

气候变暖背景下典型冰川储量变化及其特征 ——以天山乌鲁木齐河源1号冰川为例

王璞玉^{1,2}, 李忠勤^{1,2*}, 李慧林²

(1. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 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, 兰州 730000)

摘要: 冰储量变化与冰川水资源变化及其对河川径流的贡献有密切关系。论文以天山乌鲁木齐河源1号冰川为例, 基于雷达测厚、冰川测图等多年实测资料, 通过GIS技术, 计算出该冰川不同时期的储量值, 并对其变化特征进行分析。结果表明, 乌鲁木齐河源1号冰川1962、1981、1986、2001和2006年的储量分别为 $10\ 736.7 \times 10^4$ 、 $10\ 296.2 \times 10^4$ 、 $9\ 989.4 \times 10^4$ m^3 、 $8\ 797.9 \times 10^4$ 和 $8\ 115.0 \times 10^4$ m^3 。1962—2006年44 a间, 在气候变暖背景下, 冰储量亏损24.4%, 厚度减薄12.1%, 面积减小14.0%, 最大长度缩短7.6%, 且均呈加速趋势。1981年之前, 冰川面积和长度的减小是造成冰储量减少的主要原因; 1981—2001年, 冰川厚度、面积、长度的减小共同造成储量的减少, 面积的缩小仍是主导因素; 2001年以后, 冰川厚度的减薄成为冰储量减少的主要因素。

关键词: 冰储量; 冰川厚度; 冰川变化; 乌鲁木齐河源1号冰川

中图分类号: P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2011)07-1189-10

20世纪以来, 全球气温持续升高, 由此而引发了诸多环境问题, 其中尤为重要是极地冰盖和大多数中低纬度山岳冰川呈现快速消融, 已成为国内外关注的热点之一^[1-6]。IPCC第4次评估报告指出, 过去100 a来全球平均气温升高约0.74℃, 全球变暖自20世纪90年代以来呈明显加速趋势, 自1850年以来, 最暖的12 a中有11 a出现在1995—2006年时段, 未来100 a全球气温可能升高1.1~6.4℃^[7]。全球冰川加速消融影响着水资源的时空演化和利用, 在干旱与半干旱地区尤其明显。我国西北内陆干旱区分布着22 240条山岳冰川, 保存着大量的水资源, 是人类社会、经济赖以生存和发展的“固体水库”^[8-9]。冰储量变化反映冰川水资源变化及其对河川径流的贡献, 直接决定了干旱区绿洲生态环境, 因此, 在全球气候变暖背景下, 开展冰川变化, 尤其是冰储量变化研究十分迫切和必要。

在冰川变化研究中, 冰川长度、面积、厚度、冰储量是4个主要的表述参数。其中, 冰川长度和面积, 对于单条冰川, 可以利用实地测绘的方法获取, 对于大范围冰川, 则可通过遥感手段获得。冰储量是冰川变化研究中不可或缺的重要参数, 它的获取要复杂得多, 需要在搞清冰川厚度的基础上, 通过计算间接得到, 因此, 有关冰储量的研究在国内外比较有限, 更缺

收稿日期: 2010-07-09; 修订日期: 2011-01-27。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB951003); 中科院知识创新工程重大项目(KZCX2-EW-311); 国家自然科学基金项目(40631001, 1141001040)。

第一作者简介: 王璞玉(1983-), 女, 甘肃成县人, 博士研究生, 主要从事冰川变化研究。E-mail: wangpuyu862@163.com

*通信作者简介: 李忠勤, 研究员, 冰川学专业。E-mail: lizq@lzb.ac.cn

致谢: 本研究得到多位专家指导建议, 资料来自天山冰川站多年观测结果, 董志文、王飞腾、王文彬给予许多具体帮助, 在此一并表示感谢。

乏对其变化规律的认识。在无法获取冰川厚度条件下,人们常常根据冰储量与冰川面积或长度之间的统计关系来进行储量的估算^[10-13]。随着雷达探测技术的发展,冰川厚度数据的准确获取成为可能,为冰储量的计算提供了可靠的数据支持,国外已有长时间的研究实践^[14],国内也取得了许多重要成果^[15-16]。尽管有些研究已经计算出了冰储量,也给出了不同参量变化之间的比例关系^[17-18],但是,这些关系存在显著的时空差异性,尤其会由于冰川处在对气候响应的不同阶段而发生变化。最近 20~30 a,冰川出现了加速消融趋势,造成了这几个参数定量关系的明显改变,由此,亟待对长时间序列冰储量的变化及其各形态参量变化之间的关系开展进一步系统的研究。

