基于LiDAR、SRTM DEM 的祁连山黑河流域 十一冰川 2000—2012 年物质平衡估算

徐春海1.2,李忠勤1.3*,王飞腾1,王林1

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室/天山冰川站,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,兰州 730070)

摘要: 以祁连山黑河流域十一冰川为例,利用机载三维激光扫描数据(Light Detection And Ranging, LiDAR)和SRTM DEM数据,在LiDAR点云数据预处理、高程数据配准、校正、误差评估的基础上,建立基于大地测量法的冰川物质平衡计算流程。表明:2000—2012年十一冰川冰面高程变化为-7.47±0.92 m,变化率为-0.62±0.08 m·a⁻¹,估算十一冰川的年均物质平衡为 -0.53±0.07 m w.e.,累积物质平衡为-6.35±0.78 m w.e.,折合水当量约为(330.4±40.8)×10⁴ m³;与其他典型监测冰川物质平衡进行对比和分析,论证了估算结果的可靠性;LiDAR数据具有非常高的精度和空间分辨率,目前关于其在冰川物质平衡研究中的应用很少,论文尝试将其应用于冰川物质平衡变化研究中,具有广阔的发展前景。

关键词:祁连山黑河流域;十一冰川;冰川物质平衡;LiDAR;SRTM DEM
 中图分类号: P343.6
 文献标志码: A
 文章编号: 1000-3037(2017)01-0088-13
 DOI: 10.11849/zrzyxb.20160108

冰川对气候变化极其敏感,随着气候变暖,全球山地冰川呈现加速退缩趋势,对全 球水循环和生态变化产生了深刻影响^[1-2]。在我国西北干旱区,冰川是维系绿洲经济发展 和寒区生态环境稳定的保障,由冰川物质快速亏损引发的一系列水文、水资源、生态环 境问题亟需开展深入的定量研究^[3-4]。冰川物质平衡是反映冰川积累和消融量的重要参 数,对冰川的一系列物理性质和冰川变化有着深刻的影响,是连接冰川与气候、水资源 的重要纽带^[5]。而目前冰川物质平衡观测主要采用花杆/雪坑法,该方法对人力、物力的 依赖性大,而冰川大多分布在气候条件恶劣的偏远地区,使得有物质平衡观测的冰川条 数和时间序列非常有限,随着对地观测技术的不断发展,基于高分辨率DEM数据获取大 区域、长时间序列的物质平衡成为可能^[6]。祁连山黑河流域是我国目前进行水文集成研究 和水资源管理的重点实验区和示范区。葫芦沟小流域位于黑河上游,系黑河野牛沟的一 级支流流域,是黑河的产流区和水源涵养区,流域地形复杂,具有明显的垂直地带性,

收稿日期: 2016-01-28; 修订日期: 2016-08-04。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (91425303, 41471958, 41601076); 中国科学院西部之光基金 (No. Y629961001)。 [Foundation items: National Natural Science Foundation of China, No. 91425303, 41471958 and 41601076; West Light Foundation of The Chinese Academy of Sciences, No. Y629961001.]

第一作者简介:徐春海(1990-),男,河南新县人,博士研究生,研究方向为三维激光扫描技术与冰川物质平衡。E-mail: xuchunhai716@163.com

^{*}通信作者简介:李忠勤(1962-),男,研究员,主要从事冰川与环境方面的研究。E-mail: lizq@lzb.ac.cn 致谢:感谢中国科学院寒区旱区科学数据中心提供的机载三维激光扫描数据、中国科学院寒区旱区环境与工程 研究所黑河上游生态-水文试验研究站提供的十一冰川区自动气象站数据、地理空间数据云服务平台提供的SRTM DEM数据及中国气象科学数据共享服务网提供的气象台站数据。

冰川对流域水文水资源、生态环境至关重要。

近年来,SRTM、ICESat/GLAS、干涉合成孔径雷达、GRACE、光学立体像对等数据被广泛应用于冰川物质平衡变化研究中^[6-8]。机载三维激光扫描系统(LiDAR,Light Detection And Ranging)将激光测距、动态差分GPS、惯性测量系统等集成为一套设备,使得其获取的高程精度高达厘米级,同时具有较高的空间分辨率^[9],能够精细地刻画地形特征,由于受设备及成本限制,目前关于LiDAR应用于冰川物质平衡中的研究较少。本文以黑河葫芦沟流域源头的十一冰川为例,将LiDAR高精度点云数据应用于物质平衡研究中,建立一套多源DEM数据计算冰川物质平衡的技术流程。

