

Tianshan Glaciological Station

Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research

Institute, Chinese Academy of Sciences

Annual Report

Volume 19, 2007—2008

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所

天山冰川观测试验站

2007—2008 年报

第 19 卷

2011 年 5 月

内 容 简 介

本期年报汇集了 2007—2008 年中国科学院天山冰川观测试验站有关冰川，水文，气象及环境等方面的研究，实验报告和基本观测资料。

本年报可供从事冰川，冻土，水文，气候，地球化学与环境变化等方面研究的科研，教学人员和研究生参考使用。

中国科学院寒区旱区环境
与工程研究所
天山冰川观测试验站年报

**Annual Report of Tianshan
Glaciological Station,
CAREERI, CAS**

2007—2008 年 第 19 卷

Volume 19, 2007—2008

主 编：李忠勤

Chief Editors: Li Zhongqin

责任编辑：周 平

Executive Editors: Zhou Ping

印刷装订：新印图文

Printed by: The Xinyin Printing Co., Ltd

印 数：100

Impression of 100 Copies

天山冰川观测试验站年报

第 19 卷 2007—2008 年

目 录

前 言

常规观测和资料整编

1 物质平衡资料

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 2006/2007 年度物质平衡.....王文彬, 李慧林 (1)

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 2007/2008 年度物质平衡.....王文彬, 李慧林 (10)

2 水文气象资料

天山冰川试验站水文气象资料整编说明(2006/2007).....韩添丁, 金 爽 (19)

天山冰川试验站水文气象资料整编说明(2007/2008).....金 爽 (35)

3 冰川运动资料

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川表面运动速度和冰舌末端变化(2006/2007).....曹 敏 (51)

天山乌鲁木齐河源区 1 号冰川运动速度特征及其动力学模拟.....周在明 (55)

观测试验工作进展

遥感方法研究新疆天山冰川变化进展.....李开明 (62)

通过 GIS 和 RS 技术研究冰川变化.....王 林 (68)

天山地区 2008-2010 年冰川雷达测厚.....吴利华 (74)

GPS 和 GIS 技术支持下的冰川表面高程变化分析.....王璞玉 (79)

乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡观测与计算.....王 鹏 (82)

天山典型冰川温度观测新进展.....董志文 (87)

HBV 模型介绍.....孙美平 (90)

托木尔峰青冰滩72号冰川径流中氢氧同位素观测研究·····	冯 芳 (96)
冰川区大气气溶胶的单颗粒分析·····	赵淑惠 (101)

附 录

来站工作客座人员(2007-2008)·····	(106)
学术论文概要·····	(108)

论文选编

1. Characteristics of atmospheric dust deposition in snow on the glaciers of the eastern Tien Shan, China·····*Zhiwen Dong, Zhongqin Li, Feiteng Wang, Mingjun Zhang*
2. Black Carbon (BC) in the snow of glaciers in west China and its potential effects on albedos
·····*Ming Jing, Xiao Cunde Helene Cachier, Qin Dahe, Li Zhongqin*
3. The pH value and electrical conductivity of atmospheric environment from ice cores in the Tianshan Mountains·····*Dong Zhiwen, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, Wang Feiteng*
4. 新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究·····李忠勤, 李开明, 王 林
5. 天山东部冰芯 pH 值和电导率的大气环境空间差异·····董志文, 李忠勤, 王飞腾
6. 天山乌鲁木齐河源冰川积雪内不溶粉尘特征: 沙尘与非沙尘活动季节的比较·····
·····董志文, 李忠勤, 王飞腾
7. 乌鲁木齐河源 1 号冰川冰芯剖面物理特征及其形成机理·····王 林, 李忠勤, 王飞腾
8. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川雪冰中 $\delta^{18}\text{O}$ 的演化过程·····张明军, 周 平, 李忠勤
9. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川气溶胶可溶性离子昼夜变化研究··周 平, 张明军, 李忠勤

天山冰川观测试验站年报第 19 卷

前 言

本卷年报刊印了天山冰川站 2007-2008 年度常规观测整编资料。介绍了观测试验工作取得的进展。汇编了冰川变化与水资源、冰川雪冰过程等方面的研究论文 10 篇。

2007-2008 年是天山冰川站继 2006 年由国家试点站通过论证转入国家站以后,在科研、冰川观测网络和站区平台建设方面取得重大发展的阶段。首先,在科研方面,完成了降雪—粒雪—冰川冰的物理、化学演化全过程的观测,取得的宝贵资料,为进一步深入研究奠定了基础。该研究已在国际上产生了较大的影响,部分成果被选为 2008 年美国 AGU 秋季大会的特邀报告。在冰川动力学模式研究方面取得了突破,通过冰川物质平衡模式和冰川动力学模式的耦合,模拟预测了不同气候情景下 1 号冰川变化过程,得到 1 号冰川在未来 50-90 年将消融殆尽的结论。

其次,在“天山冰川监测网络”建设上取得重大拓展。除了开展已有的 3 个定位观测点的常规观测之外,新增了天山西段托木尔峰地区的定位观测点。新的参照冰川为青冰滩 72 号冰川(当地亦称为神奇峰冰川)。这一观测点的成功建立,形成了对中国境内 1700 km 天山的完整冰川观测体系。

再次,实施了站区平台建设项目。该项目拆除了 400 m² 以上的危旧房,新建了 860 m² 的天山冰川站综合楼,并拟对站区辅助设施、场地进行全面升级改造。这一基建项目的实施,将彻底改变天山冰川站面貌,大大提升天山站硬件支撑能力。与此同时,天山冰川站获取了站区土地使用证,解决了这个 30 多年悬而未决的难题。

本期年报由李忠勤主编,周平责任编辑,天山冰川站科研人员对稿件进行了校正。

李忠勤
2010 年 6 月 16 日

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 2006/2007 年度 物质平衡

王文彬, 李忠勤, 李慧林, 杨惠安

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所/天山冰川观测试验站, 甘肃 兰州 730000)

1 概述

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川简称 1 号冰川, 是由东、西两支汇流而成的小冰斗—山谷冰川。自 1959 年 1 号冰川有观测资料以来至 20 世纪 90 年代初 (1993 年), 由于物质负平衡持续增加, 导致冰川面积减少, 冰川退缩, 冰舌末端位置海拔高度升高, 1 号冰川东、西支完全分离, 形成目前的两条相互完全独立的冰川体系, 故简称原 1 号冰川东支流为 1 号冰川东支冰川 (1993 年为 1.163 km^2), 原 1 号冰川西支流为 1 号冰川西支冰川 (1993 年为 0.677 km^2)。

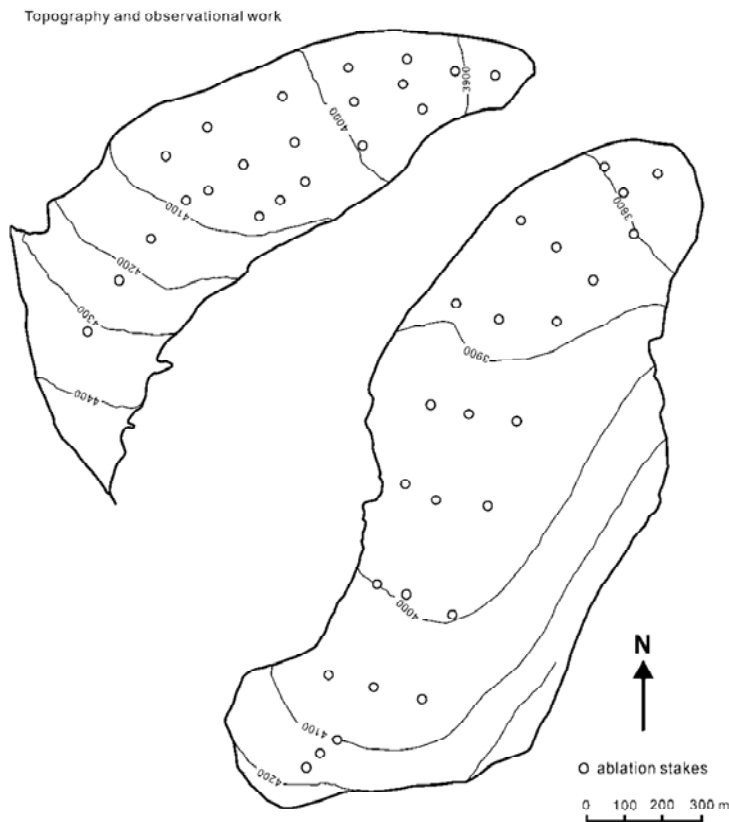


图 1 2006/07 年 1 号冰川物质平衡观测网点

2006/07 年度物质平衡观测网点的布设是在上一年观测研究工作的基础上进行的,即分别在 1 号冰川东支和西支冰川消融区表面,从冰舌开始自下而上布设 A-I 等各 9 个横剖面,各横剖面一般在冰面上等距离布设 3 根测杆进行消融期积消量的观测,积累区资料则以挖取雪坑观测结果获得。近年来由于冰舌末端消融强烈以及退缩之故,使得东支 A 剖面 and 西支 A、B、C 剖面的冰面地形变得越来越陡峭,尤其西支东侧冰舌更是冰悬壁削,冰裂隙密布,涉及这些区域的冰面测杆的布设和观测行为都非常危险。西支 C 剖面东侧冰面裂隙密布,布设测杆和测杆观测的异常艰难,这些断面测杆布设的数量亦因此有所减少(西支 C 剖面)。图 1 为 2006/07 年 1 号冰川物质平衡观测网点。

本年度 1 号冰川物质平衡观测方法与上一年相同,即从 4 月末开始观测,每月底或月初观测一次,至 8 月底为最后一次结束年度观测。

2 物质平衡观测计算结果

在观测、统计和计算工作的基础上,2006/07 年度天山乌鲁木齐河源 1 号冰川及其 1 号冰川东支、西支物质平衡获得如下结果:

(1) 2006/07 年度 1 号冰川西支单点物质平衡观测计算结果 (表 1);

(2) 2006/07 年度 1 号冰川东支单点物质平衡观测计算结果 (表 2);

(3) 冬平衡的观测,是指上一年(2006 年)8 月 31 日至本年(2007 年)4 月 30 日期间为 1 号冰川的冬平衡观测计算时段的观测结果。2006/07 年度 1 号冰川冬平衡结果为+245.1 mm,其平衡线海拔高度小于 3850 m;其中 1 号冰川东支物质冬平衡为+271.5 mm,平衡线海拔小于 3750 m,1 号冰川西支冬平衡结果为+196.4 mm,平衡线海拔高度为 3950 m(表 3)。

尽管天山乌鲁木齐河源 1 号冰川于 1959 年开始监测其年度物质平衡变化状况,但其冬平衡的专项观测及其评估仅始于 1988 年。

(4) 物质平衡年度结果,2006/07 年度 1 号冰川物质净平衡结果-641.5 mm,平衡线海拔高度为 4074 m,其中 1 号冰川东支年净平衡结果为-695.8 mm,平衡线为 4060 m;1 号冰川西支年净平衡为-541.8 mm,平衡线为 4100 m(表 4)。

(5) 2006/07 年度 1 号冰川西支各高度带物质平衡 (表 5);

(6) 2006/07 年度 1 号冰川东支各高度带物质平衡 (表 6);

(7) 2006/07 年度 1 号冰川冬平衡等值线图 (图 2);

(8) 2006/07 年度 1 号冰川物质净平衡等值线图 (图 3)。

表1 2006/07年度1号冰川西支单点物质平衡观测计算数据结果 (2006/08/31-2007/08/30)

剖面	测杆 (No.)	海拔 (m)	纯积消耗(±mm)				
			06.09.01-07.04.30	2007.06.01	2007.06.30	2007.07.31	2007.08.30
A	A1	3854	-229.0	-560.0	-1333.0	-2331.0	-2889.0
BC	BC	3900	+57.0	-100.5	-672.0	-1650.0	-2037.0
D	D1	3953	-691.2	-144.9	-567.6	-1440.0	-3094.5
	D2	3953	+181.0	-1511.5	+379.0	-1299.0	-1590.0
	D3	3953	-1122.0	+422.0	-114.0	+607.0	-1355.0
	平均	3953	-544.1	-411.5	-100.9	-710.7	-2013.2
E	E1	3964	+1032.0	+876.0	+501.0	—	—
	E2	3966	+557.4	+519.5	+118.7	—	-337.3
	E3	3980	+345.2	+103.7	-208.0	+656.0	-1300.0
	平均	3970	+644.9	+499.7	+137.2	—	—
F	F1	4009	-38.0	-566.0	-362.0	-1892.0	-2507.0
	F2	4009	-307.8	-1898.0	-2158.5	-2439.0	-3492.0
	F3	4009	-138.0	-178.2	-561.2	-823.2	-1525.2
	平均	4009	-101.3	-880.7	-1027.2	-1718.1	-2508.1
G	G1	4026	-1218.0	-1313.0	-1448.0	-30.0	-881.0
	G2	4044	+198.0	+230.8	+45.0	-447.0	-588.0
	G3	4044	+188.0	+4.2	+1940.0	+786.0	+1371.0
	平均	4038	-277.3	+359.3	+179.0	+103.0	-32.7
H	H1	4050	+126.0	-12.0	-38.0	-38.0	-470.0
	H2	4052	-171.2	-222.2	-408.2	-882.2	-1086.2
	H3	4054	+294.0	+186.0	-93.0	—	—
	平均	4052	+829	-16.1	-179.7	—	—
L1	1	4070	-671.1	-632.8	-810.6	-1350.6	-1623.6
L2	1	4250	+113.4	—	—	—	—
L3	1	4300	+100.3	—	—	—	—

注：“—”表示无观测数据

表 2 2006/07 年度 1 号冰川东支单点物质平衡观测计算数据结果 (2006/08/30—2007/08/30)

剖面	测杆 (No.)	海拔 (m)	纯积消费量(\pm mm)				
			06.09.01-07.04.30	2007.06. 01	2007.06.30	2007.07.31	2007.08.30
A	1	3796	+110.2	-195.4	-1056.0	-1584.0	-2268.0
B	1	3828	+135.7	-94.8	-836.7	-1602.0	-2106.0
	2	3838	+179.8	-63.2	-752.0	-1685.0	-2054.0
	3	3832	+106.8	-162.0	-2112.0	-3084.0	-3525.0
	平均	3833	+140.8	-106.6	-1233.6	-2123.7	-2561.7
C	1	3888	+275.8	+70.0	-330.0	-1304.0	-1598.0
	2	3886	+30.0	-53.2	-488.9	-1392.0	-1869.0
	3	3900	+813.0	—	-1136.3	-753.0	-1227.0
	平均	3891	+372.9	+8.4	-651.7	-1149.7	-1564.7
D	1	3925	+38.5	—	+31.5	-744.5	-1017.5
	2	3936	+213.5	+15.5	+452.8	-1700.5	-1915.0
	3	3956	+318.3	+162.5	-291.9	-978.0	-852.0
	平均	3939	+190.1	+89.0	+64.1	-1141.0	-1261.5
E	1	3950	+357.4	+151.9	+31.9	-698.0	-827.5
	2	3954	+372.0	+153.0	+119.7	+675.0	-800.5
	3	3960	+258.6	+141.9	-94.2	-672.0	-753.0
	平均	3955	+329.3	+148.9	+19.1	-231.7	-793.7
F	1	3976	+356.2	+190.0	-33.8	-833.0	-902.5
	2	3977	+381.2	+186.3	-49.2	-455.8	-516.8
	3	4004	+488.8	+382.6	+357.4	-65.6	-129.1
	平均	3986	+408.7	+253.0	+91.5	-454.5	-516.1
G	1	3996	+261.6	+177.8	+51.0	-567.0	-603.0
	2	3996	+322.0	+138.4	-0.7	-581.0	-639.0
	3	4007	+512.8	+282.7	+213.5	-11.0	+4.5
	平均	4000	+365.5	+199.6	+87.9	-386.3	-412.5
H	1	4046	+433.1	+294.5	+46.8	-613.9	-722.4
	2	4046	+46.1	+592.1	+256.7	+16.1	-193.4
	平均	4049					
J	1	4120	+125.0	+188.0	+280.0		+130.0
K	1	4150	+250.0	+298.0	+362.0		+230.0
L	1	4175	+113.4	+180.0	+378.0		+316.3

注：“—”表示无观测数据

表3 天山乌鲁木齐河源1号冰川2006/07年度冬平衡观测计算结果

项目	平衡线 海拔 (m)	Bc 纯积累			Ba 纯消融			Bn	
		积累区面 积(km ²)	积累量 (10 ⁴ m ³)	积累深 (mm)	消融区面 积(km ²)	消融量 (10 ⁴ m ³)	消融深 (mm)	总量 (10 ⁴ m ³)	平衡值 (mm)
1号东支	3750	1.086	29.49	271.5	0	0	0	29.49	271.5
1号西支	3950	0.526	12.83	243.9	0.065	1.22	186.6	11.61	196.4
1号冰川	3850	1.612	42.31	262.5	0.065	1.22	186.6	41.10	245.1

表4 天山乌鲁木齐河源1号冰川2006/07年度物质平衡观测计算结果

项目	平衡线 海拔 (m)	Bc 纯积累			Ba 纯消融			Bn	
		积累区面 积(km ²)	积累量 (10 ⁴ m ³)	积累深 (mm)	消融区面 积(km ²)	消融量 (10 ⁴ m ³)	消融深 (mm)	总量 (10 ⁴ m ³)	平衡值 (mm)
1号东支	4060	0.304	6.83	224.7	0.783	82.46	1053.1	-75.63	-695.8
1号西支	4100	0.214	6.21	290.2	0.377	38.23	1014.1	-32.02	-541.8
1号冰川	4074	0.518	13.04	251.7	1.160	120.69	1040.5	-107.65	-641.5

表5 1号冰川西支2006/07年度各高度带物质平衡 (mm)

海拔高度 区间(m)	冰川面积 (km ²)	观测时间 (年/月/日)				
		2007.4.30	2007.6.1	2007.6.30	2007.7.31	2007.8.30
4450-4484	0.008	165.6	217.3	295.8	178	197.9
4400-4450	0.021	184.6	242	327.2	211.6	232.4
4350-4400	0.033	208.9	273.4	367.5	254.8	282.4
4300-4350	0.043	234	305.2	408.3	285.2	313.8
4250-4300	0.034	261	339.4	450.4	317.3	345.8
4200-4250	0.031	289.3	375	495.5	342.8	358.7
4150-4200	0.035	295.1	380.4	499.4	209.4	172.2
4100-4150	0.051	288.8	371.6	465.1	24.3	-81.6
4050-4100	0.114	244.7	317.3	215.9	-285.5	-482.4
4000-4050	0.09	236.4	283.5	61.5	-506.9	-785.3
3950-4000	0.067	206.9	104.3	-304.2	-878.4	-1316.9
3900-3950	0.039	-95.9	-293.6	-830.3	-1543.4	-2116.9
3845-3900	0.025	-330.8	-607.9	-1262.4	-2041.2	-2748.5
3845-4484	0.591	196.4	213.9	95.8	-324.4	-526.5

表 6 1号冰川东支 2006/07 年度各高度带物质平衡 (mm)

海拔高度 区间(m)	冰川面积 (km ²)	观测时间 (年/月/日)				
		2007.4.30	2007.6.1	2007.6.30	2007.7.31	2007.8.30
4200-4267	0.032	155	211.7	341.7	39.7	306.7
4150-4200	0.076	224.1	286.7	327.2	-48.2	237.2
4100-4150	0.076	152.9	225.7	244	-159	99
4050-4100	0.094	198.2	381.7	164	-263	-166.9
4000-4050	0.171	307.8	312.8	99.8	-347.3	-347.3
3950-4000	0.163	393.9	233	76.8	-417.9	-480.5
3900-3950	0.212	309.4	154.4	31.1	-440	-832.2
3850-3900	0.119	255	57.2	-120.7	-1119.6	-1346.1
3800-3850	0.087	270.2	-43.1	-872.8	-1581.5	-2033.7
3742-3800	0.056	113.2	-186.6	-1054.8	-1856.1	-2442.1
3742-4267	1.086	271.5	182.7	-40	-584.5	-707.5



图 2 1号冰川 2006/07 年度冬平衡等值线图

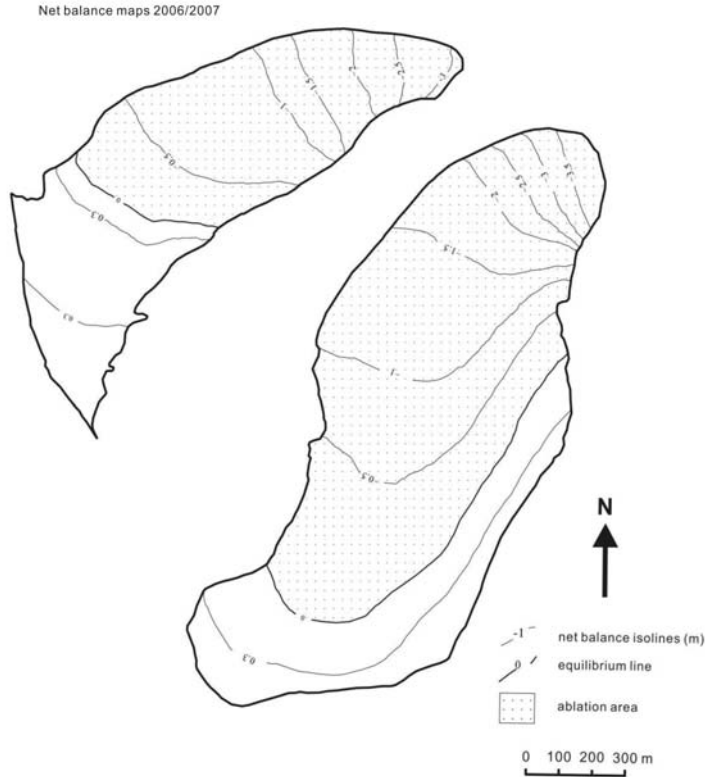


图3 1号冰川2006/07年度物质净平衡等值线图

3 气候状况

根据大西沟气象站气象资料统计, 2006/07年度(8~9月)天山乌鲁木齐河源地区年平均气温为 $-3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 比上年同期升高了 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 高出多年平均值 $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$; 本年度除3月、8月的月平均气温较上年稍有下降外, 其余月份均高于上年, 上升幅度在 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (7月)~ $3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (4月)之间。本年度冷季(9~4月)平均气温 $-7.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 比上年同期升高了 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$; 本年度暖季(5~8月)4个月内, 除9月月均温较上年降低 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 外, 其余3个月的月气温均较上年同期有所升高, 升高幅度介于 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (7月)~ $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (5月)之间。

天山乌鲁木齐河源地区本年度降水总量为 617.9 mm , 降水量比上年同期增加了 18.9% 。年度内冷季(9~4月)降水占年度总量的 25.8% , 但比上年同期增加 6.3% , 也多于同期多年平均值 3.7% ; 暖季(5~8月)降水占年度总量的 74.2% , 比上年同期减少 6.3% 。

4 结果比较

本年度1号冰川物质净平衡观测计算结果(-641.5 mm)较上一年度末物质净平衡结果(-795.4 mm)有所减少, 平衡线海拔高度(4074 m)亦比上年平衡线海拔高度(4078 m)有所降低, 但仍处于新近负平衡周期范围。

自 1996 年以来本年度 1 号冰川物质净平衡仍为负平衡年, 与过去 45 年来的物质平衡结果比较, 2006/07 年度是新近负平衡周期内连续出现的第 10 个负平衡年 (杨惠安等, 2005), 如图 4 所示, 这也表明天山乌鲁木齐河源 1 号冰川在现今气候条件下所面临的局面严峻, 令人堪忧。

据气温和降水资料, 2006/07 年度年均温为 -4.6°C , 年内冷季 (9~4 月) 气温平均为 -7.4°C , 比上年同期值高 1.1°C ; 暖季 (5~8 月) 平均气温 2.6°C , 较上年同期值低 1.0°C ; 本年度降水量为 617.9 mm , 比上年同期值偏多 153.2 mm 。天山乌鲁木齐河源 1 号冰川补给期与消融期同步, 虽然降水量较上年偏高 153.2 mm , 气温也较上年有所降低, 但这些变化只是使冰川的物质平衡亏损值有所减少, 并没能扭转整体物质平衡为负的趋势。

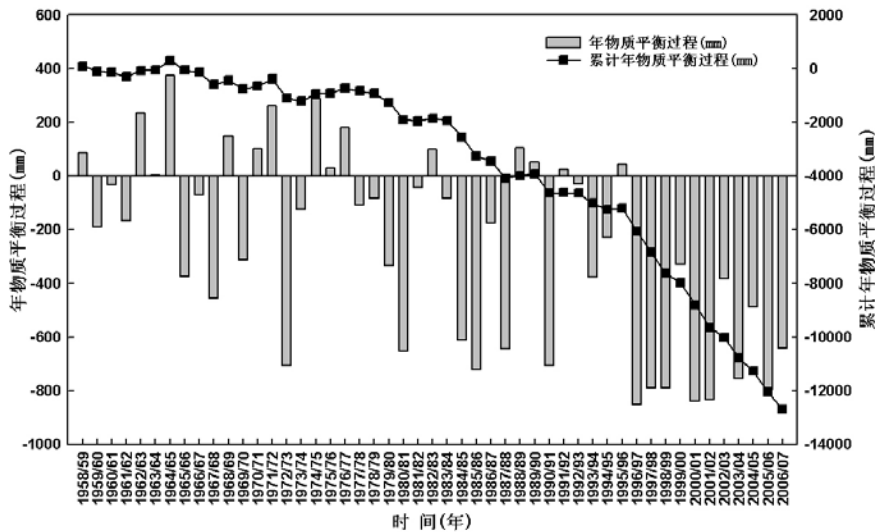


图 4 乌鲁木齐河源 1 号冰川年度物质净平衡和累积年度物质净平衡变化过程

参考文献 (References)

- [1] 施雅风, 苏珍. 天山乌鲁木齐河源冰川的形态特征与历史演变. 天山乌鲁木齐和冰川与水文研究 [C]. 北京: 科学出版社, 1965.83-87
- [2] 谢自楚, 葛广文. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的积累、消融及物质平衡. 天山乌鲁木齐和冰川与水文研究 [C]. 北京: 科学出版社, 1965.14-30
- [3] 杨惠安, 李忠勤, 叶佰生, 等. 中国天山冰川数量的时空分布及其 1959—1992 年间的变化. 中国科学院天山冰川观测试验站年报. 1996-1998 年报, 1999 年 4 月, 15: 1-6.
- [4] YANG Hui-an, LI Zhong-qin, YE Bai-sheng, et al. 2005. Study on Mass Balance and Pprocess of Glaier NO.1 at the Urumqi River in the Past 44 Years. Arid Land Geography. Vol.28, No.1: p76-80. [杨惠安, 李忠勤, 叶佰生, 等. 过去 44 年乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡结果及其过程研究[J]. 干旱区地理, 2005, 28(1): 76-80.]
- [5] Yang Huian. The Extensive Information of Mass Balance of Urumqihe Sources No.1 Glacier in Tianshan of China. Glacier Mass Balance Bulletin No.6, 1998-1999[R], IAHS(ICSI)/UNEP/UNESCO, WGMS/ETH, Zurich. 2001.

- [6] Yang Huian. The Extensive Information of Mass Balance of Urumqihe Sources No.1 Glacier in Tianshan of China. *Glacier Mass Balance Bulletin* No.7, 2000-2001[R], IAHS(ICSU)/UNEP/UNESCO/WMO, WGMS/ETH, Zurich. 2003.
- [7] 杨惠安, 王纯足, 焦克勤, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川1998/99年物质平衡. 中国科学院天山冰川观测试验站年报. 1999-2002年报, 2003年11月, **16**: 75-85.
- [8] 杨惠安, 叶柏生, 焦克勤. 天山乌鲁木齐河源1号冰川1999/2000年物质平衡. 中国科学院天山冰川观测试验站年报. 1999-2002年报, 2003年11月, **16**: 86-92.
- [9] 杨惠安, 李忠勤, 焦克勤. 天山乌鲁木齐河源1号冰川2000—2002年物质平衡. 中国科学院天山冰川观测试验站年报. 1999-2002年报, 2003年11月, **16**: 93-103.
- [10] Yang Huian. The Detailed Information of Mass Balance of Urumqihe Sources No.1 Glacier in Tianshan of China. *Glacier Mass Balance Bulletin* No.8, 2002-2003[R], IUGG(CCS)/UNEP/UNESCO/WMO, WGMS/ETH, Zurich. 2005.
- [11] Yang Huian. The Detailed Information of Mass Balance of Urumqihe Sources No.1 Glacier in Tianshan of China. *Glacier Mass Balance Bulletin* No.9, 2004-2005[R], IAHS(ICSU)/UNEP/UNESCO/WMO, WGMS/ETH, Zurich. 2008.
- [12] 杨惠安, 李忠勤, 焦克勤. 天山乌鲁木齐河源1号冰川2002/03年物质平衡. 中国科学院天山冰川观测试验站年报. 2003-2004年报, 2006年6月, **17**: 176-180.
- [13] 杨惠安, 李忠勤. 天山乌鲁木齐河源1号冰川2003/04年物质平衡. 中国科学院天山冰川观测试验站年报. 2003-2004年报, 2006年6月, **17**: 181-188.
- [14] 杨惠安, 李忠勤. 天山乌鲁木齐河源1号冰川2004/05年物质平衡. 中国科学院天山冰川观测试验站年报. 2005-2006年报, 2009年6月, **18**: 1-9.

