

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^①

陈建明 刘潮海 金明燮

(中国科学院兰州冰川冻土研究所, 730000)

摘 要 介绍重复航空摄影测量对比成图方法在监测乌鲁木齐河流域冰川规模和形态要素变化中的应用,以及成图过程中对控制加密和精度等问题的处理。检验表明,航空摄影测量对比成图方法能较准确地量测冰川长度、面积和储量等全形态要素的变化量,可以用于区域冰川变化的监测研究。测量资料表明,1964~1992年间,乌鲁木齐河流域15条冰川的规模均在缩小,冰川末端平均后退率为12.4%,面积平均缩小率为13.8%,冰储量减少15.3%。

关键词 航空摄影测量 对比成图 冰川变化

乌鲁木齐河流域位于天山北支的天格尔山中段,最高峰(天格尔II峰)海拔4 486 m,在流域的高山带分布有冰川15条,总面积48.04 km²,以冰斗、悬冰川为其主要类型。自1959年建立天山冰川观测试验站以来,重点对乌鲁木齐河源一号冰川进行了积累、消融和物质平衡,以及冰川运动速度和冰川变化的监测(施雅风等,1965;王文颖等,1976;张祥松等,1984),但乌鲁木齐河流域大范围冰川变化的监测研究尚属空白。为了解乌鲁木齐河流域冰川变化的现状,深入研究冰川变化的原因及其对径流的影响,利用1992年拍摄的比例尺为1:50 000的航空像片,并与1964年的航空像片对比成图,首次获得了28 a期间该流域每条冰川长度、面积和储量变化的系统资料。

1 航空摄影测量制图

乌鲁木齐河流域具备有1964年和1992年的航空像片,其比例尺分别为1:45 000和1:50 000。利用摄影测量成图方法,在蔡司托普卡-B型测图仪上测绘比例尺为1:10 000的冰川地形图。航空摄影测量对比成图方法所确定的冰川变化精度,主要取决于冰川地形图的精度和其比例尺的大小,而冰川地形图的比例尺则是依据研究工作的精度要求和冰川变化的量级确定的。在已拍摄的比例尺为1:50 000航空像片,其最大成图比例尺应为1:10 000。

为充分发挥仪器的测绘精度,选择的模型比例尺应尽可能大,而测图仪与绘图桌之

^① 本文于1996年4月10日收到;属中国科学院兰州冰川冻土研究所天山冰川观测试验站基金资助项目。

间的传动比要尽量小。根据成图比例尺和航空像片的比例尺,以及仪器施测的高差范围,选定1964年航片成图的模型比例尺为1:20 000,1992年航片成图的模型比例尺为1:32 000,即分别以1倍和3.1倍放大成图。

模型的绝对定向与成图的精度有关。规范化的模型定向是依据像片四个角上的控制点进行的,以达到归化比例尺,将立体模型恢复到大地理坐标系中和置平模型的目的。鉴于1964年和1992年拍摄的航空像片缺少大地控制点的资料,而野外新建控制点和室内重新加密工作又有一定的难度,因此利用已有的地形图和乌鲁木齐河源区地面立体摄影测量所建立的大地控制测量点的资料作为成图的依据。

1973年乌鲁木齐河源地面立体摄影测量绘制了1:10 000的冰川地形图,图幅控制面积约30 km²,其上有足够数量的测图控制点和较精确的地形特征点,可以保证起首两个立体模型定向的控制要求。在此基础上,采用光学机械图解法加密像片控制点。这种方法能满足归化比例尺和将立体模型恢复到大地理坐标系中的要求,但不能完全置平立体模型,为此,选用1:50 000地形图上部分特征点的海拔资料。

为了减少像片控制加密传递误差的累积,在成图次序上,先对1992年的大像幅像片成图,因其测图控制面积大,像对数量少,有利于保证1964年拍摄的小像幅像片的加密定向控制点的精度。

