

DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0240. 2017. 0002

WANG Puyu ,LI Zhongqin ,LI Huilin ,et al. Analysis of the relation between glacier volume change and area change in the Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology ,2017 ,39(1) : 9 - 15. [王璞玉 ,李忠勤 ,李慧林 ,等. 天山冰川储量变化和面积变化关系分析研究[J]. 冰川冻土 ,2017 ,39(1) : 9 - 15.]

天山冰川储量变化和面积变化关系分析研究

王璞玉¹ , 李忠勤^{1,2} , 李慧林¹ , 李开明³ , 徐春海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,甘肃 兰州 730000; 2. 西北师范大学 地理与环境科学学院,甘肃 兰州 730070; 3. 兰州城市学院 建筑与城市规划学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要: 冰川储量的变化对海平面和区域水资源、生态环境以及社会经济等有重要影响,但是对大量冰川的储量变化很难通过实地观测获得。基于天山 9 条监测冰川储量变化的估算结果,通过统计分析,探讨冰川储量变化和面积变化的相互关系,以期通过测定冰川面积变化来估算冰川储量变化。结果表明:冰川储量变化与面积变化具有线性关系,其决定系数为 0.67~0.70。加入其他山区冰川样本以后,决定系数并没有提高。其原因在于,一方面对冰川变化监测和冰川储量估算存在误差;另一方面,不同的冰川区由于冰川的类型、规模及区域气候特征的差异,冰川变化对气候变化响应的敏感程度不同。因此,未来不仅需要更多更准确的冰川储量估算,还需要按冰川形态类型和区域分别研究。

关键词: 天山冰川; 冰川储量; 冰川储量变化和面积变化关系; 冰川变化机理

中图分类号: P343.6 文献标志码: A 文章编号: 1000-0240(2017)01-0009-07

0 引言

冰川储量的变化不仅是导致海平面变化的主要因子之一,对区域水资源和生态环境乃至社会经济等都有重要影响,20 世纪中期以来气候变暖引起冰川储量损失,成为国内外关注的热点之一^[1-5]。冰川变化研究中,冰川面积和储量的变化是两个主要的表述因子。面积的变化是冰川变化最直接的反映和最容易观测的参量之一,对于单条冰川,可以利用实地测绘的方法,对于大范围多条冰川,则可通过遥感手段获得。冰川储量的变化与冰川水资源量的变化以及冰川对河川径流的贡献量密切相关,对其研究更具实际意义。与冰川面积变化相比,冰川储量变化的获得要复杂得多,需要在摸清冰川厚度,或者冰川表面高程的基础上,通过计算间接得到。然而,野外实地测量冰川厚度或表面高程不仅耗时费力,而且只能在有限的冰川上开展。因此,对冰川储量变化和面积变化关系方面开展深入的研究,以期通过比较容易获得的冰川面积变化来估算

冰川储量的变化,是较可行的途径之一。

目前,国内外对冰川储量估算的研究比较多,主要集中在两方面。一方面是采用物理模式,以物理过程为基础,从机理上研究它们之间的关系。例如, Farinotti 等^[6]以物理过程为基础,依据冰川各种物理参数的热力学联系,使用冰川动力学模型,从机理上研究了冰川各参量之间的关系,由此可估算冰川储量。Li 等^[7]在理想塑性体厚度计算方法的基础上,考虑了山谷对冰川的拖滞作用,分析了各参数之间的关系,并以此来计算山岳冰川厚度。在知道厚度和面积之后,再进一步可估算出冰川储量。利用物理模式研究冰川形态因子变化,需要详细的冰川表面及冰床地形物理输入参数,计算操作也较为困难,所以该类方法在处理众多冰川时受到限制。另一方面是通过统计方法建立适合于不同区域、不同类型冰川的储量-面积关系式^[8-10]。在统计关系研究中,已有研究建立的冰川储量和面积的关系式形式为 $V = \beta \cdot S^\gamma$ 。其中, V 为冰川储量, S 为冰川面积, β 和 γ 为两个经验常数,主要与冰川

收稿日期: 2016-08-08; 修订日期: 2016-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301069; 41641003) 资助

作者简介: 王璞玉(1983-),女,甘肃成县人,副研究员,2012 年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获博士学位,从事冰川变化过程及其机理研究。E-mail: wangpuyu@lzb.ac.cn.