1 研究区概况

十一冰川(99°52′40″E,38°12′45″N)位于祁连山中段北坡,发源于黑河上游葫芦沟流域,编号为5Y424B004,冰川海拔介于4775~4320m,朝向为正北。冰川分为东、西两支,东支为悬冰川,西支为小型山谷型冰川。2010年10月,开展该流域上游冰川状况和建立代表性冰川长期监测体系的野外考察工作,将该流域最大的一条冰川选为代表性冰川并命名为"十一"冰川,在冰川表面布设了物质平衡和运动速度观测花杆网阵,见图1,同时钻取12m测温孔,并在冰川末端架设了自动气象观测站(99°52′40″E,38°13′



?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.4"N,海拔4452m),以获取冰川区气象要素。根据野外考察,十一冰川的最大厚度为70m,冰川活动层温度-8℃,冰面流速2~10m·a⁻¹,该冰川目前面积为0.48km²。黑河流域目前冰川平均面积为0.3km²左右,而整个祁连山冰川的平均面积也仅有0.6km²左右,多为悬冰川或小型山谷冰川。从各种参数来看,十一冰川是一条具有典型大陆型冰川(冷冰川)特征的小型山谷冰川,在祁连山乃至中国西部干旱区具有良好代表性,因此研究十一冰川物质平衡具有十分重要的意义,它能够较好地反映祁连山地区冰川的消融状况。

2 数据与方法

2.1 数据

本研究所用数据包括:机载三维激光扫描数据、数字高程模型和遥感影像、气象站 数据。

1) 机载三维激光扫描数据。在"黑河流域生态-水文过程综合遥感观测联合试验"的支持下,2012年7月25日,在黑河中上游的葫芦沟观测区域,利用运12飞机,搭载Leica公司生产的ALS 70,开展了LiDAR航空遥感飞行试验。系统最大飞行高度5000m,最大扫描角75°,内置数码相机,激光波长为1064nm,记录多次回波强度,流域激光脚点个数为34007198个,平均点云密度为1点/m²,高程精度5~30 cm¹⁰¹。该数据源于 寒区旱区科学数据中心(http://westdc.westgis.ac.cn/)。

2)数字高程模型和遥感影像。为获取十一冰川近10 a的物质平衡,本研究使用了2000年的SRTM。DEM数据,由航天飞机雷达地形测绘任务(SRTM)、美国国家航空航天局(NASA)、美国国家测绘局(NIMA)和德国宇航中心(DLA)联合测量。其获取的数据覆盖了全球80%以上的陆地表面(60°N~56°S)^[11-12]。本研究采用C波段干涉仪干涉测量并经过"空洞"填补的90 m分辨率SRTM V4.1版本数据,该数据源于地理空间数据云服务平台(http://www.gscloud.cn/)。另外,十一冰川2000和2012年的冰川边界(用于获取大地测量法物质平衡计算的冰川面积参数)是利用Landsat TM/ETM遥感影像提取的(表1),来源于美国地质调查局(U.S. Geological Survey, http://www.usgs.gov)的数据共享平台,同时在边界提取过程中参考了第一和第二次中国冰川编目数据,该数据源于中国科学院寒区旱区环境与工程研究所。

3) 气象数据。冰川区自动气象站数据源于中国科学院寒区旱区环境与工程研究所黑河上游生态-水文试验研究站的 Vantage Pro2 Plus 无线自动气象站(99.88°E, 38.22°N, 海拔4 452 m), 见图 1。自动气象站安装在十一冰川区基岩上,融合 T200b 雨雪采样器 (Ceonor 公司生产,容量 600 mm,灵敏度 0.05 mm)、湿度和温度传感器以及风力计于一体。同时为分析冰川变化的气候背景,选取祁连(100.25°E, 38.18°N,海拔2 788.5 m) 和野牛沟(99.58°E, 38.14°N,海拔3 320 m) 两个气象站 2000 年以来的气温、降水资