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 2007/2008 年度 物质平衡

王文彬, 李忠勤, 李慧林, 杨惠安

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所/天山冰川观测试验站, 甘肃 兰州 730000)

冰川是全球气候变化灵敏的指示器, 冰川物质平衡是连接冰川作用区能量—物质—水交换的纽带, 是引起冰川规模和径流变化的物质基础, 已成为全球气候系统中一个重要的监测和研究对象, 正确认识冰川物质平衡及其变化对研究全球及区域气候变化、冰川水资源、冰川灾害等具有十分重要的科学意义。

2007/08 年度物质平衡观测网点的布设是在上一年观测研究工作的基础上进行的, 即分别在 1 号冰川东支和西支冰川消融区表面, 从冰舌开始自下而上布设 A-I 等各 9 个横剖面, 各横剖面一般在冰面上等距离布设 3 根测杆进行消融期积消量的观测, 积累区资料则以挖取雪坑观测结果获得。图 1 为 2007/08 年 1 号冰川物质平衡观测网点。

Topography and observational work

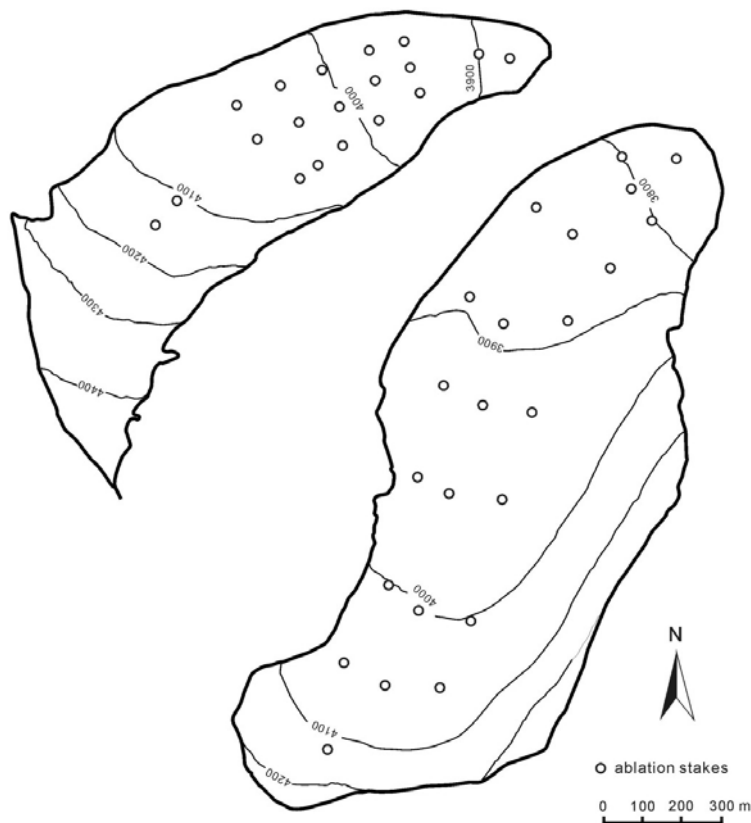


图 1 2007/08 年 1 号冰川物质平衡观测网点

本年度1号冰川物质平衡观测方法与上一年相同, 即从4月末开始观测, 每月底或月初观测一次, 至8月底为最后一次结束年度观测。

1号冰川已解体为相互完全独立的东、西两支, 为了便于与历史资料比较, 1号冰川的零平衡线高度是利用面积加权法求得的。

1 基础观测数据

在观测、统计和计算工作的基础上, 2007/08年度天山乌鲁木齐河源1号冰川及其1号冰川东支、西支物质平衡获得如下若干结果:

(1) 2007/08年度1号冰川东支单点物质平衡观测计算结果(表1);

表1 2007/08年度1号冰川东支单点物质平衡观测计算数据结果(2007/8/30-2008/9/8)

剖面	测杆 (No.)	海拔(m)	纯积消量 (mm)				合计 (mm)
			2007.8.30-2008.6.5	2008.7.3	2008.7.31	2008.9.8	
A	1	3776	-891	-1656	-2877.2	-3579.7	-3579.7
B	B1	3801	-594	-1296	-2367	-2952	-2952
	B2	3801	-468	-1071	-2610	-3222	-3222
	B3	3801	-702	-1323	-2412	-3132	-3132
	平均	3801	-588	-1230	-2463	-3102	-3102
C	C1	3849	-57	-570	-1506	-2156	-2156
	C2	3852	-270	-801	-1770.2	-2482.7	-2482.7
	C3	3847	168	-165	-1114.8	-1323.8	-1323.8
	平均	3849.3	-53	-512	-1463.6	-1987.5	-1987.5
D	D1	3894	66	-321	-1185	-1754	-1754
	D2	3890	-172.5	-672	-1466.5	-1828.5	-1828.5
	D3	3892	385.5	88.5	-605	-818	-818
	平均	3892	93	-301.5	-1085.5	-1466.8	-1466.8
E	E1	3922	156.5	-14.5	-788.5	-1364.5	-1364.5
	E2	3923	63.4	-84	-836	-1139.5	-1139.5
	E3	3923	99	-279	-864	-1179	-1179
	平均	3922.6	106.3	-125.8	-829.5	-1227.6	-1227.6
F	F1	3971	69.5	-173.5	-929.5	-1505.5	-1505.5
	F2	3965	13.5	47.7	-577	-796.5	-796.5
	F3	3966	272	138.5	-280.5	-1019.5	-1019.5
	平均	3967.3	118.3	4.2	-595.6	-1107.2	-1107.2
G	G1	4008	22.5	-31.5	-643.5	-886.5	-886.5
	G2	4004	100.1	28	-643.5	-910	-910
	G3	4003	57.8	125	-103.8	-213.3	-213.3
	平均	4005	60.1	40.5	-463.6	-669.9	-669.9
H	H1 左	4058	137.9	11.3	-175.7	-349.5	-349.5
	H1 右	4058	409.1	422.1	-671.5	-519.3	-519.3
	H2	4043	252.5	123.5	-245.3	-340	-340
	H3	4058	252.4	99.6	-150.8	-454.6	-454.6
	平均	4054.3	263.0	164.1	-310.8	-415.9	-415.9
I	1	4130		-961.1	-1446.2	-1542.2	

(2) 2007/08 年度 1 号冰川西支单点物质平衡观测计算结果 (表 2);

表 2 2007/08 年度 1 号冰川西支单点物质平衡观测计算数据结果 (2007/8/30-2008/9/8)

剖面	测杆 (No.)	海拔(m)	纯积消量 (\pm mm)				合计 (mm)
			2007.8.30-2008.06.05	2008.07.03	2008.07.31	2008.09.08	
A	1	3875	-522	-1359	-2511	-3327.8	-3327.8
BC	1	3900	-595	-1152	-1854	-2385	-2385
D	D1	3953	86.5	-928.5	-1828.5	-2396	-2396
	D2	3953	444	-807	-1464	-1872	-1872
	D3	3953	800	800	485	-107	-107
	平均	3953	443.5	-311.8	-935.8	-1458.3	-1458.3
E	E1	3964		0	6.4	-895.5	-895.5
	E2	3966	-325	-696	-1779	-2337	-2337
	E3	3980	-6	-477	-1053	-1389	-1389
	平均	3970	-165.5	-391	-941.8	-1540.5	-1540.5
F	F1	4000	3	-168	-1968	-2407.8	-2407.8
	F2	4000	90	-129	-819	-1353	-1353
	F3	4019	-114	981	300	147	147
	F'	4019			-672	-1111.8	
	平均	4009.5	-7	228	-789.7	-1181.4	-1181.4
G	G1	4026	247	-168.5	-267	-821.9	-821.9
	G2	4026	539.5	-30	-726	-1023	-1023
	G3	4044	-1884		-2380.3	-2482.3	-2482.3
	平均	4032			-1124.4	-1442.4	-1442.4
H	H1	4050	-654	-201	-2061	-1218	-1218
	H2	4052	47	-183	-855	-1029	-1029
	H3	4054	-1295.5		-580	-783	-783
	平均	4052			-1165.3	-1010	-1010
I	1	4100	1356				

2 冰川物质平衡观测计算结果

(1) 2007/08 年度 1 号冰川冬平衡观测计算结果, 2007 年 9 月 ~ 2008 年 4 月底, 1 号冰川西支冬平衡为+176.0 mm, 1 号冰川东支为+209.1 mm, 原乌鲁木齐河源 1 号冰川冬平衡为+197.4 mm (表 3):

表 3 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 2007/08 年度冬平衡观测计算结果

项 目	平衡线 海 拔 (m)	Bc 纯积累			Ba 纯消融			Bn	
		积累区面 积(km ²)	积累量 (10 ⁴ m ³)	积累深 (mm)	消融区面 积(km ²)	消融量 (10 ⁴ m ³)	消融深 (mm)	总 量 (10 ⁴ m ³)	平衡值 (mm)
1 号东支	3810	1.017	24.4	239.9	0.069	1.69	244.9	22.71	209.1
1 号西支	3930	0.545	11.03	202.4	0.046	0.63	137.0	10.40	176.0
1 号冰川	3870	1.562	35.43	226.8	0.115	2.32	201.7	33.11	197.4

(2) 2007/08 年度 1 号冰川年平衡观测计算结果, 2007 年 8 月 30 日 ~ 2008 年 9 月 8 日为一年观测时间, 1 号冰川西支的年物质平衡为-781.9 mm, 1 号冰川东支为-1117.7 mm, 原乌鲁木齐河源 1 号冰川年物质平衡为-999.3 mm (表 4):

表 4 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 2007/08 年度物质平衡观测计算结果

项 目	平衡线 海 拔 (m)	Bc 纯积累			Ba 纯消融			Bn	
		积累区面 积(km ²)	积累量 (10 ⁴ m ³)	积累深 (mm)	消融区面 积(km ²)	消融量 (10 ⁴ m ³)	消融深 (mm)	总 量 (10 ⁴ m ³)	平衡值 (mm)
1 号东支	4200	0.022	0.07	31.8	1.064	121.45	1141.4	-121.38	-1117.7
1 号西支	4185	0.185	1.63	88.1	0.406	47.84	1178.3	-46.21	-781.9
1 号冰川	4192	0.207	1.70	82.1	1.47	169.29	1151.6	-167.59	-999.3

3 物质平衡等值线图

(1) 2007/08 年冬平衡等值线图 (图 2)

(2) 2007/08 年度平衡等值线图 (图 3)

4 各高度带物质平衡

表 5、6 根据本年度最新的测量结果, 量算了原 1 号冰川现 1 号冰川西支和 1 号冰川东支各高度带的冰川面积, 并整理了冬平衡和年平衡期末的物质平衡数据 (表 5; 表 6)。

表 5 1 号冰川西支 2007/08 年度各高度带冰川面积及物质平衡

海拔高度 区间(m)	冰川面积 (km ²)	观测时间 (年/月/日)				
		2008.5.1	2008.6.5	2008.7.3	2008.7.31	2008.9.8
4450-4484	0.008	142.2	206.7	232.7	150.7	35.5
4400-4450	0.021	158.8	229.6	257	177.3	56.8
4350-4400	0.033	179.3	258.1	287.6	212.5	80.4
4300-4350	0.043	201.1	288.2	318.7	237.7	93.4
4250-4300	0.034	224.1	320.2	352.2	268.6	111.1
4200-4250	0.031	247.8	351.5	384.6	283.9	111.2
4150-4200	0.035	252.8	356.4	373.6	174.6	-21.1
4100-4150	0.051	248	348.3	173.7	-133.6	-314.1
4050-4100	0.114	225.7	129	-136.2	-498.8	-753.9
4000-4050	0.09	209.4	127.9	-135	-625.7	-1110.6
3950-4000	0.067	142.7	-26.6	-445.3	-1194.6	-1709.3
3900-3950	0.039	-16.3	-244.7	-909.3	-1700.8	-2212.7
3845-3900	0.025	-213.1	-580.2	-1174.2	-2221.8	-2960.1
3845-4484	0.591	176	135	-77.9	-466.5	-781.9

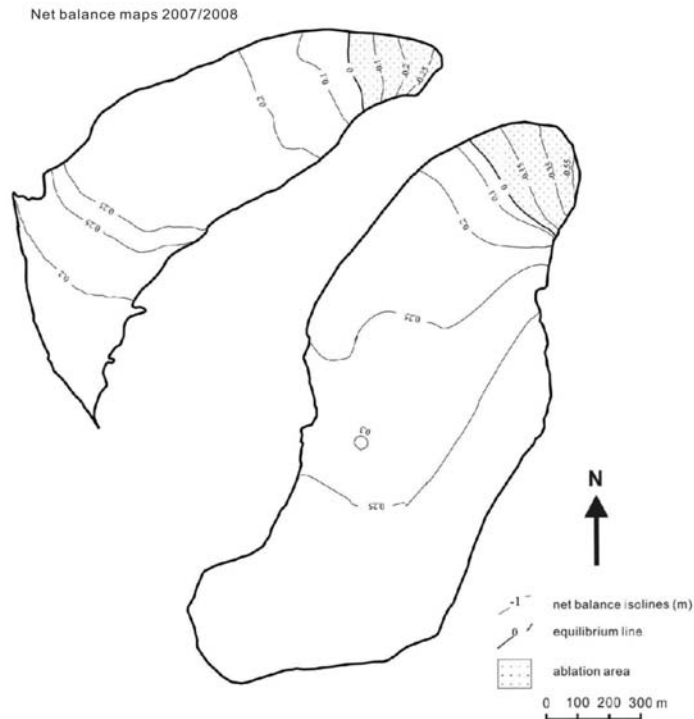


图 2 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 2007/08 年冬平衡等值线图

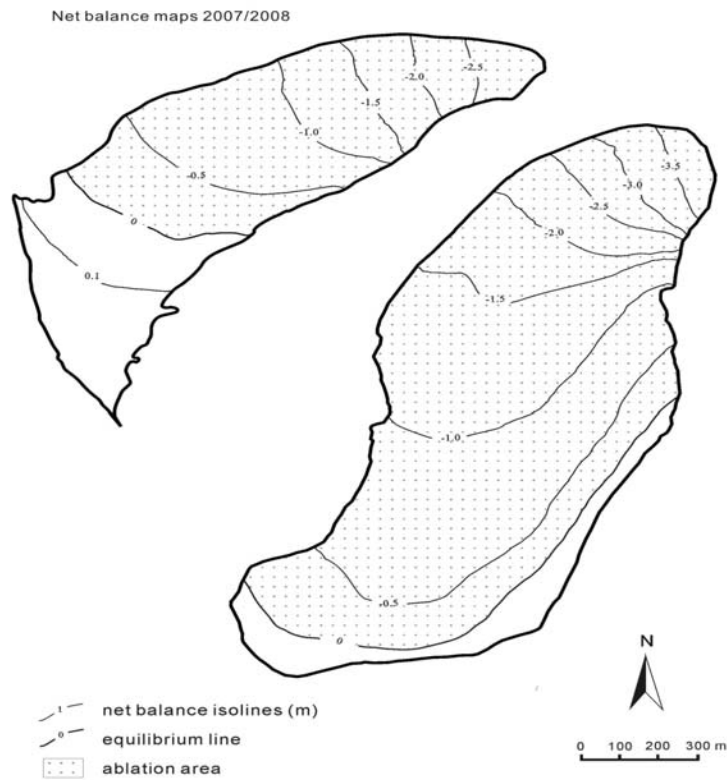


图3 乌鲁木齐河源1号冰川2007/08年度物质平衡等值线图

表6 1号冰川东支2007/08年度各高度带冰川面积及物质平衡

海拔高度 区间(m)	冰川面积 (km ²)	观测时间 (年/月/日)				
		2008.5.1	2008.6.5	2008.7.3	2008.7.31	2008.9.8
4200-4267	0.032	239	345	394.8	211.9	18
4150-4200	0.076	233.8	335.6	326	66.8	-180.2
4100-4150	0.076	235.6	336.1	238	-90.1	-380.8
4050-4100	0.094	244.5	319.4	181.1	-205.3	-479.4
4000-4050	0.171	242.5	158.5	91.7	-407	-569.7
3950-4000	0.163	269.6	99.8	10.1	-554.9	-949.3
3900-3950	0.212	258.7	112.9	-132.6	-836.3	-1243.9
3850-3900	0.119	225.6	34.4	-363.2	-1204.5	-1635.2
3800-3850	0.087	120.4	-312.3	-806.9	-1899.8	-2490.6
3742-3800	0.056	-300.2	-875.5	-1503	-2871.1	-3563.4
3742-4267	1.086	209.1	80.4	-125.1	-756	-1117.7

5 2007/08 年物质平衡结果

(1) 1号冰川 2007/08 年净物质平衡为-999.3 mm 和 $-167.59 \times 10^4 \text{ m}^3$ 水当量, 冰川平衡线海拔 4192 m, 积累区面积为 0.207 km^2 , 消融区面积 1.47 km^2 ; 2007/08 年度冬平衡为+197.4 mm 和 $+33.11 \times 10^4 \text{ m}^3$ 水当量; 冰川平衡线海拔 3870 m。

(2) 1号冰川西支 2007/08 年净物质平衡为-781.9 mm 和 $-46.21 \times 10^4 \text{ m}^3$ 水当量, 冰川平衡线海拔 4185 m, 积累区面积为 0.185 km^2 , 消融区面积为 0.406 km^2 ; 本年度冬平衡为+176.0 mm 和 $+10.40 \times 10^4 \text{ m}^3$ 水当量; 冰川平衡线海拔 3930 m。

(3) 1号冰川东支 2007/08 年净物质平衡为-1117.7 mm 和 $-121.38 \times 10^4 \text{ m}^3$ 水当量, 冰川平衡线海拔 4200 m, 积累区面积为 0.022 km^2 , 消融区面积为 1.47 km^2 ; 本年度冬平衡为+209.1 mm 和 $+22.71 \times 10^4 \text{ m}^3$ 水当量; 冰川平衡线海拔 3810 m。

6 年净物质平衡对比

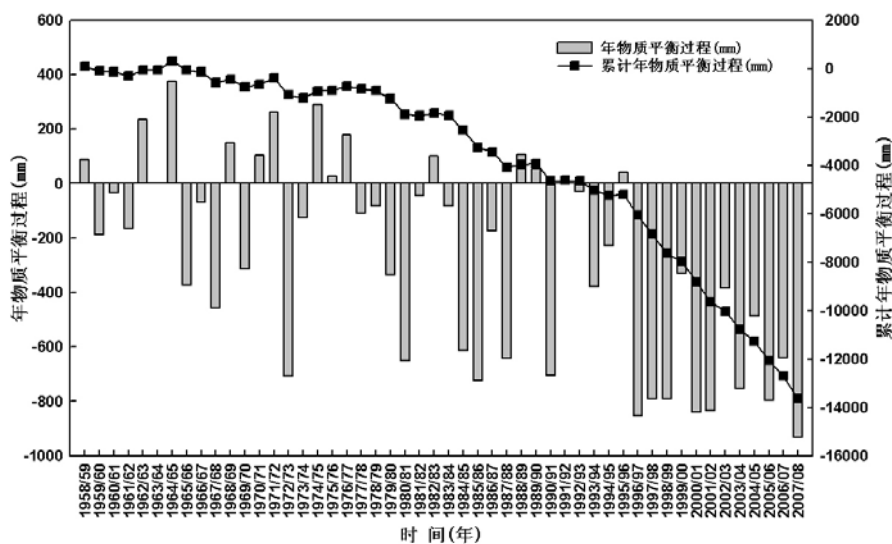


图 4 1号冰川年物质净平衡过程与累计年净平衡比较

自 1959 年起, 中国天山乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡观测研究始观测就以一个积累—消融年度观测资料计算获得年净 (纯) 物质平衡 (谢自楚等, 1965)。本年度 1 号冰川物质平衡观测计算结果 (-999.3 mm) 较上一年度末结果 (-641.5 mm) 有所减少, 平衡线海拔高度 (4192 m) 比上年度 (4074 m) 有明显升高, 与过去 45 年来的物质平衡结果比较, 自 1996 年以来, 本年度 1 号冰川物质净平衡仍为负平衡年, 2007/08 年度是新近负平衡周期内连续出现的第 11 个负平衡年 (杨惠安等, 2006), 如图 4 所示, 这种长时期连续物质亏损状态对天山乌鲁木齐河源 1 号冰川是一个严峻的考验。出现这种状况是由于乌鲁木齐河源 1 号冰川大陆性冰川性质所决定的, 加之全球变暖趋势的发展, 原乌鲁木齐河源 1 号冰川面积的萎缩和年物质平衡的加剧趋势也是不可避免的 (图 4)。

参考文献 (References)

- [1] Yang Huian, Detailed Information Mass Balance 2003/2004 and 2004/2005 of the Urumqi River Source Glacier No. 1, Tianshan, China. Glacier Mass Balance Bulletin. Bulletin N o. 9(2004 -2005). ICSU(FAGS) – IUGG(IACS)-UNEP-UNESCO-WMO, 2007.
- [2] 谢自楚, 葛光文. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的积累、消融及物质平衡. 天山乌鲁木齐河冰川与水文研究 [C], 北京: 科学出版社. 1965. 14-24.
- [3] 施雅风, 苏珍. 天山乌鲁木齐河源冰川的形态特征与历史演变. 天山乌鲁木齐和冰川与水文研究 [C]. 北京: 科学出版社, 1965.83-87
- [4] 谢自楚, 葛广文. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的积累、消融及物质平衡. 天山乌鲁木齐和冰川与水文研究 [C]. 北京: 科学出版社, 1965.14-30
- [5] 杨惠安, 李忠勤, 叶佰生, 等. 中国天山冰川数量的时空分布及其 1959—1992 年间的变化. 中国科学院天山冰川观测试验站年报.1996-1998 年报, 1999 年 4 月, **15**: 1-6.
- [6] YANG Hui-an,LI Zhong-qin,YE Bai-sheng, et al.2005.Study on Mass Balance and Pprocess of Glaier NO.1 at the Urumqi River in the Past 44 Years. Arid Land Geography. Vol.28,No.1: p76-80. [杨惠安, 李忠勤, 叶佰生, 等. 过去 44 年乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡结果及其过程研究[J]. 干旱区地理, 2005, **28**(1): 76-80.]
- [7] Yang Huian The Extensive Information of Mass Balance of Urumqihe Sources No.1 Glacier in Tianshan of China. Glacier Mass Balance Bulletin No.6, 1998-1999[R], IAHS(ICSU)/UNEP/UNESCO, WGMS/ETH, Zurich. 2001.
- [8] Yang Huian. The Extensive Information of Mass Balance of Urumqihe Sources No.1 Glacier in Tianshan of China. Glacier Mass Balance Bulletin No.7, 2000-2001[R], IAHS(ICSU)/UNEP/UNESCO/WMO, WGMS/ETH, Zurich. 2003.
- [9] 杨惠安, 王纯足, 焦克勤, 等.天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 1998/99 年物质平衡.中国科学院天山冰川观测试验站年报.1999-2002 年报, 2003 年 11 月, **16**: 75-85.
- [10] 杨惠安, 叶柏生, 焦克勤. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 1999/2000 年物质平衡.中国科学院天山冰川观测试验站年报. 1999-2002 年报, 2003 年 11 月, **16**: 86-92.
- [11] 杨惠安, 李忠勤, 焦克勤. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 2000—2002 年物质平衡.中国科学院天山冰川观测试验站年报. 1999-2002 年报, 2003 年 11 月, **16**: 93-103.
- [12] Yang Huian. The Detailed Information of Mass Balance of Urumqihe Sources No.1 Glacier in Tianshan of China. Glacier Mass Balance Bulletin No.8, 2002-2003[R], IUGG(CCS)/UNEP/UNESCO/WMO, WGMS/ETH, Zurich. 2005.
- [13] Yang Huian. The Detailed Information of Mass Balance of Urumqihe Sources No.1 Glacier in Tianshan of China. Glacier Mass Balance Bulletin No.9, 2004-2005[R], IAHS(ICSU)/UNEP/UNESCO/WMO, WGMS/ETH, Zurich. 2008.
- [14] Baisheng Ye, Daqing Yang, Keqin Jiao, Tianding Han, Zhfan Jin, Huian Yang, and Zhongqin Li. The Urumqi River Source Glacier No.1, Tianshan, China: Changes over past 45 years. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL.32, L21504, doi:10.1029/2005GL024178, 2005.
- [15] 杨惠安, 李忠勤, 焦克勤. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 2002/03 年物质平衡. 中国科学院天山冰川观测试验站年报. 2003-2004 年报, 2006 年 6 月, **17**: 176-180.

-
- [16] 杨惠安, 李忠勤. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 2003/04 年物质平衡. 中国科学院天山冰川观测试验站年报. 2003-2004 年报, 2006 年 6 月, **17**: 181-188.
- [17] 杨惠安, 李忠勤. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 2004/05 年物质平衡. 中国科学院天山冰川观测试验站年报. 2005-2006 年报, 见本年报 (第 18 卷).

天山冰川观测试验站水文气象资料整编说明 (2007)

韩添丁, 金爽

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所/天山冰川观测实验站, 甘肃 兰州 730000)

天山冰川观测试验站的常规水文、气象观测在乌鲁木齐河源区的1号冰川水文点、空冰斗水文点、总控制水文点以及后峡基本营地进行, 本文为2007年度资料整编结果报告。

1号冰川水文点设在离1号冰川末端300 m的河道上, 实施1号冰川冰雪径流的监测, 断面海拔3695 m, 流域面积3.34 km², 其中冰川面积1.677 km²。为混凝土矩形断面(高1.0 m, 宽1.6 m), 气象场设在断面左岸。

空冰斗水文点设在乌鲁木齐河源区左侧, 斗口朝南, 进行高山区积雪、多年冻土融水径流的观测, 断面海拔3805 m, 流域面积1.68 km², 为混凝土矩形断面(高1.0 m, 宽1.0 m), 气象场设在断面右岸。

在乌鲁木齐河源区大西沟和罗布道沟汇合处, 设有总控制水文点, 控制监测乌鲁木齐河源区降水和7条冰川以及冰川周围高山积雪、多年冻土的总融水径流; 该控制端面海拔3408 m, 流域面积28.9 km²; 其中冰川面积5.6 km²。为混凝土断面, 设有工作桥, 气象场设在断面左岸冰碛丘上。

三个水文断面均装有自计水位计, 测流主要用流速仪法, 即时流量由水位—流量关系线求得。气象观测项目主要为气温、降水、湿度、蒸发、地温、日照等。后峡基本营地气象观测场位于乌鲁木齐河谷, 海拔2130 m, 进行常规气象要素观测。所有观测资料均按规范进行整理(附表)。

表 1 乌鲁木齐河源 1 号冰川水文点逐日平均流量表 (流量: m³/s)

日月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1							0.225	0.420				
2							0.290	0.535				
3							0.290	0.580				
4							0.225	0.400				
5							0.270	0.400				
6							0.290	0.490				
7							0.445	0.400				
8							0.465	0.445				
9							0.490	0.510				
10							0.270	0.605				
旬总数							3.260	4.785				
旬平均							0.326	0.479				
11							0.290	0.555				
12							0.445	0.245				
13							0.535	0.225				
14							0.510	0.200				
15							0.400	0.200				
16							0.225	0.180				
17							0.225	0.180				
18							0.225	0.180				
19							0.270	0.155				
20							0.310	0.135				
旬总数							3.435	2.255				
旬平均							0.344	0.226				
21							0.310	0.555				
22							0.810	0.245				
23							0.920	0.225				
24							0.920	0.200				
25							0.920	0.200				
26						0.375	0.920	0.180				
27						0.375	0.625	0.180				
28						0.400	0.805	0.180				
29						0.245	0.510	0.155				
30						0.245	0.465	0.135				
31							0.555	0.225				
旬总数						1.640	7.760	2.480				
旬平均						0.164	0.705	0.225				
总数						1.640	14.455	9.520				
平均						0.055	0.466	0.307				
最大						1.020	1.900	1.480				
日期						28	26	11				
最小						0	0.115	0.135				
日期						1-25	6	12				
年总数	25.615	最大流量 1.9 7月26日					最小流量 0 5月1日			平均流量 0.208		
年统计	径流量 2.21E+06 m ³			径流模数 62.35 L/(s·km ²)			径流深度 663 mm					

表 2 乌鲁木齐河源 1 号冰川水文点逐日平均气温表 (气温: °C)

日\月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1	-15.1	-5.1	-18.6	-9.4	0.6	2.4	2.5	6.5	3.7	-6.5	-3.8	-12.1
2	-17.6	-7.0	-17.9	-9.5	2.6	1.6	3.0	7.4	4.5	-5.0	-6.1	-10.7
3	-24.8	-7.8	-15.9	-13.0	4.7	4.2	2.5	5.6	3.7	-4.2	-6.2	-9.8
4	-19.7	-10.3	-15.9	-9.8	4.6	5.5	1.4	2.3	2.2	-8.8	-5.2	-11.2
5	-18.5	-12.8	-15.2	-10.0	0.8	5.6	4.0	2.7	1.3	-9.6	-5.1	-10.1
6	-21.1	-12.4	-18.0	-9.1	0.4	1.9	4.3	6.0	-2.8	-7.3	-5.1	-10.1
7	-15.0	-11.4	-19.0	-6.8	0.8	5.2	6.2	4.4	1.1	-4.2	-4.7	-10.7
8	-11.2	-11.4	-18.7	-4.8	0.7	4.6	6.5	3.4	2.4	-5.4	-4.5	-16.9
9	-13.7	-10.2	-14.8	-4.6	-9.6	2.2	4.2	5.6	-0.7	-7.4	-3.2	-17.4
10	-15.5	-10.4	-12.7	-4.6	-5.7	4.7	1.3	8.3	-2.5	-8.1	-7.2	-16.0
旬总数	-172.0	-98.7	-166.6	-81.5	-0.2	37.8	35.7	52.2	12.7	-66.4	-51.0	-124.8
旬平均	-17.2	-9.9	-16.7	-8.2	0.0	3.8	3.6	5.2	1.3	-6.6	-5.1	-12.5
11	-15.1	-11.0	-14.8	-4.3	0.5	4.2	4.1	10.5	0.4	-7.1	-8.6	-16.2
12	-17.3	-9.0	-13.6	-4.3	4.0	2.1	6.5	6.1	4.1	-7.2	-8.0	-17.2
13	-19.9	-10.8	-12.4	-3.0	-0.7	2.1	7.0	-2.4	4.5	-6.0	-9.8	-17.6
14	-19.2	-12.8	-14.3	1.0	-2.7	0.8	6.2	2.2	2.6	-4.8	-10.3	-16.9
15	-19.0	-14.4	-15.8	1.2	1.1	-1.8	2.8	2.4	-2.6	-4.9	-8.8	-19.0
16	-17.5	-16.1	-14.1	-1.0	5.7	-2.0	0.9	1.7	1.3	-3.1	-11.0	-20.3
17	-17.6	-17.1	-12.7	3.9	6.3	-3.6	0.4	0.5	5.1	-3.7	-13.7	-19.2
18	-15.3	-15.6	-37.8	-0.4	3.5	-1.1	0.9	2.0	3.1	-3.8	-13.8	-15.9
19	-15.1	-14.2	-4.4	-2.0	-0.4	-1.4	4.6	4.9	4.8	-3.1	-9.9	-14.3
20	-19.0	-17.4	-3.1	-1.9	0.2	3.5	8.5	6.5	4.9	-4.6	-9.6	-13.4
旬总数	-174.9	-138.4	-143.0	-10.8	17.5	2.8	41.8	34.3	28.0	-48.2	-103.4	-170.0
旬平均	-17.5	-13.8	-14.3	-1.1	1.8	0.3	4.2	3.4	2.8	-4.8	-10.3	-17.0
21	-22.1	-14.2	-6.9	-3.2	-4.4	5.9	9.9	3.7	2.4	-5.2	-10.4	-12.4
22	-24.6	-11.1	-10.6	-9.0	-9.6	5.3	7.8	-1.1	-1.1	-10.3	-8.4	-13.4
23	-15.6	-13.8	-10.5	-7.5	-3.8	4.4	8.4	4.3	-3.3	-8.4	-6.3	-12.8
24	-14.4	-9.2	-12.8	-6.2	-0.3	6.2	9.7	5.9	-5.1	-6.5	-15.2	-14.6
25	-16.8	-8.4	-10.6	-6.4	0.5	6.3	8.2	4.3	-1.9	-9.2	-13.0	-16.2
26	-12.2	-8.5	-6.5	-6.8	0.1	3.3	7.6	4.3	-0.2	-13.2	-9.5	-18.0
27	-10.7	-8.1	-4.0	0.9	1.9	4.3	7.8	3.2	-1.6	-10.9	-9.9	-23.6
28	-9.2	-14.8	-2.1	1.9	-0.9	6.4	4.5	3.1	-4.3	-12.9	-9.7	-19.9
29	-8.3		-8.8	1.6	-3.4	4.9	2.0	4.6	-2.6	-15.2	-9.1	-24.3
30	-9.0		-8.9	4.2	2.6	1.2	5.8	3.2	-3.8	-9.8	-10.1	-24.8
31	-6.3		-11.8		4.1		7.7	4.2		-5.2		-22.4
旬总数	-149.0	-88.0	-93.4	-30.5	-13.1	48.1	79.3	39.7	-21.5	-106.8	-101.4	-202.2
旬平均	-13.5	-11.0	-8.5	-3.0	-1.2	4.8	7.2	3.6	-2.2	-9.7	-10.1	-18.4
月总数	-495.9	-325.1	-402.9	-122.8	4.2	88.7	156.8	126.2	19.2	-221.4	-255.9	-497.0
月平均	-16.0	-11.6	-13.0	-4.1	0.1	3.0	5.1	4.1	0.6	-7.1	-8.5	-16.0
最高	1.0	0.0	3.0	10.5	13.8	12.2	15.9	16.4	11.5	2.6	1.3	-4.6
日期	31	1	20	17	16	24	23	11	17	17	9	1
最低	-29.1	-21.0	-22.5	-17.2	-13.1	-8.6	-3.0	-4.8	-8.6	-16.0	-18.1	-32.0
日期	22	17	1	3	23	17	29	13	25	26	24	27
年统计	最高 16.4 8月 11日				最低 -32.0 12月 27日				年平均 -5.3			

表3 乌鲁木齐河源1号冰川水文点逐日降水量表 (降水量: mm)

日月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1					0.7							
2					2.4	1.7		4.8				
3						3.2		5.0				
4												
5							0.8					
6					0.9	0.3	1.5					
7					2.3		0.5	1.6				
8					0.8	3.8	0.9					
9						3.5	7.3	11.4				
10					0.2		25.4					
11							1.5					
12							5.9	7.7				
13							3.0					
14					2.8	5.6	5.2					
15							2.3	24.3				
16							1.0	3.4				
17							16.7	15.6				
18							7.1	4.8				
19					0.3	7.8						
20					0.5	1.0						
21					14.9			2.4				
22					8.6			8.3				
23					0.4	1.5						
24							5.0					
25					0.3	0.3						
26					0.6	2.0		3.5				
27					0.6	4.3						
28					6.5		6.4	1.3				
29					3.7	0.0						
30							10.1					
31								4.9				
总量					46.5	86.1	105.3	43.2				
降水 日数					17	21	14	9				
最大 降水量					14.9	16.7	25.4	11.4				
日期					21	17	10	9				
年统计	降水量 281.1					降水日数 61						

表4 乌鲁木齐河源1号冰川水文点逐日平均相对湿度表（相对湿度：%）

日月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1					50	77	75	66				
2					15	66	70	90				
3					0	66	69	88				
4					10	52	84	90				
5					40	65	60	85				
6					37	94	82	62				
7					76	73	69	85				
8					67	88	78	80				
9					99	69	92	73				
10					69	43	90	55				
旬总数					461	692	768	773				
旬平均					46	69	77	77				
11					62	65	88	43				
12					52	84	66	73				
13					77	87	74	73				
14					52	90	83	39				
15					27	82	73	63				
16					43	71	86	87				
17					54	79	80	86				
18					59	85	93	65				
19					92	93	73	42				
20					80	53	50	54				
旬总数					596	787	765	623				
旬平均					60	79	77	62				
21					99	51	51	85				
22					87	63	72	78				
23					38	65	62	39				
24					51	57	52	45				
25					62	64	65	59				
26					77	81	57	60				
27					72	49	56	77				
28					85	55	83	59				
29					68	75	60	64				
30					41	76	40	82				
31					45		53	56				
旬总数					722	635	649	702				
旬平均					66	63	59	64				
月总数					1779	2114	2181	2098				
月平均					57	70	70	68				
最小					14	22	19	14				
日期					7	27	20	23				

附注：相对湿度只在5-8月冰川消融期观测

表 5 乌鲁木齐河源空冰斗水文点逐日平均流量表 (流量: m^3/s)

日/月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1					0.030	0.060	0.051	0.030				
2					0.030	0.051	0.051	0.051				
3					0.046	0.046	0.039	0.088				
4					0.039	0.051	0.039	0.141				
5					0.060	0.051	0.030	0.296				
6					0.051	0.051	0.039	0.163				
7					0.030	0.046	0.039	0.141				
8					0.015	0.051	0.039	0.118				
9					0.030	0.068	0.095	0.118				
10					0.008	0.060	0.193	0.095				
旬总数					0.338	0.537	0.616	1.241				
旬平均					0.034	0.054	0.062	0.124				
11					0.022	0.046	0.154	0.088				
12					0.051	0.068	0.180	0.118				
13					0.039	0.060	0.141	0.202				
14					0.022	0.068	0.141	0.163				
15					0.039	0.060	0.258	0.163				
16					0.046	0.039	0.088	0.118				
17					0.060	0.060	0.060	0.095				
18					0.060	0.039	0.068	0.088				
19					0.060	0.060	0.129	0.095				
20					0.046	0.088	0.141	0.141				
旬总数					0.447	0.589	1.360	1.271				
旬平均					0.045	0.059	0.136	0.127				
21					0.046	0.118	0.129	0.154				
22					0.022	0.068	0.118	0.068				
23					0.015	0.046	0.088	0.141				
24					0.118	0.051	0.077	0.118				
25					0.106	0.030	0.060	0.095				
26					0.077	0.039	0.060	0.088				
27					0.068	0.046	0.051	0.077				
28					0.051	0.046	0.022	0.068				
29					0.039	0.051	0.180	0.060				
30					0.077	0.051	0.118	0.060				
31					0.077		0.039	0.060				
旬总数					0.696	0.547	0.943	0.989				
旬平均					0.063	0.055	0.086	0.090				
总数					1.482	1.674	2.919	3.501				
平均					0.048	0.055	0.093	0.112				
最大					0.180	0.281	0.359	0.433				
日期					24	20	15	5				
最小					0.000	0.000	0.008	0.022				
日期					1	1	5	22				
年统计	年总数	9.576	最大流量	0.359	7月15日	最小流量	0	5月1日	平均流量	0.078		
	径流量	8.27E+05 m^3	径流模数	46.3 $\text{L}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$		径流深度	492 mm					