形态特征有关，实际应用中需要依据具体情况来确定。

关于冰川储量变化和面积变化之间的关系极为缺乏。在统计分析上，冰川储量估算本身就比较粗略，冰川储量变化的估算更为粗略，而且具有同时期冰川面积变化和储量变化研究结果的监测冰川很少。基于物理过程的动力学模拟又仅仅只是针对单条冰川。Bahr 等^[11]从冰川对气候变化响应机理入手，引入积累区面积比率 AAR(冰川积累区面积与冰川总面积比值)的变化，从而建立冰川储量变化率 P_V 和面积变化率 P_S 之间的关系为 $P_V = (1 + P_S)^\gamma - 1$ 。其中， $(1 + P_S)$ 为积累区面积比率与稳定态(或称平衡态)积累区面积比率的比值， γ 为前述冰川储量和面积统计关系中的常数。应用这种方法，需要对具体的冰川，按照形态特征首先进行稳定态积累区面积比率和对应的物质平衡计算，然后再依据观测的物质平衡，计算积累区面积比率变化。由于在计算中已经应用了冰川储量和面积统计公式，在物质平衡和积累区面积以及它们之间关系计算中又不断需要假定近似，最终结果的可靠性很难确定。

在我国，利用 20 世纪 80 年代获取的 27 条冰川的厚度资料，建立了全国冰川储量-面积经验公式^[10]。有研究也曾针对乌鲁木齐河源 1 号冰川给出冰川储量变化率、面积变化率及长度变化率的关系 $P_V : P_S : P_L$ ^[12]。冰川是具有弹性、黏性及塑性综合特性的流变体，从根本上来说，冰川储量变化和面积变化之间的关系是由冰川的动力学特性和冰川水热边界条件共同决定的^[13]。近几十年来由于气

候变暖，冰川的动力学特性和冰川水热边界条件均发生了变化，从而改变了冰川物质输送与形态的平衡，这种响应机制无疑会改变冰川储量变化和面积变化间的相互关系。王璞玉等^[14]对乌鲁木齐河源 1 号冰川不同时期各形态因子变化关系的研究结果显示，冰川储量的变化与面积变化间的差异随时间呈增大趋势。

在这种背景下，鉴于我国在新疆天山地区有多条监测冰川，本研究选择天山地区具有冰川储量变化研究结果的 9 条冰川(图 1)，利用统计方法，试图建立适合于目前气候条件和冰川响应过程的这一地区冰川储量变化和面积变化的关系式，实现通过测定冰川面积变化来估算冰川储量变化的目的，为评估新疆冰川水文、水资源变化提供参考。

1 监测冰川储量变化研究结果

对天山地区冰川储量变化研究中，针对乌鲁木齐河源 1 号冰川的研究结果最为丰富^[14-15]。1959-2010 年间，累积物质平衡观测值为 -14 883 mm 水当量，平均年物质平衡 -286 mm 水当量。平衡线高度 ELA 显著上升达 90 m。对托木尔峰地区的青冰滩 72 号冰川和科其喀尔冰川也有一些研究。这两条冰川都是有表碛覆盖的山谷冰川，积累区地形复杂，地面观测主要在消融区开展。据冰舌区消融观测计算，青冰滩 72 号冰川消融区在 2008 年 7-8 月净消融为 162 mm 水当量^[16]，科其喀尔冰川 2003/2004 和 2004/2005 年净消融分别为 494 mm 和 383 mm 水当量^[17]。尽管在这两条冰川上没有直接的物质平衡观测，但通过冰川厚度变化可间接

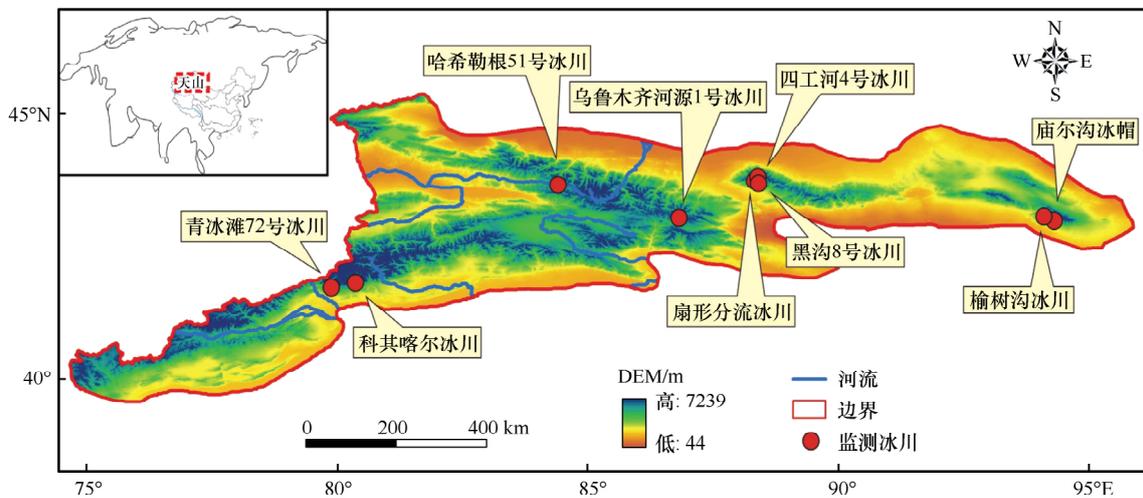


图 1 天山 9 条监测冰川位置示意图

Fig. 1 Map showing the terrain and the location of the nine monitored glaciers in the Tianshan Mountains

