

天山天格尔山北坡冰川系统及其 径流变化研究

康 尔 泗

(中国科学院兰州冰川冻土研究所, 730000)

摘 要 讨论天山天格尔山北坡冰川系统的统计特征、气候和冰川的变化趋势, 提出了一种基于气候变量的计算方法, 对天格尔山北坡的冰川系统及其径流变化进行了计算和讨论。

关键词 冰川系统 变化趋势 冰川消融 冰川变化

1 前言

近些年来在研究冰川与气候和水文的关系中, 一个重要的途径就是建立基于能量和水量平衡的模型(Oerlemans, 1992; Kang Ersi, 1994)。这些模型是根据典型冰川和冰川作用流域的观测实验研究建立的。在研究冰川及其径流变化的问题中, 需要将典型冰川的观测试验结果推广应用到区域性冰川, 模拟计算区域性的冰川及其径流变化对气候变化的响应问题。

本文以天山天格尔山北坡的现代冰川系统(Krenke, 1986)为研究对象。天格尔山位于北天山西段的东部(中国科学院新疆地理研究所, 1986), 冰川发育于天山山区西北部准噶尔内流区的乌鲁木齐河、头屯河、三屯河和呼图壁河的上游及其支流的河源区(中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1986)。冰川数量和分布状况如表 1 所示。根据在天格尔山北坡高山带乌鲁木齐河源的大西沟气象站($43^{\circ} 06' N$, $86^{\circ} 50' E$, 海拔 3 539 m)的观测和中国科学院天山冰川观测试验站的常年冰川观测, 本文讨论天格尔山北坡冰川系统的统计特征、气候变化状况、冰川系统变化对气候变化的响应, 并对冰川系统及其径流的变化进行计算研究。

表 1 天山天格尔山北坡冰川分布状况*

Table 1 Distribution of glaciers at the north flank of the Tianger Mountain
in the Tianshan Mountains

冰 川 作 用 空 间 范 围			冰川条数	冰川总面积 (km^2)	冰川总体积 (km^3)
纬 度 (N)	经 度 (E)	海 拔 (m)			
$43^{\circ} 00' \sim 43^{\circ} 35'$	$86^{\circ} 06' \sim 87^{\circ} 24'$	2 880~5 290	610	179.26	5.7987

* 根据《中国冰川目录》(Ⅲ)。

2 冰川系统的统计特征

2.1 平均冰川

一个地区的冰川系统可分为若干性质相同的子系统, 对每一个子系统的冰川可求其形态特征平均值, 从而得出一个代表子系统冰川全体的平均冰川(Коновалов, 1979), 用以研究子系统冰川总体的变化状况。

现已完成并出版的天山西北部准噶尔内流区冰川目录, 主要根据 60 年代末和 70 年代初出版的 1: 5 万航测图(刘潮海等, 1986a)。本文先以此作为天格尔山北坡冰川系统统计计算的依据, 然后再结合观测事实讨论该地区冰川的变化状况。

天格尔山北坡的冰川发育规模较小(表 2)。虽然冰川不大, 但这里的冰川总共储存了 $5.216 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的淡水, 相当于发源于天格尔山北坡的乌鲁木齐河、头屯河、三屯河和呼图壁河多年平均年总径流量的 4.2 倍。

表 2 天格尔山北坡冰川的一些形态特征*

Table 2 Some morphological features of the glaciers at the north flank of the Tianger Mountain

项 目	最 小	平 均	最 大
冰川面积 (km^2)	0.02	0.29	3.28
冰川长度 (km)	0.10	0.81	3.50
冰川厚度 (m)	6.00	19.97	65.00
冰川体积 (km^3)	0.0001	0.10095	0.2132

* 统计冰川 610 条。

将天格尔山北坡的冰川系统按冰川流域划分为 15 个子系统, 对每一个子系统的冰川求其形态特征平均值, 形成 15 条平均冰川(表 3)。图 1 表示天格尔山北坡绝大多数冰川发育在 N, NW 和 NE 三个坡向。这三个坡向的冰川条数、面积和体积分别占 87%、92% 和 93%。因此, 平均冰川的坡向基本是朝北。天格尔山北坡的冰川发育规模和坡向相似, 冰川作用海拔多集中于 3 537~4 269 m 之间, 这就使我们有条件以乌鲁木齐河源区高山带及其典型冰川的观测试验来研究整个天格尔山北坡冰川的变化状况。

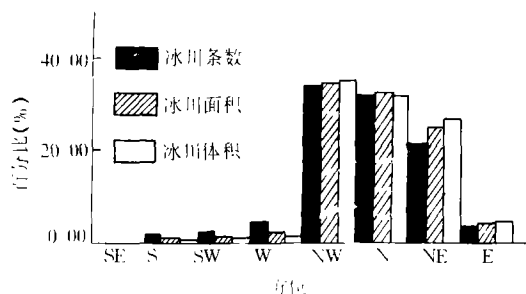


图 1 天格尔山北坡冰川条数、面积和体积随坡向的分布

Fig. 1 Distribution of number, area and volume of glaciers with exposure at the north flank of the Tianger Mountain