Tuble 1 Rentice sensing integes						
影像	接收日期	传感器	分辨率/m	轨道号		
LT51340332000190BJC00	2000-07-08	TM	30	134/033		
LE71340332012215EDC00	2012-08-02	ETM+	30/15	134/033		
LE71340332012247PFS00	2012-09-03	ETM+	30/15	134/033		

表1 遥感影像

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

料,该数据源于中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn/)。

2.2 大地测量法冰川物质平衡计算方法

在LiDAR点云数据处理获取栅格DEM的基础上,通过高程数据配准、误差评估等 建立十一冰川的物质平衡估算流程,见图2,具体如下:

1)冰川物质平衡计算原理。基于多源 DEM 提取冰川物质平衡的方法称为大地测量 法,该方法在冰川物质平衡研究中已得到广泛的应用。通过比较同一区域不同时期的 DEM 数据,结合冰川面积、密度等数据获取冰川物质平衡^[13-14]。公式如下:

$$B_N = \frac{\rho}{s_g} \sum_{i=1}^N \Delta h_i s_i \tag{1}$$

式中: B_N 为冰川物质平衡; ρ 为冰、雪的平均密度; s_g 为冰川面积;N为冰川区所包含的像元总数; Δh 为不同时期DEM数据间高程差值; s_i 为单个像元的大小,即栅格DEM的空间分辨率。

2) LiDAR点云数据处理。所获取的数据为las 1.2格式的点云数据,需经过滤波、人工交互编译和插值等操作生成冰川区栅格 DEM。数据处理主要在 Terrasolid 软件中进行 (基于 MicroStation V8i 平台),数据滤波采用不规则三角网(Triangulated Irregular Network, TIN)滤波算法,该算法的基本思想是:先获取一定地面种子点组成初始稀疏 TIN,然后对各个点进行逐一判断,如果该点到三角面的垂直距离及角度小于设定的阈值,则将该点加入地面点集合,实现 TIN 的不断加密,接着重新计算 TIN,如此迭代,直到不再增加新的地面点或满足给定条件为止,以达到对非地面点的剔除^[9,14-15]。滤波处理之后,还需人工目视检查,对于非地面点可以人工直接剔除,最终获取地面点云数据,见图 3。滤波处理后的数据在 ArcGIS 10.1 软件的支持下,采用自然邻域插值获取冰











图 4 冰川区 2012年 LiDAR DEM Fig. 4 LiDAR Raster DEM data of the glacier region of 2012

川区栅格DEM,根据点云数据密度,重采样DEM分辨率为1m,见图4。

3)高程数据配准和校正。由于传感器在运行期间不稳定,从而导致不同传感器获取 的高程数据存在错误与偏差,图5为所选取的4个非冰川区高程分布,从统计的高程值分 布情况看,两期DEM数据之间存在明显的偏差,如果直接用于冰川冰面高程的变化研 究,会产生较大的误差,因此,在计算多源DEM差值时,需要对高程数据进行配准和校 正。本文采用Nuth提出的数据配准方法¹¹⁶,以LiDAR DEM为参考,SRTM。DEM为错位 DEM,在ArcGIS 10.1软件的支持下,选择无冰区作为感兴趣区,提取两期DEM感兴趣 区的高程差值*dh*、LiDAR DEM的坡度、坡向,通过余弦拟合求得平移矢量,见公式 (2)~(4)。第一次平移为:SRTM向西平移27.49 m,向北平移38.18 m,感兴趣区*dh*标 准差由39.68 m降低为20.22 m。通过第二次拟合,向东平移5.28 m,向北平移28.02 m, 感兴趣区*dh*标准差降为18.10 m(图6)。再次拟合标准差增大,采用第二次拟合后的平 移结果。在完成DEM数据水平配准后,由于空间分辨率的差异,不同DEM数据间还存 在一定的高程偏差,研究发现由空间分辨率所引起的高程差异与地形最大曲率之间的关