获取相应时段的净物质平衡。在本研究中假设冰川密度为 $0.9 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 用以将冰川厚度转化为累积物质平衡。奎屯河哈希勒根 51 号冰川自 1999 年以来有连续物质平衡观测结果。依据 20 世纪 80 年代和 2010 年厚度测量, 获得该时段物质净损失量为 $32.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ ^[18]。对博格达峰地区的四工河 4 号冰川、扇状分流冰川和黑沟 8 号冰川以及天山最东部哈尔里克山的庙尔沟冰帽和榆树沟 6 号冰川也获得过冰川储量变化的研究结果。2009 年四工河 4 号冰川平均厚度为 27.6 m, 冰川储量为 $76.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ ^[19]。1962 - 2009 年, 该冰川冰舌减薄了 $(15 \pm 8) \text{ m}$, 冰川储量减少了 $(0.014 \pm 0.008) \text{ km}^3$, 相当于平均年物质平衡为 $(-0.29 \pm 0.15) \text{ m}$ 水当量^[20]。对扇状分流冰川仅有一次厚度测量, 但通过将 1962 年地形图转换为表面数字高程模型, 并与 2009 年表面高程测量结果对比得出 1962 - 2009 年的物质净损失量为 $(65.5 \pm 37.4) \times 10^6 \text{ m}^3$ ^[21]。黑沟 8 号冰川 20 世纪 80 年代和近期都进行过厚度测量^[21-22], 据厚度减薄计算的 1986 - 2009 年冰川储量损失为 $(25.5 \pm 11.8) \times 10^6 \text{ m}^3$ 。对于庙尔沟冰帽, 据 1981 - 2007 年间的厚度测量, 随着位置的不同, 冰川厚度减薄介于 0 ~ 20 m, 消融主要发生在冰帽的下部, 上部发生少量消融^[23]。依据厚度变化可得出该冰川 1981 - 2007 年冰川储量损失约为 9 000 mm 水当量。榆树沟 6 号冰川只在 2011 年进行过厚度测量。将 1972 年 1: 5 万地形图数字化得到的表面高程模型与 2011 年表面高程测量结果对比, 得出 1972 - 2011 年冰川厚度变化变化为 $0.51 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[23], 据此可估算出这段时间冰川储量变化约为 $71 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。图 2 汇总了对这些冰川储量变化

的研究结果。

冰川面积变化依据地形图和遥感影像对比较易获得, 实地测量也相对容易。关于天山地区冰川面积变化无论是单条冰川还是流域或区域尺度, 都有大量研究结果^[1 24-25]。对上述 9 条有冰川储量变化结果的冰川, 也有一些不同时期的面积变化研究结果。为了研究它们的冰川储量变化和面积变化之间的关系, 本研究仅选择与冰川储量变化同时期的面积变化。

2 冰川储量变化和面积变化关系探讨

根据上述 9 条冰川储量变化和面积变化结果, 采用相关分析 [图 3 (a)], 可得出冰川储量变化 (dV/V) 和面积变化 (dS/S) 之间的关系式为:

$$dV/V = 1.206dS/S + 0.029 \quad (R^2 = 0.700) \quad (1)$$

笔者将乌鲁木齐河源 1 号冰川 6 个时段的面积和冰川储量变化结果作为 6 个样本, 这样, 在得出式 (1) 时共有 14 个样本。从图 3 和式 (1) 的决定系数 R^2 来看, 这些冰川储量变化和面积变化之间的线性关系是比较显著的。尽管如此, 如果对各条冰川的形态特征进行考虑, 会觉得仍然存在问题。这些冰川中, 除庙尔沟冰帽之外, 其他基本都属于山谷冰川和冰斗山谷冰川。冰帽的储量和面积之间的关系, 以及它们变化量之间的关系与山谷冰川有很大不同, 将其纳入并不合理。另外, 科其喀尔冰川消融区很大范围被表碛完全覆盖, 根据监测研究^[26], 近几十年末端和面积都比较稳定, 冰川储量损失主要缘于厚度减薄。因此, 剔除掉这两条冰川以后, 再进行相关分析 [图 3 (b)], 得出的关系式为:

