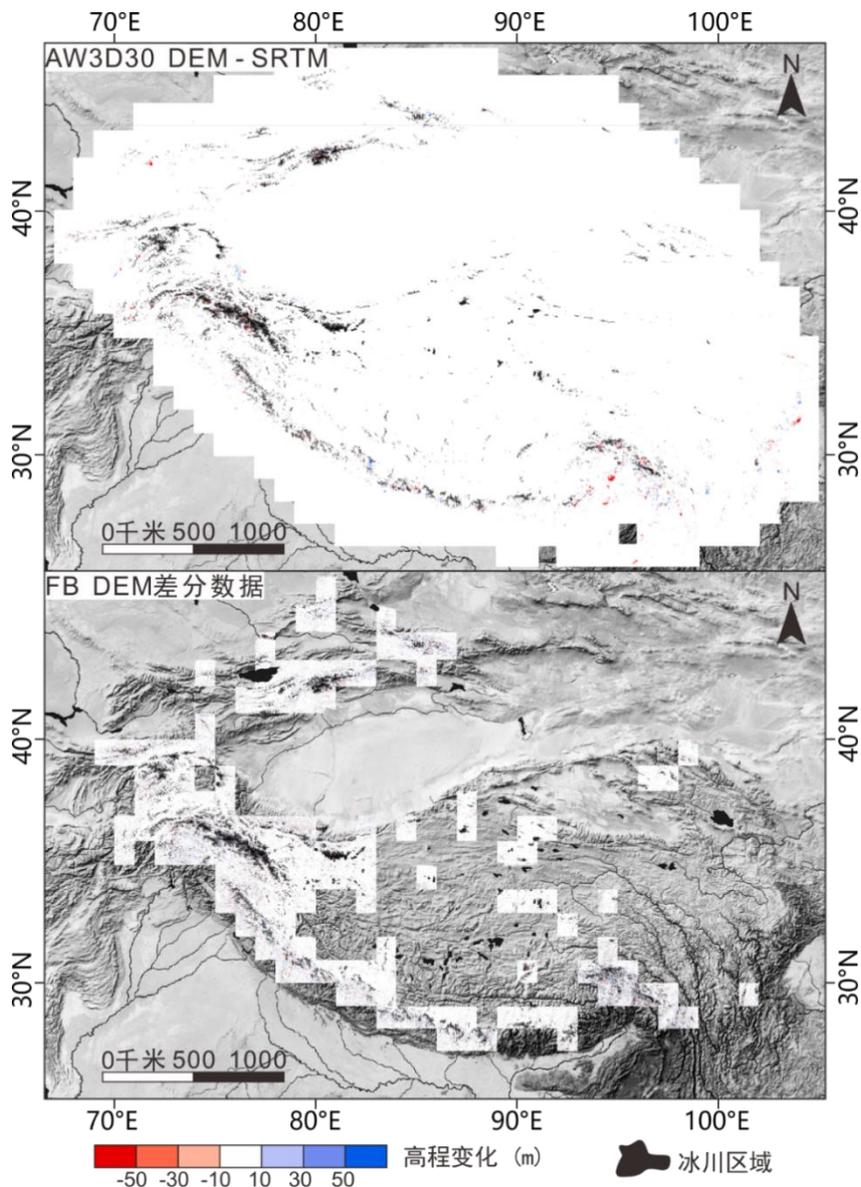


图 6 两期 DEM 差分数据在非冰川区域的对比图

Figure 6 Comparison of DEM differences during two periods over non-glacierized area

冰川末端的冰碛物覆盖会严重影像冰川边界的识别，而且手动勾绘冰川轮廓也会增加结果的不

一致性和不可重复性^[28]。本研究使用轮廓测量误差评估方法^[29]，分别针对同一冰川和不同大小不同区域的多条冰川，结合 Landsat 影像和谷歌地球高分辨率影像的特征辨别冰川末端的变化，多次重复描绘冰川边缘轮廓，测量冰川末端变化（表 4）及冰川面积（表 5），并将结果的标准差平均值作为相应冰川属性信息的误差。最终得到冰川末端变化测量的误差为 15.70 m，人工修正冰川轮廓后冰川面积测量的误差近于 1.42%。