表 3 天格尔山北坡的平均冰川

Table 3 The mean glaciers at the north flank of the Tianger Mountain

河流流域	序号	冰川流域	北纬	东经	坡向	面积 (km ²)	长度 (km)	最高海拔 (m)	海拔中值 (m)	最低海拔 (m)	厚度 (m)	体积 (km ³)	统计冰 川条数
乌鲁木齐河	1	梯 甸 河	43° 09'	87° 20'	N	0.31	0.80	4 115.7	3 872.3	3 641.5	20.0	0.0098	26
	2	察 汗 诺 尔	43° 04'	87° 08'	N	0.26	0.73	4 062.2	3 844.5	3 653.6	18.0	0.0090	61
	3	吾 特 肯	43° 03'	86° 55'	N	0.38	0.88	4 189.0	3 965.6	3 750.3	22.8	0.0136	32
	4	布 拉 特	43° 08'	86° 58'	N	0.32	0.87	4 143.6	3 901.3	3 691.9	21.9	0.0098	31
头屯河	5	宰 尔 德	43° 11'	86° 55'	N	0.29	0.85	4 042.9	3 810.9	3 608.9	20.4	0.0088	35
	6	乔能格尔	43° 12'	86° 47'	N	0.23	0.70	4 038.7	3 811.1	3 596.9	18.6	0.0061	45
三屯河	7	三屯河源	43° 14'	86° 41'	NW	0.17	0.67	4 120.7	3 893.3	3 668.1	16.6	0.0041	21
	8	吾鲁特萨依	43° 07'	86° 45'	NW	0.39	0.92	4 229.3	3 986.4	3 779.8	22.7	0.0143	47
	9	小昌吉河	43° 14'	86° 30'	N	0.25	0.76	4 086.5	3 863.7	3 662.7	18.7	0.0077	73
呼图壁河	10	额资嘎尔巴依	43° 28'	86° 26'	N	0.25	0.83	4 005.7	3 773.6	3 537.1	19.4	0.0067	14
	11	阿坦萨拉	43° 20'	86° 24'	N	0.20	0.69	4 099.2	3 902.5	3 726.3	16.0	0.0056	24
	12	买孙夏尔	43° 16'	86° 24'	N	0.27	0.75	4 171.1	3 940.3	3 710.6	20.8	0.0075	32
	13	阿乌吐赫吐普	43° 09'	86° 21'	N	0.46	0.88	4 174.0	3 963.5	3 747.1	25.2	0.0173	49
	14	兰特尔乌增	43° 20'	86° 12'	N	0.25	0.79	4 166.1	3 949.5	3 729.5	17.6	0.0082	56
	15	台普希克乌增	43° 29'	86° 11'	NE	0.29	0.96	4 269.4	3 995.9	3 711.3	19.9	0.0090	64

2.2 冰川面积、长度、体积和厚度的关系

在研究冰川和大气间的物质能量交换过程中, 冰川净物质平衡是一个重要的变量。一条冰川的净物质平衡表示了冰川表面平均厚度变化, 而由冰川物质平衡变化到冰川面积、长度和形态变化还要通过复杂的冰川动力学响应过程。一个地区冰川的形态特征是该地区冰川物质平衡状况的一种适应结果。因此, 研究一个地区冰川面积、长度、体积和厚度的关系, 是研究区域性冰川及其变化的一个重要方面。就整个天山山区而言, 冰川平均厚度和面积之间的关系已有论述(刘潮海等, 1986b)。为反映天格尔山北坡这一小区域内冰川面积 $F_g(\text{km}^2)$ 、长度 $L_g(\text{km})$ 和体积 $V_g(\text{km}^3)$ 与冰川平均厚度 $H_g(\text{m})$ 的关系, 本文就该区 610 条冰川进行了统计, 拟合了以下关系式:

$$F_g = 9.0 \times 10^{-4} H_g^{1.8455} \quad (1)$$

$$L_g = 4.245 \times 10^{-2} H_g^{0.9745} \quad (2)$$

$$V_g = 8.766 \times 10^{-7} H_g^{2.8688} \quad (3)$$

因此, 一个地区冰川厚度的变化, 会引起冰川面积、长度和体积的相应变化, 而这种变化是从该地区冰川系统总体的空间分布特征上表现出的一种平均变化状况。例如, 如果冰川厚度减少 1 m, 则根据式(1)~(3), 天格尔山北坡冰川平均面积要减少 7.2%, 冰川长度减少 4.7%, 而冰川体积要减少 7.4%。

3 高山带气候和冰川变化状况

3.1 气温和降水变化趋势

将大西沟气象站 1959~1993 年的月气温和降水观测资料组成以时间(年)为变数的系列, 用最小二乘方配合法, 求出以时间为自变量的 5 a 滑动平均二次抛物线趋势方程, 用以分析高山带气温和降水自有气象站观测资料以来的变化趋势。表 4 列出了不同季节、月份和年(由 12 月至翌年 11 月四个季节组成)的平均气温和降水量的趋势分析结果。表 4 中 14 个回归方程的相关系数显著性水平检验, 有 8 个通过 0.01 的水平, 3 个通过 0.05 的水平, 2 个通过 0.1 的水平。

表 4 表明, 近 35 a 来乌鲁木齐河源高山带年平均气温略有上升, 而年降水量减少了多年平均值的 5.1%, 但各季节和月的变化趋势却显示出较大的差异。秋季和冬季升温显著, 达 0.6°C 左右, 而降水量也有所增加。春季降温达 1.45°C , 降水有所减少。夏季增温不显著, 但降水量却减少了近 31 mm。在冰川消融的 5~9 月和冰川强烈消融的 7~8 月, 气温略有增加, 但降水量却显著减少。其中 7~8 月平均气温上升 0.2°C , 降水量减少 30.4 mm, 不能忽视这种变化对冰川变化所起的作用。

3.2 冰川变化趋势

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川是我国唯一的一条具常年物质平衡和冰川变化观测的冰川, 其年物质平衡观测系列为 1959~1960 至 1965~1966 年和 1979~1980 至 1983~1984 年。张金华等根据实测冰川积累区、消融区面积以及冰川积累量和消融量与气温和降水的关系, 插补了 1958~1959 年度和 1960~1961 至 1978~1979 年度的物质平衡资料(张金华, 1981; 张金华等, 1984), 并分析了冰川物质平衡与气候变化的关系, 指出冰川正平衡主要受降水的制约, 负平衡主要受正积温的影响。纪忠萍等(1994)应用多元回归方法, 分析了乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡与某些气候要素的关系指出, 7 月气温、夏季 5~7 月降水及 3~4 月地温是控制当年物质平衡量的主要气象要素。本文根据冰川物质平衡的实测资料^①和上述插补延长资料, 使年物质平衡序列和上述讨论气温和降水量的年时间序列一致。