针对上述问题,笔者选择在观测资料详尽的天山乌鲁木齐河源 1 号冰川(图 1)开展研究。1 号冰川位于天山山脉中部天格尔峰分冰岭的北坡,由东、西两支冰斗山谷冰川组成,不仅是世界冰川监测服务处(WGMS)中的典型冰川,也是我国监测时间最长的一条冰川,20 世纪 50 年代以来,有过 3 次冰川厚度测量和 7 次地形测量制图,每年 2 次冰川末端位置测量,这些观测数据产生了冰川面积、长度和厚度变化序列。本研究采用 GIS 技术,结合雷达实测冰川厚度数据和不同时期大比例尺冰川测图,通过“厚度积分法”和“表-底构建法”计算出了 5 个时期的冰储量值,并在此基础上分析其变化特征及与其它各形态参数变化之间的关系,以期为流域水资源评估提供重要参考。

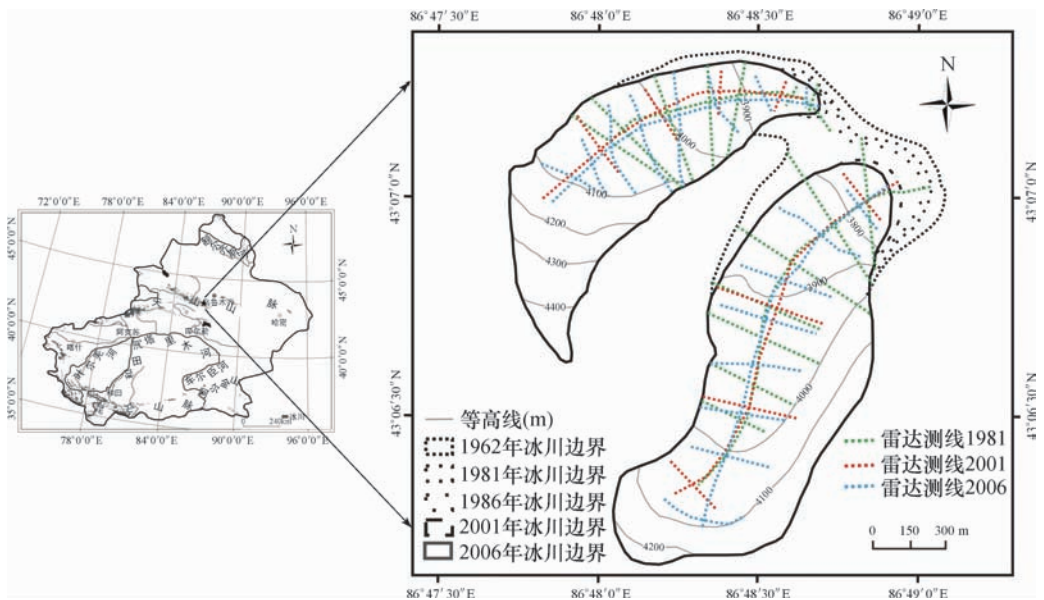


图 1 乌鲁木齐河源 1 号冰川位置、不同时期雷达测线及冰川边界

Fig. 1 Location of Urumqi Glacier No. 1, radar survey lines and glacier boundaries in different periods

1 数据、方法及误差评价

1.1 数据

厚度测量数据。1 号冰川完整的厚度测量进行过 3 次,分别在 1981、2001 和 2006 年。其中 1981 年和 2006 年使用的是 B-1 型冰川测厚雷达,该雷达量程精度为 5 m,通过在 1 号冰川上的透底热水钻钻孔验证,该雷达实际误差仅为 1 m^[15];2001 年测厚使用的是 Pulse EKKO 100A 增强型冰川测厚雷达,相对误差为 1.2%^[16],为评估实际误差,2009 年 11 月,

利用冰芯钻机在冰川下部钻取一支 55.8 m 透底冰孔,这一深度较该处的测厚值(58 m)略小一点,估计是冰川底部沉积物的影响。

冰川表面高程数据。源自 5 期大比例尺冰川地形图,包括:1962 年 1: 10 000 冰川地形图,由平板仪绘制;1981 年 1: 50 000 地形图,由航空摄影照片调绘;1986 年 1: 5 000 冰川地形图,由地面立体摄影测量方法绘制;2001 年 1: 5 000 冰川地形图,由经纬仪绘制以及 2006 年 1: 5 000 冰川地形图,由全站仪测绘。

冰川面积、长度数据。冰川面积由上述 5 期地形图获取;冰川长度取冰川的最大长度,从地形图获取,并经末端位置观测资料校准。

冰川物质平衡资料。1 号冰川有 50 a 物质平衡观测资料。冰川某个时间段的累积物质平衡量反映了相应阶段冰储量的变化,是本研究不可多得的验证资料。

1.2 方法及误差分析

本研究基于 GIS 技术,在 ArcGIS 软件环境下,针对不同数据条件使用了“厚度积分法”和“表-底构建法”两种方法来进行冰储量计算。由于 ArcGIS 软件具有强大屏幕矢量化、地图代数运算、拓扑关系建立、空间数据库建库以及三维显示等功能,近年来在国内外已经被广泛运用于冰川变化研究中^[19-20]。