表 4 冰川末端变化测量误差统计表

Table 4 Error statistics of glacial terminal change measurement

序号	编号	冰川末端变化重复测量结果(m)					标准差
1	ts147031_07	449.59	455.79	463.11	459.12	442.36	8.18
2	pm150033_11	860.69	833.52	830.92	826.21	823.65	14.87
3	hk151034_01	248.86	255.26	266.2	249.13	259.93	7.38
4	kk148035_09	2706.74	2709.85	2699.12	2707.91	2749.05	19.72
5	kl145036_01	1295.26	1351.08	1337.83	1314.94	1303.65	23.38
6	it138037_07	1973.58	1986.95	1980.22	1985.93	2026.33	20.67
冰川末端变化的测量误差							15.70

表 5 冰川面积测量误差统计表

Table 5 Error statistics of glacial area measurement

序号	编号	冰川面积重复测量结果(km ²)					标准差	百分比
1	ts147031_07	12.38	12.38	12.12	12.37	12.78	0.24	1.92%
2	pm150033_11	17.35	17.56	17.69	18.00	18.31	0.38	2.13%
3	hk151034_01	1.86	1.83	1.81	1.89	1.88	0.03	1.80%
4	kk148035_09	113.85	114.24	114.29	114.67	113.46	0.46	0.40%
5	kl145036_01	250.09	251.07	250.24	252.13	248.47	1.35	0.54%
6	it138037_07	49.59	49.01	50.89	51.01	49.57	0.89	1.77%
冰川面积的测量误差								1.42%

为了确保数据集的准确性，我们将本数据集与高亚洲地区相关的跃动冰川数据集进行了对比。需要注意的是，由于不同研究所用方法、数据、研究期跨度存在差异，使得对比工作存在一定困难^[30]，而且不同研究记录跃动事件及识别跃动冰川轮廓的方式不同，因此为了便于对比统计，我们整理了多个基于遥感研究得到的跃动冰川数据集，并将其与 RGI 冰川轮廓对应，统计各研究识别的跃动冰川数量，这其中包括 RGI 6.0 中记录的跃动冰川，以及多个区域性跃动冰川数据集(表 6)。表 6 中本数据集的跃动冰川数量也为对应的 RGI 冰川数量。RGI 6.0 中的跃动冰川信息均来自 Sevestre and Benn^[10]，其中记录了两类跃动冰川信息：可能的(1 Possible 和 2 Probable)、确认的(3 Observed)^[11]。在高亚洲地区，RGI 未记录可能的跃动冰川，仅记录了 102 条确认的跃动冰川，远低于本研究中记录 385 条确认的跃动冰川和 95 条可能的跃动冰川。Goerlich 等^[13]和 Mukherjee 等^[31]使用了与本研究相似的识别跃动冰川的方法，即判别冰川末端是否前移和冰川表面高程变化，分别识别了帕米尔地

区的 202 条跃动冰川和天山地区的 39 条跃动冰川。Mukherjee 等^[31]在天山地区的研究结果与本研究结果(33+5)相似, Goerlich 等^[13]在帕米尔地区的研究结果多出本研究结果(150+5)约 47 条, 这可能是因为该研究使用的数据分辨率较高、时间跨度较长, 对于一些小型跃动冰川和持续时间较长的冰川跃动有较好的识别度。Bhambri 等^[12]基于 1840s 至 2017 年的实地考察数据和卫星数据, 通过判别冰川末端、表面流速和表面特征的变化, 识别了喀喇昆仑地区的 172 条跃动冰川, 与本研究得到的研究结果(137+37)相似, 2 组跃动冰川数据在空间分布上有些许出入, 这可能是因为 Bhambri 等^[12]的研究时间跨度较长, 对于获取卫星数据之前发生的跃动有较好的识别性, 而本研究使用的遥感数据较多样, 可以较好地识别近年来发生的跃动事件。Yasuda and Furuya^[32]通过研究昆仑山部分地区冰川末端和冰川表面流速的变化识别了 9 条跃动冰川, 少于本研究识别的数量(20+13)。以上对比结果表明本数据集有较高的质量和可信度。