由于两次航片成图的模型定向都是相对于同各点进行的,因此,制图中的误差对于量测冰川相对变化量影响不大,基本上能保证精度要求。起始立体模型控制点和明显的地形地物点在1:10 000地形图上的平面定向的最大误差不超过0.2 mm,即不超过2 m,高程误差一般在1~2 m之间。用该模型绘制的1964年和1992年的航测图重叠比较,山体岩石部分的等高线吻合得较好,说明两次航测图具有同一精度,从而提高了冰川变化资料的可比性。乌鲁木齐河源1号冰川具有长期的物质平衡和冰川末端变化的监测资料,以此来检验航测图的精度。把乌鲁木齐河源1号冰川变化资料换算为与航测图同一时期,比较结果表明,28 a (1964~1992)间,航测图量算的冰川末端后退距离和冰面平均降低值分别为125 m和4.3 m,实测的冰川后退值为124 m,以冰川物质平衡观测资料所计算的冰面平均降低值为4.6 m,两者分别相差1 m和0.3 m,或者说较差值分别为实测值的0.8%和6.5%。由此检验可以看出,航测对比成图的精度较高,可比性较好,完全可用于大范围冰川变化的监测研究。

2 冰川形态要素变化的量算

确定冰川长度、面积和体积变化量采用地形图比较方法(Chen Jianming, 1984),即把1964年和1992年两次航测图分别绘制在经过热处理的同一透明薄膜上,然后量算冰川各形态要素的变化量。冰川末端变化,即长度变化是量算冰川最长的轴线距离,以m为单位。在两次航测图重叠时,冰川长度的变化实际上是在两次航测图上量算的长度之差值(ΔL)。为了表示不同规模的冰川变化幅度,用冰川长度缩短比(γ_c)表示:

$$\gamma_c = \frac{\Delta L}{L + \Delta L} \times 100 \quad (1)$$

式中: L 为 199 年冰川地形图上量算的冰川长度 (m)

冰川面积由索佳数字式求积仪量算, 以 km^2 为单位, 精确到小数点后三位 冰川面积变化量 (Δs) 的相对变化率 (γ_s) 表示为:

$$V_s = \frac{\Delta s}{s} \times 100 \quad (2)$$

式中: s 为 196 年冰川面积 (km^2).

冰面高程变化量 (Δh) 和冰川体积变化量 (Δv) 分别采用下式计算 (Haakensen, 1986; Reinhardt *et al.*, 1986):

$$\Delta h = \frac{d_{A1} + d_{A2}}{A_1 + A_2} H \quad (3)$$

$$\Delta v = \frac{d_{A1} + d_{A2}}{2} H \quad (4)$$

式中: d_{A1} , d_{A2} 分别为相邻同各等高线的位移面积; A_1 , A_2 分别为 196 年和 199 年航测图上的两等高线间的面积; H 为等高距.

3 乌鲁木齐河流域冰川变化

通过 196 年和 199 年两次航测图的对比, 获得了乌鲁木齐河流域 28 a 来的冰川长度、面积和体积变化的系统资料. 在航测对比成图中, 对根据 196 年航测图所编纂的冰川目录进行了复核, 乌鲁木齐河流域的冰川条数和面积应分别为 15 条和 48.04 km^2 , 冰川变化量和其变化率的计算均以此数为依据.

3.1 冰川长度的变化

乌鲁木齐河流域 15 条冰川均在后退, 其平均后退值为 97.6 m , 平均退缩率为 14.3% , 年平均后退 3.5 m . 由于冰舌末端后退, 使一些冰川的形态发生了变化, 即由原来的单一冰舌退变为两个冰舌, 如 C27 号 (乌鲁木齐河源 3 号冰川), 或由原来的一条冰川分解为两条冰川, 如 B42 号, C29 号 (乌鲁木齐河源 1 号冰川).

乌鲁木齐河流域内的四个山地冰川流域的冰川末端均在后退, 但退缩量和变化率各不相同, 其中处于山地边缘的梯匈沟的冰川, 平均后退量和年平均后退值均最大 (表 1). 冰川后退量和其变化率的大小与冰川规模有关. 统计分析表明, 长度大于 1 km 的冰川后退量在 $100 \sim 200 \text{ m}$ 之间, 个别冰川的后退量达 455 m (A22 号), 平均后退 147.8 m . 长度小于 1 km 的冰川后退量一般为 $50 \sim 100 \text{ m}$, 个别冰川后退 267 m , 平均后退 78.3 m , 前者大于后者. 而冰川平均长度缩短比率分别为 10.4% 和 15.8% , 则是前者小于后者.