“厚度积分法”是根据实测厚度数据和相应的冰川地形图,插值生成冰川厚度图层,每个像元的厚度值与像元面积做乘积运算后进行累加,从而计算冰储量值。这种方法适用于有实测冰川厚度数据的 1981、2001 和 2006 年冰储量的计算。本研究采用协同克里格插值方法,综合考虑了冰川表面地形,是一种最佳估值方法。“表-底构建法”适用于有冰川表面高程数据而无冰川厚度数据的 1962 和 1986 年冰储量计算。该方法有一个前提假定,即冰下基岩形态不随时间改变。首先利用其它年份的测厚资料和表面高程数据,恢复出冰下地形,然后将其与 1962 和 1986 年的冰川表面高程结合,计算出冰储量。冰川平均厚度通常使用算数平均值法来计算,这种方法往往会受到测量剖面以及测量点位置和数量的影响,具有不确定性。而本研究计算平均冰厚时基于冰厚图层,将像元的厚度值进行累加,并除以像元个数,考虑到了每个像元的厚度值,精度较高。

1981、2001 及 2006 年冰储量计算采用“厚度积分法”,其误差主要由雷达数据测量误差、雷达测点的数量、分布是否均匀等决定。实测数据量越多、观测点分布越均匀,则估算的结果越准确。3 期雷达测厚均较为详细,1981 年在 1 号冰川上共布设了 2 条雷达测厚纵测线以及 14 条横测线,2001 年共布设 2 条纵测线和 8 条横测线,2006 年布设了 2 条纵测线和 16 条横测线(图 1)。此外,雷达数据测量误差最大为 3 m,因此,这 3 期冰储量计算值接近于实际值。在计算 1962 和 1986 年冰储量时,采用了“表-底构建法”,首先假设了冰下基岩形态随时间是不变的,这一假设是这两期冰储量计算误差的主要来源。为了评估这种方法在计算冰储量时的误差,针对 1981、2001 和 2006 年数据进行了验证,因为该 3 期既有表面高程数据也有雷达测厚数据。将雷达测厚数据利用插值方法得到的厚度分布情况与表-底构建得到的结果进行比较,进而评价该方法的计算误差。综合评估显示,这 5 期冰储量计算平均误差在 6% 之内,是在冰川学精度要求范围之内的。

2 结果与讨论

2.1 冰储量计算及厚度变化分布

基于 3 期雷达测厚数据以及 5 期冰川表面高程数据,分别对 1 号冰川 1962、1981、1986、

2001 及 2006 年的冰储量、厚度分布及变化进行分析。在计算 1962 年和 1986 年冰储量时,首先根据 3 期测厚资料和表面高程数据,恢复出 1 号冰川底部地形,见图 2(a)。然后,将其与 1962 和 1986 年的冰川表面高程结合,便可相应计算出这两个年份的冰储量。以 1986 年为例,图 2(b) 为 1 号冰川 1986 年的表面 DEM,图 2(c) 为 1 号冰川 1986 年的冰体三维分布,显示出冰川最大冰量分布在中部趋于主流线位置,末端及边缘厚度较薄的特征。

由于冰储量是冰川厚度在空间上的积分,因此冰川的厚度变化分布可以比较直观地显示冰川各部分储量的变化。为此,做出 1962—2006 年的冰川厚度变化图(图 3)。从图 3 可以看出,自 1962 年以来的 44 a 间,1 号冰川整体处于减薄状态,减薄幅度下部远大于上部,1962 年的冰舌末端已消融殆尽。经计算,1 号冰川平均厚度减少了 6.7 m。其中,东支减少 6.6 m,西支减少 5.0 m,东、西支末端减薄最高可达 30 m。冰川边缘地势陡峭处减薄同样很强烈。冰川顶部边缘厚度的减少可能由于日辐射增强所致^[21]。冰川上部某些区域有增厚现象,但增厚幅度不大,东支最多有 5 m,西支最多只有 2 m,可能与该区近年来降水量增加及地形因素有直接关系。