表 6 与其他数据集识别的跃动冰川数量对比

Table 6 Comparison of surge-type glacier numbers between this study and other inventories

区域	本研究数量*	数据集相关研究	研究时期	跃动冰川数量	数据源	跃动判别依据
高亚洲	385+95	RGI 6.0	1861–2013	102	基于文献记录	-
帕米尔	150+5	Goerlich 等 (2020) ^[13]	1960s–2018	202	Landsat、Corona KH-4、Hexagon KH-9、SRTM、AW3D30、ASTER GDEM、TanDEM-X	冰川末端前移、表面高程变化
		RGI 6.0	1861–2013	51	基于文献记录	-
喀喇昆仑	137+37	Bhambri 等 (2017) ^[12]	1840s–2017	172	Landsat、ASTER、实地考察	冰川末端前移、表面流速变化、表面特征变化
		RGI 6.0	1861–2013	40	基于文献记录	-
天山	33+5	Mukherjee 等 (2017) ^[31]	1964–2014	39	Landsat、Corona KH-4、Hexagon KH-9、Cartosat、SPOT	冰川末端前移、表面高程变化
		RGI 6.0	1861–2013	7	基于文献记录	-
昆仑山	20+13	Yasuda and Furuya (2015) ^[32]	1972–1992	9	Landsat、多种合成孔径雷达影像	冰川末端前移、表面流速变化
		RGI 6.0	1861–2013	0	基于文献记录	-

*为本研究中确认的跃动冰川+可能的跃动冰川

4 数据价值

本研究通过空间观测手段, 依据冰川表面高程和表面特征变化情况, 识别了高亚洲地区的跃动冰川。本数据集可作为深入研究高亚洲地区冰川跃动机理和山地冰川演化过程的基础数据, 也可作为该地区公共基础设施规划和建设的参考资料, 还可为预防冰川跃动造成当地及下游居民的生命财产损失提供可靠的支撑材料。

5 数据使用方法和建议

本数据集中矢量文件的地理坐标系均为 WGS-1984，可用 ArcGIS 等 GIS 软件查阅使用。研究人员可根据需要灵活选择部分地区或全部地区的跃动冰川数据，以补充其现有研究；也可针对数据集中记录的跃动事件，开展跃动机理的深入研究。

致 谢

本项目受中国科学院战略性先导科技专项（A 类）（XDA19070202）资助。感谢中国科学院空天信息创新研究院刘广研究员提供的宝贵意见和建议，感谢 USGS 的 EROS 提供的 Landsat 系列卫星影像，感谢 NASA 和 JAXA 提供的 SRTM DEM 和 AW3D30 DEM，感谢 Fanny Brun 博士提供的 2000–2016 高亚洲地区冰川表面高程变化数据，感谢 GLIMS 提供的 6.0 版 RGI 数据。

数据作者分工职责

吕明阳（1991—），男，吉林省松原市人，博士，助理研究员，研究方向为冰冻圈遥感。主要承担工作：数据收集与处理，跃动冰川筛选与识别，跃动冰川最大轮廓勾绘，论文撰写。