表6 乌鲁木齐河源空冰斗水文点逐日平均气温表 (气温: °C)

日月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1	-15.3	-3.8	-17.1	-7.2	-0.7	1.0	1.3	6.4	2.6	-7.6	-5.3	-9.2
2	-17.7	-6.0	-17.2	-7.7	1.8	0.4	2.1	5.2	4.0	-4.3	-7.7	-9.9
3	-25.5	-8.7	-15.3	-10.4	4.6	3.3	1.8	5.5	2.8	-4.1	-7.4	-10.1
4	-20.3	-10.2	-14.8	-7.9	5.1	4.8	0.3	2.2	1.1	-6.7	-5.1	-12.4
5	-17.6	-13.1	-14.9	-8.7	0.6	4.7	3.6	1.7	0.8	-10.5	-6.8	-9.5
6	-19.4	-12.5	-17.5	-8.2	2.1	1.8	4.4	5.1	-3.3	-8.1	-5.4	-10.4
7	-15.0	-11.2	-17.4	-5.1	0.1	4.5	6.4	3.7	-0.2	-4.8	-5.6	-10.8
8	-11.5	-8.7	-18.8	-3.9	0.5	4.1	7.3	3.4	1.6	-6.1	-5.2	-16.6
9	-13.4	-10.0	-17.0	-3.6	-9.4	1.4	4.1	5.3	-1.7	-8.2	-4.7	-16.9
10	-15.3	-10.0	-12.4	-4.1	-5.6	3.4	1.2	8.2	-3.3	-8.9	-8.2	-14.4
旬总数	-170.9	-94.2	-162.4	-66.7	-1.1	29.3	32.5	46.8	4.4	-69.0	-61.3	-120.1
旬平均	-17.1	-9.4	-16.2	-6.7	-0.1	2.9	3.2	4.7	0.4	-6.9	-6.1	-12.0
11	-15.4	-11.0	-14.3	-3.6	0.5	2.9	4.3	8.9	-0.4	-8.0	-9.9	-15.5
12	-17.6	-13.6	-13.8	-4.3	3.8	1.5	6.0	5.8	3.3	-6.7	-9.8	-16.5
13	-19.0	-10.4	-12.3	-3.2	-0.9	1.9	6.5	-2.1	3.9	-7.3	-11.3	-16.8
14	-18.1	-13.0	-14.0	0.6	-1.6	-0.2	6.3	2.4	2.5	-8.0	-10.9	-16.3
15	-17.9	-14.5	-15.6	0.5	3.6	-2.6	1.8	2.4	-3.2	-5.9	-9.1	-18.7
16	-16.6	-16.2	-14.0	-0.9	5.6	-3.2	0.3	0.0	-0.1	-4.6	-11.6	-19.5
17	-16.6	-16.4	-12.3	3.9	7.1	-5.0	0.1	-0.1	4.2	-4.3	-14.0	-19.0
18	-14.2	-14.9	-8.1	-2.7	3.8	-2.8	1.1	1.2	2.5	-4.4	-14.2	-16.3
19	-14.6	-13.6	-4.7	-2.6	-0.9	-2.4	4.3	3.4	3.6	-5.2	-10.7	-14.2
20	-19.5	-7.0	-3.2	-1.9	0.4	0.2	8.2	4.8	3.9	-5.9	-11.2	-13.4
旬总数	-169.4	-130.5	-112.1	-14.1	21.3	-9.8	38.8	26.7	20.2	-60.3	-112.5	-166.0
旬平均	-16.9	-13.0	-11.2	-1.4	2.1	-1.0	3.9	2.7	2.0	-6.0	-11.3	-16.6
21	-17.0	-9.4	-6.6	-4.6	-4.2	3.1	9.3	3.5	3.8	-6.9	-10.0	-12.0
22	-23.7	-10.7	-10.4	-9.1	-8.3	3.9	7.8	-1.4	-1.3	-11.8	-8.5	-13.3
23	-16.1	-13.7	-10.3	-7.7	-2.4	3.6	7.5	3.2	-4.5	-10.4	-7.5	-12.2
24	-14.2	-9.3	-12.3	-6.4	-1.1	5.2	8.9	3.6	-7.4	-8.1	-15.3	-14.3
25	-17.3	-8.4	-13.6	-6.6	-1.3	5.3	5.2	3.1	-3.3	-9.8	-12.7	-15.8
26	-12.8	-8.8	-6.6	-6.6	-0.8	3.1	6.6	2.8	-2.3	-13.8	-9.6	-17.3
27	-10.1	-7.6	-4.3	1.4	0.5	3.7	7.8	2.7	-2.5	-11.8	-10.3	-22.3
28	-7.9	-13.5	-2.0	0.4	-3.9	5.0	3.1	1.4	-5.3	-13.7	-9.7	-19.0
29	-7.6		-6.7	1.0	-6.0	4.0	2.0	3.8	-3.8	-12.6	-8.4	-23.4
30	-7.4		-7.3	2.8	0.7	0.6	4.6	2.7	-4.8	-9.9	-8.4	-23.8
31	-6.9		-9.8		3.2		6.5	3.5		-6.4		-21.1
旬总数	-141.0	-81.4	-89.7	-35.4	-23.5	37.4	69.2	28.7	-31.2	-115.1	-100.4	-194.4
旬平均	-12.8	-10.2	-8.2	-3.5	-2.1	3.7	6.3	2.6	-3.1	-10.5	-10.0	-17.7
月总数	-481.3	-306.0	-364.3	-116.1	-3.2	56.9	140.4	102.2	-6.6	-244.3	-274.2	-480.5
月平均	-15.5	-10.9	-11.8	-3.9	-0.1	1.9	4.5	3.3	-0.2	-7.9	-9.1	-15.5
最高	-3.0	-0.5	3.0	8.8	13.8	10.8	13.9	14.1	10.0	2.8	2.7	-4.9
日期	29	1	20	17	16	25	23	11	19	12	4	1
最低	-27.0	-21.5	-21.1	-14.1	-11.4	-9.0	-2.4	-5.0	-11.1	-16.2	-18.1	-30.3
日期	22	5	7	3	9	17	1	13	24	29	24	27
年统计	最高 14.1 8月23日			最低-30.3 12月27日			年平均 -5.4					

表 7 乌鲁木齐河源空冰斗水文点逐日降水量表 (降水量: mm)

日月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1												
2						1.2						
3						1.8		5.0				
4												
5							1.0					
6							1.3					
7							1.0	1.6				
8						2.5	1.1	11.4				
9						3.0	6.3					
10							28.4					
11							2.2					
12						3.6	5.3					
13						2.2						
14						5.6	4.6					
15						2.2	19.6					
16						1.5	1.0					
17						12.8	18.9					
18						5.8	4.8					
19						5.4	0.1					
20								2.4				
21								1.4				
22												
23						1.0						
24						3.7						
25						0.2						
26						1.8		3.8				
27						4.2		2.0				
28							5.1					
29							21.3					
30						9.8		4.7				
31												
总量					0.0	68.3	122.0	32.3				
降水 日数						18	16	8				
最大 降水量					0.0	12.8	28.4	11.4				
日期						17	10	8				
年统计	降水量 222.6					降水日数 42						

表 8 乌鲁木齐河源空冰斗水文点逐日平均相对湿度表 (%)

日月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1					91	71	71	64				
2					28	64	64	77				
3					41	60	67	78				
4					63	52	85	89				
5					93	66	60	79				
6					43	93	76	64				
7					72	56	70	91				
8					67	77	77	80				
9					71	68	93	67				
10					42	41	87	55				
旬总数					608	647	749	743				
旬平均					61	65	75	74				
11					42	47	82	47				
12					34	67	65	75				
13					79	83	80	66				
14					53	87	81	33				
15					22	78	80	62				
16					37	67	91	93				
17					49	75	90	84				
18					60	79	97	69				
19					97	88	71	47				
20					86	54	43	52				
旬总数					559	725	780	628				
旬平均					56	72	78	63				
21					95	48	44	84				
22					83	53	81	63				
23					34	63	58	40				
24					58	56	50	52				
25					70	65	68	63				
26					80	77	57	62				
27					74	49	60	65				
28					86	51	88	73				
29					70	71	64	62				
30					38	68	41	85				
31					40		52	49				
旬总数					725	601	662	698				
旬平均					66	60	60	63				
月总数					1892	1972	2191	2069				
月平均					61	66	71	67				
最小					11	17	16	18				
日期					2	10	20	23				

附注：相对湿度只在 5-8 月冰川消融期观测

表9 乌鲁木齐河源总控水文点逐日平均流量表 (m³/s)

日月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1					0.38	0.70	1.15	2.46				
2					0.38	0.70	1.15	0.93				
3					0.49	0.74	1.15	1.57				
4					0.38	0.93	1.09	1.81				
5					0.74	1.20	1.15	1.81				
6					0.74	1.20	1.15	1.28				
7					0.70	1.20	1.46	0.93				
8					0.70	1.03	1.46	1.15				
9					0.58	1.03	1.46	1.15				
10					0.64	0.98	2.76	1.28				
旬总数					5.73	9.71	13.98	14.37				
旬平均					0.57	0.97	1.40	1.44				
11					0.58	0.98	1.69	1.46				
12					0.78	1.09	2.32	0.74				
13					0.70	0.98	2.06	1.57				
14					0.49	0.93	1.81	1.46				
15					0.42	0.93	1.94	1.81				
16					0.70	0.93	1.94	1.15				
17					0.78	0.93	1.28	1.57				
18					0.82	0.98	1.46	1.09				
19					0.93	1.03	1.46	0.93				
20					0.88	0.98	1.35	1.15				
旬总数					7.08	9.76	17.31	12.93				
旬平均					0.71	0.98	1.73	1.29				
21					0.88	1.03	1.69	1.28				
22					0.70	1.03	1.46	1.15				
23					0.70	1.03	1.20	0.98				
24					0.74	1.09	1.16	0.88				
25					0.82	1.09	1.57	0.88				
26					0.88	1.15	2.46	0.82				
27					0.88	1.15	2.06	0.88				
28					0.88	1.28	1.28	0.78				
29					0.74	1.15	1.94	0.74				
30					0.74	1.20	1.94	0.74				
31					0.64		2.60	0.74				
旬总数					8.60	11.20	19.36	9.87				
旬平均					0.78	1.12	1.76	0.90				
总数					21.41	30.67	50.65	37.17				
平均					0.69	1.02	1.63	1.20				
最大					2.06	2.32	6.00	5.78				
日期					18	5	29	12				
最小					0.38	0.49	0.88	0.70				
日期					1	1	2	29				
年统计	年总数 139.90		最大流量 6.00 7月29日				最小流量 0.38 5月1日		平均流量 1.137			
	径流量 1.21E+07 m ³			径流模数 39.36 L/s.km ²				径流深度 418 mm				

表 10 乌鲁木齐河源总控水文点逐日平均气温表（气温：℃）

日月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1	-14.6	-6.6	-19.1	-5.7	1.8	3.3	3.1	6.3	5.6	-2.5	-5.3	-11.4
2	-16.1	-6.8	-16.7	-5.6	3.3	2.9	5.1	6.4	7.0	-4.1	-7.2	-8.9
3	-21.6	-6.4	-13.2	-9.4	6.3	5.6	4.5	7.5	6.2	-8.6	-6.0	-9.4
4	-18.2	-10.2	-13.7	-5.6	5.1	7.8	2.2	3.9	5.6	-3.2	-6.1	-11.2
5	-17.7	-11.4	-13.8	-7.1	1.9	6.3	4.3	4.8	4.0	-8.7	-8.5	-9.5
6	-20.2	-11.3	-16.5	-5.3	1.4	3.8	5.4	7.3	0.2	-6.4	-7.0	-9.7
7	-15.3	-11.6	-15.0	-4.0	1.1	6.0	8.0	6.5	2.7	-3.2	-4.1	-10.2
8	-11.6	-11.3	-17.1	-1.0	2.0	5.8	8.4	5.2	3.5	-4.5	-4.6	-14.6
9	-12.7	-10.2	-16.8	-1.5	-7.9	3.2	5.9	7.6	0.9	-6.5	-5.8	-16.9
10	-16.2	-10.8	-11.3	-1.8	-6.0	5.9	3.7	9.9	0.2	-7.2	-5.6	-15.1
旬总数	-163.9	-96.6	-153.0	-46.9	9.0	50.3	50.6	65.4	35.9	-54.8	-60.2	-116.9
旬平均	-16.4	-9.7	-15.3	-4.7	0.9	5.0	5.1	6.5	3.6	-5.5	-6.0	-11.7
11	-15.0	-10.3	-12.6	-2.5	1.4	5.8	5.8	11.0	2.5	-6.6	-7.2	-14.1
12	-15.7	-12.9	-12.3	-2.0	5.4	3.8	7.6	5.5	4.6	-4.7	-7.7	-17.0
13	-19.3	-10.9	-15.5	0.3	1.3	3.8	7.8	-0.1	6.4	-5.3	-7.9	-16.8
14	-20.3	-11.8	-13.6	3.1	-0.2	1.7	5.9	3.9	3.6	-4.3	-8.4	-16.8
15	-17.5	-13.9	-14.3	3.5	4.3	-0.4	4.8	3.6	-1.6	-4.9	-8.6	-16.5
16	-18.1	-14.1	-11.4	2.6	7.0	-1.4	3.0	2.0	1.6	-3.9	-11.0	-19.8
17	-17.1	-15.3	-10.3	5.0	7.3	-1.2	2.6	2.3	4.2	-4.1	-12.3	-18.8
18	-14.0	-16.5	-7.2	-0.2	2.6	0.1	3.2	4.3	1.8	-3.3	-13.7	-13.5
19	-14.5	-12.5	-1.9	-0.2	0.3	-0.4	6.0	5.2	4.6	-4.1	-10.3	-11.7
20	-16.7	-15.6	-2.5	1.1	0.9	4.6	9.1	4.7	6.2	-4.4	-10.1	-10.9
旬总数	-168.3	-133.7	-101.5	10.7	30.3	16.4	55.7	42.4	33.9	-45.4	-97.1	-155.8
旬平均	-16.8	-13.4	-10.1	1.1	3.0	1.6	5.6	4.2	3.4	-4.5	-9.7	-15.6
21	-18.6	-13.4	-5.5	-2.0	-2.3	6.1	9.5	3.3	2.5	-4.4	-9.4	-8.8
22	-23.8	-10.2	-8.2	-6.6	-6.6	6.3	8.1	0.4	1.1	-9.0	-7.2	-11.7
23	-17.1	-12.3	-8.3	-6.1	-2.5	6.5	8.7	4.6	-3.5	-9.4	-3.9	-9.0
24	-14.8	-6.9	-8.7	-4.8	0.2	7.6	10.3	5.5	1.3	-5.4	-13.0	-12.8
25	-12.8	-5.1	-6.8	-4.2	0.6	7.1	7.9	4.5	-3.4	-7.9	-10.9	-12.8
26	-10.4	-6.6	-5.8	-5.1	1.2	5.1	7.0	5.4	0.4	-11.9	-10.6	-17.3
27	-10.3	-8.4	-2.4	4.1	3.6	5.2	6.7	5.7	0.4	-10.2	-10.9	-26.6
28	-10.2	-17.1	-0.5	3.3	-0.9	6.8	2.5	4.0	-2.4	-11.4	-9.1	-20.3
29	-10.1		-3.5	2.3	-2.6	5.2	2.9	3.9	-0.8	-11.7	-10.1	-23.8
30	-10.5		-4.7	3.1	3.9	2.3	6.6	4.7	-1.7	-10.9	-10.9	-23.5
31	-7.0		-9.2		4.8		7.4	6.0		-6.0		-20.7
旬总数	-145.2	-79.9	-63.5	-15.9	-0.7	58.0	77.3	47.7	-6.1	-98.1	-95.8	-187.2
旬平均	-13.2	-10.0	-5.8	-1.6	-0.1	5.8	7.0	4.3	-0.6	-8.9	-9.6	-17.0
月总数	-477.4	-310.1	-317.9	-52.1	38.6	124.8	183.6	155.5	63.7	-198.3	-253.1	-459.9
月平均	-15.4	-11.1	-10.3	-1.7	1.2	4.2	5.9	5.0	2.1	-6.4	-8.4	-14.8
最高	-1.0	1.0	4.7	12.0	15.7	14.3	16.1	16.1	13.8	3.2	2.6	-5.0
日期	19	1	20	17	16	28	21	11	2	4	9	23
最低	-29.0	-20.8	-23.0	-15.0	-12.5	-8.2	-3.6	-5.4	-9.3	-17.0	-19.0	-33.0
日期	22	28	1	3	10	17	29	22	25	27	24	27
年统计	最高 16.1 7月 21 日				最低 -33.0 12月 27 日				年平均 -4.1			

表 11 乌鲁木齐河源总控水文点逐日降水量表 (降水量: mm)

日月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1					2.8							
2						4.5		13.3				
3								3.2				
4								16.4				
5					1.0		1.7	14.5				
6					0.2		0.3					
7					2.9	2.1	0.8	1.9				
8					0.2	1.0	0.8	14.8				
9					7.9	2.8	13.4	1.0				
10							24.8					
11						1.1	7.4					
12						5.5	0.3	5.8				
13					1.9	0.3		36.1				
14						4.8	3.8					
15						3.1	16.9	3.3				
16						4.6	19.1	18.9				
17						10.2	9.1	5.7				
18						10.5	4.8					
19					0.2	1.3	0.1					
20					6.5							
21					8.9			4.8				
22					7.2	3.0	3.1	10.6				
23						1.9						
24						3.2						
25					0.4	1.7	0.1	2.8				
26					1.1	4.7						
27								5.7				
28					6.1		24.4	0.1				
29					1.1	6.9	7.4					
30						2.1		0.5				
31								3.6				
总量					48.4	75.3	138.3	163.0				
降水 日数					14	20	18	19				
最大 降水量					8.9	10.5	24.8	36.1				
日期					21	18	10	13				
年统计	降水量 425.0					降水日数 71						

表 12 乌鲁木齐河源总控水文点逐日平均相对湿度表 (相对湿度: %)

日月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1					83	83	82	79				
2					38	77	69	87				
3					48	68	70	77				
4					59	60	82	88				
5					91	78	78	87				
6					48	91	89	81				
7					85	80	74	96				
8					68	86	87	94				
9					92	77	92	86				
10					58	45	89	82				
旬总数					670	744	809	855				
旬平均					67	74	81	85				
11					53	65	79	54				
12					42	93	60	92				
13					77	87	83	92				
14					69	72	95	23				
15					47	38	66	73				
16					62	63	86	99				
17					63	64	85	89				
18					79	77	92	69				
19					97	88	81	42				
20					87	50	65	45				
旬总数					674	694	790	677				
旬平均					67	69	79	68				
21					86	49	58	98				
22					84	71	90	56				
23					49	78	77	55				
24					68	66	75	55				
25					78	85	82	66				
26					81	92	66	74				
27					68	70	85	81				
28					88	76	100	75				
29					83	86	67	70				
30					50	83	53	84				
31					59		69	55				
旬总数					792	755	821	766				
旬平均					72	75	75	70				
月总数					2136	2193	2420	2298				
月平均					69	73	78	74				
最小					18	15	20	15				
日期					2	21	20	23				

附注：相对湿度只在 5-8 月冰川消融期观测

表 13 乌鲁木齐河源后峡基本营地气象场逐日平均气温表 (气温: °C)

日\月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1	-11.9	-7.9	-13.3	-2.5	8.4	11.1	7.5	13.6	14.3	3.6	-1.0	-7.3
2	-12.7	-4.5	-13.3	-2.6	10.6	10.7	6.5	12.1	13.3	5.0	-0.6	-8.4
3	-14.4	-5.4	-9.2	-1.1	9.8	11.3	8.7	11.6	12.8	1.4	-1.2	-9.3
4	-17.4	-6.9	-9.5	0.9	12.5	14.9	7.8	11.8	11.6	-1.3	0.2	-9.5
5	-17.5	-5.2	-7.2	2.1	9.6	13.8	5.7	13.2	9.5	-0.8	0.4	-5.9
6	-16.7	-6.2	-6.9	3.3	10.7	11.4	9.8	14.4	8.3	-0.4	-0.2	-6.2
7	-15.6	-8.0	-7.5	4.0	8.5	11.9	12.4	14.2	8.1	1.2	0.0	-7.6
8	-10.5	-6.7	-9.2	5.0	6.2	13.3	10.1	13.7	9.3	1.5	2.1	-8.0
9	-10.4	-5.9	-11.3	5.8	0.5	31.2	13.5	13.3	9.1	1.1	0.0	-11.9
10	-11.5	-4.6	-8.9	4.7	1.8	24.1	10.4	16.8	8.9	1.6	-2.8	-10.8
旬总数	-138.4	-61.2	-96.2	19.5	78.6	153.5	92.4	134.5	105.0	12.9	-3.1	-84.8
旬平均	-13.8	-6.1	-9.6	2.0	7.9	15.3	9.2	13.4	10.5	1.3	-0.3	-8.5
11	-12.9	-5.1	-6.6	4.1	7.5	14.1	10.6	19.7	8.1	3.2	-5.3	-8.5
12	-12.1	-5.6	-5.8	6.1	11.6	12.8	10.0	10.7	9.8	1.7	-3.7	-11.4
13	-14.1	-5.4	-4.5	6.9	6.3	12.6	14.5	8.6	11.9	1.8	-2.2	-12.2
14	-15.1	-4.4	-6.0	9.9	7.4	11.2	12.6	10.3	10.3	1.9	-4.1	-12.2
15	-14.9	-5.4	-4.6	9.1	11.0	7.7	12.0	11.0	5.1	2.1	-5.3	-10.7
16	-15.6	-6.2	-3.0	9.4	14.5	4.0	11.1	11.3	7.0	3.9	-6.1	-12.3
17	-13.1	-6.0	-2.3	10.4	13.6	9.2	8.5	10.7	9.4	3.1	-5.2	-12.6
18	-12.7	-7.0	-0.1	7.1	9.3	9.3	10.3	11.9	9.8	3.5	-5.9	-10.9
19	-11.8	-5.2	2.5	7.0	8.7	8.0	10.9	12.4	10.4	3.0	-6.2	-11.0
20	-13.4	-7.8	3.3	7.1	9.0	7.2	8.7	16.3	11.3	2.7	-0.5	-10.4
旬总数	-135.4	-57.9	-27.1	77.0	98.8	95.8	109.2	122.8	93.0	26.7	-44.4	-112.1
旬平均	-13.5	-5.8	-2.7	7.7	9.9	9.6	10.9	12.3	9.3	2.7	-4.4	-11.2
21	-14.2	-10.1	0.6	1.9	6.6	14.3	11.9	9.8	9.3	1.6	-4.7	-7.4
22	-16.8	-5.9	0.8	1.0	1.5	14.4	13.8	8.2	8.2	-0.7	-3.7	-8.5
23	-13.5	-4.3	-0.5	2.4	4.6	13.3	12.8	10.5	4.6	-1.9	-1.0	-9.0
24	-11.5	-2.2	-1.0	4.8	9.4	16.7	16.4	11.8	3.2	0.2	-7.6	-8.8
25	-10.5	-4.0	0.5	4.1	8.6	15.1	16.1	11.5	4.5	-1.5	-6.1	-12.5
26	-12.1	-2.3	1.6	3.5	9.7	12.6	10.3	12.1	5.8	-2.8	-7.5	-16.1
27	-9.2	-8.4	3.4	8.1	10.2	12.4	12.9	11.1	5.5	-4.5	-6.9	-19.7
28	-6.3	-12.2	6.4	8.4	6.9	15.5	10.5	12.0	4.8	-3.9	-5.6	-18.7
29	-6.4		0.0	9.6	6.4	12.2	8.9	12.0	5.5	-4.3	-4.1	-20.6
30	-5.1		-2.4	11.2	9.9	11.6	9.9	11.4	3.9	-3.1	-5.0	-19.5
31	-5.4		-1.8		12.3		9.6	12.9		-1.5		-18.6
旬总数	-110.9	-49.3	7.7	54.9	85.9	138.1	133.1	123.2	55.2	-22.4	-52.0	-159.3
旬平均	-10.1	-6.2	0.7	5.5	7.8	13.8	12.1	11.2	5.5	-2.0	-5.2	-14.5
月总数	-384.7	-168.4	-115.6	151.5	263.3	387.4	334.7	380.5	253.1	17.2	-99.4	-356.2
月平均	-12.4	-6.0	-3.7	5.0	8.5	12.9	10.8	12.3	8.4	0.6	-3.3	-11.5
最高	7.1	10.2	25.7	21.8	25.4	25.7	26.5	26.4	22.7	16.1	13.5	4.1
日期	29	24	27	17	16	24	23	29	2	18	6	1
最低	-21.5	-17.3	-24.1	-9.6	-4.8	2.4	3.5	-21.5	-1.6	-12.0	-14.5	-24.4
日期	5	21	10	1	10	17	5	5	28	29	25	28
年统计	最高 26.5 7月 23 日			最低 -24.4 12月 28 日			年平均 1.8					

表 14 乌鲁木齐河源后峡基本营地气象场逐日降水量表 (降水量: mm)

日月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1					1.7		3.6			6.9		
2	0.1			0.3		1.2	1.0	1.5		0.3		
3	1.3			1.3		1.8	1.7	3.5	9.0	3.1		
4							8.7	7	0.2	1.2		
5					2.6		0.6	4.3	3.1			
6					0.3				6.5			
7					3.1		12.4	0.8				
8					3.2	2.5	2.7	6.8	0.7			0.1
9					6.4	3.0	6.6	3.8	0.1	1.4		
10					0.9		35.8	0.4	0.3			
11				5.2			3.1					
12				7.1		3.6		10.4				
13				9.2	3.1	2.2	10.3	27.3			0.1	
14					0.3	5.6	4.2					
15		0.3		3.1		2.2	9.2	5.4				
16				2.5		1.5	13.2	6.5				0.1
17						12.8	13.6	7			0.4	
18				5.7	0.2	5.8	0.7	0				
19				1		5.4	0.4					
20		0.4			1.8							
21	1.3			1.1	2.8			6.2				
22	0.5		0.4	2	7.9		0.4	7.5		4.0		
23						1.0			5.7	0.2		
24			3.2			3.7			6.5			
25	0.1			6.2	3.7	0.2	3.2	2.3				
26				9.6	1.4	1.8	2.7		0.0	0.4		0.2
27		0.1			1.7	4.2		5.9				
28					5.8		15.9					
29			2.0				8.4					
30						9.8		7.7	0.2			
31			1.6									
总量	3.3	0.8	7.2	54.3	46.9	68.3	158.4	114.3	32.3	17.5	0.5	0.4
降水 日数	5	3	4	13	16	18	22	8	11	9	2	3
最大 降水量	1.3	0.4	3.2	9.6	7.9	12.8	35.8	27.3	9.0	6.9	0.4	0.2
日期	21	20	24	26	22	17	10	13	3	1	17	26
年统计	降水量 504.2					降水日数 114						

表 15 乌鲁木齐河源后峡基本营地气象场逐日平均相对湿度表 (相对湿度: %)

日月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1	89	73	78	57	85	71	79	67	67	82	60	58
2	93	60	69	61	64	78	71	74	66	71	56	64
3	94	72	50	71	71	75	71	85	80	86	56	79
4	94	80	59	67	72	64	84	94	83	92	60	63
5	98	70	64	65	87	82	78	83	86	84	54	50
6	95	78	70	60	68	93	71	74	79	76	58	64
7	82	72	65	62	90	89	78	84	76	76	56	69
8	73	72	59	61	87	81	75	84	77	68	54	82
9	72	70	59	58	93	89	91	83	74	81	64	87
10	78	70	55	79	78	73	93	74	79	78	81	73
旬总数	866	716	628	640	794	795	790	800	766	794	597	689
旬平均	87	72	63	64	79	80	79	80	77	79	60	69
11	79	76	61	89	68	73	80	70	75	70	81	72
12	77	74	65	85	61	84	70	94	71	72	71	82
13	88	74	66	79	88	76	79	81	66	65	76	75
14	84	82	71	69	78	91	86	71	71	69	79	66
15	73	79	72	73	62	89	76	81	82	66	77	62
16	75	74	66	61	53	83	91	85	60	59	81	80
17	71	75	59	57	67	69	90	94	58	59	87	64
18	74	66	57	85	91	72	88	93	58	61	73	68
19	67	58	56	79	85	82	84	80	62	60	58	71
20	91	86	61	76	85	65	70	75	61	62	38	70
旬总数	778	743	632	752	737	783	814	823	662	643	720	709
旬平均	78	74	63	75	74	78	81	82	66	64	72	71
21	96	79	81	92	82	61	69	92	65	75	57	62
22	91	62	83	71	94	65	78	81	71	88	57	73
23	75	53	83	75	67	72	74	75	89	59	55	68
24	81	54	78	67	68	53	79	72	83	65	79	79
25	85	79	65	79	73	68	82	80	77	76	76	92
26	94	65	69	80	75	73	76	75	75	81	68	88
27	80	84	67	60	76	66	86	86	74	68	64	75
28	74	80	65	75	95	57	93	75	66	67	76	70
29	73		96	76	70	75	81	73	65	76	78	71
30	66		71	70	66	71	73	89	79	72	72	79
31	63		71		60		68	73		57		75
旬总数	876	557	829	744	824	661	857	869	742	782	682	830
旬平均	80	70	75	74	75	66	78	79	74	71	68	75
月总数	2520	2016	2089	2136	2356	2239	2460	2491	2170	2219	1998	2228
月平均	81	72	67	71	76	75	79	80	72	72	67	72
最小	36	20	23	21	19	23	31	36	25	15	19	26
日期	31	24	25	16	25	28	1	31	16	2	8	4

天山冰川观测试验站水文气象资料整编说明 (2008)

金 爽

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所/天山冰川观测实验站, 甘肃 兰州 730000)

天山冰川观测试验站的常规水文、气象观测在乌鲁木齐河源区的1号冰川水文点、空冰斗水文点、总控制水文点以及后峡基本营地进行, 本文为2008年度资料整编结果报告。

1号冰川水文点设在离1号冰川末端300 m的河道上, 实施1号冰川冰雪径流的监测, 断面海拔3695 m, 流域面积 3.34 km^2 , 其中冰川面积 1.677 km^2 。为混凝土矩形断面(高1.0 m, 宽1.6 m), 气象场设在断面左岸。

空冰斗水文点设在乌鲁木齐河源区左侧, 斗口朝南, 进行高山区积雪、多年冻土融水径流的观测, 断面海拔3805 m, 流域面积 1.68 km^2 , 为混凝土矩形断面(高1.0 m, 宽1.0 m), 气象场设在断面右岸。

在乌鲁木齐河源区大西沟和罗布道沟汇合处, 设有总控制水文点, 控制监测乌鲁木齐河源区降水和7条冰川以及冰川周围高山积雪、多年冻土的总融水径流; 该控制端面海拔3408 m, 流域面积 28.9 km^2 ; 其中冰川面积 5.6 km^2 。为混凝土断面, 设有工作桥, 气象场设在断面左岸冰碛丘上。

三个水文断面均装有自计水位计, 测流主要用流速仪法, 即时流量由水位—流量关系线求得。气象观测项目主要为气温、降水、湿度、蒸发、地温、日照等。后峡基本营地气象观测场位于乌鲁木齐河谷, 海拔2130 m, 进行常规气象要素观测。所有观测资料均按规范进行整理(附表)。

表 1 乌鲁木齐河源 1 号冰川水文点逐日平均流量表 (流量: m^3/s)

日月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1					0.000	0.270	0.355	0.510	0.135			
2					0.000	0.290	0.290	0.445	0.115			
3					0.000	0.375	0.420	0.510	0.090			
4					0.000	0.180	0.335	0.625	0.065			
5					0.000	0.180	0.375	0.270	0.045			
6					0.000	0.245	0.605	0.225	0.065			
7					0.000	0.245	0.580	0.225	0.065			
8					0.000	0.225	0.555	0.310				
9					0.000	0.270	0.180	0.355				
10					0.000	0.355	0.335	0.555				
旬总数					0.000	2.635	4.030	4.030	0.580			
旬平均					0.000	0.264	0.403	0.403	0.083			
11					0.000	0.225	0.445	0.375				
12					0.000	0.155	0.420	0.225				
13					0.000	0.090	0.400	0.245				
14					0.000	0.115	0.465	0.180				
15					0.025	0.155	0.225	0.135				
16					0.090	0.155	0.335	0.115				
17					0.180	0.180	0.375	0.135				
18					0.245	0.135	0.605	0.200				
19					0.245	0.135	0.885	0.180				
20					0.115	0.115	0.740	0.090				
旬总数					0.900	1.460	4.895	1.880				
旬平均					0.090	0.146	0.490	0.188				
21					0.065	0.065	0.605	0.115				
22					0.045	0.115	0.335	0.115				
23					0.065	0.135	0.490	0.090				
24					0.025	0.135	0.310	0.090				
25					0.045	0.200	0.310	0.090				
26					0.065	0.200	0.290	0.115				
27					0.115	0.090	0.915	0.155				
28					0.155	0.065	0.695	0.090				
29					0.225	0.245	0.310	0.090				
30					0.245	0.245	0.245	0.090				
31					0.225		0.335	0.115				
旬总数					1.210	1.430	4.235	1.040				
旬平均					0.121	0.159	0.424	0.104				
总数					2.175	5.590	13.765	7.065	0.580			
平均					0.070	0.186	0.444	0.228	0.019			
最大					0.375	0.855	1.820	1.335	0.155			
日期					30	10	21	10	1			
最小					0.000	0.065	0.090	0.065	0.000			
日期					1-14	5	9	20	8-30			
年统计	年总数 29.175		最大流量 1.820 7月 21 日				最小流量 0 5月 1-14			平均流量 0.191		
	径流量 2.52E+06 m^3		径流模数 57.1 $\text{L}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$				径流深度 755 mm					

表 2 乌鲁木齐河源 1 号冰川水文点逐日平均气温表 (气温: °C)