表 4 大西沟气象站(43° 06' N, 86° 50' E, 海拔 3 539 m)1959~1993 年
气温和降水量 5 a 滑动平均趋势分析

Table 4 Trend analysis of the 5 years moving average of air temperature and precipitation
at the Daxigou meteorological station (43° 06' N, 86° 50' E, 3 539 m a.s.l.)
during the years from 1959 to 1993

		趋 势 方 程	相关系数	1959~1993 年 变化值
冬 季 (12~2 月)	$T (^{\circ}\text{C})$	$T = -15.19 + 0.0185t_m + 0.005t_m^2$	0.75	+0.63
	$P (\text{mm})$	$P = 8.6 + 0.3189t_m$	0.92	+10.8
春 季 (3~5 月)	$T (^{\circ}\text{C})$	$T = -5.41 - 0.0426t_m - 0.0012t_m^2$	0.83	-1.45
	$P (\text{mm})$	$P = 76.8 - 0.2432t_m + 0.0229t_m^2$	0.51	-8.3
夏 季 (6~8 月)	$T (^{\circ}\text{C})$	$T = 3.97 + 0.0004t_m + 0.0005t_m^2$	0.28	+0.01
	$P (\text{mm})$	$P = 237.9 - 0.9027t_m + 0.0972t_m^2$	0.63	-30.7
秋 季 (9~11 月)	$T (^{\circ}\text{C})$	$T = -5.0 + 0.0172t_m - 0.0006t_m^2$	0.41	+0.58
	$P (\text{mm})$	$P = 56.6 + 0.1773t_m + 0.0291t_m^2$	0.37	+6.0
7~8 月	$T (^{\circ}\text{C})$	$T = 4.58 + 0.0059t_m + 0.0007t_m^2$	0.31	+0.2
	$P (\text{mm})$	$P = 179.4 - 0.8936t_m + 0.1240t_m^2$	0.64	-30.4
5~9 月	$T (^{\circ}\text{C})$	$T = 2.31 - 0.0003t_m + 0.0006t_m^2$	0.35	+0.01
	$P (\text{mm})$	$P = 368.0 - 1.1074t_m + 0.0932t_m^2$	0.64	-37.7
年	$T (^{\circ}\text{C})$	$T = -5.4 + 0.0016t_m + 0.0009t_m^2$	0.38	+0.05
	$P (\text{mm})$	$P = 415.9 - 0.6497t_m + 0.1487t_m^2$	0.62	-22.1

注: 滑动平均值样本容量 $n=31$, 时间坐标原点取年时间系列的中点位置, t_m 为以年为单位的时间; $T(^{\circ}\text{C})$ 为平均气温; $P(\text{mm})$ 为降水量。

3.2.1 年物质平衡变化趋势

将 1958~1959 年至 1992~1993 年共 35 a 的乌鲁木齐河源 1 号冰川年物质平衡作 5 a 滑动平均趋势分析, 得到以下趋势方程:

$$B = -134.12 - 10.04t_m \quad (4)$$

^①天山冰川观测试验站年报, 1~12 期。

式中: B 为年物质平衡水层深(mm); t_m 为年时间序列中点为坐标原点的时间。样本容量 $n=31$, 相关系数 $r=0.69$ 。

式(4)表示, 乌鲁木齐河源 1 号冰川 35 a 来就平均而言, 一直处于负的物质平衡状态, 而且物质亏损量平均每年以 10 mm 的量增长, 负的物质平衡增长量共计为 -341 mm。根据年物质平衡观测计算, 35 a 来 1 号冰川物质亏损量共为 4 445 mm 水层深。

3.2.2 年物质平衡和气候要素的关系

笔者用复回归方法分析了乌鲁木齐河源 1 号冰川的年物质平衡和大西沟气象站气温和降水的关系, 发现年物质平衡水层深 $B(\text{mm})$ 与 7~8 月平均气温 $T_{7\sim 8}(\text{℃})$ 和物质平衡年度 9 月至次年 8 月的年降水量 $P_{9\sim 8}(\text{mm})$ 关系较好, 其方程为:

$$B = -698.55 - 148.11T_{7\sim 8} + 2.92P_{9\sim 8} \quad (5)$$

式中: 自变量和因变量均取 5 a 滑动平均值, 样本容量 $n=31$, 复相关系数 $r=0.61$, 偏相关系数 $r_{B,T_{7\sim 8}} = -0.30$, $r_{B,P_{9\sim 8}} = 0.51$ 。

式(5)表示, 年物质平衡的负值随 7~8 月气温升高而增加, 正值随年降水量增加而增加。该地区冰川消融主要集中在 7~8 月(康尔泗等, 1994b), 据 1 号冰川水文点的观测, 7~8 月经流量占年总径流量的 84%(Kang Ersi, 1994)。因此 7~8 月平均气温和年物质平衡关系较好。在式(5)中 $T_{7\sim 8}$ 为冰川消融项; $P_{9\sim 8}$ 为冰川积累项。在现有降水量状况下, 保持现在冰川的平均负物质平衡状态, 7~8 月的平均气温为 4.64℃。如要使得冰川的平均物质平衡为 0, 则大西沟气象站 7~8 月平均气温要降至 3.73℃。这就是说, 在现有降水条件下, 要改变冰川的物质亏损状态, 大西沟气象站 7~8 月的平均气温需下降 0.19℃ 以上。由表 4 可知, 大西沟气象站 7~8 月平均气温近 35 a 来的变化趋势为 +0.2℃, 在这种条件下, 冰川的负物质平衡将继续增加。另外, 消融季节降水量的变化趋势是减少。由于冰川区降水主要为固态(Kang Ersi, 1994), 消耗于融化减少那部分积雪量的热量转而去融化冰川冰, 而融化热主要是由净辐射组成(康尔泗等, 1994b), 冰面反射率小于雪面, 这将增加冰川冰的消融量。例如, 大西沟气象站 7~8 月降水量的多年变化趋势为 -30.4 mm(表 4), 可以计算出由此而引起的冰川冰消融量为 112 mm。