郭华东（1950—），男，江苏省徐州市人，博士，研究员，研究方向为遥感理论与数字地球。主要承担工作：研究方案设计，论文修改。

闫世勇（1982—），男，江苏省徐州市人，博士，副教授，研究方向为雷达遥感应用研究。主要承担工作：研究方案设计，数据处理，论文撰写及修改。

李冠宇（1999—），男，山东省滕州市人，硕士研究生，研究方向为极地遥感。主要承担工作：冰川属性信息整理，数据集信息校对。

蒋迪（1997—），女，陕西省西安市人，博士研究生，研究方向为极地遥感。主要承担工作：跃动冰川最大轮廓勾绘，数据集信息校对。

张豪磊（1998—），男，浙江省绍兴市人，硕士研究生，研究方向为雷达遥感。主要承担工作：冰川属性信息整理，数据集信息校对。

张子彦（1999—），男，江苏省常州市人，硕士研究生，研究方向为雷达遥感。主要承担工作：冰川属性信息整理，数据集信息校对。

参考文献

- [1] HUGONNET R, MCNABB R, BERTHIER E, et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century[J]. Nature, 2021, 592(7856): 726-731. DOI: 10.1038/s41586-021-03436-z.
- [2] BRUN F, BERTHIER E, WAGNON P, et al. A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016[J]. Nature Geoscience, 2017, 10: 668. DOI: 10.1038/ngeo2999.
- [3] GARDNER A S, MOHOLDT G, COGLEY G, et al. A Reconciled Estimate of Glacier Contributions to Sea Level Rise: 2003 to 2009[J]. Science, 2013, 340(6134): 852. DOI: 10.1126/science.1234532.

- [4] YAO T, THOMPSON L, YANG W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2: 663. DOI: 10.1038/nclimate1580.
- [5] YAO T, WANG Y, LIU S, et al. Recent glacial retreat in High Asia in China and its impact on water resource in Northwest China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, 47(12): 1065-1075. DOI: 10.1360/03yd0256.
- [6] LIU S, DING Y, SHANGGUAN D, et al. Glacier retreat as a result of climate warming and increased precipitation in the Tarim river basin, northwest China[J]. *Annals of Glaciology*, 2006, 43: 91-96. DOI: 10.3189/172756406781812168.
- [7] 邬光剑, 姚檀栋, 王伟财, 等. 青藏高原及周边地区的冰川灾害[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1285-1292. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.011. [WU G J, YAO T D, WANG W C, et al. Glacial Hazards on Tibetan Plateau and Surrounding Alpines[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1285-1293. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.011.]
- [8] DING M, HUAI B, SUN W, et al. Surge-type glaciers in Karakoram Mountain and possible catastrophes alongside a portion of the Karakoram Highway[J]. *Natural Hazards*, 2018, 90(2): 1017-1020. DOI: 10.1007/s11069-017-3063-4.
- [9] BENN D I, EVANS D J A. *Glaciers and glaciation*[M]. London: Hodder Education, 2010.
- [10] SEVESTRE H, BENN D I. Climatic and geometric controls on the global distribution of surge-type glaciers: implications for a unifying model of surging[J]. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(228): 646-662. DOI: 10.3189/2015JoG14J136.
- [11] RGI Consortium. Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report[M/OL]. Colorado, USA: Global Land Ice Measurements from Space, 2017. [2021-07-01]. <http://www.glims.org/RGI/index.html>.
- [12] BHAMBRI R, HEWITT K, KAWISHWAR P, et al. Surge-type and surge-modified glaciers in the Karakoram[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 15391. DOI: 10.1038/s41598-017-15473-8.
- [13] GOERLICH F, BOLCH T, PAUL F. More dynamic than expected: an updated survey of surging glaciers in the Pamir[J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(4): 3161-3176. DOI: 10.5194/essd-12-3161-2020.
- [14] PAUL F. A 60-year chronology of glacier surges in the central Karakoram from the analysis of satellite image time-series[J]. *Geomorphology*, 2020, 352: 106993. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.106993.
- [15] 许艾文, 杨太保, 冀琴, 等. 乔戈里峰北坡冰川跃动遥感监测[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2016, 52(2): 145-152. DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2016.02.001. [XU A W, YANG T B, JI Q, et al. Monitoring recent surging on the northern slope glaciers of Qogir through remote sensing[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2016, 52(2): 145-152. DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2016.02.001.]
- [16] SHANGGUAN D, LIU S, DING Y, et al. Characterizing the May 2015 Karayaylak Glacier surge in the eastern Pamir Plateau using remote sensing [J]. *Journal of Glaciology*, 2016, 62(235): 944-953. DOI: 10.1017/jog.2016.81.