$$dV/V = 1.179dS/S + 0.033 \quad (R^2 = 0.674) \quad (2)$$

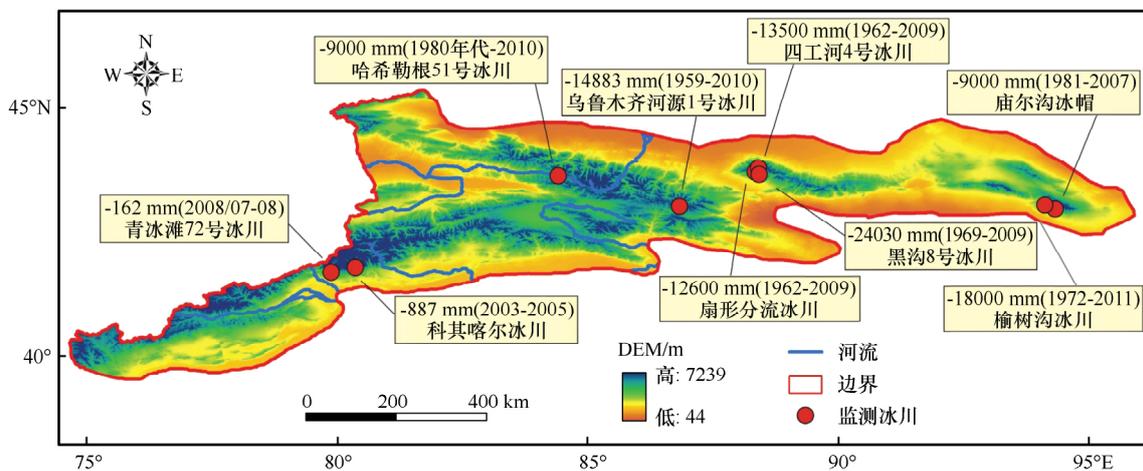


图 2 天山 9 条监测冰川的物质损失
Fig. 2 Mass losses of the nine monitored glaciers in the Tianshan Mountains

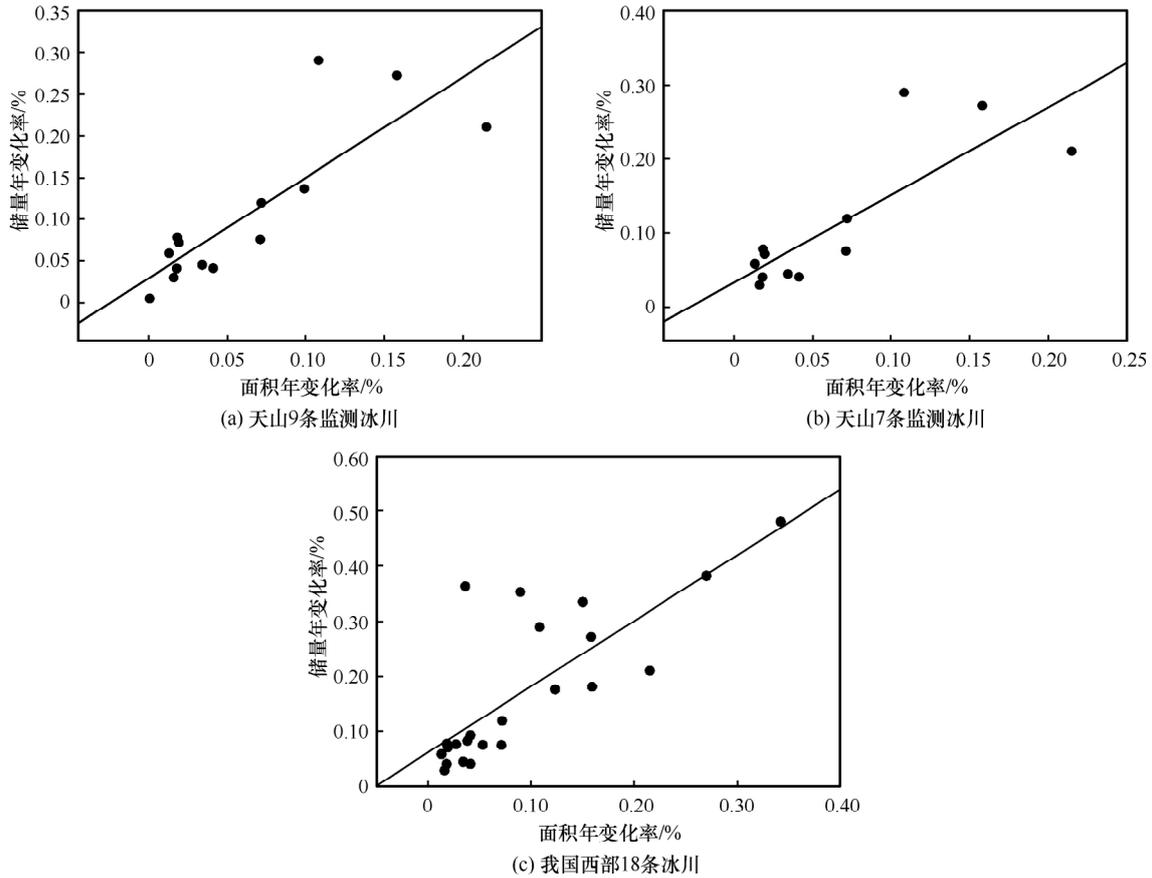


图3 冰川储量变化和面积变化的关系

Fig. 3 Scaling relation between glacier volume change and area change

[(a): for the nine glaciers monitored in the Tianshan Mountains; (b): for the seven glaciers monitored in the Tianshan Mountains; (c): for the eighteen glaciers investigated in western China]