系在冰川区和非冰川区相似,但需要高分辨率的DEM^[17-18]。本研究基于LiDAR 1 m分辨率的DEM数据,在ENVI 4.8 软件的支持下提取地形最大曲率,选取非冰川区作为感兴趣区,提取感兴趣区高程差值 dh,通过线性拟合获取 dh 和最大曲率之间的关系,见图7。根据该关系式及冰川区地形最大曲率,对冰川区高程进行校正。

$$dh/\tan(\alpha) = a \cdot \cos(b - \varphi) + c$$
 (2)

$$c = \overline{dh} / \tan(\alpha) \tag{3}$$

$$\begin{cases} x = a \cdot \sin(b) \\ y = a \cdot \cos(b) \\ z = c \cdot \tan(\bar{a}) \end{cases}$$
(4)

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



图 7 非冰川区地形最大曲率与高程差异之间的关系 Fig. 7 Relationship between elevation difference and the maximum

terrain curvature in the non-glacierized region



式中: *dh*为无冰川区高程差异值; *a*为无冰区地形坡度; *q*为无冰区坡向; *x、y、z*为平移距离; *a*为平面偏移的幅度; *b*为平面偏移的角度。

4)误差与不确定性分析。大地 测量法冰川物质平衡计算的三个关键 参数分别是冰川面积、冰川表层雪冰 密度和多时相 DEM 表面高程差值。 以下分别就这3个参数的不确定性进 行分析:

一是冰川面积参数取值,本研究 在参照冰川编目资料的情况下通过人 工目视解译的方法获取十一冰川2000 和2012年的冰川边界(图8),该方 法是目前获取冰川边界精度最高的方 式[19],同时在冰川边界提取过程中辅 助Google Earth高分辨率影像进行修 正,以最大程度减小冰川边界提取的 不确定性, 解译获取十一冰川2000 年的面积为0.55 km², 2012年的面积 为0.49 km²。由于冰川消融导致冰川 面积减小,一些学者采用较大一期的 面积作为冰川面积输入参数141,还有 些研究采用两期面积的平均值作为计 算冰川物质平衡的面积参数[20],考虑 到十一冰川面积较小,冰川面积减小 的绝对量较小, 面积参数对冰川物质 平衡的计算影响较小,本研究采用两 期面积的平均值作为冰川面积输入 参数。

二是冰川表面密度参数取值。冰川物质平衡还取决于冰川表面雪冰平均密度ρ,很多研究中,ρ都是估计值,而非实测值^[14],冰川表面雪冰的密度随时间和空间变化幅度为100~917 kg·m⁻³,Zemp等^[21]的研究表明积累区以上冰川表面雪冰的平均密度近似为800 kg·m⁻³,消融区是917 kg·m⁻³,并采用最大和最小值的平均值860±60 kg·m⁻³作为整个冰川的表层密度;Huss利用粒雪压实模型,根据两条冰川长时间序列的物质平衡观测资料,对冰川体积-物质平衡转换参数进行模拟,发现冰川密度并不是恒定不变的,且系统性地小于冰的密度,并建议在大多数情况下使用850±60 kg·m⁻³作为冰川体积向物质平衡转换参数比较合适,60 kg·m⁻³作为密度参数的不确定性,该转换参数目前已被很多研究采纳^[22]。本研究采用850±60 kg·m⁻³作为冰川体积-物质平衡转换参数。

三是数字高程模型造成的不确定性。根据不同DEM数据间的高程残差误差满足高斯

分布的假设,误差采用非冰川区高程残差的均方根误差或方差进行评价。DEM数据格网 点的高程值存在较强的空间自相关,因此对样本数据进行选择时,必须去除空间自相 关,根据相关研究,DEM数据的相对误差可由高程残差平均值和方差计算^[23]:

$$SE = \frac{STDV_{noglc}}{\sqrt{n}} \tag{5}$$

$$e = \sqrt{SE^2 + MED^2} \tag{6}$$

式中:n为参与计算的像元数;STDVnoelc为 非冰川区的标准差; SE 为非冰川区的标准 误差; MED 为非冰川区高程残差平均值; e 为误差。据研究,距离20个像元的网格点 的空间自相关性可以忽略不计[23-24],重采样 两期栅格 DEM 的分辨率为10 m, 空间自相 关距离选择200m(表2)。