- [17] GUO L, LI J, LI Z, et al. The surge of the Hispar Glacier, Central Karakoram: SAR 3D flow velocity time series and thickness changes[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(7): e2019JB018945. DOI: 10.1029/2019JB018945.
- [18] 蒋宗立, 刘时银, 郭万钦, 等. 黄河源区阿尼玛卿山典型冰川表面高程近期变化[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(2): 231-237. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0027. [JIANG Z L, LIU S Y, GUO W Q, et al. Recent surface elevation changes of three representative glaciers in Anyemaqen Mountains, source region of Yellow River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(2): 231-237. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0027.]
- [19] FARR T G, ROSEN P A, CARO E, et al. The Shuttle Radar Topography Mission[J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45(2). DOI: 10.1029/2005RG000183.
- [20] BRUN F, BERTHIER E, WAGNON P, et al. Elevation changes of High Mountain Asia from 2000 to 2016, links to GeoTIFFs, in Supplement to: BRUN F et al. (2017): A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016. *Nature Geoscience*, 10(9), 668-673, <https://doi.org/10.1038/ngeo2999>. 2017, PANGAEA.
- [21] PFEFFER W T, ARENDT A A, BLISS A, et al. The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers[J]. *Journal of Glaciology*, 2014, 60(221): 537-552. DOI: 10.3189/2014JoG13J176.
- [22] MEIER M F, POST A. What are glacier surges?[J] *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1969, 6(4): 807-817. DOI: 10.1139/e69-081.
- [23] COPLAND L, SHARP M J, DOWDESWELL J A. The distribution and flow characteristics of surge-type glaciers in the Canadian High Arctic[J]. *Annals of Glaciology*, 2003, 36: 73-81. DOI: 10.3189/172756403781816301.
- [24] GRANT K L, STOKES C R, EVANS I S. Identification and characteristics of surge-type glaciers on Novaya Zemlya, Russian Arctic[J]. *Journal of Glaciology*, 2009, 55(194): 960-972. DOI: 10.3189/002214309790794940.
- [25] LV M, GUO H, LU X, et al. Characterizing the behaviour of surge- and non-surge-type glaciers in the Kingata Mountains, eastern Pamir, from 1999 to 2016[J]. *The Cryosphere*, 2019, 13(1): 219-236. DOI: 10.5194/tc-13-219-2019.
- [26] NUTH C, KAAB A. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change[J]. *The Cryosphere*, 2011, 5(1): 271-290. DOI: 10.5194/tc-5-271-2011.
- [27] SHEAN D E, ALEXANDROV O, MORATTO Z M, et al. An automated, open-source pipeline for mass production of digital elevation models (DEMs) from very-high-resolution commercial stereo satellite imagery[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 116: 101-117. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.03.012.
- [28] HALL D K, BAYR K J, SCHONER W, et al. Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from the ground and space (1893–2001)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(4): 566-577. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00134-2.
- [29] PAUL F, BARRAND N E, BAUMANN S, et al. On the accuracy of glacier outlines derived from

- remote-sensing data[J]. *Annals of Glaciology*, 2013, 54(63): 171-182. DOI: 10.3189/2013AoG63A296.
- [30] 吕明阳. 空间观测高亚洲地区跃动冰川分布规律与运动模式[D]. 南京大学, 2020. DOI: 10.27235/d.cnki.gnjj.2020.002365. [LV M Y. Distribution and motion patterns of the surge-type glaciers in High Mountain Asia by remote sensing[D]. Nanjing University, 2020. DOI: 10.27235/d.cnki.gnjj.2020.002365.]
- [31] MUKHERJEE K, BOLCH T, GOERLICH F, et al. Surge-Type Glaciers in the Tien Shan (Central Asia)[J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2017, 49(1): 147-171. DOI: 10.1657/AAAR0016-021.
- [32] YASUDA T, FURUYA M. Dynamics of surge-type glaciers in West Kunlun Shan, Northwestern Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2015, 120(11): 2393-2405. DOI: 10.1002/2015JF003511.