4 冰川系统及其径流变化计算

4.1 计算方法

4.1.1 冰川径流计算

冰川径流产生的能水平衡方程(康尔泗等, 1994 a)为:

$$R = \frac{\tau}{L_M} (H_{NR} + H_S) - \frac{L_E}{L_M} E + P_L \quad (6)$$

式中: R 为冰川径流; τ 为计算时段; L_M 为融化潜热; H_{NR} 为净辐射; H_s 为感热通量; L_E 为蒸发潜热; E 为蒸发量; P_L 为液态降水量。本文中为简化计算, 根据观测试验(康尔泗等, 1994a, b), 式(6)的计算简化为:

$$R = \frac{1.11\tau}{L_M} H_{NR} + 0.07P \quad (7)$$

式中: P 为总降水量。式(7)表示, 冰川径流由冰雪融化和降落到冰川上的少量液态降水组成。经观测试验和模拟计算, 冰川消融热主要为净辐射, 感热和潜热的代数和平均仅占净辐射的 0.11 作为冰雪融化热的补充。冰面降水量的 93% 为固态, 形成冰面积雪, 仅 7% 为液态降水, 直接参与冰川径流形成。净辐射的计算按下式进行:

$$H_{NR} = R_G(1 - \alpha) + \varepsilon_a \delta T_a^4 - \varepsilon_e \delta T_e^4 \quad (8)$$

式中: R_G 为总辐射; α 为反射率; ε_a 为大气长波放射系数; δ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数; T_a 为气温(K); ε_e 为表面放射系数; T_e 为表面温度(K)。根据观测试验研究(康尔泗等, 1994b), 式(8)的计算以参数化通量表达式来完成。以大西沟气象站的日照时数 HD , 气温 T_m ($^{\circ}\text{C}$) 和低云量 C (0.0~1.0), 计算乌鲁木齐河源 1 号冰川消融区接近冰川平衡线位置净辐射的有关通量表达式为:

$$R_G = R_s(0.2139 + 0.5354 \frac{HD}{HD_c}) \quad (9)$$

$$\alpha = 0.82 - 0.03T_m - 1.74 \times 10^{-3} T_m^2 - 1.14 \times 10^{-4} T_m^3 \quad (\text{雪面}) \quad (10)$$

$$\alpha = 0.27 - 0.01 T_m \quad (\text{冰面}) \quad (11)$$

$$\varepsilon_a = 0.69(1 + 0.42C) \quad (12)$$

$$\varepsilon_e = 0.97 \quad (13)$$

式中: R_s (W/m^2) 为在一定坡度和坡向条件下大气上界的太阳辐射; HD_c 为天文日照时数。另外, 上面计算的能通量需用一个换算系数 C_{mf} 将其转换为整个冰川的平均能量收入; C_{mf} 是气温的函数(康尔泗等, 1994a), 对 1 号冰川, C_{mf} 的表达式为:

$$C_{mf} = -0.219 + 0.114T_m + 0.008T_m^2 \quad (14)$$

4.1.2 冰川物质平衡计算

以冰川物质平衡年度冰川区的年固态降水量 P_s 作为物质积累量, 而以式(7)中冰川融化项代表冰川总消融, 本文以下式进行冰川物质平衡计算:

$$B = P_s - \left(\frac{1.11\tau}{L_m} H_{NR} \right) C_{mf} \quad (15)$$

根据在天格尔山北坡高山带的降水观测误差以及降水随海拔分布的观测研究(杨大庆等, 1992)和冰川水量平衡计算(Kang Ersi, 1994), 冰川区的多年平均降水量为

650 mm。

4.1.3 冰川及其径流对气候变化的响应计算

除上述对气温、降水和冰川物质平衡变化趋势的分析, 笔者还分析了大西沟气象站 1959~1993 年的日照、低云量和水汽压等的变化状况, 尚未发现有意义的变化趋势。为此, 在气温变化的条件下, 本文主要分析冰川反射率 α 、长波入射辐射 R_L (W/m^2) 和感热通量 H_s (W/m^2) 的变化。对感热通量, 系根据下式(康尔泗等, 1994b)计算。

$$H_s = 0.97 U_m T_m \quad (16)$$

式中: U_m 为大西沟气象站平均风速(m/s)。长波入射辐射为:

$$R_L = \varepsilon_a \delta T_a^4 \quad (17)$$

式中: $T_a = 273.16 + T_m$ 。于是, 求得式(10)、(11)、(16)和(17)对气温的变化率为:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial T_m} = -0.03 - 3.48 \times 10^{-3} T_m - 3.42 \times 10^{-4} T_m^2 \quad (\text{雪面}) \quad (18)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial T_m} = -0.01 \quad (\text{冰面}) \quad (19)$$