虽然式(2)的决定系数比式(1)有所降低,但笔者觉得它应该更符合实际。因为进一步检查庙尔沟冰帽的结果,发现现场观测仅在很小范围开展。科其喀尔冰川目前还没有冰川储量变化研究,本文中仅仅是依据2003-2005年物质平衡估算值和末端变化对面积变化和冰川储量变化给予粗略的推断。

无论式(1)还是式(2),所依据的监测冰川也仅仅是9条和7条,从统计分析角度,样本量是相当少的。由于将乌鲁木齐河源1号冰川分时段作为多个样本来对待,这样得出的结果实际上很大程度上反映的是该冰川储量变化和面积变化之间的关系。另外,如前所述,这几条监测冰川形态类型基本属于山谷冰川和冰斗山谷冰川,得出的关系式应该仅适用于这种类型的冰川。

3 讨论

上述结果主要针对天山地区的冰川,如果将我

国其他有冰川储量变化研究结果的冰川纳入的话,其相关性会如何呢?据Shangguan等^[27]的研究,祁连山中段有两条冰川(冰川编目号码为5Y432A1和5Y432A5),1956-2007年的厚度减薄速率分别为 $(0.40 \pm 0.22) \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $(0.33 \pm 0.22) \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$,冰川面积的缩小比率分别为约4.1%和15.9%。祁连山东段,1972-2007年,水管河4号冰川消融区减薄速率为 $(0.42 \pm 0.22) \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[28]。对于老虎沟12号冰川,1957-2007年,RTK-GPS测量的区域,冰川减薄速率达 $(0.37 \pm 0.01) \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[29]。宁缠河3号冰川,1972-2009年冰川厚度减薄速率约 $0.25 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。相对1972年,冰川末端退缩了约6%,面积减少了约13.1%,冰川储量减少约35.3%^[30]。贡嘎山地区的海螺沟冰川,其消融区1966-2009年减薄速率为 $(1.1 \pm 0.4) \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[31],同时冰川面积减少了3.5%^[32]。43年的减薄量相当于1994年平均厚度125m的约30%^[33]。青藏高原南部的三条冰川观测结果显示,2007-2011年古

仁河口冰川厚度减少速率为 $0.85 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 2007 – 2009 年抗物热冰川厚度减少速率为 $0.85 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 2008 – 2013 年纳木那尼冰川(北支)厚度减少速率为 $0.42 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ [34]。基于 GPR 测量, 古仁河口冰川 2008 年冰川储量约为 0.045 km^3 ; 面积由 1970 年的 1.5 km^2 缩减到 2007 年的 1.28 km^2 , 减少了约 15% [35]。结合 GPS 数据、雷达测厚和地形图以及遥感数据, 抗物热冰川 2008 年平均厚度、面积、储量分别为 26.4 m 、 1.96 km^2 、 0.0517 km^3 。20 世纪 70 年代以来, 抗物热冰川一直处于大幅度的物质亏损状态, 面积和体积分别减少了 34.2% 和 48.2% [36]。2003 – 2013 年纳木那尼冰川减薄速率为 $(0.27 \pm 0.06) \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 10 年间储量减少 7.53%, 面积减少 $(0.8 \pm 0.0022) \text{ km}^2$, 年均减少 0.5% [37]。青藏高原中部羌塘 1 号冰川 2011 年平均厚度为 51.28 m , 冰川储量为 0.1236 km^3 。1970 – 2014 年, 该冰川面积减少 0.32 km^2 , 年缩小比率达 0.28%, 34 年间储量减少了 17.54% [38]。

加入上述冰川后, 共 18 条冰川, 仍将乌鲁木齐河源 1 号冰川 6 个时间段的结果作为 6 个样本, 共 23 个样本, 拟合结果如图 3(c) 和式(3)所示:

$$dV/V = 1.201dS/S + 0.061 \quad (R^2 = 0.607) \quad (3)$$

式(3)的决定系数较前两个偏低, 主要可能来源于两方面的原因: 一方面, 对样本单条冰川, 大多数冰川上部没有实测数据, 其结果缺乏完整性, 尽管面积和冰川储量变化主要发生在冰川下部。而且, 野外测量覆盖范围、剖面位置、测点数量等也存在差异。另一方面, 山地冰川数量众多, 分布广泛, 而且受区域气候条件和局地地形的控制, 其形态类型和规模千差万别, 很难有各方面完全相同的冰川存在。因此, 需要分类讨论, 针对不同类型冰川开展储量估算, 成为该项研究的关键和难点。