论文引用格式

吕明阳, 郭华东, 闫世勇, 等. 基于高程变化及遥感影像的高亚洲地区跃动冰川数据集[J/OL]. 中国科学数据, 2022, 7(2). (2022-04-11). DOI: 10.11922/11-6035.ncdc.2021.0006.zh.

数据引用格式

吕明阳, 郭华东, 闫世勇, 等. 基于高程变化及遥感影像的高亚洲地区跃动冰川数据集[DS/OL]. Science Data Bank, 2021. DOI: 10.11922/sciencedb.00901.

A dataset of surge-type glaciers in the High Mountain Asia based on elevation change and satellite imagery

LV Mingyang^{1*}, GUO Huadong¹, YAN Shiyong², LI Guanyu^{1,3}, JIANG Di^{1,3},
ZHANG Haolei², ZHANG Ziyang²

1. Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, P.R. China
2. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, P.R. China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, P.R. China

*Email: lvmy@aircas.ac.cn

Abstract: The High Mountain Asia, which covers the Tibet Plateau and neighboring mountainous regions, is home to the largest number of glaciers outside the Earth's polar regions. Since the end of the 20th century, global warming has caused dramatical recession of mountain glaciers in the High Mountain Asia, resulting in many glacial related hazards. As one of the glacial related hazards, glacier surges have the features of suddenness, concealment, and are difficult to detect their processes. They have been paid more and more

attention by scholars around the world recent years. However, the development and distribution characteristics of surge-type glaciers in the High Mountain Asia are not clearly understood. Related dataset is urgently needed to fill this research gap. We co-registered and differentiated of two digital elevation model datasets over the High Mountain Asia. Combining analysis of other glacial surface elevation change maps and historical optical satellite images since the 1970s, we identified 457 surge-type glaciers, including 362 glaciers surged within studied period and 95 likely surge-type glaciers. This dataset contains shapefiles describing locations, boundaries, and related attributes of the surge-type glaciers, and tables with surge evidences. This dataset can be taken as basic data for further studies on surge-type glaciers and reference for planning and construction of infrastructure in the High Mountain Asia. It can also provide reliable support for preventing life and property loss of residents caused by glacier surges.

Keywords: High Mountain Asia; surge-type glaciers; optical satellite images; digital elevation model; DEM co-registration

Dataset Profile

Title	A dataset of surge-type glaciers in the High Mountain Asia based on elevation change and satellite imagery
Data corresponding author	LV Mingyang (lvmy@aircas.ac.cn)
Data authors	LV Mingyang, GUO Huadong, YAN Shiyong, LI Guanyu, JIANG Di, ZHANG Haolei, ZHANG Ziyan
Time range	1972 - 2019
Geographical scope	Geographical scope: 26° 42' 28" - 46° 5' 7" N, 65° 58' 14" - 104° 20' 31" E; specific areas: mountainous regions including Tibetan Plateau, Karakoram Mountains, Himalaya Mountains, Hindu Kush Mountains, Pamir Plateau, and Tianshan Mountains, etc.
Data volume	7.92 MB
Data format	*.shp, *.xlsx
Data service system	< http://dx.doi.org/10.11922/sciencedb.00901 >
Sources of funding	Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA19070202).
Dataset composition	This dataset consists of 5 data files in a compressed file, including 3 shapefiles and 2 tables, as follows: (1) STG_HMA.shp (11.1 MB), the shapefile data of surge-type glaciers which surged during the study period in the High Mountain Asia; (2) STGlikely_HMA.shp (2.18 MB), the shapefile data of to-be-determined glaciers in the High Mountain Asia; (3) HMA_regionshape.shp (45 KB), the shapefile data of sub-regions in the High Mountain Asia; (4) Attributes of STG.xlsx, the data table of the corresponding glacial attributes with surge evidences during the study period in the High Mountain Asia (97 KB); (5) Attributes of STGlikely.xlsx, the data table of the corresponding likely glacial attributes with surge evidences during the study period in the High Mountain Asia (24 KB).