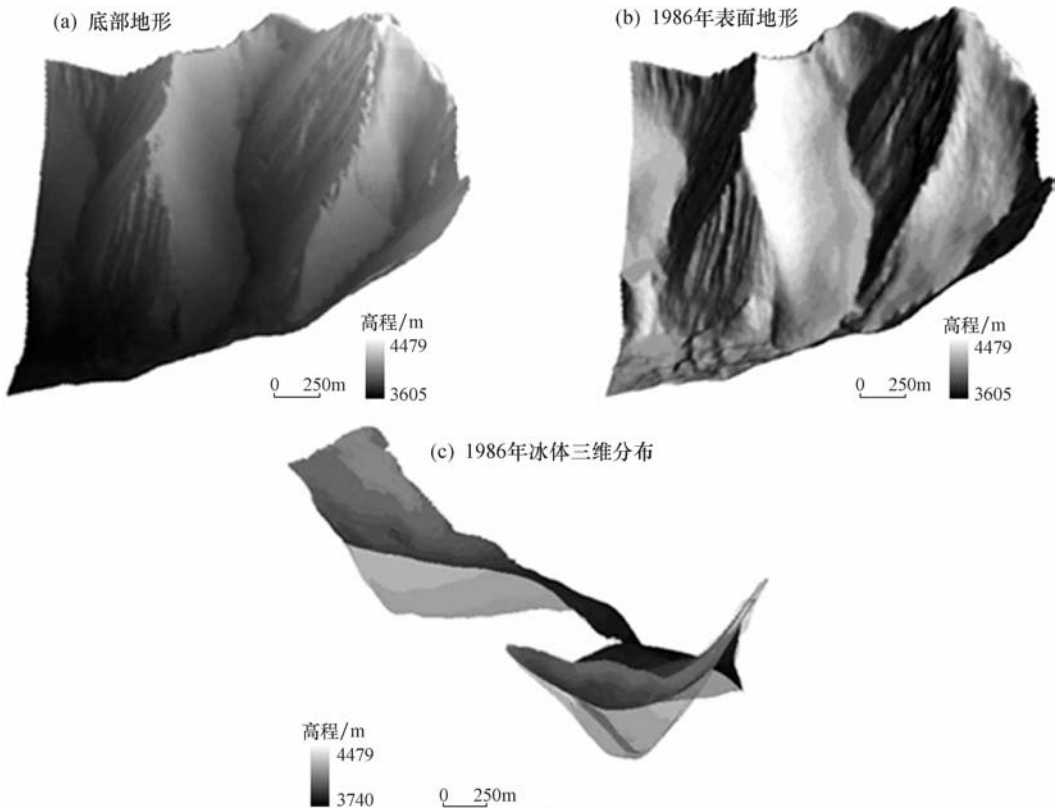


图2 乌鲁木齐河源1号冰川地形特征

Fig. 2 Topographical features of Urumqi Glacier No. 1

2.2 不同时期冰川储量及其变化特征

通过计算可以获取 1 号冰川不同时期的冰储量值(表 1)。由于冰川物质平衡反映的是冰川物质的变化,即储量的变化,因此,两个时期冰川储量的变化,可以通过同期实测的冰川物质平衡累计值(表 1)来进行验证。结果发现,1962—1981 年冰储量变化与物质平衡

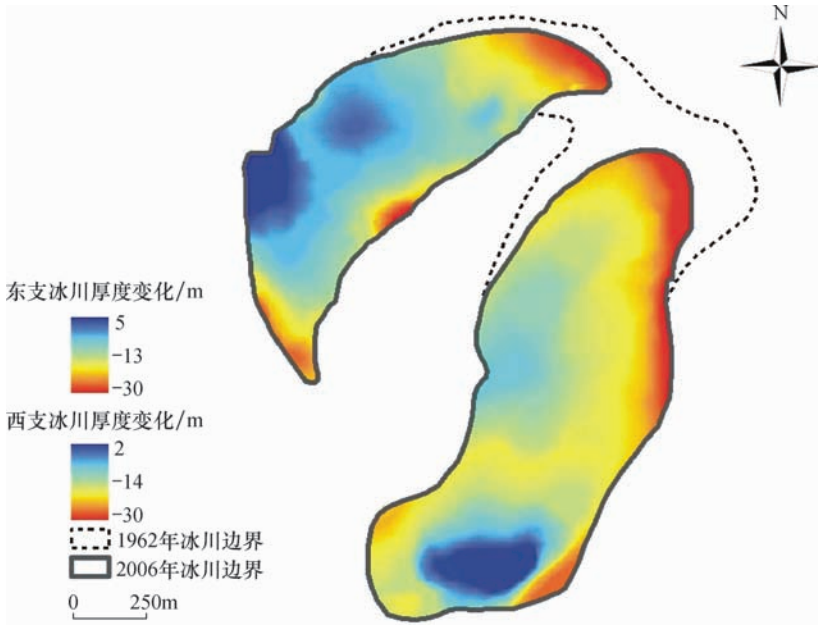


图3 1962—2006年乌鲁木齐河源1号冰川厚度变化

Fig. 3 Ice thickness changes of Urumqi Glacier No. 1 during 1962—2006

的差异为20.0%，其他时间段内差异均在 $\pm 10\%$ 以内，表明本研究中冰川储量的计算具有良好的准确性。从表1可以看出，1962年到2006年，1号冰川储量由 $10\,736.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 锐减到 $8\,115.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，减少了24.4%，平均每年减少0.6%，即过去的44 a间，1号冰川至少提供了 $2\,359.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 融水径流量（冰密度 $0.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ）。冰储量的减少呈加速趋势，年均减少量在1962—1981年间为 $23.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ，而在2001—2006年间则上升到了 $136.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ，增加了5倍之多。