日月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1	-23.0	-22.5	-12.2	-8.6	-4.6	6.0	2.5	7.7	1.0	0.6	-4.9	-12.6
2	-24.3	-18.6	-10.1	-7.9	-9.2	7.2	3.1	9.9	2.5	1.7	-5.3	-17.1
3	-18.2	-20.0	-9.9	-8.6	-2.4	5.3	8.7	9.9	1.7	-2.4	-7.6	-17.2
4	-15.0	-20.8	-9.0	-9.8	1.9	1.5	5.2	8.6	-0.6	-0.6	-11.2	-12.9
5	-16.2	-22.3	-10.5	-2.4	-1.1	5.0	7.2	-2.3	0.3	-1.9	-8.5	-11.7
6	-15.0	-22.1	-10.8	-6.1	-5.2	5.9	5.7	0.1	1.1	-4.2	-7.7	-15.0
7	-13.8	-20.1	-9.7	-5.6	-8.0	5.4	3.1	5.0	-5.6	-3.9	-7.6	-10.7
8	-9.6	-22.4	-6.8	-8.1	-2.1	3.9	1.8	5.9	-2.7	-5.3	-4.1	-7.6
9	-13.5	-20.5	-8.2	-10.4	1.5	4.2	2.4	5.0	1.0	-4.0	-7.3	-9.2
10	-15.7	-24.1	-8.9	-11.3	4.5	7.1	3.4	8.1	3.6	-2.5	-9.5	-8.0
旬总数	-164.1	-213.4	-96.1	-78.9	-24.5	51.5	42.9	57.9	2.4	-22.5	-73.7	-121.9
旬平均	-16.4	-21.3	-9.6	-7.9	-2.4	5.1	4.3	5.8	0.2	-2.3	-7.4	-12.2
11	-18.1	-24.2	-11.3	-9.1	4.2	2.5	3.9	6.4	4.3	-2.7	-14.6	-10.1
12	-21.8	-24.9	-8.1	-6.2	3.9	0.6	4.4	5.2	0.0	-3.2	-17.1	-15.4
13	-21.1	-22.0	-6.2	-4.6	1.8	-1.2	4.9	3.3	0.0	-4.1	-14.4	-17.5
14	-19.3	-16.4	-10.1	-4.8	4.0	3.1	4.2	2.9	1.7	-4.3	-12.6	-11.3
15	-20.1	-15.7	-5.4	-3.9	2.8	4.8	2.7	5.5	1.0	-4.0	-13.6	-10.3
16	-19.0	-15.3	-3.2	-4.1	3.8	5.1	5.1	5.7	3.1	-7.2	-14.0	-10.2
17	-17.6	-15.8	-4.8	-2.5	3.2	1.4	3.5	1.4	4.6	-7.6	-12.6	-6.6
18	-21.5	-14.6	-5.7	-7.3	3.5	-0.5	7.7	-0.2	4.2	-4.0	-9.2	-6.2
19	-26.2	-12.7	-13.0	-16.5	4.4	0.2	5.1	-3.5	2.4	-2.6	-8.5	-10.5
20	-25.7	-12.1	-11.5	-16.4	-0.8	0.1	4.1	-0.5	-0.4	-9.0	-10.0	-9.4
旬总数	-210.3	-173.7	-79.2	-75.5	30.7	16.2	45.5	26.2	20.9	-48.7	-126.5	-107.2
旬平均	-21.0	-17.4	-7.9	-7.5	3.1	1.6	4.6	2.6	2.1	-4.9	-12.7	-10.7
21	-22.8	-7.1	-8.1	-8.4	-1.4	3.5	4.3	4.2	-4.6	-12.7	-12.6	-11.0
22	-23.3	-12.8	-7.4	-2.7	1.2	4.1	3.7	3.3	-5.1	-7.6	-13.5	-14.4
23	-23.1	-19.7	-7.2	0.1	2.1	2.6	4.9	3.0	-3.3	-7.2	-12.4	-12.5
24	-21.7	-21.8	-5.4	-0.6	0.8	2.9	3.9	4.4	-0.9	-7.3	-12.5	-14.3
25	-21.1	-17.8	-5.9	-3.7	1.6	3.5	4.2	2.5	-2.0	-6.7	-10.8	-15.1
26	-23.6	-17.8	-7.4	0.0	0.7	5.6	2.4	3.1	-1.1	-5.3	-10.1	-15.9
27	-23.4	-14.7	-12.1	0.3	2.0	2.0	6.5	0.8	0.0	-11.4	-12.2	-24.9
28	-21.9	-8.9	-11.2	-2.1	4.8	2.4	5.4	0.3	2.2	-7.7	-10.1	-15.1
29	-20.6	-14.1	-5.8	-1.0	4.6	5.2	1.4	4.0	1.9	-6.8	-8.4	-13.7
30	-22.7		-14.0	-5.7	5.2	2.7	2.0	3.6	1.4	-5.6	-12.0	-12.4
31	-22.5		-12.4		5.5		7.2	2.3		-5.8		-17.1
旬总数	-246.6	-134.7	-96.8	-23.8	26.9	34.3	45.9	31.4	-11.6	-83.9	-114.5	-166.2
旬平均	-22.4	-15.0	-8.8	-2.4	2.4	3.4	4.2	2.9	-1.2	-7.6	-11.5	-15.1
月总数	-621.0	-521.8	-272.1	-178.1	33.1	101.9	134.3	115.5	11.7	-155.2	-314.7	-395.3
月平均	-20.0	-18.0	-8.8	-5.9	1.1	3.4	4.3	3.7	0.4	-5.0	-10.5	-12.8
最高	-4.2	-2.1	0.5	7.1	11.8	14.0	12.9	14.2	9.9	2.3	1.5	-2.2
日期	8	21	16	23	31	10	3	2	16	16	8	18
最低	-29.8	-28.0	-20.7	-23.8	-13.3	-8.0	-2.5	-7.4	-8.5	-15.1	-20.1	-28.8
日期	20	12	30	20	2	21	26	6	7	29	12	27
年统计	最高 14.2 8月 2 日				最低 -28.8 12月 27 日				年平均 -5.6			

表3 乌鲁木齐河源1号冰川水文点逐日降水量表(降水量: mm)

日月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	
1						1.7	9.6		7.7				
2					6.3		10.9						
3						16.5	0.6			5.2			
4							7.3		4.2				
5							1.6	19.3	4.4				
6					6.3		3.2	2.9		0.5			
7					5.2	1.2	2.3		10.3				
8					3		2.3				0.1		
9							1	3.3		4.8			
10						0.2		0.2					
11						0.6							
12		1.8				8.2			10.3				
13					3.8			4.6	11.5				
14					1.8		0.3	13.4					
15	1.4					1.8	5.9		3.7		0.3		
16					2	2.5	0.2			4.1			
17						3.7	9.2	9.9					
18					13.2	4.4		14.5					
19						0.9	16.7	3.7					
20						4.4	18.6	6.7	3.9				
21					4.1	7.1	2.1		9.6				
22						0.5	6.8				2.4		
23						2	19.2		2.9				
24					0.8	3.6		1.1					
25								1.9	6.8				
26		2.1			11.5	1.1		2.4					
27						4.6		3.1					
28						0.8	10.7						
29					3.6		10.5						
30							2.3						
31							38.8						
总量	1.4	3.9	0.0	0.0	61.6	65.8	180.1	87.0	75.3	14.6	2.8	0.0	
降水 日数	1	2			12	19	22	14	11	4	3		
最大 降水量	1.4	2.1			13.2	16.5	38.8	19.3	11.5	5.2	2.4		
日期	15	26			18	3	31	5	13	3	22		
年统计	降水量 492.5						降水日数 88						

表4 乌鲁木齐河源1号冰川水文点逐日平均相对湿度表（相对湿度：%）

日\月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1					52	82	91	53				
2					63	53	84	39				
3					56	72	50	49				
4					60	71	70	61				
5					78	26	64	96				
6					95	45	65	32				
7					96	47	78	42				
8					40	70	83	62				
9					43	65	69	72				
10					42	48	50	53				
旬总数					625	579	702	557				
旬平均					62	58	70	56				
11					66	88	57	54				
12					65	81	52	74				
13					67	62	50	75				
14					36	39	62	70				
15					67	56	74	48				
16					66	66	58	59				
17					77	77	85	82				
18					68	84	49	93				
19					38	72	79	90				
20					74	79	91	43				
旬总数					622	704	656	686				
旬平均					62	70	66	69				
21					63	54	86	42				
22					36	70	91	55				
23					67	88	75	65				
24					77	73	88	65				
25					82	76	84	77				
26					39	62	81	67				
27					58	86	65	82				
28					41	81	84	54				
29					66	69	87	34				
30					53	68	78	50				
31					61		46	71				
旬总数					642	727	864	660				
旬平均					58	73	79	60				
月总数					1888	2010	2221	1903				
月平均					61	67	72	61				
最小					15	15	25	16				
日期					8	5	10	6				

附注：相对湿度只在5-8月冰川消融期观测

表 5 乌鲁木齐河源空冰斗水文点逐日平均流量表 (流量: m^3/s)

日/月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1					0	0.046	0.106	0.051				
2					0	0.039	0.129	0.051				
3					0	0.088	0.106	0.046				
4					0	0.129	0.088	0.046				
5					0	0.068	0.088	0.088				
6					0.022	0.068	0.095	0.060				
7					0.022	0.039	0.118	0.106				
8					0.015	0.039	0.077	0.068				
9					0.051	0.068	0.060	0.068				
10					0.068	0.051	0.051	0.060				
旬总数					0.178	0.636	0.919	0.645				
旬平均					0.018	0.064	0.092	0.065				
11					0.051	0.046	0.046	0.051				
12					0.046	0.039	0.051	0.051				
13					0.046	0.046	0.046	0.051				
14					0.077	0.077	0.039	0.077				
15					0.129	0.046	0.060	0.095				
16					0.088	0.051	0.051	0.068				
17					0.068	0.046	0.088	0.051				
18					0.077	0.046	0.095	0.118				
19					0.088	0.060	0.180	0.077				
20					0.046	0.046	0.239	0.106				
旬总数					0.717	0.505	0.897	0.746				
旬平均					0.072	0.051	0.090	0.075				
21					0.046	0.030	0.129	0.095				
22					0.068	0.106	0.095	0.118				
23					0.039	0.088	0.060	0.077				
24					0.030	0.068	0.163	0.051				
25					0.030	0.088	0.118	0.060				
26					0.077	0.088	0.068	0.046				
27					0.068	0.077	0.051	0.046				
28					0.051	0.088	0.088	0.030				
29					0.068	0.088	0.163	0.046				
30					0.039	0.077	0.060	0.046				
31					0.046		0.046	0.046				
旬总数					0.562	0.797	1.042	0.662				
旬平均					0.051	0.080	0.095	0.060				
总数					1.457	1.938	2.857	2.054				
平均					0.046	0.065	0.094	0.066				
最大					0.314	0.412	0.472	0.359				
日期					18	3	19	20				
最小					0	0	0.039	0.015				
日期					1-5	13	19	19				
年统计	年总数 8.306	最大流量 0.472 7月19日				最小流量 0 5月1日			平均流量 0.068			
	径流量 $7.18\text{E}+05 \text{ m}^3$		径流模数 $40.2\text{L}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$				径流深度 427 mm					

表6 乌鲁木齐河源空冰斗水文点逐日平均气温表（气温：℃）

日\月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1	-22.6	-21.0	-11.6	-8.8	-6.3	4.4	3.5	8.6	0.5	0.0	-4.2	-13.4
2	-22.0	-17.8	-10.1	-9.1	-10.2	6.7	2.7	9.9	1.8	-2.7	-5.5	-18.2
3	-16.1	-18.5	-9.1	-9.0	-3.5	6.0	6.8	10.0	0.8	-2.7	-8.0	-17.8
4	-14.4	-19.6	-8.7	-10.7	0.8	1.4	5.2	8.4	-1.1	-1.1	-12.2	-13.0
5	-15.3	-20.6	-11.4	-3.1	-1.5	4.2	5.6	-1.1	-1.4	-2.8	-8.4	-12.8
6	-17.9	-20.7	-10.8	-7.2	-5.2	4.8	5.5	1.6	0.5	-4.7	-8.4	-15.7
7	-12.4	-19.5	-8.6	-6.3	-8.3	4.8	4.5	5.4	-7.4	-5.1	-8.2	-11.6
8	-7.9	-22.2	-8.1	-9.1	-2.4	3.2	2.2	6.0	-4.5	-5.3	-3.8	-7.0
9	-13.9	-20.2	-8.5	-10.9	1.5	6.9	8.0	5.5	-0.4	-4.7	-7.6	-8.8
10	-13.9	-10.6	-10.3	-12.4	2.8	2.8	3.4	7.9	1.0	-0.7	-10.2	-8.4
旬总数	-156.2	-190.8	-97.1	-86.4	-32.2	45.1	47.3	62.1	-10.5	-29.7	-76.4	-126.6
旬平均	-15.6	-19.1	-9.7	-8.6	-3.2	4.5	4.7	6.2	-1.0	-3.0	-7.6	-12.7
11	-16.2	-24.6	-11.4	-10.1	2.2	3.4	3.4	7.2	1.9	-3.8	-14.9	-10.8
12	-20.0	-24.8	-8.5	-6.0	6.3	0.8	4.0	4.1	-1.8	-4.1	-17.2	-16.7
13	-19.2	-22.0	-8.3	-5.7	-0.5	-0.4	4.3	3.8	-2.5	-4.8	-14.7	-18.5
14	-17.4	-16.5	-11.0	-5.6	6.0	3.8	4.5	2.4	0.2	-5.2	-12.4	-11.0
15	-19.0	-8.2	-7.5	-4.3	2.7	4.4	2.7	6.1	-0.6	-5.5	-13.5	-10.9
16	-18.8	-15.3	-5.4	-4.7	3.5	4.4	4.5	6.0	0.4	-8.2	-13.2	-10.9
17	-16.1	-15.3	-7.1	-3.6	2.7	1.1	3.3	2.2	2.4	-8.0	-12.1	-7.0
18	-21.2	-14.2	-7.0	-9.7	3.2	-1.1	6.9	0.7	2.5	-4.2	-9.3	-7.3
19	-25.5	-12.5	-13.4	-18.5	3.5	0.3	5.4	-2.7	1.7	-3.3	-8.9	-10.0
20	-24.7	-13.0	-13.6	-17.2	-1.2	-3.0	4.0	-1.4	-1.6	-10.2	-10.1	-9.4
旬总数	-198.0	-166.3	-93.1	-85.3	28.2	13.6	42.9	28.5	2.7	-57.0	-126.2	-112.2
旬平均	-19.8	-16.6	-9.3	-8.5	2.8	1.4	4.3	2.9	0.3	-5.7	-12.6	-11.2
21	-21.9	-8.3	-9.2	-9.4	-1.6	-1.8	4.6	1.3	-6.0	-13.4	-13.2	-12.4
22	-21.7	-13.2	-7.8	-3.6	-0.1	3.2	4.1	2.0	-5.7	-8.0	-13.3	-14.9
23	-22.0	-20.1	-8.0	-0.1	1.3	1.6	4.9	3.8	-4.9	-8.3	-12.3	-13.6
24	-21.6	-21.9	-7.3	-1.1	0.2	3.2	4.4	5.3	-2.9	-8.0	-12.9	-15.2
25	-19.9	-17.6	-5.9	-4.3	-1.8	3.5	5.0	2.8	-3.5	-7.7	-10.6	-16.8
26	-22.2	-17.0	-8.7	-1.0	2.5	5.1	3.3	2.4	-2.0	-7.0	-11.2	-16.6
27	-20.6	-17.0	-10.6	0.5	3.5	1.7	7.2	0.1	-2.1	-13.6	-12.9	-24.7
28	-21.1	-8.7	-11.0	-2.4	4.3	2.3	5.4	-1.3	0.1	-8.8	-10.6	-16.1
29	-20.9	-15.0	-2.8	-2.0	3.2	5.1	1.8	4.3	-0.5	-6.9	-9.4	-14.1
30	-21.8		-15.4	-1.2	4.8	4.8	2.8	4.0	-0.8	-6.2	-12.2	-13.4
31	-21.1		-13.9		3.8		7.4	0.4		-6.4		-18.7
旬总数	-234.6	-138.7	-100.5	-24.6	20.1	28.6	50.7	24.9	-28.1	-94.3	-118.4	-176.4
旬平均	-21.3	-15.4	-9.1	-2.5	1.8	2.9	4.6	2.3	-2.8	-8.6	-11.8	-16.0
月总数	-588.8	-495.7	-290.7	-196.2	16.1	87.3	140.9	115.5	-35.8	-181.0	-320.9	-415.2
月平均	-19.0	-17.7	-9.4	-6.5	0.5	2.9	4.5	3.7	-1.2	-5.8	-10.7	-13.4
最高	-2.9	-2.0	-1.0	5.0	12.2	12.5	13.0	15.0	7.9	5.0	1.0	-3.1
日期	8	21	16	26	31	1	27	2	16	1	8	8
最低	-28.4	-27.0	-19.0	-22.0	-13.9	-6.2	-2.3	-5.5	-9.2	-14.0	-20.0	-30.0
日期	20	10	20	20	2	21	10	6	7	27	12	27
年统计	最高 15.0 8月2日				最低 -30.0 12月27日				年平均 -5.9			

表 7 乌鲁木齐河源空冰斗水文点逐日降水量表 (降水量: mm)

日月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1						1.4	8.1		7.2			
2					4.8	16.2	11.8					
3										4.8		
4							9.6		4.0			
5							1.1	18.6	3.8			
6					5.6		3.4			0.4		
7					4.6		4.8		9.8	0.4		
8					2.4	0.9	2.2			4.8	0.1	
9						8.4	1.5	3.9				
10												
11						0.9						
12		1.6			4.8	0.4			9.8			
13					1.4	6.0		3.8	10.5			
14							1.0	10.6				
15	1.6				1.6		3.9		3.4	3.5		
16						1.8					0.1	
17						2.2	9.7	8.3				
18					13.6	4.6		14.1				
19					0.2	1.4	15.1	3.5	3.8			
20						4.7	2.1	5.2				
21						6.0	2.1		10.6		1.8	
22						0.6	6.2					
23					0.6				2.8			
24					11.8	2.2	18.8	0.8				
25						3.3			6.3			
26		1.8					1.8					
27						1.1						
28					1.9	4.1	8.8	2.5				
29						0.7	11.3	2.2				
30							2.3					
31												
总量	1.6	3.4	0.0	0.0	53.3	66.9	125.6	73.5	72.0	13.9	2.0	0.0
降水 日数	1	2	0	0	12	19	20	11	11	5	3	0
最大 降水量	1.6	1.8			13.6	16.2	18.8	18.6	10.6	4.8	1.8	
年统计	降水量 412.2					降水日数 84						

表8 乌鲁木齐河源空冰斗水文点逐日平均相对湿度表（相对湿度：%）

日\月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1					72	65	92	59				
2					70	52	75	43				
3					48	63	42	52				
4					60	65	60	69				
5					81	25	68	96				
6					92	43	74	41				
7					88	57	84	47				
8					46	75	81	62				
9					50	42	66	72				
10					52	66	55	55				
旬总数					659	553	695	594				
旬平均					66	55	70	59				
11					77	72	61	66				
12					78	64	57	71				
13					87	71	60	76				
14					46	42	73	79				
15					81	59	79	50				
16					80	70	60	64				
17					83	74	85	94				
18					85	78	53	93				
19					52	68	84	93				
20					94	86	92	50				
旬总数					763	684	702	736				
旬平均					76	68	70	74				
21					77	64	90	50				
22					54	51	89	63				
23					85	82	83	77				
24					83	74	83	68				
25					87	76	89	70				
26					60	63	76	65				
27					67	84	52	85				
28					56	79	86	62				
29					78	66	85	37				
30					65	75	76	55				
31					72		50	76				
旬总数					783	714	859	707				
旬平均					71	71	78	64				
月总数					2205	1951	2257	2037				
月平均					71	65	73	66				
最小					12	12	23	19				
日期					8	5	3	20				

附注：相对湿度只在 5-8 月冰川消融期观测

表9 乌鲁木齐河源总控水文点逐日平均流量表 (流量: m^3/s)

日/月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1					0	1.28	1.69	1.69				
2					0	1.35	2.32	1.20				
3					0	2.06	1.57	1.57				
4					0	1.46	1.81	0.93				
5					0	1.03	1.94	1.57				
6					0.58	1.28	2.20	1.20				
7					0.58	1.28	2.74	1.35				
8					0.53	1.46	1.94	1.28				
9					0.78	1.46	1.28	1.57				
10					0.88	1.28	1.20	1.81				
旬总数					3.35	13.94	18.69	14.17				
旬平均					0.34	1.39	1.87	1.42				
11					0.78	1.20	1.28	1.57				
12					0.74	1.03	1.28	1.28				
13					0.93	0.98	1.20	1.09				
14					0.93	0.98	1.20	1.09				
15					0.98	1.03	1.20	0.93				
16					1.03	1.03	1.46	0.88				
17					1.14	1.09	2.06	0.88				
18					1.35	1.03	1.81	1.28				
19					1.20	1.03	3.02	0.88				
20					1.03	1.03	5.75	0.82				
旬总数					10.11	10.43	20.26	10.70				
旬平均					1.01	1.04	2.03	1.07				
21					0.93	1.03	4.18	1.03				
22					0.88	1.14	2.96	1.09				
23					0.93	1.14	2.90	0.93				
24					0.93	1.14	4.40	0.88				
25					1.03	1.28	3.02	0.88				
26					0.93	1.35	1.46	0.88				
27					0.98	1.28	2.90	0.82				
28					0.98	1.28	2.06	0.78				
29					1.03	1.57	4.40	0.82				
30					1.14	1.46	2.96	0.78				
31					1.20		1.35	0.88				
旬总数					10.96	12.67	32.59	9.77				
旬平均					1.00	1.27	2.96	0.89				
总数					24.42	37.04	71.54	34.64				
平均					0.79	1.23	2.31	1.12				
最大					2.06	6.63	8.80	3.44				
日期					18	3	19	10				
最小					0	0.82	0.98	0.53				
日期					1-5	14	13	20				
年统计	年总数 167.640		最大流量 8.80 7月19日				最小流量 0 5月1日			平均流量 1.096		
	径流量 $1.45\text{E}+07 \text{ m}^3$			径流模数 $37.9 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$				径流深度 501 mm				

表 10 乌鲁木齐河源总控水文点逐日平均气温表（气温：℃）

日\月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1	-22.0	-20.9	-9.5	-8.0	-1.3	6.8	4.9	9.2	1.8	3.5	-5.7	-11.8
2	-22.6	-18.1	-11.3	-6.8	-6.8	7.3	4.7	9.9	4.3	1.5	-5.8	-16.4
3	-16.3	-18.4	-10.0	-7.0	0.7	5.2	8.6	9.1	2.7	1.8	-8.3	-18.0
4	-11.2	-20.0	-8.1	-5.0	4.0	3.8	6.6	9.8	1.5	3.1	-9.8	-14.3
5	-14.7	-22.4	-8.6	-0.2	0.6	5.7	6.2	0.4	2.1	1.2	-8.4	-13.3
6	-14.3	-21.9	-9.5	-5.8	-2.4	6.4	6.9	0.6	2.2	0.0	-6.9	-14.5
7	-10.4	-20.5	-7.7	-4.6	-4.8	4.9	5.6	5.9	-3.7	-1.4	-6.3	-10.3
8	-7.9	-20.7	-6.0	-6.3	-5.3	3.6	3.9	6.5	-0.8	-3.7	-4.3	-9.4
9	-10.6	-19.1	-8.0	-8.8	3.1	5.3	3.4	6.4	2.0	-1.6	-6.9	-8.9
10	-14.1	-23.2	-8.3	-9.3	4.0	8.7	4.3	8.6	3.3	-0.5	-8.1	-9.3
旬总数	-144.0	-205.2	-86.9	-61.7	-8.2	57.5	55.0	66.3	15.4	4.0	-70.5	-125.9
旬平均	-14.4	-20.5	-8.7	-6.2	-0.8	5.7	5.5	6.6	1.5	0.4	-7.0	-12.6
11	-16.1	-23.3	-9.6	-6.1	4.5	4.0	4.8	8.0	3.3	-0.5	-13.5	-9.8
12	-20.0	-24.2	-5.5	-3.3	4.4	2.0	5.8	6.3	1.1	-2.2	-16.2	-15.8
13	-20.1	-20.4	-4.5	-3.0	2.2	1.6	5.3	4.7	1.3	-1.9	-13.5	-16.2
14	-18.5	-13.6	-9.7	-1.9	6.0	4.5	5.5	5.3	3.6	-2.8	-13.3	-13.7
15	-16.9	-13.2	-3.7	-2.0	3.9	6.9	4.6	7.5	3.3	-2.5	-13.4	-12.5
16	-15.8	-12.7	-2.7	-1.5	4.5	5.2	3.8	6.5	3.9	-4.3	-15.9	-8.9
17	-17.2	-15.4	-5.2	0.3	4.3	3.6	5.5	2.4	4.8	-4.9	-13.8	-5.7
18	-24.5	-12.6	-4.8	-10.3	4.7	0.0	7.4	0.7	5.8	-3.2	-10.4	-9.0
19	-24.8	-11.6	-10.9	-16.0	6.1	1.3	6.8	-2.7	2.8	-1.4	-10.3	-14.6
20	-26.2	-11.8	-12.8	-16.0	-0.3	-0.8	5.3	2.7	-0.5	-7.5	-11.9	-9.4
旬总数	-199.9	-158.8	-69.1	-59.8	40.2	28.1	54.6	41.3	29.3	-31.0	-132.1	-115.5
旬平均	-20.0	-15.9	-6.9	-6.0	4.0	2.8	5.5	4.1	2.9	-3.1	-13.2	-11.5
21	-23.3	-7.3	-8.2	-5.2	3.8	0.3	5.8	4.5	-4.1	-11.1	-12.7	-10.1
22	-22.6	-11.8	-7.0	-0.4	2.4	4.3	5.7	3.7	-3.6	-8.1	-15.4	-15.2
23	-22.4	-18.5	-7.7	1.8	2.5	3.4	5.8	4.3	-3.4	-8.1	-13.0	-11.9
24	-22.9	-20.7	-5.7	1.1	2.0	4.5	5.5	4.1	-0.4	-8.4	-14.4	-14.0
25	-18.4	-17.5	-5.0	-1.2	0.4	4.9	5.4	3.3	-0.1	-7.6	-12.5	-14.3
26	-22.2	-17.1	-6.5	0.9	4.2	6.8	4.6	4.8	0.6	-5.2	-10.5	-15.6
27	-20.7	-16.5	-11.1	2.1	5.7	3.2	7.9	2.3	1.4	-10.5	-13.9	-23.9
28	-21.9	-9.6	-10.2	1.0	4.8	3.2	6.0	0.5	1.4	-2.8	-12.9	-16.4
29	-22.5	-15.0	-4.9	1.6	5.3	6.7	3.5	4.9	2.8	-7.0	-6.8	-13.7
30	-23.2		-13.0	2.5	6.6	4.1	5.7	4.0	2.4	-6.2	-11.3	-12.2
31	-23.3		-11.5		6.5		8.0	2.7		-6.9		-16.7
旬总数	-243.3	-134.0	-90.9	4.2	44.1	41.2	63.8	39.0	-3.1	-81.7	-123.2	-163.7
旬平均	-22.1	-16.8	-8.3	0.4	4.0	4.1	5.8	3.5	-0.3	-7.4	-12.3	-14.9
月总数	-587.2	-498.0	-246.9	-117.3	76.1	126.8	173.4	146.6	41.6	-108.7	-325.8	-405.1
月平均	-18.9	-17.2	-8.0	-3.9	2.5	4.2	5.6	4.7	1.4	-3.5	-10.9	-13.1
最高	-2.0	0.0	2.0	9.0	14.5	14.1	14.2	16.0	10.5	9.5	3.8	-1.4
日期	8	21	16	23	31	29	3	1	10	1	8	18
最低	-29.6	-27.0	-19.2	-20.2	-12.5	-5.4	-0.8	-7.8	-6.8	-17.5	-19.7	-30.0
日期	20	11	20	20	2	21	28	20	23	21	12	27
年统计	最高 16.0 8月 1日			最低 -30.0 12月 27日				年平均 -4.7				

表 11 乌鲁木齐河源总控水文点逐日降水量表 (降水量: mm)

日月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1						1.8	8.9		0.8			
2					4.2		8.3					
3						13.3				4.5		
4						2.1	1.5		2.5			
5					3.9		1.7	18.8	1.7			
6					4.3		2.4					
7					8.5		2.4		2.1	0.6		
8						9.2	2.6	3.2		4.5		
9						0.2		1.9				
10												
11					0.1							
12		1.6			0.0	2.1		2.8	8.0			
13					6.5	2.2	0.9	5.2	10.5			
14					0.4		5.9	3.3	5.2			
15					1.8	1.6	0.9					
16						1.1				3.7		
17					3.9	3.3	8.9	8.2				
18					10.7	1.4		12.8				
19						1.5	13.6	2.0	8.5			
20					4.0	4.8	14.5					
21							10.3		7.6			
22							1.5		2.0			
23						1.9	2.0					
24					5.9	0.8	14.4					
25					7.9	1.7		0.9	5.2			
26		1.8					1.7	2.5				
27						4.4						
28						1.6	9.0	3.2				
29					2.8		9.3					
30						0.4	1.6					
31					0.4			6.2				
总量	0.0	3.4	0.0	0.0	65.3	55.4	122.3	71.0	53.3	13.3	0.0	0.0
降水日数		2			16	19	21	13	11	4		
最大降水量		1.8			10.7	13.3	14.5	18.8	10.5	4.5		
日期		26			17	3	20	5	13	8		
年统计	降水量 384.0					降水日数 86						

表 12 乌鲁木齐河源总控水文点逐日平均相对湿度表（相对湿度：%）

日\月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1					74	67	91	76				
2					89	70	71	59				
3					35	75	61	61				
4					54	73	76	80				
5					88	26	94	93				
6					95	49	82	34				
7					100	52	87	67				
8					28	81	92	77				
9					36	64	95	90				
10					47	44	76	72				
旬总数					645	599	824	709				
旬平均					65	60	82	71				
11					69	91	78	91				
12					65	74	68	77				
13					78	61	81	96				
14					38	60	90	95				
15					83	57	86	64				
16					75	67	90	75				
17					78	74	91	95				
18					86	67	70	95				
19					43	66	88	97				
20					87	84	97	44				
旬总数					701	699	838	829				
旬平均					70	70	84	83				
21					71	44	97	69				
22					55	61	98	79				
23					75	91	86	82				
24					93	83	93	82				
25					89	84	96	76				
26					46	76	88	78				
27					59	80	74	84				
28					51	88	95	68				
29					71	77	92	52				
30					62	96	84	73				
31					63		56	92				
旬总数					733	780	958	834				
旬平均					67	78	87	76				
月总数					2079	2079	2621	2372				
月平均					67	69	85	77				
最小					3	11	21	12				
日期					9	19	3	28				

附注：相对湿度只在 5-8 月冰川消融期观测

表 13 乌鲁木齐河源后峡基本营地气象场逐日平均气温表 (气温: °C)

日\月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1	-18.2	-15.1	-4.3	-0.1	0.8	15.7	12.8	16.8	10.9	7.3	-1.1	-8.1
2	-19.0	-13.3	-2.6	0.9	-0.8	14.5	13.8	18.7	11.4	7.6	-1.4	-12.0
3	-15.9	-13.5	-2.0	1.5	4.0	11.8	15.5	15.5	11.7	8.1	-2.3	-16.8
4	-13.4	-13.8	-1.4	2.5	9.5	12.0	16.1	15.4	10.3	7.5	-0.5	-13.5
5	-13.1	-14.9	-1.3	4.0	6.9	12.7	14.3	8.1	9.9	5.5	-1.8	-9.7
6	-14.1	-15.8	-1.4	1.8	4.8	15.2	14.3	11.1	8.0	5.6	-1.0	-7.0
7	-12.2	-15.2	-1.6	4.2	4.4	14.5	13.5	13.6	3.8	4.3	-2.0	-8.2
8	-10.3	-14.9	0.4	-0.4	6.8	13.0	11.3	13.4	4.3	5.7	-0.6	-6.8
9	-9.7	-14.5	0.5	-2.4	10.9	14.1	10.0	14.5	7.9	4.4	-1.9	-5.2
10	-12.2	-14.5	0.4	-0.5	11.5	15.4	12.3	17.3	9.3	4.9	-4.2	-7.7
旬总数	-138.1	-145.4	-13.4	11.4	58.7	138.7	133.7	144.3	87.3	60.8	-16.6	-94.8
旬平均	-13.8	-14.5	-1.3	1.1	5.9	13.9	13.4	14.4	8.7	6.1	-1.7	-9.5
11	-11.3	-15.9	-3.3	1.3	11.8	11.5	13.3	15.3	11.0	5.2	-7.2	-7.2
12	-13.0	-16.7	-0.8	3.3	12.0	11.1	14.3	15.1	12.2	4.9	-7.4	-10.2
13	-15.1	-17.3	0.2	4.3	12.0	10.4	15.0	13.9	8.4	5.8	-7.9	-12.7
14	-15.9	-11.1	-0.7	6.1	11.8	12.1	14.5	11.8	9.4	2.8	-4.5	-13.8
15	-15.0	-9.8	1.7	2.1	10.4	14.5	14.6	14.1	9.9	1.9	-7.0	-10.3
16	-14.9	-7.9	2.6	5.1	13.0	13.4	14.7	13.9	9.6	2.4	-6.2	-11.1
17	-14.5	-8.8	2.3	5.6	15.1	11.3	15.3	12.3	11.3	1.1	-8.5	-8.3
18	-15.3	-7.3	2.6	-6.7	11.2	8.6	16.0	12.7	10.0	3.5	-8.3	-7.6
19	-19.7	-6.5	-3.4	-8.1	11.2	9.9	14.5	6.7	9.6	4.7	-7.5	-10.1
20	-22.5	-7.4	-3.2	-6.2	9.3	6.3	11.3	9.6	5.2	-1.4	-6.4	-10.6
旬总数	-157.2	-108.8	-1.9	6.7	117.9	109.0	143.6	125.2	96.6	30.8	-70.8	-101.8
旬平均	-15.7	-10.9	-0.2	0.7	11.8	10.9	14.4	12.5	9.7	3.1	-7.1	-10.2
21	-20.6	-1.0	3.7	-1.1	9.3	9.3	13.1	12.1	4.7	-5.9	-5.1	-6.4
22	-19.3	-6.6	1.3	2.5	10.5	12.7	14.9	12.3	2.5	-3.2	-7.5	-10.7
23	-19.2	-9.6	2.8	6.6	11.7	13.5	14.6	12.3	0.3	-1.3	-7.7	-10.4
24	-19.1	-12.1	3.2	6.4	9.0	12.8	13.6	11.3	4.1	2.8	-6.6	-11.5
25	-16.8	-11.7	-0.2	7.7	9.1	13.8	12.5	11.3	7.5	-0.3	-8.0	-13.4
26	-16.8	-9.8	-1.2	8.3	9.8	11.5	12.0	12.1	6.3	-0.2	-1.4	-15.0
27	-16.7	-7.4	-3.6	8.6	11.4	11.5	14.2	7.3	7.4	-0.2	-5.3	-18.0
28	-15.5	-2.4	-2.6	6.0	11.2	11.3	14.4	8.9	7.4	-2.0	-6.6	-15.2
29	-16.7	-6.2	-0.9	6.4	12.1	13.3	13.2	10.6	8.8	-0.4	-5.3	-11.9
30	-17.0		-5.7	6.4	14.5	13.9	14.2	11.4	12.2	-0.3	-5.5	-10.3
31	-16.6		-4.4		19.2		15.0	9.4		-1.0		-12.2
旬总数	-194.3	-66.7	-7.5	57.6	127.6	123.6	151.7	118.9	61.1	-11.9	-58.9	-135.0
旬平均	-17.7	-7.4	-0.7	5.8	11.6	12.4	13.8	10.8	6.1	-1.1	-5.9	-12.3
月总数	-489.5	-320.9	-22.8	75.7	304.2	371.4	429.1	388.3	245.1	79.7	-146.3	-331.6
月平均	-15.8	-11.1	-0.7	2.5	9.8	12.4	13.8	12.5	8.2	2.6	-4.9	-10.7
最高	1.5	17.5	25.7	19.7	24.8	26.4	26.0	35.5	22.0	17.6	11.5	4.8
日期	8	28	29	23	31	10	13	4	2	4	5	1
最低	-27.6	-24.3	-14.0	-12.4	-4.8	1.5	4.4	1.0	-3.5	-13.0	-13.4	-22.6
日期	20	13	1	20	3	2	13	6	15	21	17	27
年统计	最高 35.5 7月4日			最低 -27.6 1月20日			年平均 1.6					