4 结论与展望

在全球变暖的背景下, 近年来冰川呈现加速消融的趋势, 然而对冰川储量变化估算的研究还很薄弱。基于 9 条监测冰川对我国天山地区冰川储量变化和面积变化关系的统计分析表明, 对于山谷冰川以及冰斗山谷冰川来说, 冰川储量变化与面积变化具有线性相关。但因样本数量较少, 评估其误差范围具有一定难度。加入祁连山等地一些冰川以后, 这种线性相关的决定系数并没有提高。其原因在于一方面对冰川变化监测和冰川储量估算存在误差, 另一方面不同的冰川区, 由于冰川的类型、规模及

区域气候特征的差异, 冰川变化对气候变化响应的敏感程度不同。因此, 大范围、针对不同类型冰川评估冰川储量具有很大挑战性, 未来还需要从以下两方面继续开展工作。

(1) 完善与改进技术手段

在国际上, 对于大范围区域冰川的冰川储量(厚度)变化, 通常采用多源遥感的方法, 基于不同时期冰川表面数字高程模型对比来进行估算。但由于受到厚度估算较大误差和数字高程精度的限制, 这些研究结果都存在很大不确定性。因此, 采用多源遥感方法, 包括光学遥感方法、合成孔径雷达(SAR)、微波遥感、激光扫描仪等, 和野外观测相结合的方法可以大大提高冰川储量变化研究的精度, 以代表性冰川为参照和验证, 从而拓展到整个区域。

(2) 加强对不同类型冰川的监测和分类研究

我国具有连续观测的冰川数量有限, 除乌鲁木齐河源 1 号冰川拥有逾 50 年观测历史外, 其他冰川均缺少长期、连续观测。因此, 亟待加强冰川的野外调查和监测。不仅使冰川变化监测在时间上得以连续, 而且要扩大冰川的监测区域和冰川的监测数量。同时, 还要区分冰川形态类型来分别进行冰川储量变化和面积变化之间的关系研究。

参考文献(References):

- [1] Farinotti D, Longuevergne L, Moholdt G, et al. Substantial glacier mass loss in the Tien Shan over the past 50 years[J]. Nature Geoscience, 2015, 8(9): 716 – 722.
- [2] Yao Tandong, Thompson L, Yang Wei, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(9): 663 – 667.
- [3] Huai Baojuan, Li Zhongqin, Wang Feiteng, et al. Variation of glaciers in the Sawuer Mountain within Chinese territory during 1959 – 2013[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(5): 1141 – 1149. [怀保娟, 李忠勤, 王飞腾, 等. 1959 – 2013 年中国境内萨吾尔山冰川变化特征[J]. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1141 – 1149.]
- [4] Wang Xin, Liu Qionghuan, Jiang Lianghong, et al. Characteristics and influence factors of glacier surface flow velocity in the Everest region, the Himalayas derived from ALOS/PAL SAR images[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(3): 570 – 579. [王欣, 刘琼欢, 蒋亮虹, 等. 基于 SAR 影像的喜马拉雅山珠穆朗玛峰地区冰川运动速度特征及其影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 570 – 579.]
- [5] Feng Tong, Liu Shiyin, Xu Junli, et al. Glacier change of the Yarkant River basin from 1968 to 2009 derived from the first and second glacier inventories of China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 1 – 13. [冯童, 刘时银, 许君利, 等. 1968 – 2009 年叶尔羌河流域冰川变化: 基于第一、二次中国冰川编目数据[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 1 – 13.]