表1 乌鲁木齐河源1号冰川储量、储量变化及其与同期累计物质平衡比较

Table 1 Ice volume of Urumqi Glacier No. 1 in different periods and comparison of their changes with the accumulated mass balance in the same periods

年份	冰储量/ 10^4 m^3	冰储量变化 $WC/10^4 \text{ m}^3$	累计物质平衡 $MC/10^4 \text{ m}^3$	误差 [$(WC - MC)/MC$]/%	年均冰储量变化 / $(10^4 \text{ m}^3/\text{a})$
1962	10 736.7				
1981	10 296.2	-440.5	-367.0	20.0	-23.2
1986	9 989.4	-306.9	-281.8	8.9	-61.4
2001	8 797.9	-1 191.5	-1 092.7	9.0	-79.4
2006	8 115.0	-682.9	-623.0	9.6	-136.6

冰川变化的驱动因素是冰川区水热条件的变化，即气候变化。根据乌鲁木齐河源区4个气象观测站（点）和后峡气象站资料，以及冰川物质平衡观测，该区气温与降水在1962—1985年基本处在正常波动的范围，冰川物质平衡有正有负；1985年以后气温呈显著上升趋势，1997年至今的升温最为显著，平均气温增加了 1°C 左右，尽管同期降水也有明显增加，但冰川物质平衡主要受气温升高的控制，以负平衡为主^[22]。由此可见，1号冰川储量的加速减少主要是由于这一地区气温升高、冰川消融加剧所造成的。消融期气温升高，会造成冰

川的消融量增大,而其它季节气温的升高,会造成冰川冷储的减少,同样可以加大消融期的消融量^[23],同时,随着气温的升高,冰川表面由于粉尘颗粒物聚集,反照率下降^[24],这些都是造成冰川加速消融的原因。

在无法获取冰川厚度条件下,人们通常根据冰储量与冰川面积之间的经验公式来进行冰储量的估算。经验公式的基本形式为 $V = \beta S^\gamma$, 其中, V 为冰储量, S 为冰川面积, β 和 γ 为两个参数,只要确定其量值,便可以利用这个方程根据冰川面积计算出冰储量。 β 和 γ 参数值随着空间和时间的不同而改变,国际上常常通过统计或物理模式方法,辅之以实际验证来确定适合于不同地区不同类型冰川的 β 和 γ 数值^[13,25-26]。在我国, β 和 γ 值是通过面积与储量的回归分析确定的。20 世纪 70—90 年代,我国通过 B-1 型冰川测厚雷达,获取了 27 条冰川的厚度资料,包括天山 16 条、祁连山 6 条、贡嘎山 4 条、西昆仑山 1 条。利用这些资料,有学者得到了几个适合于不同山系或全国冰川的 β 和 γ 值,并建立了相应的冰储量(厚度)-面积关系^[10-12]。选取目前国内外通常所采用的经验公式进行分析^[10-13,25-26],结果发现,1 号冰川不同时期经验公式结果与本研究计算值二者之间存在明显差异,而且采用的经验公式不同,其差异亦不相同。

冰川是具有粘性、弹性及塑性综合特性的固体,很多因素都会影响冰川的形态特征,从而影响到 β 和 γ 参数的量值。这些因素包括:底部基岩形态、所处海拔及上下高差、冰川朝向等。在同一区域或者更小的地理单元内,个体冰川所受上述因素影响差别很小,达到可以忽略不计时,则可使用相同的 β 和 γ 量值。根据 Jóhannesson 等^[27]的研究,当冰川与所处地区的气候条件达到平衡时,冰川最终会达到稳定状态,此时冰川的几何特征参数之间会形成一定的比例关系,这也是冰储量(厚度)-面积经验公式产生的原理。而目前所研究的大多数冰川,处在对气候响应的不同阶段,属非稳定状态,其几何特征参数之间的比例关系是不稳定的,由此建立的经验公式,其时间和空间上的可推广性还有待进一步的评估。由此,经验公式应该根据冰川变化而进行修正,以适应现阶段的气候特征。