表 14 乌鲁木齐河源后峡基本营地气象场逐日降水量表（降水量：mm）

日月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	
1					1.0	1.2	1.8			1.7			
2					8.4		5.5			0.6		0.6	
3						13.6			0.2	3.1			
4						3.1	2.6	1.0			0.7		
5				0.8	3.7		4.5	10.2		1.8			
6				0.3	3.3		3.4			3.0			
7				0.3	2.5		6.9		3.8	0.3			
8					3.3	6.0	1.8						
9			0.0								1.6		
10											0.7		
11	0.2	0.4	0.1			2.1					1.1		
12	1.3					0.6		0.0					
13						7.5		0.3	0.6				
14									0.2				
15	0.1			2.6					1.8				
16				2.5		0.2				1.3			
17				0.3		7.3	0.9	3.0					
18	0.1			3.1	2.5	7.9		4.1					
19	0.3		6.1		2.5	5.2	10.4	10.6	0.2				
20			2.6	0.2		13.4	4.8	2.2	3.3	4.2			
21					1.5	0.7	1.0		2.1				
22		0.4					0.3	0.0	1.9				
23		1.2					1.3	0.8	0.3	0.9			
24		0.1			8.4		7.7	7.0					
25					5.1	3.5	0.0	10.9					
26						1.1	5.8	0.0					
27						2.9		7.2					
28				0.3		4.9	1.7	0.0					
29		1.3				0.4	8.9	0.0					
30			1.6	0.2		1.5	0.6	0.0					
31								4.6					
总量	2.0	3.4	10.4	10.6	42.2	84.4	69.4	61.4	15.0	16.0	4.1	0.6	
降水日数	5	5	5	10	11	20	19	18	10	8	4	1	
最大降水量	1.3	1.3	6.1	3.1	8.4	13.6	10.4	10.9	3.8	4.2	1.6	0.6	
日期	12	29	19	18	2	3	19	25	7	20	9	2	
年统计	降水量 319.5					降水日数 116							

表 15 乌鲁木齐河源后峡基本营地气象场逐日平均相对湿度表 (相对湿度: %)

日/月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
1	69	59	59	40	76	61	84	69	75	83	75	69
2	69	54	56	42	80	66	78	59	67	84	78	83
3	59	55	59	53	72	89	64	57	67	83	84	86
4	57	55	58	54	59	76	64	71	76	74	87	81
5	70	56	57	47	75	59	76	93	70	86	73	70
6	77	66	60	61	91	52	83	66	96	90	72	79
7	69	69	71	67	78	60	86	63	79	83	73	75
8	63	71	66	83	72	76	81	75	77	69	74	74
9	69	70	68	69	62	69	76	68	66	68	89	61
10	80	75	76	73	65	60	65	58	68	67	84	72
旬总数	681	628	630	587	728	666	755	679	741	786	789	749
旬平均	68	63	63	59	73	67	76	68	74	79	79	75
11	86	85	72	62	61	83	66	69	63	64	96	68
12	93	85	55	55	69	77	56	74	69	72	74	84
13	90	68	60	64	68	72	64	74	75	72	71	86
14	82	59	54	66	58	62	61	74	67	82	77	66
15	83	65	46	87	74	61	67	68	72	73	87	65
16	77	59	52	80	71	69	66	68	73	87	80	76
17	74	64	67	65	63	82	66	75	65	71	71	69
18	87	53	76	86	81	88	71	71	69	64	71	71
19	86	52	87	68	86	82	86	90	78	65	74	84
20	82	54	77	64	84	89	85	70	91	94	70	87
旬总数	839	641	646	696	714	764	687	733	722	744	771	755
旬平均	84	64	65	70	71	76	69	73	72	74	77	75
21	72	46	62	61	87	75	79	65	89	75	73	65
22	72	82	57	53	73	67	79	68	87	72	77	83
23	76	92	56	47	80	69	80	74	88	71	61	76
24	77	78	59	49	83	71	85	80	79	68	64	80
25	78	70	82	65	90	73	85	81	65	69	63	90
26	76	64	67	56	84	95	79	71	68	83	38	88
27	77	54	60	49	72	84	72	94	68	83	57	74
28	73	54	53	75	61	85	81	74	70	69	63	71
29	73	81	60	65	60	91	77	65	65	70	51	78
30	66		68	68	60	82	70	68	61	73	72	70
31	58		49		61		70	82		73		91
旬总数	797	621	672	587	810	792	857	822	740	805	619	865
旬平均	72	78	61	59	74	79	78	75	74	73	62	79
月总数	2317	1889	1947	1870	2252	2221	2300	2234	2203	2335	2179	2369
月平均	75	65	63	62	73	74	74	72	73	75	73	76
最小	26	22	14	12	20	22	22	24	28	23	13	33
日期	30	21	12	1	9	6	3	10	30	28	26	1

乌鲁木齐河源 1 号冰川表面运动速度 和冰舌末端变化 (2006/2007 和 2007/2008 年度)

曹 敏

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所/天山冰川站, 甘肃 兰州 730000)

1 观测与说明

2007 年 8 月及 2008 年 8 月对冰川表面的运动点进行了冰川表面运动的观测, 观测是使用 RTK-GPS 进行测量的。

表1 为2006/2007 年度的运动速度, 表2 为1 号冰川东、西支冰舌的年进退变化量, 表3、4 为2007 和2008 年度的各流速点的空间坐标。

坐标系统仍为独立坐标系。X 为纵坐标, Y 为横坐标, Z 为竖直向上的坐标。 U_x 、 U_y 是分别平行于 X 和 Y 速度分量, U_{xy} 为速度的水平分量, a 为运动速度的方向。

2 运动速度的初步分析

在计算和整编运动速度资料的过程中, 经过对比和分析得出以下结果:

(1) 从表 1 可以看出, 东支冰川 2007 年度最大流速点为 E3', 其年流速为 4.26 m。西支冰川 2007 年度最大流速点为 E2 点, 其年流速为 4.52 m。最大流速点位与往年相同。

(2) 冰川末端进退的观测方法仍同以往。表 2 反映了 2007 年度和 2007 年 8 月至 2008 年 4 月的冰舌退缩量。2007 年度西支冰舌的退缩量相对 2006 年度有所增加。

3 07/08 年度 1 号冰川运动速度说明

07/08 年冰川运动方面的观测注重季节观测, 和以前年度观测不同。季节变化发现的结果, 已有文章发表, 详见周在明《冰川冻土》文章——《天山乌鲁木齐河源区 1 号冰川运动速度特征及其动力学模拟》。

表 1 年运动速度 (观测日期: 2006.08.19—2007.08.20)

点名	Ux	Uy	Uxy	A(° ')	Uxy(m/a)
A'	2.17	1.34	2.55	31°41'	2.55
B1'	2.03	1.88	2.77	42°48'	2.77
B2'	2.78	2.77	3.93	44°53'	3.93
B3'	2.34	3.1	3.88	52°57'	3.88
C1'	2.58	2.99	3.95	49°12'	3.95
C2'	3.41	1.98	3.95	30°8'	3.95
C3'	3.34	2.03	3.91	31°17'	3.91
D1'	2.96	1.68	3.4	29°34'	3.4
D2'	1.07	3.76	3.91	74°6'	3.91
D3'	1.8	2.87	3.39	57°54'	3.39
E1'	2.83	2.03	3.49	35°39'	3.49
E2'	3.31	2.67	4.26	38°53'	4.26
E3'	2.89	2.93	4.12	45°23'	4.12
F1'	1.1	2.52	2.75	66°25'	2.75
F2'	2.88	0.87	3	16°48'	3.00
F3'	2.85	1.37	3.17	25°40'	3.17
G1'	1.56	0.63	1.68	21°59'	1.68
G2'	1.48	2.01	2.5	53°38'	2.5
G3'	1.49	2.87	3.24	62°33'	3.24
H1'	0.49	1.32	1.41	69°38'	1.41
H2'	1.57	1.63	2.26	46°4'	2.26
H3'	1.03	1.47	1.79	54°58'	1.79
H4'	1.09	1.02	1.5	43°5'	1.50
A	0.73	1.68	1.83	66°30'	1.83
B	1.24	3.68	3.88	71°22'	3.88
C1	2.35	2.57	3.48	47°33'	3.48
C2	3.1	2.89	4.24	42°59'	4.24
C3	1.96	3.21	3.76	58°35'	3.76
D1	1.02	2.57	2.77	68°21'	2.77
D2	2.65	2.2	3.45	39°41'	3.45
D3	3.16	0.87	3.28	15°23'	3.28
E1	2.57	2.47	3.56	43°51'	3.56
E2	3.79	2.47	4.52	33°5'	4.52
E3	1.22	4.12	4.3	73°30'	4.3
F1	0.98	2.87	3.03	71°8'	3.03
F2	2.31	2.79	3.62	50°22'	3.62
F3	1.02	2.98	3.15	71°6'	3.15
G1	0.75	2.35	2.47	72°17'	2.47
G2	1.55	2.73	3.14	60°24'	3.14
G3	3.00	1.16	3.22	21°8'	3.22
H1	0.54	1.7	1.78	72°22'	1.78
H2	1.89	2.09	2.82	47°52'	2.82
H3	2.54	1.5	2.95	30°33'	2.95
L1	1.66	4.04	4.37	67°39'	4.37
L2	3.52	2.72	4.45	37°41'	4.45

表2 东西支冰舌进退变化量(m)

时间	东支冰舌	西支冰舌
2006.8.19-2007.8.20	-3.57	-6.39
2007.8.20-2008.4.20	-3.65	-6.43

注：“-”表示为后退

表3 流速点坐标（观测日期：2006.08.19）

东支点名	X(m)	Y(m)	西支点名	X(m)	Y(m)
A'	3203.07	3817.56	A	3232.27	4153.71
B1'	3480.25	3950.55	B	3452.57	4255.45
B2'	3253.81	4022.86	C1	3802.78	4333.28
B3'	2991.46	4033.26	C2	3664.30	4409.06
C1'	3553.04	4255.90	C3	3451.97	4416.64
C2'	3241.62	4251.46	D1	4017.72	4514.08
C3'	2995.59	4284.42	D2	3811.24	4557.73
D1'	3586.51	4417.75	D3	3585.97	4608.21
D2'	3243.61	4426.79	E1	4105.57	4651.50
D3'	2908.27	4442.25	E2	3937.75	4691.65
E1'	3598.25	4609.21	E3	3706.75	4733.05
E2'	3233.52	4554.37	F1	4113.08	4774.23
E3'	2960.78	4605.97	F2	4006.85	4793.60
F1'	3534.25	4858.87	F3	3804.14	4839.51
F2'	3207.00	4862.80	G1	4199.33	4868.45
F3'	2909.66	4863.36	G2	4060.47	4919.18
G1'	3536.27	4958.42	G3	3845.31	4939.47
G2'	3238.57	4985.75	H1	4286.22	4982.32
G3'	2963.53	5078.22	H2	4104.12	5029.07
H1'	3502.51	5206.74	H3	3946.66	5035.43
H2'	3284.08	5207.05	L1	4204.14	5088.06
H3'	3199.17	5322.66	L2	3973.17	5136.35
H4'	2896.49	5275.62			

表 4 流速点坐标 (观测日期: 2007.8.20)

东支点名	X (m)	Y (m)	西支点名	X (m)	Y (m)
A'	3205.24	3818.91	A	3233.00	4155.38
B1'	3482.28	3952.43	B	3453.81	4259.13
B2'	3256.59	4025.63	C1	3805.13	4335.85
B3'	2993.80	4036.36	C2	3667.40	4411.95
C1'	3555.62	4258.89	C3	3453.93	4419.84
C2'	3245.03	4253.45	D1	4018.75	4516.65
C3'	2998.93	4286.46	D2	3813.89	4559.94
D1'	3589.46	4419.43	D3	3589.14	4609.08
D2'	3244.68	4430.55	E1	4108.14	4653.97
D3'	2910.07	4445.13	E2	3941.53	4694.12
E1'	3601.09	4611.25	E3	3707.97	4737.17
E2'	3236.84	4557.05	F1	4114.06	4777.10
E3'	2963.67	4608.90	F2	4009.16	4796.39
F1'	3535.35	4861.40	F3	3805.16	4842.49
F2'	3209.88	4863.67	G1	4200.07	4870.81
F3'	2912.51	4864.73	G2	4062.01	4921.92
G1'	3537.83	4959.05	G3	3848.31	4940.64
G2'	3240.05	4987.76	H1	4286.77	4984.01
G3'	2965.02	5081.09	H2	4106.01	5031.16
H1'	3503.01	5208.07	H3	3949.20	5036.92
H2'	3285.65	5208.69	L1	4205.80	5092.10
H3'	3200.20	5324.12	L2	3976.69	5139.07
H4'	2897.58	5276.64			

文章编号: 1000-0240(2009)01-0055-07

天山乌鲁木齐河源区 1 号冰川运动速度特征及其动力学模拟

周在明, 李忠勤, 李慧林, 井哲帆

(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/天山冰川国家野外观测试验站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 冰川运动造成了冰川物质的再分布, 改变了冰体所处的水、热环境, 维系了冰川的动态平衡。冰川表面速度是冰川运动的基本体征, 通过对天山乌鲁木齐河源区 1 号冰川 2006—2008 年连续 2 a 的月观测, 获得了冰川表面运动速度的时、空变化特征, 并对其进行了动力学模拟验证。结果表明: 冰川运动速度分布是冰川厚度、冰面坡度及冰川基岩形态等因素综合作用的结果, 而厚度的改变是运动速度季节性变化的主要影响因素。

关键词: 1 号冰川; 运动速度; 冰川断面; 动力学模拟

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A

0 引言

冰川或冰盖内部的冰, 由于受到重力的驱动作用发生着沿坡向下的位移。此外, 冰川还可能发生底部运动包括在下伏基岩上发生的滑动与底部沉积层变形造成的运动。这两种运动过程构成了冰川运动的主要形式作^[1]。运动是冰川的基本过程, 是冰川动力学的基础, 是冰川区别于其它自然冰体的主要标志之一^[2-3]。与冰川运动相适应的是冰川物质平衡的变化^[4-7], 冰体所处的融水、温度环境的改变^[8-9], 以及冰体所受应力作用的不稳定^[10]。因此, 冰川运动造成了冰川物质的再分布, 改变了冰体所处的水、热环境, 维系了冰川的动态平衡。

目前, 国际上以欧美国家为主对极地冰盖与阿拉斯加湾、阿尔卑斯山区的海洋型冰川进行了深入的研究^[11-15], 揭示了冰川运动速度的分布规律及其与冰下地形、潮汐作用、水压作用等的关系^[9, 12, 16-17]。中国是世界上山岳冰川最发达的国家之一^[18], 自 20 世纪 50 年代以来, 科学工作者对天山、阿尔泰山、祁连山、喀喇昆仑山、喜马拉雅山、念青唐古拉山、横断山等山区的冰川进行了运动速

度的观测研究, 取得了一定的研究成果^[19-23]。天山乌鲁木齐河源区 1 号冰川(以下简称 1 号冰川)是在我国境内研究冰川运动速度最早的冰川, 对 1 号冰川的运动观测始于 1959 年^[24], 至今已有近 50 a 的观测历史。然而其运动速度的季节变化资料缺乏, 对其运动速度与动力学关系的认识还不够深入, 为此我们开展了 1 号冰川运动速度的季节变化与动力学模拟研究。

1 运动速度的观测与方法

1 号冰川的观测点位源于早期的冰川运动速度与物质平衡花杆点。点位布设情况为: 东支冰川在海拔 3 800~4 050 m 共布设 A'~H' 共 8 排 23 根花杆, 西支冰川在海拔 3 850~4 100 m 共布设 A~L 共 9 排 22 根花杆(观测点位图 1 所示)。控制点位的观测采用传统的大地测量方法, 应用 SOKKIA、GSS1A 型 GPS 定点。运动点位观测应用 KTS442 型全站仪测定。GPS 测量控制点的处理采用定位解算软件 GAMIT/ GLOBK, 根据观测方法并经过误差分析, 水平方向精度 ≤ 5 mm, 高程精度 ≤ 20 mm。运动速度观测数据计算以坐标法计算出冰体单位时间内的

收稿日期: 2008-08-13; 修订日期: 2008-12-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2007CB411501); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-127); 国家自然科学基金项目(40631001; 40571033; 40371028; J0630966)资助

作者简介: 周在明(1980—), 男, 山东淄博人, 2004 年毕业于山东理工大学, 现为在读硕士研究生, 主要从事冰川运动与冰川变化研究。

E-mail: zhoumingzhou@163.com

位移, 位移量与时间的比值即为单位时间内的速度值. 坐标系统为独立坐标系, X 为纵坐标, Y 为横坐标. U_x, U_y 分别为平行于 X, Y 轴的速度分量, Y_{xy} 为速度的水平分量, $Y_{xy} = (U_x^2 + U_y^2)^{1/2}$, 误差一般不超过其本身数据的 10%.

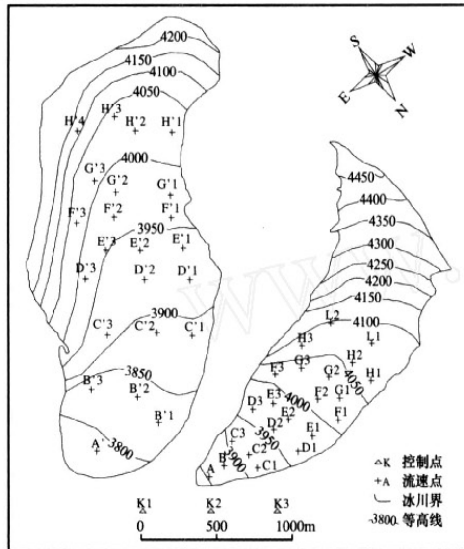


图 1 乌鲁木齐河源区 1 号冰川运动速度观测点
Fig.1 Points for flow velocity surveying of the Glacier No. 1 at the headwaters of Ürtmqi River

本文研究的 1 号冰川运动速度资料来自 2006 年 6 月 1 日至 2008 年 4 月 3 日之间的 12 次观测数据, 观测时间分别为: 2006 年 6 月 1 日、2006 年 7 月 17 日、2006 年 8 月 19 日、2006 年 9 月 26 日、2006 年 10 月 20 日、2007 年 5 月 1 日、2007 年 7 月 24 日、2007 年 8 月 20 日、2007 年 9 月 22 日、2007 年 10 月 24 日、2007 年 12 月 21 日和 2008 年 4 月 3 日.

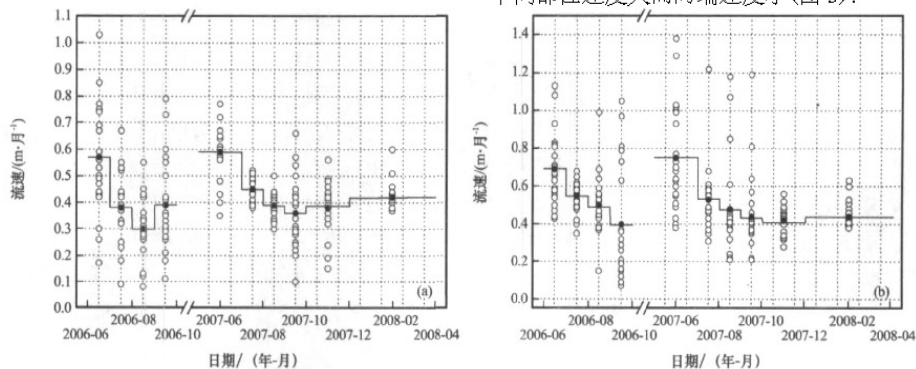


图 2 乌鲁木齐河源区 1 号冰川 2006—2008 年月运动速度图

注: (a) 东支冰川; (b) 西支冰川, 图中的小圆圈表示不同观测点, 实线表示月平均运动速度值

Fig.2 Observed monthly flow velocities of the Glacier No.1 at the headwaters of Ürtmqi River (2006—2008)

2 运动速度的时间变化特征分析

对 1 号冰川 2006—2008 年的观测数据分析表明, 东、西支冰川的月运动速度变化规律表现出很好的一致性(图 2). 东西两支的月运动速度最大值都出现在 2007 年 5—7 月间, 东支冰川最大值为 $0.59 \text{ m} \cdot \text{月}^{-1}$, 西支冰川为 $0.75 \text{ m} \cdot \text{月}^{-1}$; 月运动速度的最小值东支出现在 2006 年 8—9 月间, 速度值为 $0.30 \text{ m} \cdot \text{月}^{-1}$, 西支出现在 2006 年 9—10 月间, 速度值为 $0.40 \text{ m} \cdot \text{月}^{-1}$. 总体来看, 5—7 月的运动速度值较大, 从 7 月份开始运动速度开始减小, 东支冰川 9 月份以后运动速度值又开始缓慢增大, 西支冰川 12 月以后速度开始小幅度回升.

东西支冰川表面运动速度的季节变化规律在 2007 年表现出很好的一致性. 运动速度在春季最大, 到夏、秋季节持续减小, 到冬季又有增大趋势, 最小值出现在秋季. 西支冰川的运动速度比东支冰川大, 其差别在春季尤为显著为 $0.15 \text{ m} \cdot \text{月}^{-1}$, 而冬季较小 $0.03 \text{ m} \cdot \text{月}^{-1}$. 对同支冰川来说, 不同季节的运动速度差异明显, 春季速度与秋季速度相比, 东支冰川为 1.7 倍, 西支冰川为 1.6 倍.

2007 年四季中, 西支冰川的运动速度变化幅度都大于东支, 西支冰川表现出相对较快的运动特征. 在春季较为明显, 西支冰川运动速度变化幅度为 $0.36 \sim 0.12 \text{ m} \cdot \text{月}^{-1}$, 而东支为 $0.36 \text{ h} \sim 0.78 \text{ m} \cdot \text{月}^{-1}$. 在不同季节中东西支冰川速度分布差异较大, 在运动速度较快的春季与夏季西支冰川个别点位运动速度值较大, 且速度值的大小差别较大, 东支冰川速度分布相对均匀. 在运动速度相对较慢的秋、冬季节东西支冰川速度分布均匀, 且表现为中间部位速度大而两端速度小(图 3).

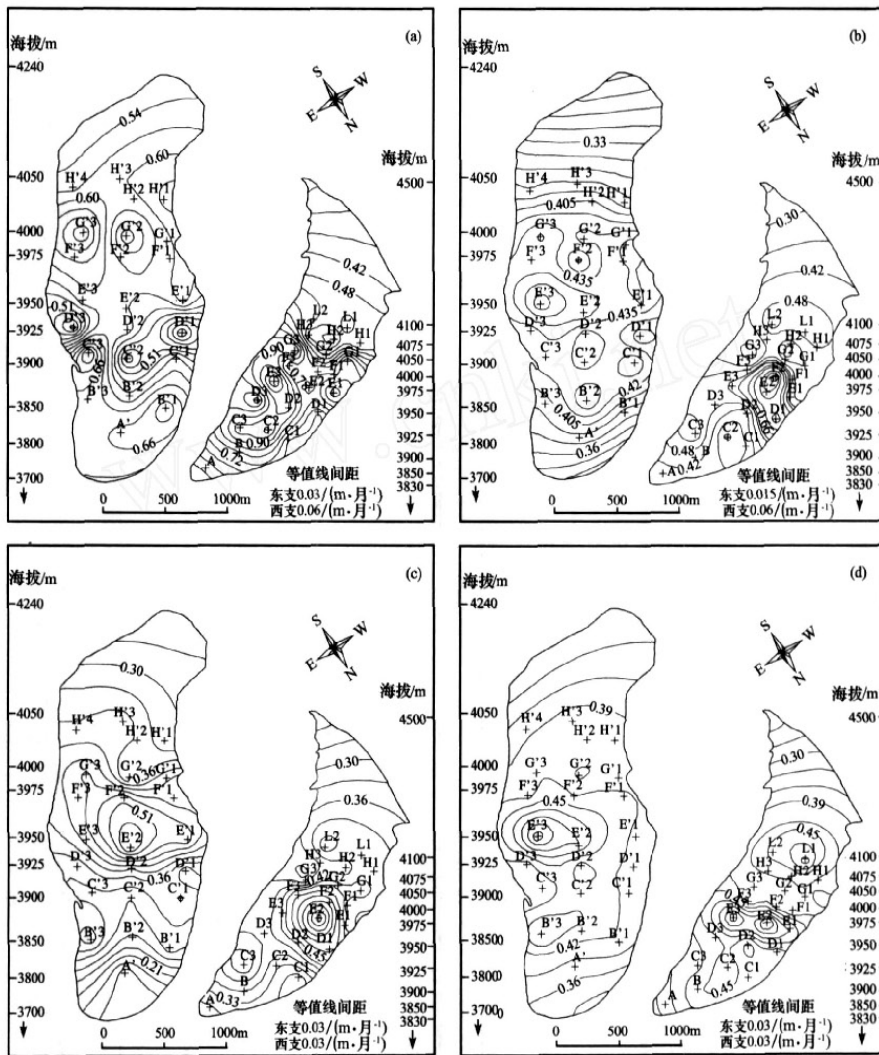


图 3 乌鲁木齐河源区 1 号冰川 2007 年不同季节运动速度等值线
(a、b、c、d 分别代表春、夏、秋、冬)

Fig. 3 Isolines of flow velocities of the Glacier No. 1 at the headwaters of Ürümqi River in spring (a) summer (b) autumn (c) and winter (d) in 2007

3 运动速度高度变化特征分析

在同时期内, 西支冰川的运动速度比东支冰川的大, 东支冰川在历次观测中都表现出中间 E' 断面运动速度快, 而两端运动速度低的现象. 西支冰川的历次观测中基本上是中间 E 断面速度最大, 而未端 A 断面与顶端的 G 或 H 断面速度较小. 东、西支冰川的速度变化幅度都表现为中间断面大而两端断面小 (图 4).

东西支冰川表现出在中间断面两边的断面上运

动速度值表现出对称性: 如东支冰川以海拔 3 950 m 的 E' 断面为中心两边的 H' 与 B' 断面; 西支冰川以海拔 3 975 m 的 E 断面为中心两边的 C 与 G 断面, B 与 H 断面 (图 5).

4 运动速度动力学模式模拟

为了进一步讨论冰川表面运动速度的时空分布及成因, 利用表面高程、厚度、长度及宽度等实测资料对 1 号冰川的表面速度进行动力学模拟. 采用的模式是近年来国际上通用的 SIA (Shallow Ice

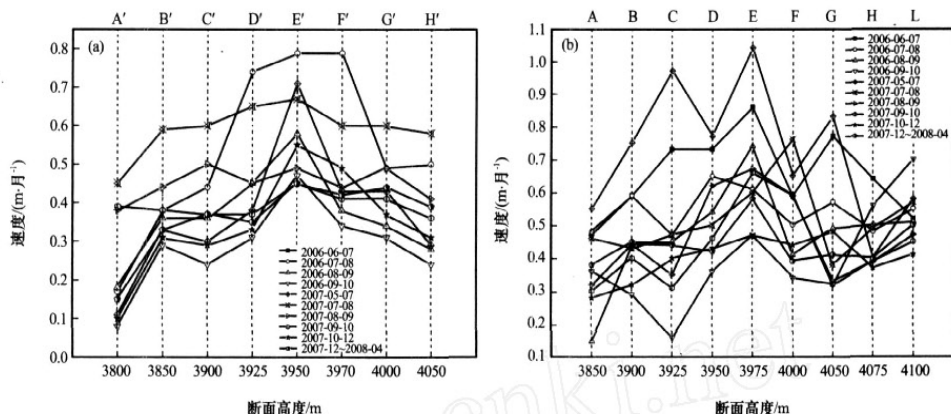


图 4 乌鲁木齐河源区 1 号冰川 2006—2008 年逐月断面速度图
a. 为东支冰川; b. 为西支冰川

Fig. 4 Monthly flow velocities for different profiles of the Glacier No. 1 at the headwaters of Ürünqi River (2006—2008)

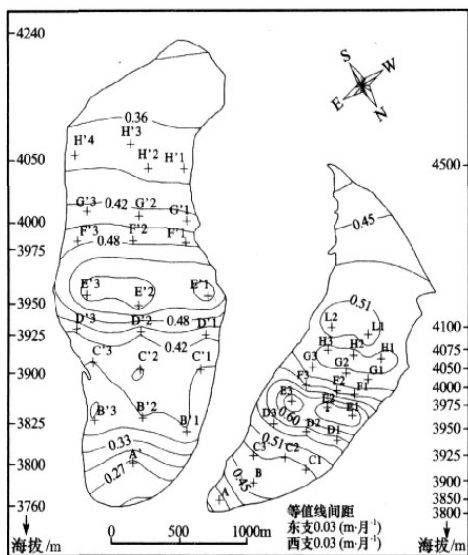


图 5 乌鲁木齐河源区 1 号冰川 2006—2008 年
各观测断面平均速度等值线图

Fig. 5 Average flow velocity isolines of different profiles
of the Glacier No. 1 at the headwaters
of Ürünqi River (2006—2008)

Approximation) 模式.

4.1 基本理论及计算

依据动量守恒定律, 在冰川的每一点重力都可表表达式为:

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = -\rho g_x \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力; 下标表示各个应力的方向. 另外, 格伦流动定律与应变速度转化定律如下:

$$\dot{\epsilon}_{xy} = \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_{xy} = A \tau^{n-1} \tau_{xy} \quad (3)$$

式中: u 为 x 方向上的速度; v 为 y 方向上的速度; A 为流变系数; ϵ 为应变变量.

依据 1 号冰川的表面形态特征及在此研究中只计算主流线上的冰川运动速度, 可以假定速度在横断面上的变化率 $\partial v / \partial x$ 为零. 综合式 (1)、(2) 与式 (3), 得到冰川运动速度计算公式:

$$u(y) = u_b + \frac{A}{2} (\rho g \sin \alpha)^3 \{ h^4 - y^4 \} \quad (4)$$

式中: y 为质点深度; u_b 为底部 (变形) 滑动速度; h 为冰川厚度.

对 1 号冰川而言, 谷形基岩对冰川向下流动有一定阻滞作用, 因此在模拟冰川流动时需要在公式中加入形状因子 f , 通常 f 与冰川厚度和宽度的比有关^[25]. 公式 (4) 变为:

$$u(y) = u_b + f \frac{A}{2} (\rho g \sin \alpha)^3 \{ h^4 - y^4 \} \quad (5)$$

滑动因子 A 与冰川温度有关, 在一定程度上影响模拟结果中的速度值. 为了获得符合真实情况的 A 值, 我们以实测运动速度作为率定参数的标准做了大量数值实验, 并且在 1 号冰川不同海拔开挖 5 个温度探孔测量整个活动层的温度变化数据^[26]. 综合实测资料及实验结果, $A = 2.27 \times 10^{-17} \text{ m} \cdot \text{Pa}^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$ 被选为最佳值进行模拟.