- [6] Farinotti D, Huss M, Bauder A, et al. A method to estimate the ice volume and ice-thickness distribution of alpine glaciers [J]. *Journal of Glaciology*, 2009, 55(191): 422–430.
- [7] Li Huilin, Ng F, Li Zhongqin, et al. An extended “perfect-plasticity” method for estimating ice thickness along the flow line of mountain glaciers [J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2012, 117(F1) [2016-02-22]. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011JF002104/abstract>.
- [8] Bahr D B, Meier M F, Peckham S D. The physical basis of glacier volume-area scaling [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(B9): 20355–20362.
- [9] Liu Shiyin, Sun Wenxin, Shen Yongping, et al. Glacier changes since the Little Ice Age maximum in the western Qilian Shan, Northwest China, and consequences of glacier runoff for water supply [J]. *Journal of Glaciology*, 2003, 49(164): 117–124.
- [10] Shi Yafeng. Concise glacier inventory of China [M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2005. [施雅风. 简明中国冰川目录 [M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005.]
- [11] Bahr D B, Dyurgerov M, Meier M F. Sea-level rise from glaciers and ice caps: a lower bound [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(3): 151–157.
- [12] Yao Tandong, Shi Yafeng. Climate, glacier and stream water change and their projection in Ürümqi River [J]. *Science in China: Series B*, 1988(6): 657–666. [姚檀栋, 施雅风. 乌鲁木齐河气候、冰川、径流变化及未来趋势 [J]. *中国科学: B 辑*, 1988(6): 657–666.]
- [13] Paterson W. The physics of glaciers [M]. 3rd ed. Tokyo: Elsevier, 1994.
- [14] Wang Puyu, Li Zhongqin, Li Huilin, et al. Comparison of glaciological and geodetic mass balance at Ürümqi Glacier No. 1, Tian Shan, Central Asia [J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 114(469): 14–22.
- [15] Li Zhongqin, Li Huilin, Chen Yaning. Mechanisms and simulation of accelerated shrinkage of continental glaciers: a case study of Ürümqi Glacier No. 1 in eastern Tianshan, Central Asia [J]. *Journal of Earth Science*, 2011, 22(4): 423–430.
- [16] Luo Yuan, Li Huilin, Li Zhongqin, et al. The relationship between the mass balances and meteorological factors at the glacier of No. 72, Qingbingtan, Shenqi Peak, Tuomuer Area [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(3): 62–67. [雒园, 李慧琳, 李忠勤, 等. 托木尔峰地区神奇峰冰川 3 950 m 处物质平衡与气象要素关系分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(3): 62–67.]
- [17] Zhang Yong, Liu Shiyin, Ding Yongjian, et al. Preliminary study of mass balance on the Keqicar Baxi Glacier on the south slopes of Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(4): 477–484. [张勇, 刘时银, 丁永建, 等. 天山南坡科契卡尔巴西冰川物质平衡初步研究 [J]. *冰川冻土*, 2006, 28(4): 477–484.]
- [18] Wang Puyu, Li Zhongqin, Li Huilin, et al. Recent evolution in extent, thickness and velocity of Haxilegen Glacier No. 51, Kuytun River basin, eastern Tianshan Mountains [J]. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 2016, 48(2): 241–252.
- [19] Wu Lihua, Li Zhongqin, Wang Puyu, et al. Sounding the Sigong River Glacier No. 4 in Mt. Bogda area, the Tianshan Mountains by using ground penetrating radar and estimating the ice volume [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(2): 276–282. [吴利华, 李忠勤, 王璞玉, 等. 天山博格达峰地区四工河 4 号冰川雷达测厚与冰储量估算 [J]. *冰川冻土*, 2011, 33(2): 276–282.]
- [20] Wang Puyu, Li Zhongqin, Li Huilin, et al. Glacier No. 4 of Sigong River over Mt. Bogda of eastern Tianshan, central Asia: thinning and retreat during the period 1962–2009 [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(1): 265–273.
- [21] Wang Puyu, Li Zhongqin, Wang Wenbin, et al. Comparison of changes in glacier area and thickness on the northern and southern slopes of Mt. Bogda, eastern Tianshan Mountains [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, 132: 164–173.
- [22] Wu Zhen, Liu Shiyin, Zhang Shiqiang, et al. Accelerated thinning of Hei Valley No. 8 Glacier in the Tianshan Mountains, China [J]. *Journal of Earth Science*, 2013, 24(6): 1044–1055.
- [23] Wang Puyu, Li Zhongqin, Zhou Ping, et al. Recent changes of two selected glaciers in Hami Prefecture of eastern Xinjiang and their impact on water resources [J]. *Quaternary International*, 2015, 358(2): 146–152.
- [24] Li Baolin, Zhu Axing, Zhang Yichi, et al. Glacier change over the past four decades in the middle Chinese Tien Shan [J]. *Journal of Glaciology*, 2006, 52(178): 425–432.
- [25] Wang Shengjie, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, et al. Response of glacier area variation to climate change in Chinese Tianshan Mountains in the past 50 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 38–46. [王圣杰, 张明军, 李忠勤, 等. 近 50 年来中国天山冰川面积变化对气候的响应 [J]. *地理学报*, 2011, 66(1): 38–46.]
- [26] Xie Changwei, Ding Yongjian, Liu Shiyin, et al. Variation of Keqikaer Glacier terminus in Tomur Peak during last 30 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5): 672–677. [谢昌卫, 丁永建, 刘时银, 等. 近 30 年来托木尔峰南麓科其喀尔冰川冰舌区变化 [J]. *冰川冻土*, 2006, 28(5): 672–677.]
- [27] Shanguan Donghui, Liu Shiyin, Ding Yongjian, 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] Li Jing, Liu Shiyin, Shanguan Donghui, et al. Identification of ice elevation change of the Shuiguan River No. 4 Glacier in the Qilian Mountains, China [J]. *Journal of Mountain Sciences*, 2010, 7(4): 375–379.
- [29] Zhang Yingsong, Liu Shiyin, Shanguan Donghui, et al. Thinning and shrinkage of Laohugou No. 12 Glacier in the western Qilian Mountains, China, from 1957 to 2007 [J]. *Journal of Mountain Sciences*, 2012, 9(3): 343–350.
- [30] Liu Yushuo, Qin Xiang, Zhang Tong, et al. Variation of Ningchan River Glacier No. 3 in the Lenglongling Range, east Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(5): 1031–1036. [刘宇硕, 秦翔, 张通, 等. 祁连山东段冷龙岭地区宁缠河 3 号冰川变化研究 [J]. *冰川冻土*, 2012, 34(5): 1031–1036.]
- [31] Zhang Yong, Fujita K, Liu Shiyin, et al. Multidecadal ice-velocity and elevation changes of a monsoonal maritime glacier: Hailuogou Glacier, China [J]. *Journal of Glaciology*, 2010, 56(195): 65–74.
- [32] Li Zongxing, He Yuanqing, Pu Tao, et al. Changes of climate, glaciers and runoff in China’s monsoonal temperate glacier region during the last several decades [J]. *Quaternary International*, 2010, 218(1/2): 13–28.
- [33] Huang Maohuan, Wang Maohai, Song Guoping, et al. Hydraulic effects in the ablation area of the Hailuogou Glacier [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(Suppl. 1): 46–50.