表2 DEM 校正前后误差分布特征(非冰川区)

Table 2 Statistics of overtical error before and afer DEM adujustment (non glacier area)

校	校正前 校正后				
MED	$STDV_{noglc}$	MED	$STDV_{noglc}$	n	e
-48.02	39.68	0.793	18.10	1 456	0.92

3 结果与讨论

3.1 近10 a 十一冰川物质平衡变化特征

基于大地测量法的原理得到2000—2012年十一冰川冰面高程变化为-7.47±0.92 m (图9),年均变化为-0.62±0.08 m·a⁻¹,可见十一冰川近10 a一直处于消融状态、厚度不断

60 kg·m⁻³作为冰川冰量向冰川 物质平衡转换时的密度参数, 得到 2000—2012 年十一冰川的 平均物质平衡为-0.53±0.07 m w.e. • a⁻¹, 累积物质亏损量达 -6.35±0.78 m w.e., 折合水当 量约为 (330.4±40.8) ×10⁴ m³。 3.2 冰川物质平衡计算结果的 对比分析

中国境内近10 a具有连续 实测物质平衡资料的冰川很 少,十一冰川所处位置海拔 高、环境恶劣,野外观测工作 十分困难, 实测物质资料非常 有限,无法直接验证本研究结 果。因此,本研究主要借助于 有连续观测资料的一些典型监 测冰川邻近年份的物质平衡资 料与本文的研究结果进行对比 分析,其中天山乌鲁木齐河源1





96

号冰川(以下称简称1号冰川) 和祁连山七一冰川的物质平衡资 料源于世界冰川检测服务处 WGMS (http://www.geo.uzh. ch/ micorsite/wgms/literature.html). 通过图10可以看出,近10a七 一冰川与1号冰川的物质平衡无 论在变化幅度还是变化规律上均 极为相似,根据WGMS 提供的 资料,1号冰川的形态规模、积 消类型与水热状况在全球大陆性 冰川中具有很好的代表性,其物 质平衡曲线无论是变化幅度还是 变化规律均与全球尺度山岳冰川

的平均物质平衡标准曲线极为类似,因而1号冰川物质平衡变化情况具有很好的代表性[25]。 近10 a七一冰川的年均物质平衡为-0.495 m w.e. • a⁻¹, 1号冰川为-0.686 m w.e. • a⁻¹。 十一冰川为-0.53±0.07 m w.e.·a⁻¹,介于两者之间。蒲健辰等^[20]研究发现七一冰川区冬季 气温低,降水量不足全年的20%,冰川积累和消融过程微弱,夏季日均温度高于0℃, 冰川物质平衡过程主要发生在夏季。从图11可以看出十一冰川区的气候条件与七一冰川 区十分相似,可见十一冰川物质平衡过程与七一冰川的物质平衡过程类似,本研究所得 十一冰川与七一冰川年均物质平衡值十分接近。同时根据上官冬辉等印对羊龙河1号冰川 和羊龙河5号冰川厚度变化的研究,两条冰川1997—2007年(与本文的研究时段存在很 大的重叠) 年均厚度变化分别是-0.42±0.06 m·a⁻¹和-0.52±0.06 m·a⁻¹, 与本文计算结果亦 十分接近。



图 11 十一冰川末端自动气象站气温、降水量柱状图



3.3 冰川物质平衡变化的气候背景

十一冰川属于夏季积累型冰川即冰川积累和消融同时发生在夏季,冰川消融与消融 期气温有直接的关系,而消融量直接影响到物质平衡的年际变化,并且气温的高低决定 着冰川消融的强弱^[28-29]。根据我国学者对天山乌鲁木齐河源1号冰川消融机理的研究,消 融期气温的升高,直接造成冰川消融量增加,在气温上升到一定程度后,尽管降水有增加,也不会使冰川物质亏损有所改变,该机理适用于解释世界众多山岳冰川的加速退缩^[25]。 20世纪90年代中期以来祁连山山区升温最为明显,变化幅度最大超过1℃^[30],虽然2000 年以来,祁连山区降水有所增加,但降水的年际变化大,且降水量主要集中在夏季,最 高可达247 mm,冬季降水量不足13 mm^[31],这种气候模式显然不利于冰川物质的积累, 距十一冰川较近的祁连和野牛沟两个气象站2000年以来夏季气温、年降水量显示(图 12),近10 a夏季平均气温上升幅度均超过0.04℃•a⁻¹。Oerlemans的研究表明气温每升高 1℃需要降水量增加25%或35%才能弥补由气温升高引起的冰川消融^[32],可见夏季气温的 升高是引发十一冰川物质亏损的主要原因。