将 1 号冰川东支的厚度、坡度等实测参数及引入式 (5) 来计算速度, 发现在冰川上部 (海拔 3 980~4 250 m) 年运动速度的实测值与模拟值能够很好符合, 而海拔 3 980 m 以下的部分则模拟值

明显小于实测值, 平均差值在 $2 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 左右。20 世纪 80 年代科学家在 1 号冰川东西两支末端冰洞内的观测表明, 冰川底部温度略高于熔点或非常接近熔点, 并且底部有较厚的沙砾沉积层, 在有溶水的情况下极易变形。因此, 获得结论: 在 1 号冰川末端有底部运动发生, 并且底部运动占整体运动的比重较大^[26]。之后近 30 a 中, 随着气温度上升, 1 号冰川发生明显退缩, 东西两支分离为两条独立的冰川。在速度观测期间, 我们对冰川末端底部的温度及形态作了粗略同步观测, 发现消融季节底部有融水流出, 底部沙砾松散, 冰川极有发生底部运动的可能。针对这种可能性, 应用 Weertmen 滑动定律(式(6))将冰川滑动因素引入模式对冰川下游部分(海拔 3 750~3 890 m)的年运动速度重新模拟, 获得了令人满意的结果(图 6)。发现在冰川下游, 底部运动占整个运动的 50% 左右, 平均值为 $2.5 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

$$u_b = A_s \rho g \sin \alpha)^3 h^2 \quad (6)$$

式中: A_s 为滑动系数, 通过在模型中不断调整冰川厚度与速度最终确定经率定为 $A_s = 2.063 \times 10^{-13} \text{ m} \cdot \text{Pa}^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$; h 为沿冰川主流线方向的厚度其平均值为 85.3 m, 变化范围 20~120 m。

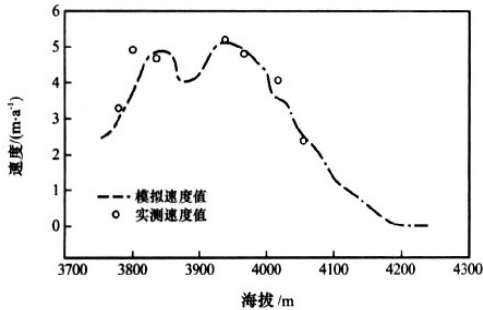


图 6 模拟与观测表面运动速度的比较

Fig. 6 The measured and simulated surface flow velocity

4.2 速度的时间变化模拟与实测比较

对速度主要起作用的厚度、坡度及形状因子 3 个因素中, 厚度是最基本的影响因子, 而且厚度的改变直接影响坡度与形状因子的变化。在年尺度内, 厚度也是变化最活跃的因子。因此, 我们作了表面运动速度对厚度改变的敏感性实验。

1 号冰川东支主流线上的厚度变化范围为 20~120 m。依据敏感性实验结果, 在此变化范围内, 冰川厚度增加或减少 1 m, 表面运动速度的变幅主要在 30%~40% 之间。量值上, 变化主要发生在冰川中部海拔 3 800~4 050 m 之间, 变化最大值约为

$0.4 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。比重上, 冰川两端的变化最为明显, 增加 1m 与减少 1m 分别造成 45% 与 33% 的变化; 冰川中部的变化幅度相对较小, 界于 3%~10% 之间。

4.3 速度的高度变化模拟与实测比较

将 2006—2008 年实测表面运动速度与模拟的数值进行比较(图 6), 发现除海拔 3 800 m 左右的 B' 排花杆外, 其它点都符合良好。结果充分证明, 冰川运动速度是冰川厚度、冰面坡度及冰川基岩形态等因素的综合作用结果(海拔 3 880 m 以下的模拟加入了冰川底部的运动分量)。

5 原因分析

由于速度的季节性变化主要发生在春末到夏末期间, 因此, 我们把研究的重点放在 7—10 月这 4 个月。综合考虑冰川不同部分在不同季节积累与消融可能引起的厚度变化, 以及夏季消融盛期冰川末端发生底部运动等因素, 界定了表面运动速度季节变化的理论范围(图 7)。

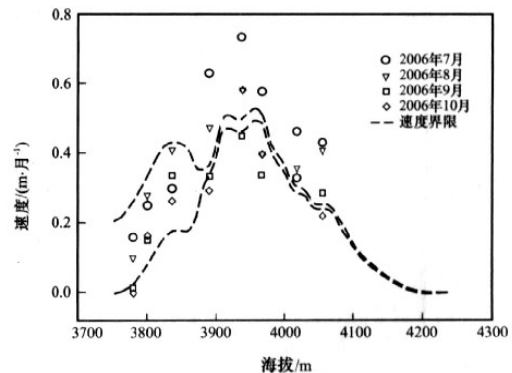


图 7 实测表面运动速度与其季节变化理论范围的比较

Fig. 7 Observed surface flow velocity and its theoretic limitation

可以看到海拔 3 900 m 以下的观测数据几乎都在理论变化范围以内, 而此点以上则大部分都超出解释范围。说明冰川末端区域的运动速度季节性变化, 主要是由于夏季强烈消融造成的厚度骤减及消融盛期底部运动差异造成, 并且底部运动是相当重要的因素。

海拔 3 900 m 以上各点速度变化幅度大, 其成因较为复杂, 这与我们只沿冰川主流线方向的一维速度模拟有关。另外, 在实地测量中发现该海拔以上的冰川表面出现连续起伏变化, 造成坡度陡缓交替, 多数点在夏初仍然有降雪沉积。这些因素造成

花杆在消融与沉积共同作用的过程中出现倾斜或类似状况,使观测结果存在除仪器误差外的其它误差。由于月观测的运动速度量值仅在几厘米到十几厘米之间,误差对观测结果来说有一定影响。

此外,物质平衡积累量减小导致纵向应力的变化,纵向应力减小会导致冰体运动减速,反之则加速。夏季降水对冰川物质平衡积累为负作用而对冰川的消融是正面作用,同样夏季的气温对冰川物质平衡影响为负,但对冰川的径流融化有积极的影响,高温导致冰川消融加剧从而产生大的冰川径流。因此,一定程度上夏季的气温控制着冰川物质平衡的改变。伴随着气温的升高与降水的增多,1号冰川消融大于积累,从而影响着整个冰川的运动速度改变。1号冰川东西支的积累区差异较大,东支冰川明显大于西支,物质积累量的差异造成东西支冰川运动速度的差别。

6 结论

时间变化上看,2006—2008年同月份西支冰川速度值的分布范围比东支大,总体上月间运动速度的变化幅度西支冰川是东支冰川的1.6倍。东西支冰川逐月间的运动速度表现出很好的规律一致性,东西支冰川月间运动速度大体同方向变化。5—7月份内运动速度值最大,从7月份开始运动速度值开始减小,东支冰川9月份以后运动速度值开始缓慢增大,而西支冰川12月份以后速度值开始回升。总体上,西支冰川运动速度是东支冰川的1.2倍,冰川厚度的改变是其原因。

高度变化上看,2006—2008年总体上东西支冰川表现出中间断面运动快而两端断面速度慢,越靠近冰体两端运动速度越低,但是西支冰川最上端断面速度是增大的。冰川以中间断面为中心两端断面的运动速度值表现出对称性分布的特点。在同一断面上,冰川表面运动速度从中间向两侧逐渐减小。原因是冰川厚度、冰面坡度及冰川基岩形态等综合作用的结果。

致谢:本研究得到天山冰川国家野外观测试验站的大力支持,在此对天山站的工作人员表示衷心的感谢和敬意。

参考文献(References):

[1] Paterson W S B. The Physics of Glaciers [M]. Beijing: Sciences Press, 1987: 37 - 40. [W. S. B. 佩特森. 冰川物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 1987: 37 - 40.]

- [2] Kääb A. Combination of SRTM3 and repeat ASTER data for deriving alpine glacier flow velocities in the Bhutan Himalaya [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 94: 463 - 474.
- [3] Huang Maohuan, Sun Zuozhe. Some flow characteristics of continental-type glaciers in China [J]. Journal of Glaciology and Cryopedology, 1982, 4(2): 35 - 44. [黄茂桓, 孙作哲. 我国大陆性冰川运动的某些特征 [J]. 冰川冻土, 1982, 4(2): 35 - 44.]
- [4] Shi Yafeng. Some achievement on mountain glacier researches in China. Seppyo, 1980, 42(4): 215 - 228.
- [5] Rignot E, Kanagaratnam P. Changes in the velocity structure of the Greenland Ice Sheet [J]. Science, 2006, 311: 986 - 990.
- [6] Carr S, Coleman C. An improved technique for the reconstruction of former glacier mass-balance and dynamics [J]. Geomorphology, 2007, 92: 76 - 90.
- [7] Nakamura K, Doi K, Shibuya K. Estimation of seasonal changes in the flow of Shirase Glacier using JERS-1/SAR image correlation [J]. Polar Science, 2007, 1: 73 - 83.
- [8] Echelmeyer K, Harrison W D. Jakobshavn Isbrae, West Greenland: Seasonal variations in velocity or lack thereof [J]. Journal of Glaciology, 1990, 36(122): 82 - 88.
- [9] Iken A, Truffer M. The relationship between subglacial water pressure and velocity of Findelengletscher, Switzerland, during its advance and retreat [J]. Journal of Glaciology, 1997, 43(144): 328 - 338.
- [10] Rabus B T, Lang O. Interannual surface velocity variations of Pine Island Glacier, West Antarctica [J]. Annals of Glaciology, 2003, 36: 205 - 214.
- [11] Gudmundsson GH. Fortnightly variations in the flow velocity of Rutford Ice Stream, West Antarctica [J]. Nature, 2006, 444(7122): 1063 - 1064.
- [12] Dowdeswell J A, Unwin B, Nuttall A M, et al. Velocity structure, flow instability and mass flux on a large Arctic ice cap from satellite radar interferometry [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1999, 167: 131 - 140.
- [13] Bamber J L, Hardy R J, Huybrechts P, et al. A comparison of balance velocities, measured velocities and thermomechanically modeled velocities for the Greenland ice sheet [J]. Annals of Glaciology, 2000, 30: 211 - 216.
- [14] Fatland D R, Lingle G S, Truffer M. A surface motion survey of Black Rapids Glacier, Alaska, U. S. A. [J]. Annals of Glaciology, 2003, 36: 29 - 36.
- [15] Liboutry L. Velocities, strain rates, stress, crevassing and faulting on Glacier de Saint - Sorlin, French Alps, 1957-76 [J]. Journal of Glaciology, 2002, 48(160): 125 - 141.
- [16] Hagen J O, Kohler J, Melvold K, et al. Glaciers in Svalbard: mass balance, runoff and freshwater flux [J]. Polar Research, 2003, 22(2): 145 - 159.
- [17] Urbini S, Frezzotti M, Gandolfi S, et al. Historical behavior of Dome C and Talos Dome (East Antarctica) as investigated by snow accumulation and ice velocity measurements [J]. Global and Planetary Change, 2008, 60: 577 - 588.
- [18] Shi Yafeng, Xie Zichu. General features of modern glaciers in China [J]. Acta Geographica Sinica, 1964, 30(3): 183 - 206. [施雅风, 谢自楚. 中国现代冰川的基本特征 [J]. 地理学报, 1964, 30(3): 183 - 208.]
- [19] Huang Maohuan. The movement mechanisms of the Urumqi

- Glacier No. 1, Tianshan Mts., China[J]. *Annals of Glaciology*, 1992, **16**: 39 - 44.
- [20] Jing Xiaoping, Huang Maohuan, Chen Jianming, *et al.* Basal deformation of Ürümqi Glacier No. 1, Tianshan Mts., China [J]. *Annals of Glaciology*, 1992, **16**: 123 - 126.
- [21] Jing Zhefan, Ye Baisheng, Jiao Keqin, *et al.* Surface velocity on the Glacier No. 51 at Haxilegen of the Kuytun River, Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, **24**(5): 563 - 566. [井哲帆, 叶柏生, 焦克勤, 等. 天山奎屯河哈希勒根 51 号冰川表面运动特征分析[J]. *冰川冻土*, 2002, **24**(5): 563 - 566.]
- [22] Jing Zhefan, Yao Tandong, Wang Ninglian. The surface flow features of the Puruogangri Ice Field[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(3): 288 - 290. [井哲帆, 姚檀栋, 王宁练. 普若岗日冰原表面运动特征观测研究进展[J]. *冰川冻土*, 2003, **25**(3): 288 - 290.]
- [23] Sun Zuozhe, Chen Yaowu, You Genxiang, *et al.* Flow characteristics of Glacier No. 1 at the headwater of Ürümqi River, Tianshan[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1985, **7**(1): 27 - 40. [孙作哲, 陈要武, 尤根祥, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的运动特征[J]. *冰川冻土*, 1985, **7**(1): 27 - 40.]
- [24] Sun Zuozhe, Chen Yaowu, Zhang Jinhua. The velocity of Glacier No. 1 at the headwater of Ürümqi River[R]. Annual Report of Tianshan Glaciological Station, 1980, **1**: 22 - 30. [孙作哲, 陈要武, 张金华. 乌鲁木齐河源 1 号冰川表面运动速度[R]. 天山冰川站年报, 1980, **1**: 22 - 30.]
- [25] Ny J F. The motion of ice sheets and glaciers [J]. *Journal of Glaciology*, 1959, **3**(26): 493 - 507.
- [26] Wang Zhongxiang, Song Genhai, Li Gang. Observation and experiment on inner flow characteristics of Glacier No. 1 in the Ürümqi River Headwaters, Tianshan[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1985, **7**(2): 123 - 131. [王仲祥, 宋根还, 李纲. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川冰体流变的现场观测与试验研究[J]. *冰川冻土*, 1985, **7**(2): 123 - 131.]

The Flow Velocity Features and Dynamic Simulation of the Glacier No. 1 at the Headwaters of Ürümqi River, Tianshan Mountains

ZHOU Zai-ming, LI Zhong-qin, LI Hui-lin, JING Zhe-fan

(Key State Laboratory of Cryospheric Sciences, Tianshan Glaciological Station, CAREERI, CAS, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: The movement of glacier can redistribute glacier mass, change the water and thermal environment of a glacier, so the glacier can maintain its dynamic balance. Surface flow velocity of glacier is a basic feature of the glacier movement. By the successive monthly observation from 2006 to 2008, the space-time variation features of the surface

flow velocity of the glacier is obtained. A dynamic simulation is made to validate the findings. The results show that the altitude distribution of the glacier flow velocity is an integrated effect of the glacier thickness, slope and bedrock morphology. However, the seasonal variation in flow velocity is resulted from the thickness changing.

Key words: Glacier No. 1; velocity; slope; dynamic simulation

遥感方法研究新疆天山冰川变化进展

李开明

(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, 甘肃 兰州 730000)

冰川是气候的产物, 气候变暖使得冰川退缩成为全球性趋势。冰川变化在全球不同区域得到系统地监测, 它也成为气候变化的可见证据。小冰川由于对温度升高响应的的时间较短, 对气候变化较为敏感, 其变化对气候具有很好指示作用。中国天山以小冰川为主导, 强烈的消融使得部分冰川已经消失或处于即将消失状态, 对于以冰川融水为主要水源的干旱或半干旱地区具有重大影响。对冰川现状及其变化的了解可为该地区水资源规划及合理利用提供依据。

1 天山冰川研究现状

全球冰川监测显示小冰期以来全球冰川处于退缩之中, 并在过去 30 年间有加速趋势^[1], 在未来这种趋势还将持续^[2]。新疆天山高山区是主要产流区, 丰富的降水和冰川融水为南山麓地带提供了可靠的水资源, 灌溉了准噶尔盆地、伊犁盆地、塔里木盆地和哈密—吐鲁番盆地的低地和绿洲。自 20 世纪 90 年代以来冰川的加速退缩使冰川变化研究成为关注的焦点。遥感技术的日益成熟为冰川变化研究提供了大量高精度的数据源, 为许多大冰川和人迹罕至地区冰川变化研究提供了可能。对天山山脉西段的研究较多^[3, 4], 而对中国境内天山冰川变化的研究却很有限。除近几年天山冰川站观测的单条冰川如乌鲁木齐河源 1 号冰川 (1 号冰川) 和奎屯哈希勒根 51 号冰川等之外 (表 1), 区域研究也只限于开都河流域^[5]。

表 1 区域遥感影像资料信息及观测冰川

Table 1 The basic information of satellite images and observed glaciers

研究区域	影像时间	传感器	位置	精度	观测冰川
庙尔沟	2005-08-24	SPOT5	94°E/43°N	5	庙尔沟平顶冰川
博格达	2006-09-21	ASTER	88°E/44°N	15	四工河 4 号、黑沟 8 号、扇形冰川
乌鲁木齐河	2005-10-03	SPOT5	87°E/43°N	5	1 号冰川
头屯河	2005-09-07	SPOT5	87°E/43°N	5	
奎屯河	2004-10-13	SPOT5	84°E/43°N	10	奎屯哈希勒根 51 号、48 号
库克苏河	2004-09-05	ASTER	82°E/42°N	15	
托木尔	2003-09-08	SPOT5	81°E/41°N	5	青冰滩 72 号、74 号、托木尔冰川

根据中国冰川编目资料, 在中国天山山区共有 9035 条冰川, 面积为 9225 km², 冰储量大约为 1010.5 km³ [6]。中国天山冰川平均面积约为 1 km², 小冰川敏感响应特性使得中国天山冰川变化研究在该区域的重要性显著, 为了解东天山冰川在过去四十年间由于气温升高

而导致的冰川面积变化以及目前冰川的覆盖面积状况, 对新疆天山选取了代表不同区域气候和地理位置的冰川进行了研究 (表 1)。

2 数据资料

对天山山区冰川变化研究的最大障碍在于缺少精度高而又优质的遥感影像资料。经过对近期上千张影像资料的遴选, 最终选定七个区域精度在 15 m 以上的七景影像资料 (表 1)。在冰川参数提取中, 边界的准确确定是保证冰川变化研究准确性的基础, 也是冰川监测最基本的部分。粗糙的冰川边界确定将会导致冰川面积、储量及物质平衡计算等方面巨大误差。冰川边界提取工作会遇到很多复杂问题, 进而影响到边界提取的准确性, 比如云、表碛覆盖、积雪以及地形图的误差等。因此所有影像资料都选自消融期末, 且对研究区有实地考察冰川进行冰川边界勾画的准确性验证以及确定研究区表碛覆盖情况。各研究区域遥感影像均依据 1962 ~ 1972 年比例为 1:50 000 的地形图进行几何精校正, 并经过 GPS 实地测量采集地面标识物控制点的方法进行正化处理, 使均方根误差在 x、y 方向均控制在 0.5 个象元以内, 满足遥感影像几何校正所需精度的要求。利用该地区的数字高程模型 (DEM) 对数字遥感影像进行地形纠正处理, 纠正后的遥感影像清晰度明显提高, 为冰川信息的准确提取奠定了基础。为减小冰川参数提取中的误差, 所有的冰川参数提取工作由同一人完成, 且全部采用人工目视判读的方法来提高研究精度。

3 主要结果

3.1 冰川变化趋势

东天山主要以小冰川为主要分布特征, 研究区 < 1 km² 的冰川数量占 77 %。小冰川数量多且面积损失率较大, 这种分布特征也使得天山冰川在气候升温背景下更为敏感。小冰川的分布和响应特征, 对区域水资源的贡献量不容忽视。冰川面积相对变化具有很大区域差异性, 但该变化率与区域冰川规模大小紧密相关。在过去的四十多年里东天山冰川面积缩小了-11.4 %, 庙尔沟、博格达、乌鲁木齐河、头屯河、奎屯河、库克苏河和托木尔地区冰川面积分别减小了 10.5 %、21.6 %、34.2 %、31.5 %、15.4 %、18.9 % 和 8.8 %。面积损失率最大的乌鲁木齐河流域达到-34.2 %, 平均面积仅为 0.33 km²; 冰川面积变化率最小的托木尔峰地区为-8.8 %, 其平均面积为 4.77 km²。天山山区温度的显著升高趋势造成冰川的强烈消融, 但水汽来源、区域温度差异以及冰川规模分布差异等是造成冰川面积变化区域差异性主要原因。而区域尺度内冰川面积变化差异性可能受到朝向、海拔、冰川类型等地形条件的影响。

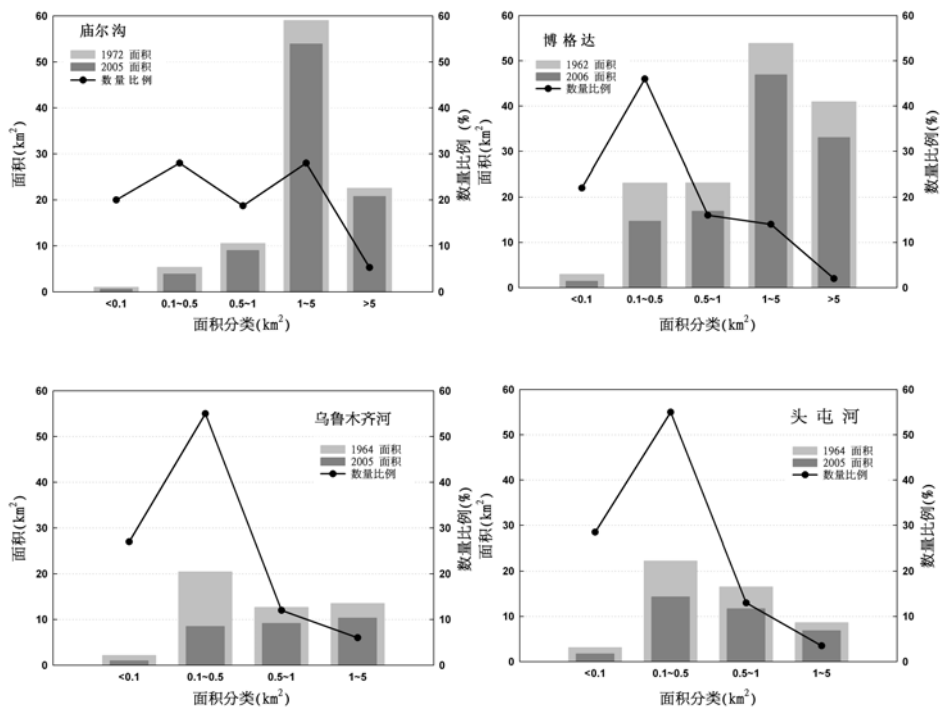
3.2 哈密庙尔沟地区

庙尔沟地区共研究冰川 75 条, 分属于哈尔里克山南坡和北坡, 其中南坡 50 条冰川, 平均面积为 1.33 km², 北坡 25 条冰川, 平均面积为 1.28 km²。75 条冰川在 1972 ~ 2005 年间面积由 98.25 km² 减小到 87.96 km², 面积损失了 10.5 %, 同时有 4 条冰川消失。随冰川规模增大, 冰川面积变化率从-44 % 变化到-7.8 %。其中 1 ~ 5 km² 之间冰川面积最大, 其面积损失量为 5.1 km² (-8.6 %) (Fig. 1)。庙尔沟地理位置独特, 处于两种主要水汽来源的交界地带, 即从东面来的太平洋、印度洋水汽和从西面来的北冰洋、大西洋的水汽^[7]。南、北和东三面外围

为气候十分干燥的低山荒漠戈壁，降水稀少。干旱的气候和稀少的降水使这个流域的冰川成为非常重要的水资源形式。庙儿沟平顶冰川 (5Y822c3) 是该区域的一条长期监测冰川，李忠勤等^[8]通过研究该平顶冰川后认为在 1981~2005 冰川上部平均每年减薄 5 m，其末端退缩了 70.8 m，大约 2.8 m a^{-1} 。它的面积减小了 0.36 km^2 ，大约是 1972 年 3.64 km^2 的 10%。根据 Mikhailenko^[9]，夏季最大的固态降水使冰川表面反照率最大化，导致高海拔的积累持续增加。但平顶冰川的径流并不等于总的消融，这种差别是由于渗浸和再冻结作用使大约 10~15% 的融水损失。

3.3 博格达峰地区

博格达峰冰川研究区在 1962 年有冰川 203 条，分属于博格达山南坡和北坡。南坡 104 条冰川，平均面积为 0.78 km^2 ，其面积减小了 25%；而北坡 99 条冰川其平均面积为 0.63 km^2 ，面积减小了 17%。博格达山同哈尔里克山一样，山坡呈现出南北两翼不对称，北坡短而陡，南坡长而缓现象。博格达山主峰博格达峰高达 5445 m，它也是天山东部散流区中冰川数量分布最多的一条山脉。在 1962 到 2006 年期间，共有 12 条冰川消失，其面积从 144.05 km^2 减小到 112.87 km^2 ，冰川表面积损失了 21.6% (Fig. 1)。该区域的四工河 4 号冰川 (5Y725d4) 和扇形分流冰川 (5Y725d5, 5Y813b11) 和黑沟 8 号冰川 (5Y813b8) 在 1981 年中日联合考察中作过详细的研究，并在 2009 年 8 月我天山站研究人员对这些冰川又作了进一步的考察和验证。



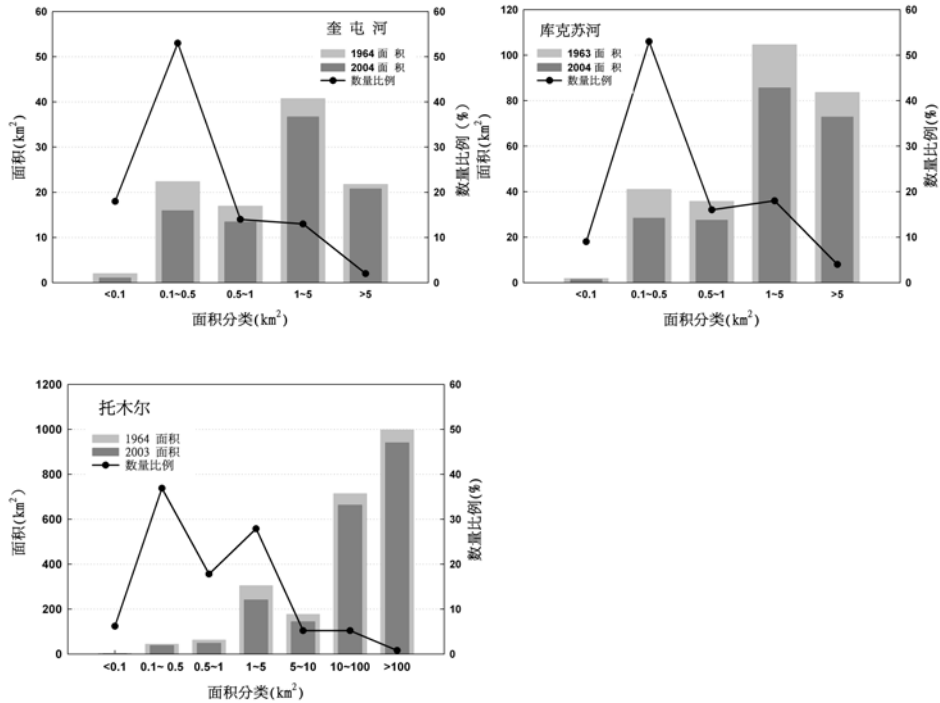


图 1 各个流域冰川在不同面积等级上数量百分比及面积分布

Fig. 1 Glacier number percent and area distributed in different class between 1960s and 2000s

3.4 乌鲁木齐河和头屯河流域

乌鲁木齐河流域冰川在 1964 年时面积为 48.68 km^2 ，但是到 2005 年时，面积也减小到 32.08 km^2 ，已有 11 条冰川已消失，其在过去的 41 年间冰川面积减小了 34.2%。冰川全部发育在天格尔山北坡，主峰高度 4484 m，相比于其它山脉，天格尔山山体较小。该流域冰川规模也相对较小，平均面积只有 0.33 km^2 。不同规模冰川面积减小率在 24% ~ 56% 之间，而 $0.1 \sim 0.5 \text{ km}^2$ 之间的冰川损失面积达到 12 km^2 (Fig. 1)。1 号冰川是该流域的监测冰川，也是 WGMS 监测系统中的一条冰川。该冰川监测项目较为全面，监测时间较长，从 1959 年被监测并具有完备和观测数据。冰川面积从 1964 年到 2005 年减小了 0.22 km^2 ，其面积相对变化为 -14.5%。自 1997 年以来 1 号冰川呈现出连续的负物质平衡，1959 ~ 2006 年间，实际观测到的年物质平衡值和累积物质平衡分别是 -252.4 mm 和 -12115.4 mm 。

头屯河地区冰川是紧邻乌鲁木齐河流域的一个以小冰川为主导的流域，冰川平均面积为 0.29 km^2 。研究区在 1964 年时有 172 条冰川，到 2005 年时已有 5 条冰川消失。不同面积等级的冰川面积变化率在 21% ~ 45% 之间，也是仅次于乌鲁木齐河流域面积变化较大的地区 (Fig. 1)。在过去的四十多年，由于气候变暖和系统变化的影响，受到了广泛的关注。尤其自 20 世纪 80 年代到 90 年代，这个流域的现代冰川处在强烈的消融之中。

3.4 奎屯河流域

奎屯河地区冰川位于新疆天山北麓，准噶尔盆地西南部。奎屯河地区冰川所处的依连哈比尔尕山，最高峰 5289 m，共有冰川 1892 条，是天山山区仅次于哈尔克他乌山的主要冰川分布地。研究区共有 167 条冰川，1964 覆盖面积为 103.73 km^2 。截至到 2004 年，共有 11

条冰川消失。在过去的 40 年面积损失了 15.4%。处于 0.1~0.5 km² 的冰川 87 条, 占 53%, 而冰川面积主要分布在 1~5 km² 之间的冰川上 (Fig. 1)。奎屯哈希勒根 51 号冰川 (5Y741c51), 处在依连哈比尔尕山北坡, 奎屯河上游支沟哈希勒根河源区, 是该流域的一条监测冰川。该冰川朝向 NE, 其面积 1.48 km², 最大长度是 1.7 km, 末端海拔为 3400 m, 最高海拔为 4000 m。从 1964 年到 1999 年, 该冰川退缩了 49 m (-1.4 m·a⁻¹), 处于相对稳定状态, 而在 1999~2001 年, 末端退缩了 10.0 m, 平均退缩率为 5.0 m·a⁻¹, 冰川表现出了强烈的退缩趋势^[9]。表明自 20 世纪 90 年代以来, 冰川退缩加速, 这与 20 世纪以来中国乃至全球气候变化特征相一致。1981~2000 年面积减小到 1.397 km² (-5.6%), 而到 2006 年其面积为 1.36 km² (-8.3%)。也就是说, 面积损失率从 -0.3%·a⁻¹ (1981~2000) 增大到 -0.48%·a⁻¹ (2001~2006)。

3.5 库克苏河

库克苏河地区 293 条冰川, 分别属于三个流域: 库克苏河 169 条, 开都河 92 条, 渭干河 32 条。1963 年时面积 265.81 km², 冰川平均面积为 0.91 km², 在过去的 41 年间冰川面积减小到 215.51 km²。89% 的冰川位于科克铁克山和哈尔克他乌山北坡, 面积损失率为 18.9%, 冰川末端退缩率为 5.7 m·a⁻¹, 在过去的 41 年间共有 11 条冰川消失。其中 0.1~0.5 km² 的冰川占 53%, 该区域冰川平均面积为 0.91 km², 其中大于 1 km² 的冰川数量占 22% (Fig. 1)。

3.6 托木尔峰地区

托木尔峰地区共研究 483 条冰川, 分布在哈尔克他乌山南坡和北坡, 冰川规模大小差异很大, 最大的冰川在 300 km² 以上。该山脉南坡冰川是天山山区冰川数量最多、规模最大的冰川分布区。由于该区山势较高, 其中天山山区最高的托木尔峰 (7435 m) 就处于此地, 高大的山体以及该区域丰沛的降水为冰川发育提供了有利的条件。面积 0.1~0.5 km² 的占 37%, 1~5 km² 的占 28%, 而面积 > 10 km² 的 29 冰川占总面积的 74% (Fig. 1); 冰川面积在 1964~2003 年间减小了 8%, 但小于 10 km² 的冰川面积变化率却在 -16.7%, 共有 25 条冰川消失。483 条冰川中有 416 条处于哈尔克他乌山南坡, 处于北坡的冰川只有 67 条, 但对不同朝向的冰川统计分析发现, 托木尔峰地区冰川对朝向差异不敏感, 除朝北 230 条冰川面积变化率为 -8.9% 外, 其余朝向的冰川面积变化相差不大。青冰滩 72 号冰川 (5Y673p72) 是该区域的监测冰川, 是一条复合型山谷冰川。冰舌末端和最高处高度介于海拔 3560~5986 m 之间, 平均海拔为 4200 m, 冰川面积 5.23 km², 冰储量为 0.4 km³。1964~2008 年间该冰川面积呈明显递减趋势, 从 1964 年的 5.23 km² 缩减为 2008 年的 3.97 km², 面积共减少了 1.26 km², 变化率为 -24%。长度退缩趋势尤为明显, 从 1964 年的 7.4 km 缩减为现在的 6.53 km, 变化率为 -11.8%。青冰滩 72 号冰川末端退缩十分严重, 目前已退缩至海拔 3720 m 处, 2008 年 8~9 月观测期间冰川正在以每天 3~5 cm 的速度急速消融。由于冰川两侧有大量表碛覆盖, 减缓了冰川的消融, 差别消融造成了冰川末端两侧高于中间的现象。

参考文献 (References)

- [1] Barry R G. The status of research on glaciers and global glacier recession: a review [J]. *Progress in Physical geography*, 2006, 30 (3): 285-306.
- [2] Haeblerli W, Frauenfelder R, Hoelzle M, et al. On rates and acceleration trends of global glacier mass changes [J]. *Geografiska Annaler*, 1999, 81A: 585-591.

-
- [3] Aizen V B, Kuzmichenok V A, Surnzakov A B, et al. Glacier changes in the Tianshan as determined from topographic and remotely sensed data [J]. *Global Planetary Change*, 2007, 56: 328-340.
- [4] Bolch T. Climate change and glacier retreat in northern Tianshan (Kazakhstan/ Kyrgyzstan) using remote sensing data [J]. *Global Planetary Change*, 2007, 56: 1-12.
- [5] Li B, Zhu A, Zhang Y, et al. Glacier change over the past four decades in the middle Chinese Tien Shan [J]. *Journal of Glaciology*, 2006, 52 (178): 425-432.
- [6] Liu C, Ding L. The glacial Resources and Their Distribution Characteristics in the Tianshan Mountains of China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1987, 9 (2): 99-107.
- [7] Tian L, Yao T, MacClune K, et al. Stable isotopic variations in west China: a consideration of moisture sources [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112 (D10112), doi: 10.1029 / 2006JD007718.
- [8] Li Z Q, Wang F T, Zhu G C, et al. Basic features of the Miaoergou flat-topped glacier in east Tianshan Mountains and its thickness change over the past 24 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2007, 29 (1): 61-65.
- [9] Mikhailenko V N. The peculiarities of Mass Exchange of the Flat-top Glaciers at the Central TianShan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 1991, 13 (2): 107-114.
- [10] Jing Z F, Ye B S, Jiao K Q, Surface Velocity on the Glacier No.51 at Haxiegen of Kuytun River, Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2002, 24 (5): 563-566.