由于冰川后退, 导致冰舌末端平均海拔由 196 年的 3638 m 升高到 199 年的 3673 m , 即平均升高了 35 m . 在冰川末端高度普遍升高的同时, 也有 5 条冰川 (B15, B19, B57, B59, C20) 例外, 即 199 年冰川末端海拔反而比 196 年下降了数米, 这并不意味着这些冰川在

前进,而是这些冰川末端在 1964 年时受局部地形或终碛垄的阻塞,使其冰面壅高。28 a 后,虽然这些冰川也在后退,冰面高度下降,但由于冰床平缓,致使冰川末端因后退而升高的高度不足以抵消原来的冰面壅高高度

表 1 乌鲁木齐河流域冰川变化 (1964~ 1992)

Table 1 Glacier variation in the drainage area of Urumqi River (1964~ 1992)

编 号	河 流 名 称	冰 川 条 数	冰 舌 末 端 变 化					
			平均海拔 (m)			平均后 退量 (m)	退缩率 (%)	年平均 退缩量 (m)
			1964 年	1992 年	变化量			
A	梯沟沟	28	3 582.9	3 620.6	37.7	112.4	14.1	4.0
B	察汗若尔沟	64	3 638.4	3 676.2	37.9	96.7	13.4	3.5
C	吾特肯沟	33	3 729.3	3 760.9	31.6	93.9	11.7	3.4
D	布拉特沟	30	3 608.8	3 636.9	28.1	89.6	10.3	3.2
A~ D	乌鲁木齐河	155	3 638.3	3 673.0	34.7	97.6	12.4	3.5
编 号	冰 川 面 积 变 化		冰量和冰面海拔变化					
	面 积 (km ²)		面 积 缩小量 (km ²)	面 积 缩小率 (%)	冰 量 消失量 (10 ⁸ m ³)	消融区冰 面下降量 (m)	冰川平均 下降量 (m)	储量减 少率 (%)
	1964 年	1992 年						
A	9.172	7.774	1.398	15.2	46 258	9.9	5.2	15.6
B	16.884	14.266	2.618	15.9	132 692	11.6	8.2	18.8
C	12.073	10.621	1.452	12.0	50 817	8.3	4.3	12.0
D	9.912	8.732	1.180	11.9	40 658	8.4	4.2	12.7
A~ D	48.041	41.393	6.648	13.8	270 425	10.0	5.8	15.5

3.2 冰川面积的变化

冰川面积的变化不仅反映在因末端后退而使其面积缩小上,而且还表现在因冰川变窄而使面积缩小上。积累区的冰川面积因受山体环绕而变化不大。1964 年和 1992 年航测地形图的比较表明,冰川面积由 1964 年的 48.04 km²减少到 1992 年的 41.39 km²,即冰川面积缩小了 6.64 km²,平均缩小率为 13.8%,年平均缩小 0.24 km²,或者年平均缩小率为 0.5%。统计分析还表明,面积大于 1 km²的冰川面积缩小率在 5.6%~ 17.7% 之间,平均为 10.8%,而面积小于 1 km²的冰川面积缩小率变化在 3.4%~ 65.3% 之间,平均为 18.8%。由此可见,规模小的冰川面积缩小率明显大于规模较大的冰川,但后者缩小的绝对量则较前者大。

3.3 冰面高程和冰川体积的变化

冰川表面高度的变化是通过比较两次航测地形图的同名等高线而计算出来的。冰面高度的变化只量算了 12 条冰川,另外平均面积小于 0.05 km²的 3 条小冰川(总计面积 1.4 km²)发育在坡度很陡的山坡上,等高线间距很小而无法量算。冰川积累区由于被积雪覆盖和高度变化甚小而难以绘制出精确的等高线,故大部分冰川的积累区没有量算冰面高

度的变化

在量算的 12 条冰川的表面高度平均下降 5.8 m, 估计冰储量减少 $2.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。如果按乌鲁木齐河流域冰面平均高度的下降值估算另外 3 条冰川的体积变化, 那么还应减少 $0.08 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的冰川储量。这样, 冰储量的亏损量应占总冰储量的 15.8%。如果考虑到积累区冰量的亏损, 总冰储量的减少量还可能要大一些。