2.3 冰储量变化与冰川厚度、面积及长度变化之间的关系

表 2 列出了 1962、1981、1986、2001 和 2006 年 5 个时期 1 号冰川储量、平均厚度、面积、最大长度值,其中冰川面积和冰川最大长度为实测值。1 号冰川储量、平均厚度、面积、最大长度均随时间呈加速减小的变化趋势,但各阶段的减小率各不相同。在 1981 年以前的 19 a 间,除冰川厚度的变化率较小外,其余 3 个参量的变化率几乎相同,说明这期间面积和长度的减小是造成冰储量减少的重要原因;到了 1986 年,4 个参量的变化开始发生明显的差异,但面积和长度的减小率(5.6%,5.0%)仍大于厚度的减小率(1.4%),表明这阶段冰川储量减少还是主要由面积和长度的减小造成;到 2001 年,厚度的减小加剧,与长度的减小率明显接近,但均小于面积的减小率,由此看来,此阶段冰储量的减少是由冰

表 2 不同时期乌鲁木齐河源 1 号冰川储量、平均厚度、面积、最大长度

Table 2 Ice volume, thickness, area and maximum length of Urumqi Glacier No. 1 in different periods

年份	储量/ 10^4 m^3	平均厚度/m	面积/ km^2	最大长度/m
1962	10 736.7	55.1	1.950	2 210.9
1981	10 296.2	55.1	1.870	2 117.5
1986	9 989.4	54.3	1.840	2 101.1
2001	8 797.9	51.5	1.708	2 057.5
2006	8 115.0	48.4	1.677	2 041.9

川面积、长度和厚度的减小共同作用的结果;2001 年以后,冰川厚度的减小率激增,已大于长度的减小率,与面积减小率的差距也逐渐缩小,且有超过的趋势,表明造成冰储量减少的主要因素为厚度的加速减薄。

以往的一些研究曾给出冰储量变化率 (ΔV)、冰川面积变化率 (ΔS) 及冰川长度变化率 (ΔL) 之间的比值关系^[17-18],试图通过比较容易获得的冰川面积或长度变化来估算冰储量的变化。表 3 列出了本研究 1962 年以来,各个时间段 1 号冰川储量、面积、长度变化率及相互间比值,从中看出, $\Delta V : \Delta S : \Delta L$ 有随时间增大的趋势,若使用某一时段的比值来估算另一时段冰储量的变化,会产生较大误差。

表 3 乌鲁木齐河源 1 号冰川储量、面积、长度变化率

Table 3 The ratios of changes in ice volume, area and length of Urumqi Glacier No. 1

时间段	储量变化 $\Delta V/\%$	面积变化 $\Delta S/\%$	长度变化 $\Delta L/\%$	$\Delta V : \Delta S : \Delta L$
1962—1981 年	-4.1	-4.1	-4.2	0.97 : 0.97 : 1
1981—1986 年	-3.0	-1.6	-0.8	3.85 : 2.07 : 1
1986—2001 年	-11.9	-7.2	-2.1	5.75 : 3.46 : 1
2001—2006 年	-7.8	-1.8	-0.8	10.24 : 2.39 : 1

事实上,由于冰储量等于冰川平均厚度与面积的乘积,根据数学推算,其减小率应该大于平均厚度和面积的减小率。而冰川长度减小率与面积减小率之间的关系取决于冰川的形态。气候变化是引发冰储量、面积和长度这些形态参量变化的原因,而变化的量值与冰川形态、冰川的流动,以及冰川的积累、消融变化有很大关系。对于 1 号冰川,可以推测,随着气温的升高,首先是冰川下部消融区的消融加剧,而通过冰川流动补充进来的物质无法弥补消融损耗,冰储量开始减小。由于 1 号冰川末端在 1962 年时,面积大而平坦,厚度较薄,因此,那时的储量减少是以面积减小为主要特征的,到了 2001 年以后,冰川末端已经退缩到山谷的边缘,厚度迅速增加,面积减小,因此,之后的储量减少转而以厚度减薄为特征。然而,要想弄清这几个参量变化之间的定量关系,需要从这些参量响应气候变化的机理入手,利用冰川动力学模式模拟这些参量响应气候变化的过程,以建立这些参量变化之间的内在联系^[28]。

3 结论

本研究在 GIS 技术支持下,基于天山乌鲁木齐河源 1 号冰川雷达测厚、冰川测图等多年实测资料计算出了该冰川 1962、1981、1986、2001 和 2006 年的储量分别为 $10\ 736.7 \times 10^4$ 、 $10\ 296.2 \times 10^4$ 、 9989.4×10^4 、 $8\ 797.9 \times 10^4$ 和 $8\ 115.0 \times 10^4\ \text{m}^3$ 。