通过 GIS 和 RS 技术研究冰川变化

王 林

(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, 甘肃 兰州 730000)

1 研究意义

随着全球气候变化的加剧, 作为气候敏感指示器的冰川响应显得十分明显。近年来, 大量研究表明冰川在气候变化、水资源、海平面上升、冰川灾害等方面担任着重要角色, 在全球变化中的作用已经不容忽视^[1]。因此监测冰川变化 (包括面积、长度、物质平衡和运动速度等) 对研究内陆河流域水资源与冰川灾害的形成演变及其对下游地区可持续发展、减灾防灾具有重要意义。随着 3S (RS、GIS 和 GPS) 技术手段的不断发展和广泛应用, 使大范围冰川变化监测成为可能。冰川监测从最开始的仅描述冰川末端的变化到现在开展冰川各种特征参数的测量, 从野外实地对单条或几条数目有限的冰川的考察, 到使用卫星遥感手段对区域甚至全球冰川的监测研究, 得到比较全面、系统的冰川变化数据。

2 数据处理

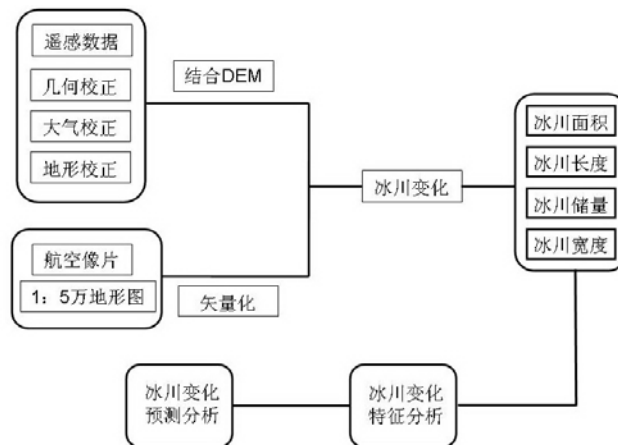


图 1 遥感数据的处理流程

Fig.1 Flow chat summarizing the applied pre-processing and interpretation chain

流域冰川变化采用地理信息系统与遥感技术相结合的方法获取, 主要利用高精度数字遥感影像资料、航空像片、地形图 (1:5 万)、第一次冰川编目时研究区冰川编目及数字地形模型 (DEM), 通过遥感图像处理和分析提取研究区的冰川边界, 并在地理信息系统技术支持下分析该地区冰川参数变化情况。本研究使用目前国际上冰川监测工作被公认为最权威的机构世界冰川监测服务处 (WGMS) 的标准, 采用其分支机构全球陆地冰空间观测规划 (GLIMS)

的解译规范^[2-4],其遥感数据的处理流程如图 1 所示。首先对高精度数字遥感影像进行预处理,包括结合数字地形模型 (DEM) 对其进行几何校正、大气校正、地形校正等,为检验数字影像的几何校正精度,在校正后的影像上均匀选择 20 个独立校正点,并与地形图同名点位置进行比较。另外,在定点监测冰川上进行多点验证,确保遥感影像平均几何校正误差在 0.5 个像元以内。同时,对第一次冰川编目时所用的经过航片校正的 1:5 万地形图进行矢量化。将两期数据进行对比分析得到冰川变化各参数(面积、长度、储量、宽度等),进而,对其进行整个流域冰川变化的特征分析和预测分析。

遥感数据的预处理方法已经比较成熟,但对于冰川变化各参数的提取仍然较难把握。Frank^[5-6]等重点提出获取准确冰川参数的条件有两个方面:遥感数据的选择和准确界定冰川边界。冰川边界的确定是冰川变化研究的最基础工作之一。提取边界时会遇到很多问题的影响,比如云、表碛覆盖、积雪以及地形图的误差等^[7]。为了消除这些影响,选择影像资料基于以下几个条件:一是所有的影像资料都取自于消融期末(8~9月份),消除积雪的影响;二是选择没有云层遮挡的影像,以消除云的影响。

此外,在研究区域有长期定位监测冰川,长时间序列的观测资料,可以实现冰川边界人工勾画后的再验证,为提高影像解译精度提供重要保证。

3 天山地区遥感影像解译

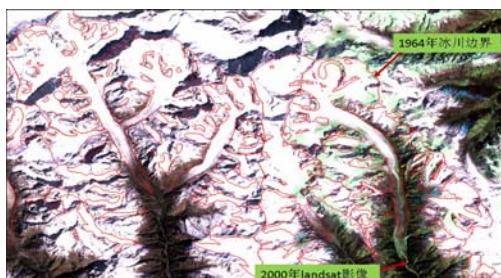
遥感影像解译的方法可分为人工解译法和计算机自动分类法两大类,其中计算机自动分类法又包括比值法、雪盖指数法、监督分类法、非监督分类法等方法。人工解译法可以充分利用解译人员的经验知识,能够判读出很多计算机无法自动识别的要素,但人工解译法带有很大的主观性,解译结果不具有可重复性,很难用定量方式描述解译精度。计算机自动制图法则在可重复性和定量误差描述方面具有优势,但现有的各种自动分类方法尚不具备普适性,每种方法的独立具体应用起来有很大的限制。因此,冰川的解译工作一般采取人工解译和计算机自动分类相集合的办法,尤其是表碛发育的地区,以提高数据的正确率。针对天山地区的具体情况,对遥感影像的选择及其解译作了具体的分析。

3.1 遥感数据的选择

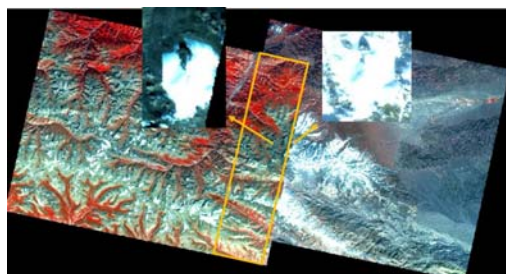
质量较好的遥感影像是冰川的解译精度的重要保证。我们主要查询了以下几种数据类型: Landsat5、6、7; Aster; Spot4、5; Alos; 北京 1 号等,查询过程中发现,积雪是影响天山区影像质量的主要因素。如图 2 (a)所示,同为 Alos 的 10 m 分辨率影像,9 月 7 日的影像中冰川轮廓较清晰,基本满足冰川解译的要求,而同一个地区,1 月 20 日影像质量差距较大,无法进行冰川解译工作;再则(如图 2 b),将从地形图上矢量化的 1964 年冰川边界叠加与 2000 年 landsat 影像之上,发现,不仅冰川边界无法识别,而且以 1964 年冰川边界为标准的 36 年间,冰川边界不仅没有退缩,反而呈现一种增加的趋势,同时,由于影像分辨率较低(30 m),无法满足低于 1 km²冰川规模的解译工作;如图 2 (c) 所示,同样是 Spot-5 的 5 m 分辨率影像数据,两景影像时间上相差一个月,在其重叠部分,以其中一条冰川为例,会发现冰川边界相差较大。鉴于积雪对于遥感影像的影响较大,只能通过大量的查询、比较来解决,从不同传感器的几千张影像中选出较理想的影像,所有的影像资料都取自于消融期末(8~9月份)且没有云层遮挡,大部分为 Spot-5 的高分辨率影像数据。



(a)



(b)



(c)

图 2 积雪对冰川信息提取的影响

Fig.2 Snow have an effect on the glacier of access to information

3.2 准确界定冰川边界

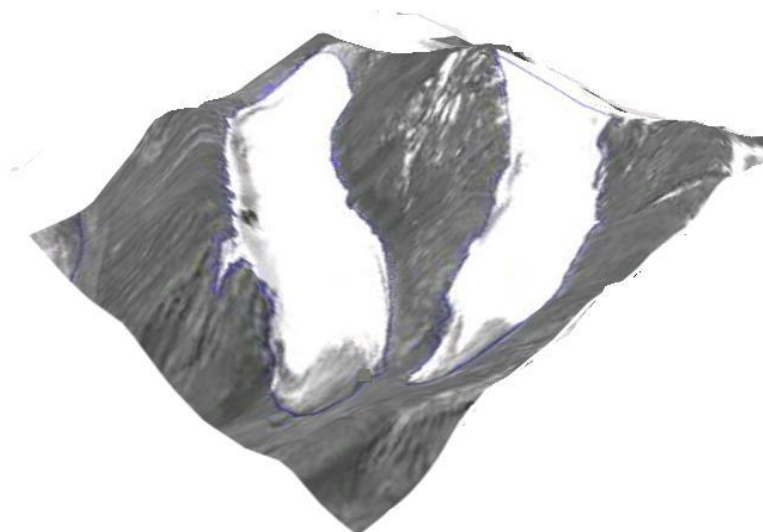


图 3 流域内定位监测冰川数字化及借助 DEM 在三维立体环境中验证

Fig.3 The digital of the location monitoring glacier in basin and validate by DEM in three-dimensional environment

冰川边界的准确界定是提取其他冰川变化参数的前提，经过长时间的研究、对比发现天山区冰川解译方法大致可分为无表碛覆盖区和表碛覆盖区两种。为了更准确的提取冰川边界，针对区域冰川的具体情况，其解译方法存在一定的差异。

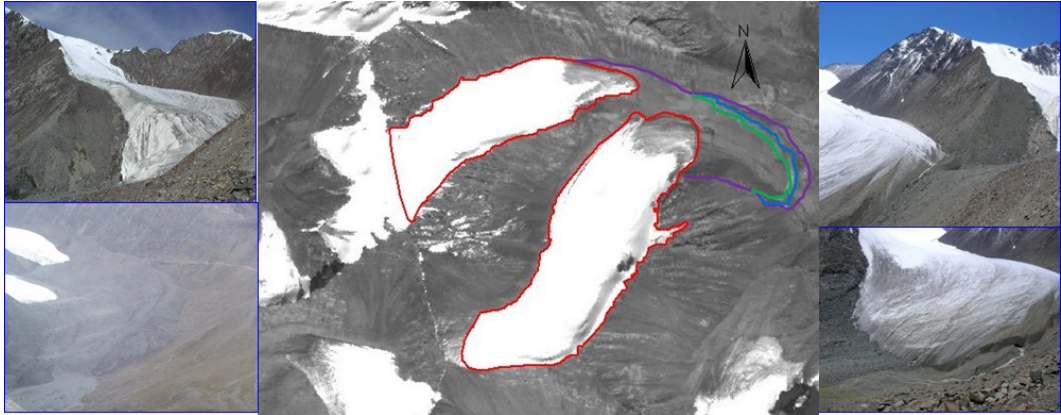


图 4 流域内定位监测冰川数字化及实地考察验证

Fig.4 The digital of the location monitoring glacier in basin and validate by fieldwork

无表碛覆盖区的解译方法相对简单，首先以比较熟悉的乌鲁木齐河流域冰川为研究对象，便于从中积累经验，数字化研究区域内的定位监测冰川 1 号冰川；借助 DEM 在三维立体环境中对其进行再验证（图 3）；通过野外考察对数字化的定位监测冰川进行的实地考察验证（图 4），做具体的修改并从其中积累经验；将由此得到的经验推广到整个研究流域中，对流域冰川进行数字化，并借助 DEM 在三维立体环境中修改、进行实地考察验证等。按照种这方法依次在乌鲁木齐河流域、头屯河流域、奎屯河流域、庙尔沟流域进行冰川解译工作，不断积累经验，提高解译精度。

表碛覆盖区的冰川解译工作比较难处理，尽管目前发展了多种表碛覆盖的自动获取方法，如 Frank paul 等^[8]利用 DEM 获取地形信息建立了基于地形坡度、NDVI、比值图像和色调分量的分类树，提取了位于瑞士阿尔卑斯山的 Grosser Aletschgletscher、Oberaletschgletscher 等三条表碛覆盖冰川。该方法也被引入到中国表碛覆盖冰川的提取中^[9, 10]，但该方法主要是针对单条或几条表碛覆盖冰川进行研究，并不能推广应用。并且，我国冰川表碛覆盖比较复杂，很难用一种或几种准则将其自动描绘，对于大量的表碛覆盖冰川的解译仍主要基于目视解译方法。在目视解译时，由于表碛覆盖的表面特征与周围地物十分相似，为此，通常采用与 DEM 相结合的方式来判断。一般而言，表碛覆盖表面高于槽谷而低于侧碛，表碛终端成拱形。但是当表碛覆盖区有植被发育时，则很难判断。因此，针对这种情况，我们首先在托木尔峰区展开研究，这一区域表碛比较发育，且有定位监测冰川青冰滩 72、74 号冰川。

表碛覆盖区的冰川解译方法较之无表碛覆盖区有所差异。首先数字化研究区域定位监测冰川青冰滩 72 号冰川地形图上的冰川信息；再将矢量图层叠加于高分辨率遥感影像之上，借助 DEM 在三维立体环境中，解译影像冰川信息，且借助冰川学经验着重注意冰碛物的处理，在三维立体环境中进行修正；通过野外考察对数字化的定位监测冰川进行实地考察验证，做具体的修改并从其中积累经验；将由此得到的经验推广到整个研究流域中，将流域冰川数字化，并进行野外考察实地验证、三维立体环境中的修改（图 5）；并且广泛征求老冰川学家意

见，在此基础上做进一步修正，以求降低冰川边界解译误差。

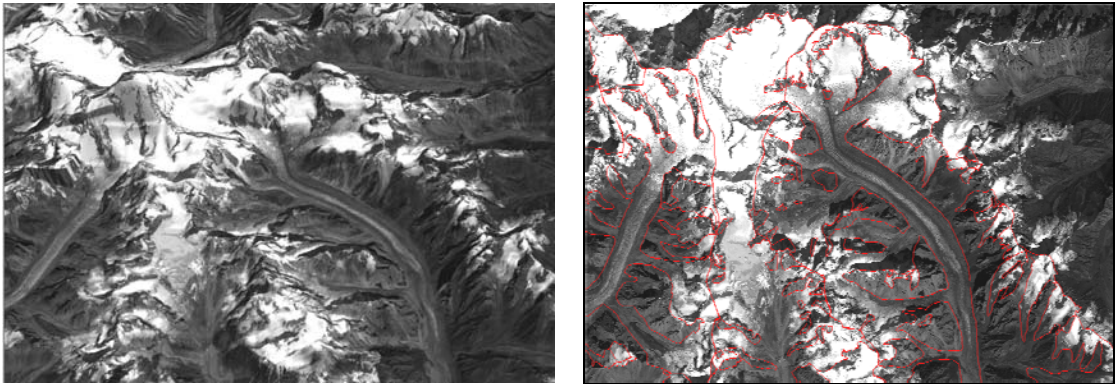


图5 借助 DEM 在三维立体环境中，解译影像冰川信息

Fig.5 With DEM in the three-dimensional environment interpretation of remote sensing image glacier information

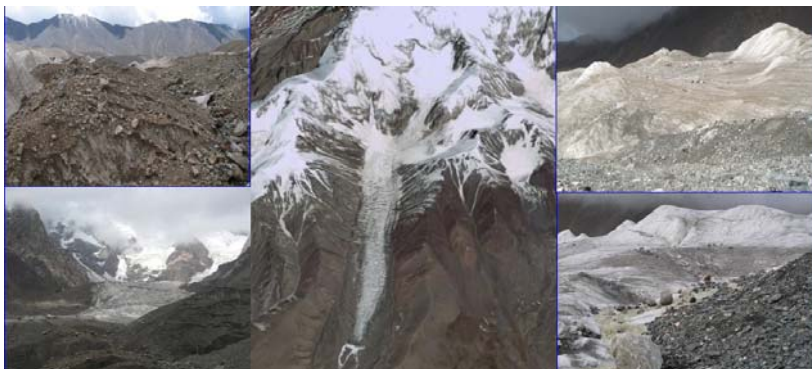


图6 定位监测冰川上进行表碛识别验证

Fig.6 Identify and validate the debris layer on the location monitoring glaciers

对于冰碛的具体处理方法严格按照 GLIMS 的冰川解译指南执行，天山区域比较常见以下几种类型：(1) 冰川末端与终碛垄之间有明显间隔，而冰川末端又难以确定时，可以冰川融水形成的水流的源头 (或起始点) 作为冰川的末端；(2) 冰川退缩时冰川终碛和表碛会被遗留在原地，形成多道终碛垄和凌乱的石块或碎屑，以最靠近冰川终碛作为冰川的末端，并沿冰川终碛垄外侧进行数字化；(3) 冰川侧边界一般直接受山体限制，但当谷地内有冰川侧碛存在时，冰川的侧边界直接受侧碛的影响，在数字化冰川边界时，应选择侧碛靠近冰川的一侧进行数字化；(4) 冰川上水流的界限特征比较明显，裸冰与表碛、表碛与侧碛、表碛与基岩间均有水流间隔。在具体工作中不断积累经验，进一步提高冰川边界界定准确度，且在定位监测冰川上进行不断验证 (图 6)。按照这种方法依次在库克苏河地区、博格达地区、叶尔羌河流域进行冰川解译工作，不断积累经验，提高解译精度。

4 结论

本文采用地理信息系统与遥感技术相结合的方法研究冰川变化,在对遥感数据处理和天山区遥感影像解译方法进行研究的的基础上,得到以下结论:

为使冰川变化资料具有可比性,将冰川解译方法进行统一,延用目前国际上冰川监测工作被公认为最权威的机构世界冰川监测服务处 (WGMS) 的标准,采用其分支机构全球陆地冰空间观测规划(GLIMS)的解译规范。遥感数据的预处理方法已经比较成熟,将工作重点集中在准确获取冰川参数的两个基本条件方面:遥感数据的选择和准确界定冰川边界。质量较好的遥感影像是冰川的解译精度的重要保证,鉴于积雪对于遥感影像的影响较大,只能通过大量的查询、比较来解决,从不同传感器的几千张影像中选出较理想的影像,所有的影像资料都取自于消融期末(8~9月份)且没有云层遮挡,大部分为 Spot-5 的高分辨率影像数据。冰川边界的准确界定是提取其他冰川变化参数的前提,经过长时间的研究、对比发现天山区冰川解译方法大致可分为无表碛覆盖区和表碛覆盖区两种。在研究区域有长期定位监测冰川,其长时间序列的观测资料,可以实现冰川边界人工勾画后的再验证。冰川上表碛的存在,使具体解译方法存在一定的差异,针对表碛分布特征的研究为应用遥感的方法研究冰川变化提供参考,为提高表碛覆盖区域冰川的解译精度提供保障。

参考文献 (Reference)

- [1] IPCC. Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate change 2001: The Scientific Basis [A]. Contribution of working group I to the Third Assessment Report [C]. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 2001.
- [2] Frank R, Fabian M, Steffen V, et al. Illustrated GLIMS Glacier classification manual, 2005.
- [3] Paul F, Liss M, ANDREASSEN. A new glacier inventory for the svartisen region, Norway, from Landsat ETM+ data: challenges and change assessment [J]. Journal of glaciology, 2009, 55: 192-204.
- [4] Paul F, Kääb A, Maisch M, et al. The new remote sensing derived Swiss glacier inventory. I: Methods [J]. Annals of Glaciology, 2002, 34: 355-361.
- [5] Paul F. Changes in glacier area in Tyrol, Austria, between 1969 and 1992 derived from Landsat TM and Austrian glacier inventory data [J]. Int. J. Remote Sens. 2002, 23 (4): 787-799.
- [6] Paul F, Kääb A, Maisch M et al. Rapid disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data [J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31, L21402.
- [7] 王林. 通过 GIS 和 RS 技术研究冰川变化. 天山冰川站年报, 第十八卷.
- [8] Paul F, Huggel C, Kääb A. Combining satellite multispectral image data and a digital elevation model for mapping debris-covered glaciers [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89: 510-518.
- [9] 宋波, 何元庆, 庞洪喜, 等. 基于遥感和 GIS 的我国季风海洋性冰川区冰碛物覆盖型冰川边界的自动识别[J]. 冰川冻土, 2007, 26 (3): 456-462.
- [10] 上官冬辉. 基于 3S 的塔里木河流域冰川变化应用研究[C]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2007.

天山地区 2008-2010 年冰川雷达测厚

吴利华

(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, 甘肃 兰州 730000)

1 冰川雷达测厚的意义

在冰川学研究领域中,冰川厚度是重要的基本参数^[1-2],特别是在冰川动力学数值模拟与模型研究中,冰川厚度又是一个重要的输入参数^[3-4]。冰川厚度对气候变化具有良好的指示意义,近年来山地冰川以“变薄退缩”的基本模式响应着气候变暖的事实^[5],正是体现了冰川厚度对气候变化的敏感性。因此冰川厚度的测量,能够为冰川变化提供定量化的科学依据,同时根据测厚结果不仅可以获得基本的冰下地形信息,通过冰川动力学研究冰下地形与冰川运动之间的互动性,而且又可估算出冰川的冰储量,为水资源的调查评估提供研究基础和科学依据^[6]。

2 天山地区冰川测厚概况及实地探测

2008~2010年,天山冰川站组织了数次大规模野外科学考察活动,其中对6条冰川进行了测厚工作,包括天山托木尔峰地区的青冰滩72号冰川、青冰滩74号冰川、托木尔冰川和天山博格达峰地区的博格达扇状分流冰川、四工河4号冰川及黑沟8号冰川,这6条冰川中,除黑沟8号冰川的厚度在20世纪80年代被原中科院兰州冰川冻土所(现改为中科院寒旱所)采用自行研制的B-1型探地雷达测量外^[7],其余冰川均未有正式出版的厚度数据。我们对以上6条冰川的厚度采用加拿大SSI(Sensors&software Inc.)公司生产的新一代pulse EKKO PRO 100A增强型探地雷达系统进行测量,雷达天线中心频率为100 MHz,测量方式采取剖面法,即在保持接收/发射天线合理间距下同步移动测量,天线距和测量点间距均采用4 m,因雷达电磁波在山地冰川中的传播速度在0.167 m/ns至0.171 m/ns范围内^[8-11],测量中取其平均值0.169 m/ns,这样雷达测厚的相对误差为1.2%^[6]。在用探地雷达测量冰川厚度时,同步利用差分GPS对探地雷达测量点进行精确定位,获得测量点的经纬度和高程数据,差分GPS为北京合众思壮E650型,其动态RTK高程测量相对精度为±2 cm。下面就这些冰川的自然概况和实地探测情况做一概述。

2.1 天山托木尔峰地区

青冰滩72号冰川(冰川编号5Y673P0072,41°45.51' N,79°54.43' E)位于天山托木尔峰地区,属于库马里克河流域,新疆阿克苏地区温宿县吐木秀克乡境内,是一条复合型山谷冰川。根据冰川编目^[12],冰川朝向为S,最高处和冰舌末端高度介于海拔5986 m~3560 m之间,平均海拔4200 m,雪线海拔4400 m,面积5.23 km²,长度约7.4 km,冰储量为0.3975 km³。冰川冰舌狭长,冰川中部以下的东、西两侧具有表碛覆盖:东侧表碛厚度较小,西侧

表碛厚度较大, 冰川海拔 3950 m 以上, 冰裂隙交错分布, 冰下河道水系发育, 冰川上部是由 2 条冰斗冰川分支组成, 冰斗以及山脊陡峭部分产生的冰、雪崩是该条冰川的主要补给来源。该冰川雷达测厚主要集中在海拔 4200 m 以下区域, 综合考虑物质平衡观测花杆、冰川表面形态、冰川运动等因素, 共布设 9 条雷达测线, 包括 5 条横测线和 4 条纵测线, 总共 824 个测点; 其中横测线尽量沿物质平衡花杆横排布设, 经过冰厚可能最大的区域, 以保证测量结果可以客观地揭示冰川的整体厚度特征, 并与纵测线测量结果进行比对; 在冰面布设纵测线时, 考虑到冰川海拔 3950 m 以上冰裂隙交错分布并且冰面地势陡峭, 将纵测线分成两段布设, 其中在海拔 3950 m 以下区域, 从冰川末端至海拔 3950 m 沿冰川主流线布设一条纵测线, 在海拔 3950 m 以上区域, 从海拔 4050 m 至海拔 4200 m 的粒雪盆布设一条纵测线, 另外, 在海拔 4000 m 以下区域表碛覆盖严重的东西两侧各布设一条纵测线, 以研究表碛对雷达测厚结果的影响。

青冰滩 74 号冰川 (冰川编号 5Y673P0074, 41°44.64'N, 79°56.61'E) 与青冰滩 72 号冰川相邻, 根据中国冰川编目^[12], 冰川朝向为 S, 最高处和冰舌末端高度介于海拔 5600 m ~ 3680 m 之间, 平均海拔为 4050 m, 雪线海拔 4300 m, 面积 8.98 km², 长度约为 7.5 km, 冰储量为 0.8172 km³。该冰川的冰舌也呈狭长型, 与青冰滩 72 号冰川在形状上具有相似性, 与青冰滩 72 号冰川不同的是, 该冰川冰舌地势比青冰滩 72 号冰川相对平坦, 冰裂隙少, 主要集中在上游, 并且冰面河十分发育, 冰川上游为裸冰区下游为表碛区, 表碛区所占面积比裸冰区大。该冰川的雷达测厚, 考虑到其表面形态特征, 在冰川裸冰区布设 1 条纵测线和 1 条横测线, 在冰川表碛区, 沿冰川末端至裸冰区与表碛区分界处自下而上布设 4 条纵测线 2 条横测线, 该冰川合计布设雷达测线 8 条, 总共 999 个测点。

托木尔冰川 (冰川编号 5Y673P0037, 41°55.17' N, 80°00.20' E) 是托木尔峰地区最大的冰川。根据中国冰川编目^[12], 冰川朝向为 SE, 最高处和冰舌末端高度介于海拔 7434 m ~ 2780 m 之间, 平均海拔为 4500 m, 雪线海拔 4350 m, 面积 337.85 km², 长度约为 41.5 km, 冰储量为 99.3279 km³。托木尔冰川上的表碛主要分布于海拔 4000 m ~ 2780 m 之间, 布满冰川冰舌部分, 冰川分支交汇处中碛较发育; 积累区呈树枝状, 非常复杂, 主峰是天山最高峰托木尔峰。对于托木尔冰川的测厚工作, 由于该冰川面积大, 要对该冰川完全测量, 在短时间内不可能完成, 因此野外测厚工作仅针对托木尔冰川末端区域进行, 其中测厚区域从冰川末端有冰处一直到冰川第一个分支以上 1 km 处, 共布设 3 条纵测线和 3 条横测线, 合计 531 个测点。

2.2 天山博格达峰地区

博格达扇状分流冰川包括四工河 5 号冰川 (冰川编号 5Y725D5, 43°47.96' N, 88°20.12' E) 和古班博格达河 10 号冰川 (冰川编号 5Y812B10, 43°47.51' N, 88°16.30' E)。博格达扇状分流冰川面积为 10.94 km², 其中消融区面积 3.42 km², 约占总面积的 31.30 %, 冰川雪线海拔高度 3800 ~ 3900 m^[13]。冰川上限接近博格达峰顶 (海拔 5445.0 m), 冰川西北侧是十分发育的雪崩区, 也是该冰川的主要积累地带, 冰川的中下部分则呈扇形分布在主峰下次一级山岭的鞍部, 其末端分别流入北坡的四工河和南坡的古班博格达河, 其中冰川末端高程在四工河为 3615 m, 在古班博格达河为 3535 m, 前缘均有终碛湖和冰蚀湖发育。总体上, 博格达扇状分流冰川主要由四条冰流汇合而成, 冰川补给方面, 除一条冰流为粒雪盆补给外, 其余冰流均为雪崩补给; 在三条冰流的汇合线上有中碛发育, 末端有零星表碛分布。对该冰川进行

雷达测厚时, 考虑到这四条冰流的发育条件和物质平衡状况, 沿冰川末端至冰川上游在四条冰流的交汇处布设 4 条横测线和 3 条纵测线, 总共 1450 个测点。

四工河 4 号冰川 (冰川编号 5Y725D4, 43°48.92' N, 88°20.65' E) 位于天山博格达峰冰川区, 根据中国冰川编目的数据^[14], 冰川朝向 W, 最高处和冰舌末端高度介于海拔 4350 m ~ 3600 m 之间, 平均海拔为 3920 m, 雪线海拔 3880 m, 冰川长度为 3.2 km, 冰川面积为 2.96 km², 冰储量为 0.1835 km³, 朝向 W, 雪线海拔高度为 3880 m。该冰川形态单一, 冰面冰碛少且相对较平坦, 属于典型的“洁净型”冰川。在该冰川进行雷达测厚时, 共布设 1 条纵测线和 5 条横测线, 其中纵测线沿主流线布设, 5 条横测线根据纵测线的测厚结果特征, 在 5 个典型的海拔区域布设, 纵横测线合计 676 个测点。

黑沟 8 号冰川 (冰川编号 5Y813B0008, 43°46.26' N, 88°22.40' E) 位于天山博格达峰南坡黑沟河源头, 是一条典型的双粒雪盆山谷冰川。据中国冰川编目^[14], 冰川朝向 S, 冰川最高处和冰舌末端高度介于海拔 5445 m ~ 3380 m 之间, 平均海拔为 4150 m, 雪线海拔 4050 m, 冰川面积 5.61 km², 长度为 7.1 km, 冰储量约 0.4376 km³。对于黑沟 8 号冰川的雷达测厚工作, 为了与 20 世纪 80 年代的测厚结果进行对比, 测厚路线基本沿用 20 世纪 80 年代的测厚路线 (根据经纬度导航), 共布设 1 条纵测线和 4 条横测线, 合计 907 个测点, 其中 4 条横测线完全按照原来的测厚路线, 1 条纵测线在原来测线的基础上向冰川上游延长了 1764 m。

3 雷达测厚数据初步分析及结果

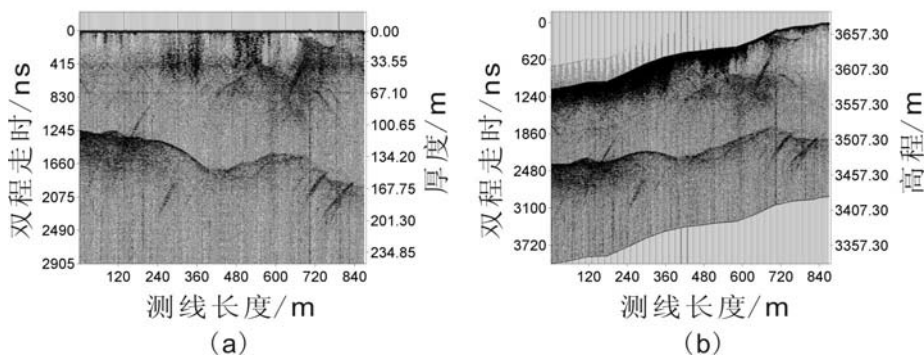


图 1 博格达扇状分流冰川雷达测厚结果

图 1(a) 雷达冰厚分布图, 图 1(b) 雷达冰川表面与冰床地形图

Fig. 1 Radar results of Bogda Fan-Shaped Difffluence Glacier

Fig. 1(a) Ice thickness distribution of Bogda Fan-Shaped Difffluence Glacier along a survey line

Fig. 1(b) Glacier surface and bedrock topography of Bogda Fan-Shaped Difffluence Glacier along a survey line

在冰川厚度实地测量中, 探地雷达通过发射天线由冰川表面向下垂直发射一定频段的电磁波, 当电磁波传播到冰川底部时, 由于冰川冰与下伏基岩两种介质存在显著电性差异, 电磁波在冰—岩界面就会产生反射信号, 反射信号回到冰川表面时被接收天线接收, 探地雷达根据电磁信号的双程传播时间、反射信号强度和同相轴特征, 实现对冰—岩界面位置的判定, 冰川雷达测厚以电磁波双程走时记录波形, 以平面二维图象方式显示雷达测厚结果^[6]。在雷

达探测图象中, 横坐标表示雷达天线沿测线移动的位置和测线长度, 纵坐标表示电磁波双程走时, 给出传播速度后, 就能够换算出冰川的厚度, 并且将 GPS 定位的雷达测点表面高程数据引入雷达测厚结果进行雷达测线地形数据校正, 便可以得出显示冰川表面与冰床剖面地形特征的直观雷达图。

在以上 6 条冰川厚度的实地测量中, 我们采用电磁波在山地冰川中的平均传播速度 0.169 m/ns, 将探地雷达中的实地测量数据导入 SSI (Sensors&software Inc.) 公司提供的 EKKO_View 软件中, 便可得到雷达测厚图像, 如图 1 所示为博格达扇状分流冰川其中 1 条测线的雷达测厚图像, 其中图 1(a)为雷达测厚图像, 将该测线上各测点的 GPS 定位的表面高程数据引入雷达测厚结果进行雷达测线地形数据校正, 便可得到显示冰川表面与冰床剖面地形的直观雷达图, 即图 1(b)所示。

为了将雷达测厚图像中厚度数据解译出来, 我们采用 ORIGIN 软件将其数字化, 从而得到每条雷达测线上各个测点的厚度值, 由此我们得到以上 6 条冰川雷达测厚初步结果: 博格达扇状分流冰川所测冰体最大厚度超过 215.7 m, 位于四工河 5 号冰川和古班博格达河 10 号冰川交界处靠下方部分, 该处冰面呈凹陷状; 四工河 4 号冰川测得冰体最大厚度为 104.9 m, 位于冰川海拔 3800 m 位置处; 黑沟 8 号冰川测得冰体最大厚度为 177.5 m, 位于冰川海拔 3630 m 位置处; 青冰滩 74 号冰川测得冰体最大厚度超过 150.0 m, 位于裸冰区海拔 4180 m 位置处; 托木尔冰川所测冰川末端冰体平均厚度为 38.3 m。

以上主要介绍了冰川雷达测厚数据的初步分析和结果, 关于应用雷达测厚数据进行冰川冰储量估算和动力学模式研究正在进行当中。

参考文献 (References)

- [1] Paterson W S B. The Physics of Glacier (Third Edition) [M]. Oxford: Pergamon Press, 1994, 238-288.
- [2] 施雅风, 黄茂桓, 姚檀栋, 等. 中国冰川与环境[M], 北京, 科学出版社, 2000, 54-78.
- [3] Van der Ven, C J. Fundamentals of Glacier Dynamics[M], Balkema, Rotterdam, 1999, 103-144.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 施雅风, 刘潮海, 王宗太, 等. 简明中国冰川目录[M], 上海, 上海科学普及出版社, 2005, 9-16.
- [8] Glen J W, Paren J G. The electrical properties of ice and snow [J]. Journal of Glaciology, 1975, 15 (73): 15-38.
- [9] Drewry D J, Jordan S R, Jankowski E. Measured properties of the Antarctic ice sheet: surface configuration, ice thickness, volume and bedrock characteristics [J]. Annals of Glaciology, 1982, 3: 83-91.
- [10] Nolan M, Motkya R J, Echelmeyer K, et al. Ice-thickness measurements of Taku Glacier, Alaska, USA and their relevance to its recent behavior [J]. Journal of Glaciology, 1995, 41 (139): 541-553.
- [11] Moore J C, Pälli A, Ludwig F, et al. High-resolution hydrothermal structure of Hansbreen, Spitsbergen mapped by ground penetrating radar [J]. Journal of Glaciology, 1999, 45 (151): 524-532.
- [12] 谢维荣, 丁良福, 刘潮海, 等. 中国冰川目录 (III) 天山山区 (西南部塔里木内流区)[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 66-67.
- [13] 张文敬, 谢自楚. 天山博格达峰北坡现代冰川积累和消融特征及物质平衡的估算[J]. 冰川冻土, 1983, 5

(3): 59-70.