$$\frac{\partial R_L}{\partial T_a} = 4 \varepsilon_a \delta T_a^3 \quad (20)$$

$$\frac{\partial H_s}{\partial T_m} = 0.97 U_m \quad (21)$$

另外, 如降水量减少, 本文还根据反射率的变化, 计算了由此而增加的冰川冰消融量。冰川径流的变化即根据消融量的变化和降水量的变化由式(6)进行计算。冰川厚度的变化由冰川物质平衡表达式(15)来计算。这里, 认为在多年的变化中, 冰川的累计物质平衡近似或等于冰川厚度的变化。由于在天格尔山北坡的冰川中, 只有乌鲁木齐河源 1 号冰川有实测资料, 考虑到 1 号冰川是一条平均处于负物质平衡的退缩冰川, 而天山地区冰川虽以退缩为主, 但也同时存在一些稳定和前进的冰川。据 1962~1987 年的统计, 天山冰川退缩的占 61%, 前进的占 13%, 稳定的占 26%(Kang Ersi, 1986)。因此, 以 1 号冰川的物质平衡来推算天格尔山北坡的平均物质平衡状况, 需要一个换算系数。根据新近完成的乌鲁木齐河流域 1992 年航测图冰川统计资料(据陈建明), 笔者经模型校准, 取一个 0.34 的相乘因子, 来推求天格尔山北坡冰川系统的物质平衡。

冰川厚度的变化, 将引起冰川面积、长度和体积的变化。作为冰川系统的平均变化状况, 可由式(1)~(3)来推求, 即:

$$\frac{\partial F_g}{\partial H_g} = 16.61 \times 10^{-4} H_g^{0.8455} \quad (22)$$

$$\frac{\partial L_g}{\partial H_g} = 4.14 \times 10^{-2} H_g^{-0.0255} \quad (23)$$

$$\frac{\partial V_g}{\partial H_g} = 25.08 \times 10^{-7} H_g^{1.8668} \quad (24)$$

本文以式(22)~(24)对表 3 中的平均冰川进行计算。如果一条冰川的面积、长度和体积小于它所在冰川子系统平均冰川的面积、长度和体积减少量,则认为该条冰川已消亡。基于此种方法,便可由冰川厚度变化来推求冰川系统的变化状况。

4.2 计算结果和讨论

以乌鲁木齐河源高山带有冰川和气候观测资料的 1959~1993 年共 35 a 的时间序列作为计算基础,进而计算和讨论在现有变化趋势,以及 6~8 月平均气温升高 0.5℃、1.0℃ 和年降水量保持不变,变化 ±5% 和 ±10% 的气候情景条件下,1993 年以后的 35 a 天格尔山北坡冰川及其径流的可能变化状况。根据对乌鲁木齐河源 1 号冰川的水文观测,6~8 月经流量占年径流量的 96%(Kang Ersi, 1994),因此,冰川消融和融水径流的产生主要是在 6~8 月,而在讨论气温变化对冰川及其径流变化的影响中,主要讨论 6~8 月的气温以及冰川消融热的变化。

表 5 乌鲁木齐河源 1 号冰川不同气候条件下消融和径流量计算结果

Table 5 Results from calculation on the ablation and runoff of Glacier No.1 at the source area of the Urumqi River under different climate conditions

年 限	假设气候情景		6~8 月融化 热(W / m ²)	6~8 月融 水量 (mm)	年冰川 总径 流量 (mm)	冰川平均年 物质平衡		冰川平均每 年减薄厚度		冰川冰总 减薄厚度	
	6~8 月气温 变化 (℃)	年降水量 变化 (%)				计算 (mm)	观测 (mm)	计算 (mm)	观测 (mm)	计算 (m)	观测 (m)
1959~1993 年共 35 a	—	—	30.7	729	805	-155	-127	172	141	6.01	4.94
1993~2027 年共 35 a	变化趋势 同上一年限	变化趋势 同上一年限	44.5	1 056	1 146	-496	—	551	—	19.28	—
	+0.5	0	50.5	1 199	1 294	-644	—	716	—	25.06	—
		-5	51.9	1 232	1 328	-694	—	771	—	27.00	—
		+5	50.5	1 199	1 296	-629	—	699	—	24.47	—
		-10	54.7	1 299	1 396	-779	—	866	—	30.29	—
		+10	50.5	1 199	1 297	-614	—	682	—	23.87	—
	+1.0	0	57.7	1 370	1 472	-822	—	914	—	31.97	—
		-5	59.0	1 401	1 504	-870	—	966	—	33.83	—
		+5	57.7	1 370	1 474	-807	—	897	—	31.40	—
		-10	61.7	1 463	1 568	-950	—	1 055	—	36.95	—
		+10	57.7	1 370	1 475	-792	—	880	—	30.80	—

在 1959~1993 年期间,冰川处于负的物质亏损状态,这是由这段时期的基本热量条件所决定的。这段时期 6~8 月平均融化热相应的融水层深大于冰川上的年固态降水量 605 mm(表 5)。因此,冰川物质平衡为负。利用上述方法对乌鲁木齐河源 1 号冰川

物质平衡和冰川冰厚度变化的计算和观测值较接近, 相对误差约为 22%(表 5)。证明了所用计算方法的合理性。

为探讨气候干暖化对高山冰川变化的可能影响, 在计算 1959~1993 年 35 a 期间乌鲁木齐河源 1 号冰川消融和径流量的基础上, 又对 1993~2027 年未来 35 a 期间的变化状况以不同的假设气候情景来进行计算(表 5)。在气温和降水的变化趋势保持不变的情况下, 未来冰川消融热和物质亏损的增加和过去的 35 a 相比将更加迅速, 这是由于过去增加的消融热又叠加上新增加的消融热所致。如果在 1993 年以后的 35 a, 6~8 月气温升高 0.5℃ 和 1.0℃, 冰川消融热和物质亏损将大幅度增加。如果伴随气温的上升, 年降水量增加 5% 和 10%, 计算结果表明这个降水量的增加对冰川消融和物质亏损影响不大。但如年降水量减少 5% 和 10%, 可使消融热增加约 7%~8%, 而冰川物质亏损将增加 15%~20%。如果在未来的 35 a, 6~8 月气温升高 1.0℃, 年降水量减少 10%, 则乌鲁木齐河源 1 号冰川将减薄达 37 m。基于此, 本文将天格尔山北坡的冰川系统按乌鲁木齐河、头屯河、三屯河和呼图壁河分为四个子系统, 对冰川及其径流的变化按以下情况进行计算: 1) 1959~1993 年的变化状况; 2) 1993~2027 年保持上一个 35 a 变化趋势时的变化状况; 3) 1993~2027 年期间假设到年限时段末 6~8 月平均气温分别升高 0.5℃, 1.0℃ 和年降水量保持不变和分别增加和减少 5%, 10% 时冰川及其径流的变化状况。