冰川表面高度的下降值在冰川末端附近最大, 随着海拔增高, 冰面高度下降值减小, 至冰川积累区, 冰面高度无明显变化。消融区冰面高度平均降低 10 m, 整个冰川平均下降 5.8 m。面积小于 1 km^2 的冰川消融区的冰面高度平均下降 8.2 m, 而面积大于 1 km^2 的冰川消融区则下降了 11.7 m, 即规模大的冰川厚度减小量大, 但其储量减小率则是前者大于后者。

由于冰川积累区目前尚无明显的增厚趋势, 因此, 乌鲁木齐河流域的冰川面积在今后相当长一段时间将会继续缩小, 储量也将进一步减少, 冰川将继续后退。

4 结论

(1) 重复航空摄影测量对比成图方法在用于乌鲁木齐河流域冰川变化监测时, 获得了冰川长度、面积和储量变化的系统资料。经与有末端变化和物质平衡观测的乌鲁木齐河源 1 号冰川相比较, 冰川长度和冰川体积变化仅分别相差 0.8% 和 6.5%, 均在观测误差范围之内, 因而精度高, 可以用于区域性的冰川变化监测研究。

(2) 影响航测图精度的主要因素是航空像片的比例尺、清晰度和拍摄的时间。航空像片的比例尺要与冰川规模的变化量级相适应, 并需要足够数量的控制点。航空摄影的时间最好选择在消融期末进行, 这时积累区积雪少, 能够保证像片的清晰度和积累区高精度等高线的绘制。

(3) 乌鲁木齐河流域 1964~1999 年冰川长度、面积和储量变化均很显著, 和世界其它山区一样, 以退缩为其主要趋势。乌鲁木齐河流域冰川规模相对较小, 平均面积仅为 0.31 km^2 。这类冰川相对变化率很大, 能够较迅速地响应气候变化。

(4) 乌鲁木齐河流域冰川的积累区至今没有明显的增厚趋势, 因而冰川规模在今后很长一段时间将继续缩小, 定期监测其变化, 对于乌鲁木齐河冰川融水径流变化的计算和对河流调节作用的影响具有重要的现实意义。

参 考 文 献

- 王文颖等. 1976. 1962~1973 年天山乌鲁木齐河 1 号冰川的后退和运动的对比测量. 见: 中国科学院兰州冰川冻土沙漠研究所集刊. 第 1 号. 北京: 科学出版社, 32~35.
- 张祥松, 孙作哲, 张金华等. 1984. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的变化及其与气候变化的若干关系. 冰川冻土, 6(4): 1~12.
- 施雅风, 苏珍. 1965. 天山乌鲁木齐河源冰川的形态特征与历史演变. 见: 天山乌鲁木齐河冰川与水文研究. 北京: 科学出版社, 83~87.
- Chen Jianming. 1984. Variations of the Batura glaciers surface from repeated surveys. International Karakoram Project, (1): 196~204.

- Haakensen N. 1986. Glacier mapping to confirm results from mass- balance measurements. *annals of glaciology*, 8 73~ 77.
- Reinhardt W and H Rentsch. 1986. Determination of changes in volume and elevation of glaciers. Using Digital Elevation Models for the Vernagtferner, Otztal Alps, Austria, *Annals of Glaciology*, 8 151~ 155.

Application of the Repeated Aerial Photogrammetry to Monitoring Glacier Variation in the Drainage Area of the Urumqi River

Chen Jianming, Liu Chaohai and Jin Mingxie

(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences, 730000)

Abstract

This paper stressed upon the application of comparative method with repeated aerial photogrammetric mapping to monitoring the variation of glacier size and morphologic factors in the drainage area of the Urumqi River, and the management of photographic control extension and the accuracy etc., during mapping. The detection shows that the method with higher accuracy can be used to determine the variation of morphologic factors of glacier length, area and ice storage etc, and it can also be applied to monitor regional glacier variation. The measurement data show that 155 glaciers in the drainage area of the Urumqi River all retreated during the period of 1964~ 1992, with an average retreating rate of the glacier terminus of 12.4% and an average reducing rate of the glacier area of 13.8% as well as a loss of 15.5% of ice storage.

Key word aerial photogrammetry, comparative mapping, glacier variation

第一作者简介: 陈建明, 男, 58岁, 高级工程师, 1959年毕业于南京地质学校航测专业。现主要从事冰川测绘工作。