- [黄茂桓, 王茂海, 宋国平, 等. 海螺沟冰川消融区的水力状况[J]. 冰川冻土, 1996, 18(增刊1): 46-50.]
- [34] Tian Lide, Zong Jibiao, Yao Tandong, et al. Direct measurement of glacier thinning on the southern Tibetan Plateau (Gurenhekou, Kangwure and Naimona'Nyi glaciers) [J]. *Journal of Glaciology*, 2014, 60(223): 879-888.
- [35] Ma Linglong, Tian Lide, Yang Wei, et al. Measuring the depth of Gurenhekou Glacier in the south of the Tibetan Plateau using GPR and estimating its volume based on the outcomes[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(5): 783-788. [马凌龙, 田立德, 杨威, 等. 青藏高原南部羊八井古仁河口冰川 GPR 测厚及冰川体积估算[J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 783-788.]
- [36] Ma Linglong, Tian Lide, Pu Jianchen, et al. Recent area and ice volume change of Kangwure Glacier in the middle of Himalayas [J]. *Science Bulletin*, 2010, 55(20): 2088-2096.
- [37] Zhu Dayun, Tian Lide, Wang Jianli, et al. Rapid glacier retreat in the Naimona'Nyi region, western Himalayas, between 2003 and 2013 [J/OL]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 8(1) [2016-01-30]. <http://remotesensing.spiedigitallibrary.org/article.aspx?articleid=2039081#tab1>.
- [38] Zhu Dayun. Changes of ice thickness for typical glaciers in different areas of Tibetan Plateau [D]. Chongqing: Southwest University, 2015. [朱大运. 青藏高原不同地区典型冰川厚度变化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015.]

Analysis of the relation between glacier volume change and area change in the Tianshan Mountains

WANG Puyu¹, LI Zhongqin^{1,2}, LI Huilin¹, LI Kaiming³, XU Chunhai¹

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences / Tianshan Glaciological Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 3. School of Architecture and Urban Planning, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Glacier volume change has significant influence on sea level, regional water resources, eco-environment and social economy. However, it is very difficult to carry out in-situ measurement. The main aim of this study is to make quantitative investigation on the scaling relation between glacier volume change and area change based on the ice volume estimation of nine glaciers in the Tianshan Mountains. Then, the scaling relation between glacier volume change and area change, which is suited for current climate condition and response process of glaciers, is established by using statistical method in order to estimate glacier volume change from glacier area change. It is found that there is a linear relation between glacier reserve change and glacier area change, with a determination coefficient between 0.67 and 0.70. The determination coefficient does not improve much as adding samples of glaciers in the other mountain areas. The reason may be that, on the one hand, there are errors in the glacier change monitoring and volume estimating, on the other hand, the sensitivity of glacier change to climate change, which depended on the glacier type, size and their regional differentia, is not the same. Therefore, in further study, it is necessary to focus on not only glacier volume estimation, but also on the glacier type and its regional differentia.

Key words: glaciers in the Tianshan Mountains; glacier volume; scaling relation between glacier volume change and area change; mechanism of glacier change

(本文编辑: 武俊杰)