计算结果(表 6)表明, 乌鲁木齐河流域 1959~1993 年期间冰川条数减少了 6.7%, 冰川面积减少了 13.0%。根据 1964~1992 年两次测量 1:10⁴ 航测图对比, 乌鲁木齐河流域冰川面积约减少了 13.8%(据陈建明提供的数据), 这和计算结果相当吻合。在这段时期, 天格尔山北坡头屯河、三屯河和呼图壁河流域冰川的变化状况大体和乌鲁木齐河一致。如果气候和冰川变化趋势保持不变, 则从 1993~2027 年天格尔山北坡的冰川条数将减少 61%, 面积减少 49%。这种大量冰川减少的状况, 一方面是由于过去数十年冰川消融增加的趋势在未来数十年的延续将导致冰川消融量的大幅度增加; 另一方面则是由于天格尔山北坡冰川发育的规模小(表 2), 在气候变暖的背景下, 小冰川更容易消亡。因此, 天格尔山北坡冰川在未来数十年内将加快退缩速度。假如在 1993 年以后的 35 a 6~8 月气温升高为 0.5℃, 则冰川条数将减少 76%、面积减少 61%; 如气温升高为 1.0℃, 则冰川条数减少 85%, 面积减少 72%。计算表明(表 6), 在气温变化的条件下, 年降水量增加 5% 和 10%, 对冰川变化的影响很微小, 但如降水量减少, 则在较大程度上加速冰川的消退。10% 的年降水减少量, 可导致冰川条数减少约 5%, 面积减少约 6%。假如在未来的 35 a 6~8 月气温升高 1.0℃, 年降水量减少 10%, 则天格尔山北坡冰川条数将减少 90%, 面积减少 78%, 即大部分冰川将消亡。因此可以认为, 由于天格尔山北坡冰川发育规模小, 如果现今气候干暖化的趋势继续下去, 冰川将在未来 35 a 的时期内大量消亡。

由于冰川处于物质亏损和面积缩小的状态中, 河流流域冰川覆盖率不断减少, 但由于冰川融水随消融增强而增加, 在 1959~1993 年期间, 虽然冰川面积减小, 但冰川融水对河流的补给比重仍有所增加, 其中乌鲁木齐河冰川融水补给比重可达 15% 左右, 呼图壁河达 12% 左右。但如果到 2027 年, 6~8 月气温升高 0.5~1.0℃, 由于冰川大量

表 6 天格尔山北坡冰川及其径流变化计算

Table 6 Calculation on the changes of glaciers and their runoff at the north flank of the Tianger Mountain															
河 流 域	面 积 (km ²)	径流量 (10 ⁸ m ³)	年 限	冰川变化				冰川径流变化							
				年 限 末 期 设 气 候 情 景		冰 川 条 数		冰 川 面 积 (km ²)		冰 川 覆 盖 率		冰 川 融 水 补 给 比 重			
				6~8月 气温变化 (℃)	年降水 量变化 (%)	年限末期 冰川条数	变化 数量	变化 %	年限末期 冰川面积	变化 面积	变化 %	年限末期 覆盖率 (%)	变化 (%)	年限末期 补给比重 (%)	变化 (%)
乌 鲁 木 齐 河 924 (英雄 桥水 文站)	2.22		~1959	-	-	150	-	-	46.00	-	-	5.0	-	13.2	-
			1959~1993	-	-	140	-10	-6.7	40.02	-5.98	-13.0	4.3	-0.7	14.5	+1.3
			1993 ~ 2027	同上一年限	同上一年限	60	-80	-57.1	21.41	-18.61	-46.5	2.0	-2.3	11.0	-3.5
				+0.5	0	37	-103	-74.0	16.50	-23.52	-59.0	2.0	-2.3	11.0	-3.5
					-5	31	-109	-78.0	14.94	-25.08	-63.0	2.0	-2.3	11.0	-3.5
					+5	33	-107	-76.0	15.67	-24.35	-61.0	2.0	-2.3	11.0	-3.5
					-10	26	-114	-81.0	13.13	-26.89	-67.0	1.0	-3.3	10.0	-4.5
				+10	27	-113	-81.0	14.02	-26.00	-65.0	2.0	-2.3	10.0	-4.5	
				-1	0	23	-117	-84.0	12.07	-27.95	-70.0	1.0	-3.3	10.0	-4.5
					-5	18	-122	-87.0	10.74	-29.28	-73.0	1.0	-3.3	9.0	-5.5
+5	20	-120	-86.0		11.36	-28.66	-72.0	1.0	-3.3	9.0	-5.5				
-10	15	-125	-89.0		9.39	-30.63	-77.0	1.0	-3.3	8.0	-6.5				
头 屯 河 840 (制材 厂水 文站)	2.21	~1959	-	-	80	-	-	20.50	-	-	2.4	-	5.9	-	
		1959~1993	-	-	77	-3	-3.8	17.44	-3.06	-15.3	2.1	-0.3	6.4	+0.5	
		1993 ~ 2027	同上一年限	同上一年限	23	-54	-70.0	6.91	-10.53	-60.0	1.0	-1.1	4.0	-2.4	
			+0.5	0	15	-62	-81.0	5.14	-12.30	-71.0	1.0	-1.1	4.0	-2.4	
				-5	12	-65	-84.0	4.44	-13.00	-75.0	1.0	-1.1	3.0	-3.4	
				+5	13	-64	-83.0	4.73	-12.71	-73.0	1.0	-1.1	3.0	-3.4	
				-10	10	-67	-87.0	3.68	-13.76	-79.0	1.0	-1.1	3.0	-3.4	
			+10	12	-65	-84.0	4.32	-13.12	-75.0	1.0	-1.1	3.0	-3.4		
			-1	0	9	-68	-88.0	3.30	-14.14	-81.0	1.0	-1.1	3.0	-3.4	
				-5	5	-72	-94.0	2.39	-15.05	-86.0	1.0	-1.1	2.0	-4.4	
+5	9	-68		-88.0	3.27	-14.17	-81.0	1.0	-1.1	3.0	-3.4				
-10	4	-73		-95.0	1.96	-15.48	-89.0	1.0	-1.1	2.0	-4.4				
+10	5	-72	-94.0	2.34	-15.10	-87.0	1.0	-1.1	2.0	-4.4					