研究恢复了 1 号冰川底部基岩地形,并获得了 1962—2006 年的冰川厚度变化,结果表明,1962—2006 年冰川整体处于减薄状态,减薄幅度下部远高于上部。44 a 间 1 号冰川面积、长度、厚度及储量均呈现减小趋势,相对于 1962 年,冰川面积缩小 14.0%,长度缩短 7.6%,平均厚度减薄 12.1%,储量减少 24.4%。1 号冰川储量亏损 $2\ 621.7 \times 10^4\ \text{m}^3$,即 1 号冰川的消融对河川径流补给量可达 $2\ 359.5 \times 10^4\ \text{m}^3$ 。1981 年之前,冰川面积和长度的减小是造成冰储量减少的主要原因;1981—2001 年,厚度、面积、长度的减小共同造成冰储量的减少,面积的减小仍是主导因素;2001 年以后,冰川厚度的减小成为冰储量减少的主要因素。分析表明,1 号冰川储量的加速减少可能与该区气温升高、冰川表面反照率降低有直接

关系。

冰储量变化与冰川厚度、面积和长度变化之间在不同时期存在不同的比率关系,与冰川形态等因素有很大关系。若使用某一时段的比率关系来估算另一时段储量的变化,会产生较大误差。因此,考虑利用冰川动力学模式从机理上模拟不同形态参量对气候变化的响应过程,从而探求各参量之间的关联,此方面还有待进一步的研究和探讨。

参考文献 (References):

- [1] 姚檀栋, 刘时银, 蒲健成, 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. [YAO Tan-dong, LIU Shi-yin, PU Jian-cheng, et al. Recent glacial retreat in high-Asia in China and its impact on water resources in Northwest China. *Science in China Series D*, 2004, 34(6): 535-543.]
- [2] 李忠勤, 李开明, 王林. 新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究[J]. 第四纪研究, 2010, 30(1): 96-106. [LI Zhong-qin, LI Kai-ming, WANG Lin. Study on recent glacier changes and their impact on water resources in Xinjiang, North Western China. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(1): 96-106.]
- [3] 李宗省, 何元庆, 王世金, 等. 1900—2007 年横断山区部分海洋型冰川变化[J]. 地理学报, 2009, 64(11): 1319-1330. [LI Zong-xing, HE Yuan-qing, WANG Shi-jin, et al. Changes of some monsoonal temperate glaciers in Hengduan Mountains region during 1900-2007. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1319-1330.]
- [4] 杨建平, 丁永建, 刘时银, 等. 长江黄河源区冰川变化及其对河川径流的影响[J]. 自然资源学报, 2003, 18(5): 595-602. [YANG Jian-ping, DING Yong-jian, LIU Shi-yin, et al. Glacier change and its effect on surface runoff in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(5): 595-602.]
- [5] Molina C, Navarro F J, Calvet J, et al. Hurd Peninsula glaciers, Livingston, Island, Antarctica, as indicators of regional warming: Ice-volume changes during the period 1956-2000 [J]. *Annals of Glaciology*, 2007, 46: 43-49.
- [6] Koch J, Mennounos 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: 161-178.
- [7] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis [R]. Report of working group II of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [8] 康尔泗, 程国栋, 董增川. 中国西北干旱区冰雪水资源与出山径流[M]. 北京: 科学出版社, 2002. [KANG Er-si, CHENG Guo-dong, DONG Zeng-chuan. Glacier-snow Water Resources and Mountain Runoff in the Arid Area of Northwest China. Beijing: Science Press, 2002.]
- [9] 杨针娘. 中国冰川水资源[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991. [YANG Zhen-niang. Glacier Water Resources in China. Lanzhou: Gansu Science and Technology Publishing House, 1991.]
- [10] 施雅风. 简明中国冰川目录[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005: 9-16. [SHI Ya-feng. Concise Glacier Inventory of China. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2005: 9-16.]
- [11] 王宗太, 刘潮海, 尤根祥, 等. 中国冰川目录 I (祁连山区)[M]. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1981: 4-5. [WANG Zong-tai, LIU Chao-hai, YOU Gen-xiang, et al. Glacier Inventory of China I (Qilian Mountains). Lanzhou: Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, CAS, 1981: 4-5.]
- [12] Liu S Y, Sun W X, Shen Y P, 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.
- [13] Bahr D B, Meier M, Peckman S. The physical basis of glacier volume area scaling [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B9): 20355-20362.
- [14] Fischer A. Calculation of glacier volume from sparse ice-thickness data applied to Schaufelferner, Austria [J]. *Journal of Glaciology*, 2009, 55(191): 453-460.
- [15] 张祥松, 朱国才, 钱嵩林, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川雷达测厚[J]. 冰川冻土, 1985, 7(2): 153-162. [ZHANG Xiang-song, ZHU Guo-cai, QIAN Song-lin, et al. Radar measuring ice thickness of Glacier No. 1 at the source of Urumqi River, Tianshan. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1985, 7(2): 153-162.]
- [16] 孙波, 何茂兵, 张鹏, 等. 天山 1 号冰川厚度和冰下地形探测与冰储量分析[J]. 极地研究, 2003, 15(1): 35-