图12 祁连和野牛沟近10 a夏季气温、年降水变化

Fig. 12 Summer temperature and annual precipitation change at Qilian and Yeniugou stations during 1960-2012

4 结论

本文利用LiDAR和SRTM DEM数据,以祁连山黑河流域十一冰川为研究对象,建 立了一套多源DEM数据估算冰川物质平衡的技术流程。表明:2000—2012年十一冰川冰 面高程变化为-7.47±0.92 m,年均厚度变化0.62±0.08 m·a⁻¹,估算十一冰川年均物质平衡 为-0.53±0.07 m w.e.·a⁻¹,累积物质平衡为-6.35±0.78 m w.e.,折合水当量约为(330.4± 40.8)×10⁴ m³;通过与其他典型监测冰川实测物质平衡计算结果的对比分析,论证了估 算结果的可靠性,进入21世纪祁连山区夏季气温显著升高引起冰川加速消融;研究发现,机载三维激光扫描数据的精度高达厘米级且具有非常高的空间分辨率,目前厘米级 精度的数字高程模型非常少,关于机载三维激光扫描技术在冰川物质平衡变化中的研究 更少,本文以LiDAR点云数据为基础,构建了冰川物质平衡估算流程,大大减小了冰川 物质平衡估算的不确定性,研究所使用的数据和研究方法具有广阔的发展前景和实用性。

参考文献(References):

- IPCC. Climate change 2013: The Physical Science Basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 4-10, 335-344.
- [2] FISCHER A. Glaciers and climate change: Interpretation of 50 years of direct mass balance of hintereisferner [J]. Global and Planetary Change, 2010, 71(1): 13-26.
- [3] 沈永平,苏宏超,王亚国,等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I):水文效应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 513-527.
 [SHEN Y P, SU H C, WANG G Y, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate chang in Xinjing (I): Hydrological effect. Journal of Glaciology and Geocrylogy, 2013, 35(3): 513-527.
- [4] 李忠勤, 李开明, 王林. 新疆冰川近期变化对水资源的影响研究 [J]. 第四纪研究, 2010, 30(1): 96-106. [LI Z Q, LI K M, WANG L. Study on recent glacier changes and their impact on water resources in Xinjiang, northwestern China. Quaternary Sciences, 2010, 30(1): 96-106.]
- [5] 刘潮海,谢自楚, 王纯足. 天山乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡过程研究 [J]. 冰川冻土, 1997, 19(1): 14-24. [LIU C H, XIE Z C, WANG C Z. A research on the mass balance processes of Glacier No.1 at the headwaters of the Urumqi River, Tianshan Mountains. Journal of Glaciology and Geocrylogy, 1997, 19(1): 17-24.]
- [6] NECKEL N, KROPÁČEK J, BOLCH T, et al. Glacier mass changes on the Tibetan Plateau 2003–2009 derived from ICESat laser altimetry measurements [J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(1): 014009.
- [7] NECKEL N, BRAUN A, KROPÁČEK J, et al. Recent mass balance of the Purogangri Ice Cap, central Tibetan Plateau, by means of differential X-band SAR interferometry [J]. The Cryosphere, 2013, 7(5): 1623-1633.
- [8] JANKE J R. Using airborne LiDAR and USGS DEM data for assessing rock glaciers and glaciers [J]. Geomorphology, 2013, 195: 118-130.
- [9] 赖旭东. 机载激光雷达基础原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 37-54, 169-172. [LAI X D. Fundamentals and Applications of Airborne LiDAR. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 37-54, 169-172.]
- [10] 李新, 刘绍民, 马明国, 等. 黑河流域生态-水文过程综合遥感观测联合试验总体设计 [J]. 地球科学进展, 2012, 27
 (5): 481-498. [LI X, LIU S L, MA M G, et al. HiWATER: An integrated remote sensing experiment on hydrological and ecological processes in the Heihe River Basin. Advances in Earth Science, 2012, 27(5): 481-498.]
- [11] VAN ZYL J J. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): A breakthrough in remote sensing of topography [J]. Acta Astronautica, 2001, 48: 559-565.
- [12] BERTHIER E, ARNAUD Y, VINCENT C, et al. Biases of SRTM in high-mountain areas: Implications for the monitoring of glacier volume changes [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(8), L08502. doi: 10.1029/2006GL025862.
- [13] THIBERT E, BLANC R, VINCENT C, et al. Instruments and Methods Glaciological and volumetric mass-balance measurements: Error analysis over 51 years for Glacier de Sarennes, French Alps [J]. Journal of Glaciology, 2008, 54(186): 522-532.
- [14] FISCHER A. Comparison of direct and geodetic mass balances on a multi-annual time scale [J]. The Cryosphere, 2010, 5(1): 107-124.
- [15] KILIAN J, HAALA N, ENGLICH M. DEM generation from laser scanner data using adaptive tin models [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996, 31: 383-388.
- [16] NUTH C, KÄÄB A. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change [J]. The Cryosphere, 2011, 5(1): 271.
- [17] PAUL F. Calculation of glacier elevation changes with SRTM: Is there an elevation-dependent bias? [J]. Journal of Glaciology, 2008, 54: 945-946.
- [18] GARDELLE J, BERTHIER E, ARNAUD Y. Impact of resolution and radar penetration on glacier elevation changes computed from DEM differencing [J]. Journal of Glaciology, 2012, 58(208): 419-422.