表 6 (续)

河流域	面积 (km ²)	径流量 (10 ⁸ m ³)	年限	年限末期假 设气候情景		冰川变化						冰川径流变化			
						冰川条数			冰川面积 (km ²)			冰川覆盖率		冰川融水补给比重	
				6~8月 气温变化 (℃)	年降水 量变化 (%)	年限末期 冰川条数	变化		年限末期 冰川面积	变化		年限末期 覆盖率 (%)	变化 (%)	年限末期 补给比重 (%)	变化 (%)
							数量	%		面积	%				
三屯河	1636 (磙盘庄水文站)	3.49	~1959	-	-	141	-	-	40.15	-	-	2.5	-	7.3	-
			1959~1993	-	-	133	-8	-5.8	34.86	-5.29	-13.2	2.1	-0.4	8.0	+0.7
			1993 ~ 2027	同上一年限	同上一年限	45	-88	-66.0	17.93	-16.93	-49.0	1.0	-1.1	6.0	-2.0
				0	0	29	-104	-78.0	14.14	-20.72	-59.0	1.0	-1.1	6.0	-2.0
				-5	+5	27	-106	-80.0	13.24	-21.62	-62.0	1.0	-1.1	6.0	-2.0
						29	-104	-78.0	14.03	-20.83	-60.0	1.0	-1.1	6.0	-2.0
				-10		23	-110	-83.0	11.51	-23.35	-67.0	1.0	-1.1	5.0	-3.0
				+10		26	-107	-80.0	12.78	-22.08	-63.0	1.0	-1.1	6.0	-2.0
				0		20	-113	-85.0	10.67	-24.19	-69.0	1.0	-1.1	5.0	-3.0
				-5		19	-114	-86.0	9.92	-24.94	-72.0	1.0	-1.1	5.0	-3.0
				+5	+1.0	20	-113	-85.0	10.47	-24.39	-70.0	1.0	-1.1	5.0	-3.0
				-10		15	-118	-89.0	8.41	-26.45	-76.0	1.0	-1.1	5.0	-3.0
+10		18	-115	-86.0	9.53	-25.33	-73.0	1.0	-1.1	5.0	-3.0				
~1959	-	-	239	-	-	72.04	-	-	3.9	-	10.5	-			
呼图壁河	1840 (石门水文站)	4.34	1959~1993	-	-	214	-25	-10.5	62.28	-10.12	-14.0	3.4	-0.5	11.6	+1.1
			同上一年限	同上一年限	94	-120	-56.0	32.97	-29.31	-47.0	2.0	-1.4	9.0	-2.6	
			0	0	54	-160	-75.0	24.63	-37.65	-60.0	1.0	-2.4	9.0	-2.6	
			-5		49	-165	-77.0	22.70	-39.58	-64.0	1.0	-2.4	8.0	-3.6	
			+5	+0.5	53	-161	-75.0	23.98	-38.30	-61.0	1.0	-2.4	8.0	-3.6	
			-10		44	-170	-79.0	20.24	-42.04	-68.0	1.0	-2.4	8.0	-3.6	
			+10		48	-166	-78.0	22.09	-40.19	-65.0	1.0	-2.4	8.0	-3.6	
			0		33	-181	-85.0	17.20	-45.08	-72.0	1.0	-2.4	7.0	-4.6	
			-5		30	-184	-86.0	15.97	-46.31	-74.0	1.0	-2.4	7.0	-4.6	
			+5	+1.0	33	-181	-85.0	16.97	-45.31	-73.0	1.0	-2.4	7.0	-4.6	
			-10		25	-189	-88.0	13.73	-48.55	-78.0	1.0	-2.4	6.0	-5.6	
			+10		28	-186	-87.0	15.13	-47.15	-76.0	1.0	-2.4	6.0	-5.6	

消亡,冰川融水对河流的补给比重将大量减少。即使如此,冰川融水对河流仍有一定的补给量。如到 2027 年 6~8 月平均气温上升 1°C , 年降水量减少 10%, 则天山天格尔山北坡冰川融水对河流的补给比重在乌鲁木齐河为 8%, 头屯河为 2%, 三屯河为 5%, 呼图壁河为 6% (表 6)。