44. [SUN Bo, HE Mao-bing, ZHANG Peng, *et al.* Determination of ice thickness, subice topography and ice volume at Glacier No. 1 in the Tianshan, China, by ground penetrating radar. *Chinese Journal of Polar Research*, 2003, 15(1): 35-44.]
- [17] 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. [SHI Ya-feng. Estimation of the water resources affected by climatic warming and glacier shrinkage before 2050 in West China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(4): 333-341.]
- [18] 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. [YAO Tan-dong, SHI Ya-feng. Variation of climate, glacier, runoff and future trend of Urumqi River. *Science in China Series B*, 1988(6): 657-666.]
- [19] 潘竟虎. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤侵蚀情景模拟——以甘肃省静宁县清水沟流域为例[J]. 自然资源学报, 2009, 24(4): 577-584. [PAN Jing-hu. Scenario simulation of soil erosion in small watershed of loess hilly-gully region—A case study of Qingshuigou watershed of Gansu Province. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(4): 577-584.]
- [20] Binder D, Brückl E, Roch K H, *et al.* Determination of total ice volume and ice-thickness distribution of two glaciers in the Hohen Tauern region, Eastern Alps, from GPR data [J]. *Annals of Glaciology*, 2009, 50(51): 71-79.
- [21] 李忠勤. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川东支顶部出现冰面湖[J]. 冰川冻土, 2005, 27(1): 150-152. [LI Zhong-qin. A glacier melt water pool was discovered at summit of east branch on Glacier No. 1 at Urumqi River head, Tianshan Mts., Xinjiang. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(1): 150-152.]
- [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 40 年观测事实[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 117-123. [LI Zhong-qin, HAN Tian-ding, JING Zhe-fan, *et al.* A summary of 40-year observed variation facts of climate and Glacier No. 1 at headwater of Urumqi River, Tianshan, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 117-123.]
- [23] 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 Zhong-qin, SHEN Yong-ping, WANG Fei-teng, *et al.* Response of glacier melting to climate change—take Urumqi Glacier No. 1 as an example. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(3): 333-342.]
- [24] Takeuchi N, Li Z Q. Characteristics of surface dust on Urumqi Glacier No. 1 in the Tien Shan Mountains, China [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2008, 40(4): 744-750.
- [25] Chen J, Ohmura A. Estimation of alpine glacier water resources and their change since the 1870s, hydrology in mountainous regions-I [C] // Proceeding of the Hydrological Measurements and the Water Cycle Symposia. IAHS Publication, 1990, 193: 127-135.
- [26] Driedger C L, Kennard P M. Ice volumes on Cascade volcanoes: Rainier, Mount Hood, Three Sisters, and Mount Shasta. U. S. [R]. Geological Survey Professional Paper, 1986, 1365: 29.
- [27] Jóhannesson T, Raymond C, Waddington E. Time-scale for adjustment of glaciers to change in mass balance [J]. *Journal of Glaciology*, 1989, 35(121): 355-369.
- [28] 李慧林, 李忠勤, 沈永平, 等. 冰川动力学模式及其对中国冰川变化预测的适应性[J]. 冰川冻土, 2007, 29(2): 201-208. [LI Hui-lin, LI Zhong-qin, SHEN Yong-ping, *et al.* Glacier dynamic models and their applicability for the glaciers in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(2): 201-208.]

Ice Volume Changes and Their Characteristics for Representative Glacier against the Background of Climatic Warming —A Case Study of Urumqi Glacier No. 1, Tianshan, China

WANG Pu-yu^{1,2}, LI Zhong-qin^{1,2}, LI Hui-lin²

(1. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences/Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Region Environment and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The changes of ice volume are closely related to the changes of glacial water resources and the contribution of melt water to the river runoff. Based on the ice thickness measured data, topographic maps and the long-term field observation data, this study has calculated the ice volume of Urumqi Glacier No. 1 in different periods using GIS technique and analyzed the characteristics of their changes. Results indicated that the ice volume of Urumqi Glacier No. 1 is $10736.7 \times 10^4 \text{ m}^3$, $10296.2 \times 10^4 \text{ m}^3$, $9989.4 \times 10^4 \text{ m}^3$, $8797.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ and $8115.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ in 1962, 1981, 1986, 2001 and 2006, respectively. During 1962–2006, the total ice volume of the glacier has reduced by 24.4% and the reduction rate of ice thickness, area and maximum length is 12.1%, 14.0% and 7.6%, respectively. The glacier was in a state of rapid shrinking with an accelerated tendency against the background of climatic warming in the past several decades. Before 1981, area shrinkage and terminus retreat was the key cause of the ice volume reduction; during 1981–2001, the reduction of ice volume was caused by three aspects: ice thickness, area and length, and area shrinkage was considered as the main factor; the noticeable reduction in ice volume is due to the intensive thinning of the ice thickness after 2001.

Key words: ice volume; ice thickness; glacier change; Urumqi Glacier No. 1