- [19] RAUP B, BACOVITEANU A, KHALSA S J S, et al. The GLIMS geospatial glacier database: A new tool for studying glacier change [J]. Global and Planetary Change, 2007, 56(1): 101-110.
- [20] ZEMP M, THIBERT E, HUSS M, et al. Uncertainties and re-analysis of glacier mass balance measurements [J]. Cryosphere Discussions, 2013, 7(2): 789-839.
- [21] ZEMP M, JANSSON P, HOLMLUND P, et al. Reanalysis of multi-temporal aerial images of Storglaciären, Sweden (1959–99)—Part 2: Comparison of glaciological and volumetric mass balances [J]. The Cryosphere, 2010, 4(3): 345-357.
- [22] HUSS M. Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change [J]. The Cryosphere, 2013, 7(3): 877-887.
- [23] BOLCH T, PIECZONKA T, BENN D I. Multi-decadal mass loss of glaciers in the Everest area (Nepal Himalaya) derived from stereo imagery [J]. The Cryosphere, 2011, 5(2): 349-358.
- [24] KOBLET T, GÄRTNER-ROER I, ZEMP M, et al. Reanalysis of multi-temporal aerial images of Storglaciren, Sweden (1959–99)—Part 1: Determination of length, area, and volume changes [J]. The Cryosphere, 2010, 4(3): 333-343.
- [25] 李忠勤. 天山乌鲁木齐河源1号冰川近期研究与应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2011: 1-2, 9-11. [LI Z Q. Progress and Application of Research on Glacier No.1 at Headwaters of Urumqi River, Tianshan, China. Beijing: China Meteorological Press, 2011: 1-2, 9-11.]
- [26] 蒲健辰, 姚檀栋, 段克勤. 祁连山七一冰川物质平衡的最新观测结果 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(2): 199-204. [PU J C, YAO T D, DUAN K Q, et al. Mass balance of the Qiyi Glacier in the Qilian Mountains: A new observation. Journal of Glaciology and Geocrylogy, 2005, 27(2): 199-204.]
- [27] SHANGGUAN D H, LIU S Y, DING Y J, et al. Changes in the elevation and extent of two glaciers along the Yanglonghe River, Qilian Shan, China [J]. Journal of Glaciology, 2010, 56(196): 309-317.
- [28] 李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 等. 冰川消融对气候变化的响应——以乌鲁木齐河源1号冰川为例 [J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 333-342. [LI Z Q, SHEN Y P, WANG F T, et al. Response of glacier melting to climate change—Taking Urumqi Glacier No.1 as an example. Journal of Glaciology and Geocrylogy, 2007, 29(3): 333-342.]
- [29] 王卫东, 张国飞, 李忠勤. 近 52 a天山乌鲁木齐河源1号冰川平衡线高度及其与气候变化关系研究 [J]. 自然资源学报, 2015, 30(1): 124-132. [WANG W D, ZHANG G F, LI Z Q. Study on equilibrium line altitude and its relationship with climate change of Urumqi Glacier No.1 in Tianshan Mountains in recent 52 years. Journal of Natural Resources, 2015, 30(1): 124-132.]
- [30] 王海军,张勃, 靳晓华,等. 基于GIS 的祁连山区气温和降水的时空变化分析 [J]. 中国沙漠, 2009, 29(6): 1196-1202.
 [WANG H J, ZHANG B, JIN X H, et al. Spatio-temporal variation analysis of air temperature and precipitation in Qilian mountainous region based on GIS. Journal of Desert Research, 2009, 29(6): 1196-1202.]
- [31] 张耀宗, 张勃, 刘艳艳, 等. 近半个世纪以来祁连山区气温与降水变化的时空特征分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(4): 125-130. [ZHANG Y Z, ZHANG B, LIU Y Y, et al. Variation characteristics of air temperature and precipitation in Mt Qilian region in recent half century. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(4): 125-130.]
- [32] OERLEMANS J. Extracting a climate signal from 169 glacier records [J]. Science, 2005, 308(5722): 675-677.