5 结语

在气候变化背景下,高山冰川及其径流变化是冰冻圈动态变化研究的重要方面。由于高山气候和冰川观测资料非常有限,因此,需要寻找利用有限的观测资料来推求区域性冰川变化状况的方法。本文利用山地冰川系统的概念,根据天格尔山北坡冰川分布和发育的统计特征,将乌鲁木齐河源冰川和气候的观测试验结果应用到冰川发育条件与之类似的河流流域和区域性的冰川及其径流变化的研究中,提出了一种基于气候变量的冰川系统及其径流变化的计算方法。计算结果表明,近 35 a 来天格尔山北坡的冰川处于物质亏损的退缩状态中,而冰川融水对河流的补给比重略有增加。如在未来的 35 a 中气候的干暖化继续加剧,则该地区的冰川将迅速减少,冰川融水对河流的补给比重也将随之减少。今后需对不同山系和地区的冰川系统及其径流变化状况进行计算,以不断完善和改进本文提出的计算方法,进而从整体上探讨高亚洲冰川系统及其径流的变化状况。

致谢: 张祥松、李培基同志对本文提出修改意见, 特此致谢。

参 考 文 献

- 中国科学院新疆地理研究所. 1986. 天山山体演化. 北京: 科学出版社, 1~188.
- 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 1986. 中国冰川目录(Ⅲ)·天山山区(西北部准噶尔内流区). 北京: 科学出版社, 1~65.
- 刘潮海, 赖祖铭, 曹真堂. 1986a. 天山西北部准噶尔内流区冰川目录编纂说明. 中国冰川目录(Ⅲ)·天山山区(西北部准噶尔内流区). 北京: 科学出版社, 1~6.
- 刘潮海, 丁良福. 1986b. 天山西北部准噶尔内流区冰川分布及其作用特征. 北京: 科学出版社, 7~22.
- 纪忠萍, 汤懋苍. 1994. 乌鲁木齐河源1号冰川年物质平衡量的预报方法与资料插补. 冰川冻土, 16(2): 128~138.
- 张金华. 1981. 天山乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡变化与气候相互关系的研究. 冰川冻土, 6(4): 25~36.
- 张金华, 王晓军, 李军. 1984. 天山乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡变化与气候相互关系的研究. 冰川冻土, 6(4): 25~36.
- 杨大庆, 施雅风, 康尔泗等. 1992. 天山乌鲁木齐河流域降水观测系统误差分析和修正. 见: 乌鲁木齐河山区水资源形成和估算. 北京: 科学出版社, 14~40.
- 康尔泗, Ohmura A. 1994a. 天山冰川作用流域能量、水量和物质平衡及径流模型. 中国科学(B辑), 24(9): 983~991.
- 康尔泗, Ohmura A. 1994b. 天山冰川消融参数化能量平衡模型. 地理学报, 49(5): 467~476.
- Kang Ersi. 1986. A preliminary glaciohydrological comparison between some glaciers in Swiss Alps and Chinese Tianshan. Data of Glaciology, Moscow, Pub, 58, 9~18, 130~139.
- Kang Ersi. 1994. Energy-water-mass balance and hydrological discharge. Ziircher Geographische Schriften Heft 57, ETH-Ziirich, 1~178.
- Krenke AN. 1986. Analysis and computations of regional mountain glacier system regime. Data of Glaciological Studies, 1(58): 4~9, 125~130.
- Oerlemans J. 1992. A model for the surface balance of ice masses: part 1, Alpine glaciers. Zeitschrift für

Gletscherkunde und Glacialgeologie, Band 27~28, 63~83.

Конозалов В. Ф. 1979. Расчет и прогноз таяния ледников Средней Азии. Л., ГИМИЗ, 1~232.

A Study on Changes of the Glacier System and Its Runoff at the North Flank of the Tianger Mountain in the Tianshan Mountains

Kang Ersi

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

Abstract

The glaciers at the north flank of the Tianger Mountain develop in a small scale, facing basically north. The spatial distribution of the glacier system has some characteristics on an average as a whole, that is, the changes of area, length and volume of the glaciers in the system coincide with those of their depth.

The trend analysis indicates that, during the recent 35 years from 1959 to 1993, at the high mountainous zone of the source area of the Urumqi River, the annual mean air temperature increased slightly, by about 0.1°C , while the annual precipitation decreased by about 5.1% of the mean value during the years, but the monthly and seasonal trends are quite different from each other. Under the present conditions of air temperature and precipitation, the mass deficit of the glaciers will continuously increase.

The calculation on the change of the glacier system and its runoff indicates that, during the 35 years from 1959 to 1993, the glacier number and area were reduced by 6.7% and 13.0% respectively in the Urumqi River basin. This is basically identical with the change calculated by the aerophotography maps. During these years, the number and area of the glaciers at the north flank of the Tianger mountain were also reduced correspondingly. If the trend of the climate and glacier changes during the years keeps continuously, then, during the next 35 years from 1993, the number for glaciers could be reduced by 61%, and area be reduced by 49%. Suppose that, in the future 35 years from 1993, the air temperature of June to August increases by 0.5°C , annual precipitation decreases by 5%, then about 3/4 of the glaciers could disappear. Suppose that, in the above mentioned years, the air temperature of June to August increases by 1°C , the annual precipitation decreases by 10%, then the overwhelming majority of the glaciers could disappear. The calculation indicates that, if the annual precipitation increases by 55% and 10%, it doesn't influence the glacier changes much more, while 10% reduction of the annual precipitation will cause about 5% reduction of the glacier number and 6% reduction of the glacier area in the region. During 1959 to 1993, although the glacier area is reduced, because the glacier melt is intensified, the feeding of gla-

cier meltwater to the rivers at the north flank of the Tianger Mountain was slightly increased. Under the conditions of air temperature reduction during June to August by 0.5℃ and 1℃, because a large amount of glaciers will disappear, the feeding of glacier meltwater to the rivers will largely reduced.

Key words: glacier system, trend analysis, glacier changes, glacier meltwater

www.cnki.net