Estimation of Mass Balance of Shiyi Glacier in the Heihe River Basin, Qilian Mountains during 2000–2012 Based on LiDAR and SRTM

XU Chun-hai^{1,2}, LI Zhong-qin^{1,3}, WANG Fei-teng¹, WANG Lin¹

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences/Tianshan Glaciological Station, Northwest Institute of Eco-Environment

and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Glacier mass balance is the most direct reflection of climate, and its dynamic fluctuation can cause the changes of glacier morphological characteristics and melt water runoff. Usually, glacier mass balance is measured with glaciological and geodetic methods. In this study, geodetic method is used to measure the mass balance of Shiyi Glacier in the Heihe River Basin. Based on Airborne Laser Scanning (Light Detection and Ranging, LiDAR) point cloud data and SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) DEM, we establish the process for glacier mass balance calculation. Firstly, LiDAR point cloud data are preprocessed, including filtering (classification) and interpolation. Triangulated irregular network (TIN) filtering algorithm can easily realize the point cloud data filtering to obtain precise ground point cloud data. Based on TIN filtering algorithm, we obtain the ground point cloud. And the DEM is generated from LiDAR data based on natural neighborhood interpolation method, and is resampled to the resolution of 1 m. Then, taking LiDAR DEM as the reference data, multisource DEM data are matched with cosine curve fitting. The maximum terrain curvature of LiDAR DEM is extracted, and the spatial resolution error is corrected. After those processes, based on error analysis and accuracy assessment, we acquire ice surface change of Shiyi Glacier. Result shows the ice elevation of Shiyi Glacier changed -7.47±0.92 m from 2000 to 2012, with a glacier thinning rate of 0.62 ± 0.08 m \cdot a⁻¹. According to other related studies, the volume-mass conversion parameter is assumed to be $850\pm60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. It is estimated that the average mass balance of Shiyi Glacier is -0.53 ± 0.07 m w.e. $\cdot a^{-1}$, and the cumulative mass change of the glacier is -6.35 ± 0.78 m w.e., which is about $(330.4 \pm 40.8) \times 10^4$ m³ water equivalents. Compared to other typical monitors on glacier mass balance, the results is reliable. The summer temperature rise in the study area caused serious mass loss of Shiyi Glacier in recent years. LiDAR point cloud data have high precision and spatial resolution, however it is less used in glacier volume research at present. In this paper, it is applied in measuring glacier mass balance changes, showing the promising prospects and practicability of both the data and the method.

Key words: Heihe River Basin; Shiyi glacier; glacier mass balance; LiDAR; SRTM