- [14] 王银生, 刘潮海, 丁良福, 等. 中国冰川目录 (III) 天山山区 (东部散流内流区)[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 41-43.

GPS 和 GIS 技术支持下的冰川表面高程变化分析

王璞玉

(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, 甘肃 兰州 730000)

GPS (Global Positioning System) 具有全天候, 不受任何天气的影响, 高精度、快速、省时、高效等优点, 可以准确获取空间三维位置信息。GIS (Geographical Information System) 又是用于采集、模拟、处理、检索、分析和表达地理空间数据的计算机信息系统, 具有独特的地理空间信息处理优势。近年来, 随着这两种技术的迅速发展, 已经被广泛应用于冰川学研究当中。本研究将以青冰滩 72 号冰川为例, 在 GPS 和 GIS 技术的支持下, 开展冰川表面高程变化研究, 从而分析冰川厚度、储量 (体积) 的变化, 估算冰川物质平衡, 从而为水资源评估提供可靠数据支持。

1 研究现状

近年来, 冰川表面高程变化研究工作在一些冰川上已经有所开展。Paul F 和 Haerberli W 通过对比不同时期的 DEM, 从而研究了阿尔卑斯山冰川表面高程变化的空间分布特征^[1]; Chueca 基于航片以及 GPS 测量数据分别建立了两期 DEM, 对比分析了西班牙比利牛斯山脉 Maladeta 冰川 1981 ~ 2005 年间表面高程变化特征, 并以此估算储量变化^[2]; Shangguan 利用 1969 和 2007 年 DEM, 对比研究了青藏高原小冬克玛底冰川的表面高程变化, 从而估算了物质平衡状况^[3]。

2 GPS 测量资料获取

2008 年 8 月对 72 号冰川开展了 RTK-GPS (Real Time Kinematic- Global Position System) 测量, 即载波相位差分技术, 野外实时可得到 cm 级定位精度, 是目前 GPS 测量中精度最高的一种定位方法, 完全满足冰川表面测量的精度要求。野外测量主要集中在冰舌区, 对冰川边界精确定位的同时, 以间距 20 ~ 50 m 布设测点以确定冰面高程, 测量路线如图 1 所示。GPS 原始测点 UTM-WGS84 坐标, 处理过程中将其转化为 BJ54 坐标, 基准点取黄海平均海平面, 即青岛零点^[4]。

3 处理方法

本研究使用的资料包括 72 号冰川 1964 年白纸测图法绘制的 1:50 000 地形图和 2008 年 RTK-GPS 测量资料。在地理信息系统软件 ARCGIS 中首先数字化 1964 年地形图等高线, 通

过插值建立 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ DEM, 坐标系取 BJ54。其次, 基于 GPS 测点, 通过数据插值提取等高线, 并建立 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ DEM。对两期 DEM 进行精度评价, 分别以 1964 地形图和 2008 年 GPS 数据为准, 从中随机的选取了 200 个高程点与 DEM 上的同名点进行比较, 从而计算误差范围。同时, 还采用了 DEM 内插等高线与原等高线套合检查的方法, 套合情况良好。在此基础上, 结合 1964 年和 2008 年 DEM, 可以开展冰舌区表面高程变化研究, 研究过程中对比选取周围基岩区域 10 个离散的独立控制点进行误差评估^[5], 并综合考虑两期 DEM 的高程误差, 结果表明冰面高程变化误差在 $\pm 6\text{ m}$ 以内, 是在冰川学精度要求范围之内。此外, 可以提取不同时期冰川形态参数, 建立拓扑关系以及空间数据库, 利用地图代数运算从而研究冰川末端、面积变化特征。

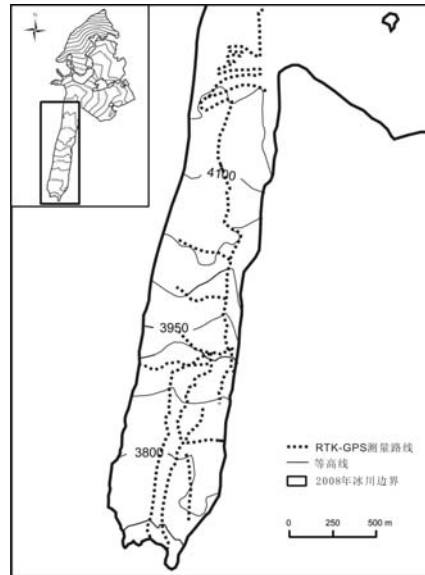


图 1 青冰滩 72 号冰川 RTK-GPS 测量路线图

Fig.1 RTK-GPS measuring lines of Qingbingtan Glacier No.72

4 冰川表面高程变化分析

冰面高程变化研究过程中发现, 由于冰川上部地势陡峭, 会引入较大误差, 因此, 本研究仅针对冰舌开展, 以期更为准确的反映变化特征。图 2 用不同颜色标注了 72 号冰川 1964 ~ 2008 年冰舌冰面高程变化程度, 即冰川厚度变化。研究表明, 72 号冰川冰舌整体处于减薄状态, 1964 ~ 2008 年平均减薄 $9.59 \pm 6\text{ m}$, 年均减薄约 $0.22 \pm 0.14\text{ m}$ 。末端减薄最为强烈, 可达 $30 \pm 6\text{ m}$ 。海拔 4200 m 附近有增厚现象, 但区域极小且幅度不大, 可能是冰川上部带来的冰、雪补给。同时也发现, 冰川中部趋于主流线位置的冰面高程变化普遍强于东西两侧。冰川减薄直接导致冰量的亏损, 评估结果表明, 1964 ~ 2008 年, 72 号冰川冰舌由于减薄造成的冰量亏损达 $14.1 \pm 8.8 \times 10^3\text{ km}^3$, 折合水当量 $12.7 \pm 7.9 \times 10^3\text{ km}^3$ (冰密度 $0.9 \times 10^3\text{ kg/m}^3$)。

野外观测发现, 冰川上部有块状基岩出露, 厚度亦减小, 整条冰川处于减薄状态。冰川退缩也是引起冰量亏损的一个重要方面, 但是 2008 年未对冰舌已退缩区域开展测绘工作(图 3), 因此无法评估冰川退缩造成的冰量损失。但可以肯定, 过去 44 a 间冰舌区至少亏损了 14.1

$\pm 8.8 \times 10^{-3} \text{ km}^3$ 冰量, 即 72 号冰川至少提供 $12.7 \pm 7.9 \times 10^{-3} \text{ km}^3$ 的融水径流。冰面高程变化研究为 72 号冰川这种缺少长期观测的冰川提供了一种估算物质平衡的行之有效的方法, 可以通过间接获取冰储量变化从而反映冰川在一定时期内的物质积累或亏损。

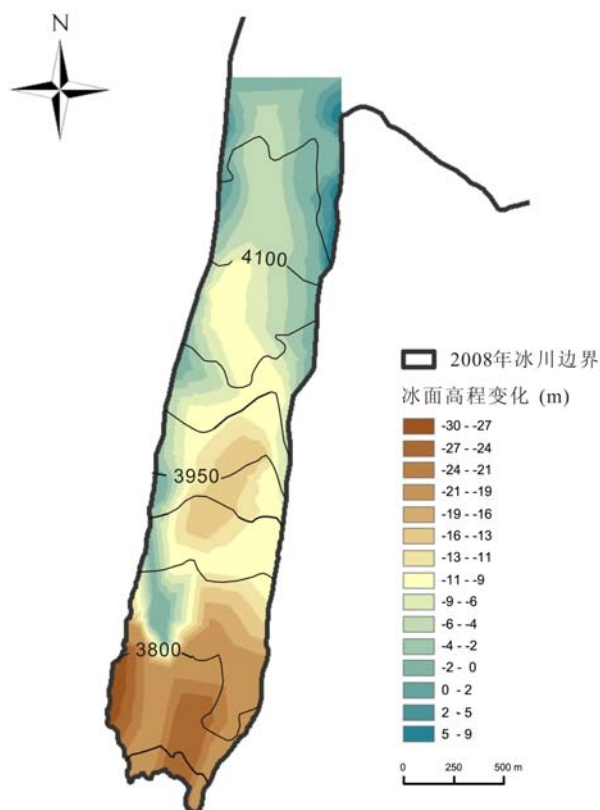


图 2 1964~2008 年青冰滩 72 号冰舌区表面高程变化

Fig.2 Ice surface-elevation changes of the ice tongue of Qingbingtan Glacier No.72 from 1964 to 2008

参考文献 (References)

- [1] Paul F, Haeberli W. Spatial variability of glacier elevation changes in the Swiss Alps obtained from two digital elevation models [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35: L21502, doi: 10.1029/2008GL034718.
- [2] Chueca J, Julian A, Lopez-Moreno J I. Recent evolution (1981-2005) of the Maladeta glaciers, Pyrenees, Spain: extent and volume losses and their relation with climatic and topographic factors [J]. Journal of Glaciology, 2007, 53 (183): 547-557.
- [3] Shangguan D H, Liu S Y, Ding Y J, et al Thinning and retreat of Xiao Dongkemadi glacier, Tibetan Plateau, since 1993 [J]. Journal of Glaciology, 2008, 54 (188): 949-951.
- [4] 王解先, 王军, 陆彩萍. WGS-84 与北京 54 坐标的转换问题[J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 23 (3): 70-73.
- [5] Rivera A, Benham T, Casassa G, et al. Ice elevation and areal changes of glaciers from the Northern Patagonia Icefield, Chile [J]. Global and Planetary Change, 2007, 59: 126-137.

乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡观测与计算

王 鹏

(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, 甘肃 兰州 730000)

1 冰川物质平衡观测的意义

冰川上物质的收入与支出之间的关系称为物质平衡。冰川物质平衡观测一直以来都是冰川研究的重要基础内容之一。冰川的物质平衡状态不仅直接反映了冰川作用区的气候变化, 导致冰川的进退, 而且与冰川表面的热量平衡, 冰体内的水文状态, 成冰作用, 活动层的温度状况, 以及冰川运动速度等密切联系。因此, 研究冰川物质平衡对于认识冰川的发育、变化及物理特征是十分必要的。由于冰川物质平衡的重要意义, 一直是冰川学中传统的观测及研究内容。

2 乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡观测方法及进展

乌鲁木齐河源 1 号冰川是目前中国研究冰川物质平衡最详细、系列最长的冰川。1959 年 6 月, 中国科学院高山冰雪利用研究队 (中科院寒旱所前身) 在该冰川附近建立天山冰川观测试验站, 开始了对 1 号冰川进行系统的、直接的物质平衡研究。到目前为止, 关于 1 号冰川物质平衡的观测研究已经进行了 50 年, 而与此相关的研究成果众多, 在国内外影响巨大。该冰川是 WGMS 网络中惟一的冰川, 并于 2007 年被列为全球重点监测的 10 条冰川之一。

1 号冰川自进行冰川物质平衡观测起, 采用了消融区花杆 (测杆) 和积累区雪坑相结合的观测方法, 后来的研究者相继探索出了重复地面立体摄影法、水文学方法、重复测量法、踏勘方法。而经过历史和实践的考验, 原始的花杆和雪坑相结合的方法一直沿用至今。为了和传统的实地观测进行比较, 近年来还发展了冰川物质平衡模型的相关研究, 其中主要是物质平衡度日模型。

3 数据获取和处理

3.1 观测冰川的选择及测点的布设

冰川物质平衡最精确的观测方法是直接在冰川上布设测点, 进行系统的定期观测, 然后综合各测点的测量结果, 计算出整个冰川或冰川上某一部分在全年或某一时段的物质平衡及其各分量。作为直接观测的冰川, 其面积及高差不宜太大, 冰川形态较为规则, 表面比较平坦, 未被表碛覆盖, 表面裂隙也不易太多、太宽, 否则将增大观测难度, 影响计算精度。作为物质平衡观测的冰川, 必须要有近期测量的较大比例尺的冰川地形图, 一般为数千至万分

之一，并将测点精确地标在图上，以便于计算。

3.2 物质平衡数据采集

3.2.1 消融区的直接观测

在消融区一般采用质地坚实、质量轻的测杆观测冰川表面的物质变化。测杆长度根据所观测冰川历年来的实际年消融情况来定，若没有相关历史资料则一般选 3 m 的测杆为宜，采用手摇冰钻或蒸汽钻打孔，将测杆铅直插入冰内。夏季消融强烈时应注意测杆的更新轮换，尽可能保证测杆不因消融而倾倒，使得观测具有连续性。观测时间从每年 4 月底 5 月初至次年 8 月底 9 月初之间，保证每月 1 次。

每次读数均以测杆顶部为零计算到达冰面的距离，两次读数之差便是该时段冰融化的深度。当冰川表面有积雪(粒雪)及附加冰时，还要分别记录它们的厚度 (h) 及平均密度 (ρ)，如图 1 所示：

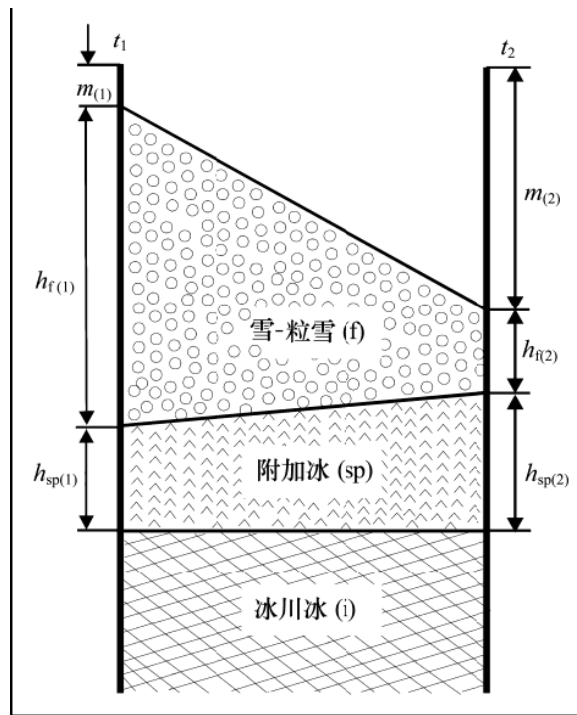


图 1. 物质平衡观测及计算图示

Fig. 1 Icon for Observation and calculation of the mass balance

某时段、某点的物质平衡应为积(粒)雪平衡 (b_f)，附加冰平衡 (b_{sp}) 及冰川冰平衡 (b_i) 的代数和：

$$b_{(1\sim 2)} = b_{f(1\sim 2)} + b_{sp(1\sim 2)} = b_{i(1\sim 2)} \quad (1)$$

$$b_{f(1\sim 2)} = \rho_{f(2)} h_{f(2)} - \rho_{f(1)} h_{f(1)} \quad (2)$$

$$b_{sp(1\sim 2)} = \rho_{sp} (h_{sp(2)} - h_{sp(1)}) \quad (3)$$

$$b_{i(1\sim 2)} = \rho_i[(m_{(1)} + h_{f(1)} + h_{sp(1)}) - (m_{(2)} + h_{f(2)} + h_{sp(2)})] \quad (4)$$

式中: 下标 i , sp , f 分别表示冰川冰、附加冰和雪 (粒雪); 1, 2 表示观测的顺序; 密度(ρ) 的量纲为 g/cm^3 ; 测杆的读数 (m) 及厚度 (h) 的量纲为 cm ; 附加冰的平均密度 (ρ_{sp}) 可取 $0.85 \text{ g}/\text{cm}^3$; 冰川冰的平均密度 (ρ_i) 为 $0.9 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

在野外肉眼观测时, 附加冰呈半透明或乳白色, 并可见绵絮状气泡残体; 冰川冰则完全透明或呈现天蓝色, 有时可见沿冰川流向分布的小气泡串, 对此的判断都需要一定的冰川学相关经验。全年度的物质平衡是每次观测结果的代数和:

$$b_n = b_1 + b_2 + b_3 \cdots \cdots \quad (5)$$

3.2.2 积累区的直接观测

积累区主要是雪及粒雪层, 它的密度及厚度变化很大, 用测杆已不能测出准确的积累量, 因此主要观测方法是雪坑法, 测杆只能作为辅助方法。但在极地冰盖上仍普遍使用测杆法, 其雪(粒雪)的密度只需取表层的平均值即可。

雪坑观测比测杆观测要复杂得多。首先要在选定的测点上, 用人工挖掘比当年积雪厚度更深的雪坑, 按雪 (粒雪) 层的层位分层测定密度和厚度, 然后以下式, 计算出该年层的纯积累量:

$$b_n = \sum_1^n h_j p_j \quad (6)$$

式中: h_j , p_j 分别为各雪层的厚度及密度, n 为总层数。雪坑法常与成冰作用观测同时进行。

3.3 整个冰川物质平衡的计算

3.3.1 等值线法

在计算出单个花杆点的物质平衡值, 并以此绘制出物质平衡等值线(图 2), 以面积加权法计算整个冰川的平均物质平衡量。

整个冰川的物质平衡 B 为:

$$B = C + A = \sum s_{cn} c_n + \sum s_{an} a_n \quad (7)$$

式中: C 、 A 分别为纯积累量和纯消融量; S_{cn} 、 S_{an} 分别为积累区和消融区相邻两等值线或等高线之间的投影面积; c_n 、 a_n 分别为相邻等值线或等高线投影面积区域内的平均积累深度和消融深度。

3.3.2 等高线法

以所研究冰川的地形图等高线各海拔高度带为区间, 通过实测值计算出各区间布设的花杆单点物质平衡值 (同等值线法), 并求取各区间的平均物质平衡值, 进而通过面积加权法计算整个冰川的物质平衡。

3.3.3 计算结果

两种方法最终得出 1 号冰川年物质平衡结果如下(表 1):

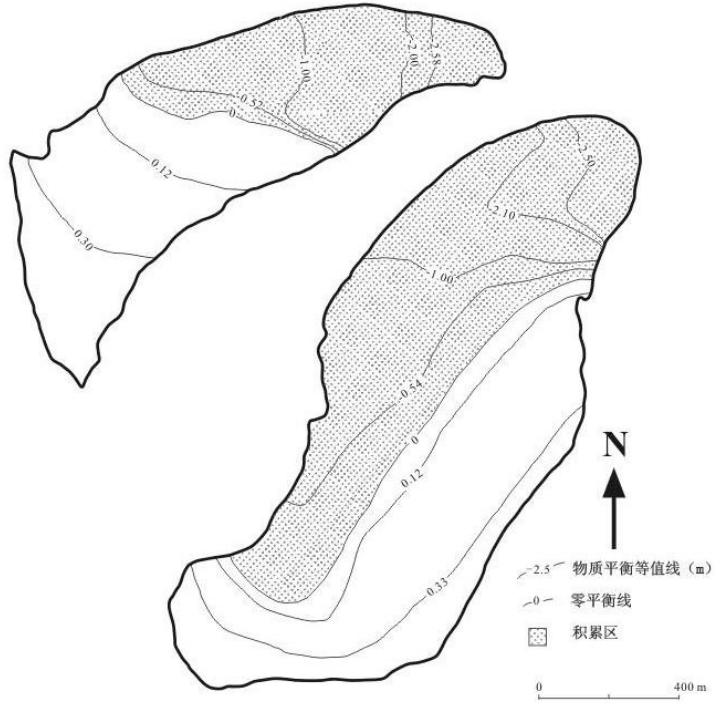


图 2. 冰川物质平衡等值线图

Fig. 2 Contour of glacier mass balance

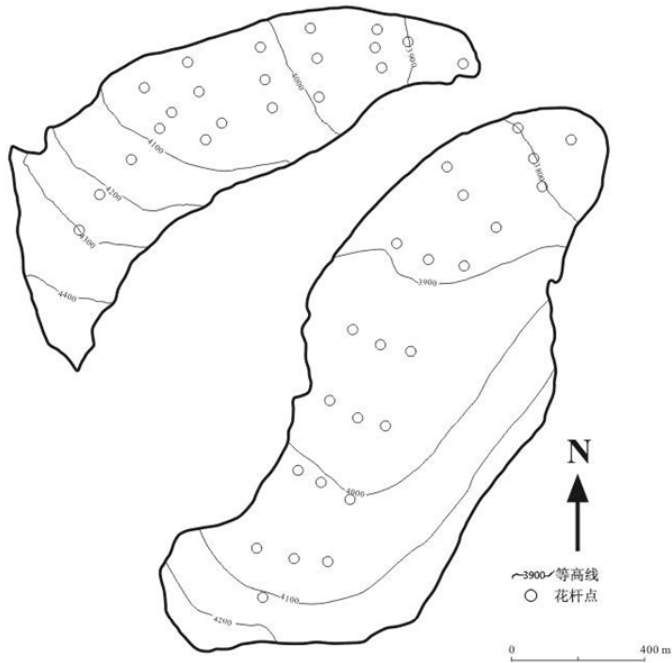


图 3. 冰川等高线地形图

Fig. 3 Glacier contour map

表 1 1 号冰川 2005/2006 年度等值线法物质平衡观测计算结果 (据杨惠安)

Table 1 The observing material balance calculation of contour method of Glacier No. 1 in 2005/2006 (From Yang Hui-an)

项 目	平衡线	纯积累			纯消融			年物质平衡	
	海拔 (m)	积累区面积 (km ²)	积累量 (10 ⁴ m ³)	积累深 (mm)	消融区面积 (km ²)	消融量 (10 ⁴ m ³)	消融深 (mm)	总量 (10 ⁴ m ³)	平衡值 (mm)
1号东支	4068	0.41	8.8	214.7	0.676	-104.32	-1543.2	-95.52	-879.6
1号西支	4096	0.276	4.65	168.5	0.315	-42.51	-1349.5	-37.86	-640.6
1号冰川	4078	0.686	13.45	196.1	0.991	-146.83	-1481.5	-133.38	-795.3

4 小结

在对冰川进行物质平衡观测研究中, 观测数据的准确度、计算的细致程度及使用的观测计算方法都会影响最终研究结果。这就需要我们研究者, 在实际的观测和计算当中尽可能的避免或减小误差, 让观测和计算的结果尽可能接近真实情况。冰川物质平衡是冰川研究极为重要的基础性工作, 为了更好的解释和描述冰川的物质平衡机理, 需要我们不断探索新的方法, 解决物质平衡研究中的新问题。

参考文献 (References)

- [1] 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 中国冰川概论[M], 科学出版社, 1988: 69-73
- [2] 谢自楚, 刘潮海. 冰川学导论[M], 上海科学普及出版社, 2009: 68-72
- [3] 刘潮海, 王纯足, 韩添丁, 等. 乌鲁木齐河源 1 号冰川积累、消融和物质平衡研究[A]. 天山冰川观测试验站年报, Vol.7, [C]. 兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 1988, 1.
- [4] Meier, Mark F. Proposed definitions for glacier mass budget terms [J]. Journal of Glaciology, 1962, 4(33):252-263
- [5] 杨大庆, 刘潮海, 王纯足. 冰川积累量测量和计算方法研究[J]. 冰川冻土, 1992, 14 (1): 1-10.
- [6] 周平, 金爽. 乌鲁木齐河流域降水和径流化学观测[A]. 天山冰川观测试验站年报, Vol.18, [C]. 兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2009, 117.
- [7] 杨惠安, 李忠勤, 王飞腾. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 2005/06 年度物质平衡观测研究结果[A]. 天山冰川观测试验站年报, Vol.18, [C]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2009, 10.

天山典型冰川温度观测新进展

董志文

(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, 甘肃 兰州 730000)

1 冰川温度观测的意义

冰川温度是冰川物理性质的基本指标之一, 是冰川物理状态的一种表现, 反映冰川发育的水热条件和所处的动力条件^[1-3], 尤其是冰川活动层以下的温度决定了冰川的许多基本性质, 如流动及底部运动特征等。冰川表面的热量平衡、积累和消融、融水的活动、冰川的运动以及地热流的作用都对冰川温度场产生影响。冰川温度的改变表明冰川内部冷储的变化, 预示着冰川对气候变化的敏感性。此外, 通过温度的观测, 可以为冰川动力学模式的研究提供重要的参数, 对于冰川的变化预测研究有着重要的意义。

2 乌鲁木齐河源 1 号冰川温度观测新进展

乌鲁木齐河源 1 号冰川温度的观测最早为 1962 年夏季, 温度孔深度 5.6 m。1964~1966 年曾取得了两个 10 米深钻孔资料。1980~1986 年期间, 在乌鲁木齐河源 1 号冰川共钻孔 36 个, 深度 10~30 m, 另有 1986 年打的 3 个深钻孔。1990 年王晓军等利用提取冰芯后的钻孔也取得了一次资料。测温用的仪器是温度表。在 1 号冰川的温度测量中先后使用了铜电阻温度表、热敏电阻温度表、晶体管, 一般精度为 ± 0.1 K, 精确的小于 ± 0.05 K。通过对资料的整理分析, 研究人员已取得了许多成果, 如对冰川温度理论的形成以及推动冰川物理学的发展等^[1]。2006 年 10 月至今, 天山冰川站在乌鲁木齐河源 1 号冰川不同成冰带再钻取了 7 个深孔, 进行冰川内部温度的观测, 使得这项重要的观测得以恢复。这 7 个深孔位于 1980~1986 年测孔的一些较为典型的位置上进行冰温测量。如图 2 所示, 这 7 个点位置分别为: 东支为花秆 C₂、D₂、F₂、H₂、以及 PGPI (雪冰过程研究取样点) 观测点; 西支为 D₂、H₂ 花秆。具体如图 1 所示。冰川温度观测频率为 1 周一次的较为密集观测。基于此, 我们已经得到了过去 4 年 (2006~2009 年) 冰川不同部位深孔温度的资料。

在以上冰川温度观测的基础上, 2009 年 11 月在乌鲁木齐河源 1 号冰川钻取了透底冰芯, 进行冰川消融区温度观测。透底冰层温度的观测点在 20 世纪 80 年代曾经有 2 个, 后来由于种种原因被迫终止。为了恢复透底冰层温度的观测, 天山冰川站将该冰芯的钻孔位置选在 20 世纪 80 年代的观测点位置附近, 钻取透底冰芯后, 在钻孔中布设直达冰川底部的温度探头。该观测点的恢复, 对于研究近年冰温随气候的变化具有深远意义。同时, 取得资料后, 可以通过对 2006~2009 年深孔温度观测比较、近 20 年前后冰川温度的分析比较, 揭示冰川内部冷储的变化情况, 从而反映冰川变化及其对气候变化敏感性的变化。因为尽管已有比较系统的多年观测资料, 但是缺乏对透底冰层温度的观测。

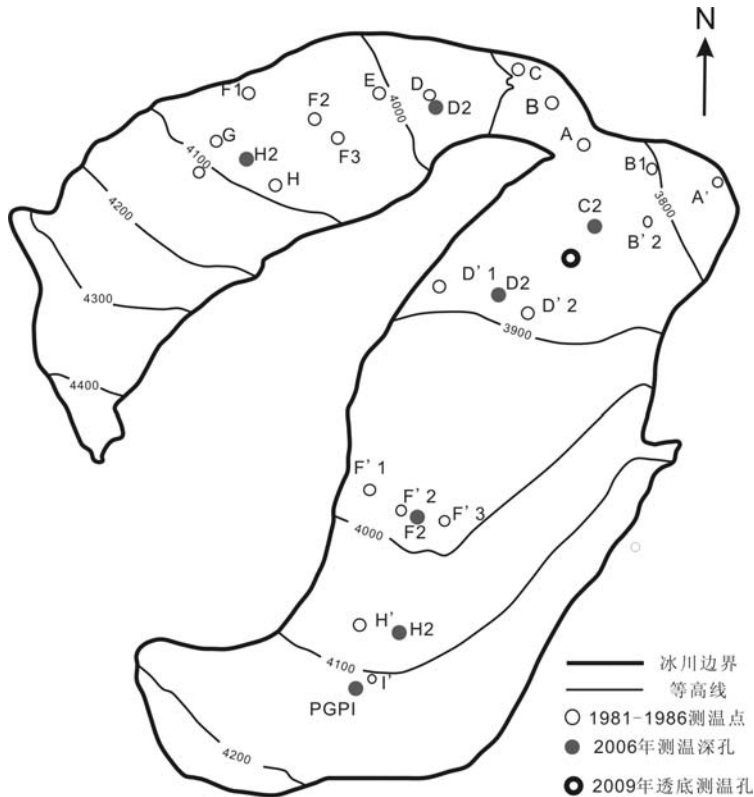


图1 2009年乌鲁木齐河源1号冰川透底冰心钻孔深孔测温点位置图

Fig.1 The distribution map of glacier temperature measure point on glacier No.1 at the headwaters of Urumqi River in 2009

3 托木尔峰青冰滩72号冰川温度观测的开展

2008年天山冰川站开始了天山西段托木尔峰青冰滩72号冰川温度观测工作。青冰滩72号冰川(41°45.51' N, 79°54.43' E)位于托木尔峰区的阿克苏河分支库马力可河,是一条复合型山谷冰川。冰舌末端和最高处高度介于海拔3560~5986 m之间,平均海拔为4200 m,冰川面积5.52 km²,冰储量为0.398 km³。根据2009年的野外实地观测,72号冰川面积在1964~2008年间减少了28%,由7.27 km²缩小到5.23 km²。末端的退缩速率达到了45.3 m·a⁻¹。冰川下部厚度薄,温度高(接近0°C),末端表碛厚度与消融关系密切。但整个冰川的运动补给强烈,冰川表面运动速度最高达到了70 m·a⁻¹,动力学作用不可忽视。与乌鲁木齐河源1号冰川相比,该冰川的消融和运动补给要强得多,具有海洋型冰川的某些特征,对气候的变化十分敏感。2个温度孔分别位于冰川海拔3950 m冰碛物上和海拔3950 m D₂花杆处。图2是青冰滩72号冰川2009年7月18日温度观测得到的结果示例,包括海拔3950 m处表碛覆盖区和无表碛区冰川测温点所获得的冰川温度情况。从温度曲线(图2)来看,夏季冰川温度(0~18 m)显得很高,表碛覆盖区和无表碛覆盖区冰川温度都大于消融点,说明了夏季青冰滩72号冰川处于强烈消融的原因所在。由于本文主要说明冰川温度观测进展情况,所以在此只列举了一些观测结果的例子,对于观测结果更加具体、系统的分析有待于进一步的研究。

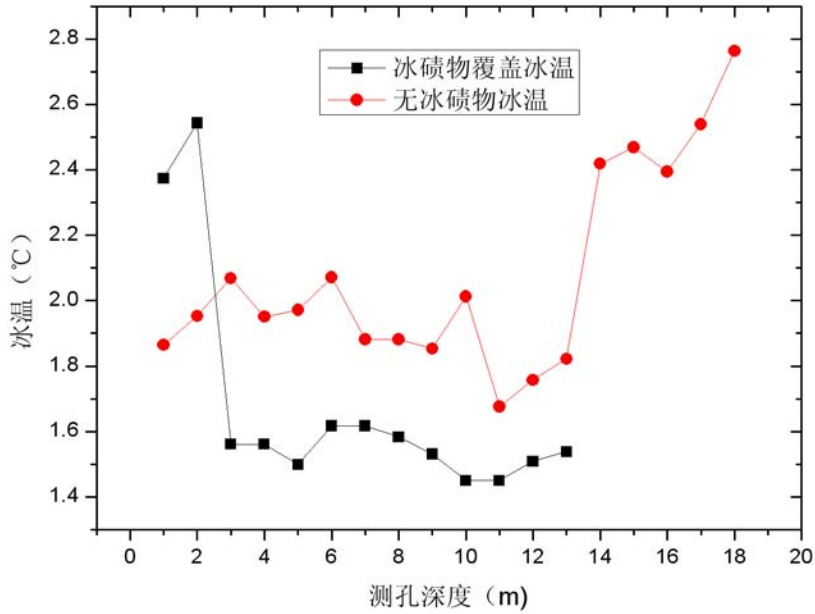


图2 青冰滩72号冰川2009年夏季冰川温度观测结果

Fig.2 Glacier temperature measure results of some points on Qingbingtan glacier No.72 in the year 2009

参考文献 (References)

- [1] 黄茂桓, 王仲祥, 任贾文. 我国冰川的温度[J]. 冰川冻土, 1982, 4(1): 20-30.
- [2] 任贾文, 张金华, 黄茂桓. 天山乌鲁木齐河源1号冰川温度研究[J]. 冰川冻土, 1985, 7(2): 141-151.
- [3] 黄茂桓. 我国冰川温度研究40年[J]. 冰川冻土, 1999, 21(3): 193-197.

HBV 模型介绍

孙美平

(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, 甘肃 兰州 730000)

1 模型概述

HBV模型由瑞典水文气象局 (SMHI) 开发, 目前已在北欧等50多个国家推广应用 (图1), 获得了良好的使用效果^[1]。HBV是瑞典水文局水量平衡部分的模型, 是Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (Hydrological Bureau Waterbalance-section) 的缩写。该模型把降雨、融雪、产流、汇流以及实时预报有机地结合在一起, 是一个概念性、半分布式水文模型^[2]。



图1 HBV模型应用的国家和地区

Fig.1 Countries or regions where the HBV Model has been applied

2 模型原理及结构

2.1 模型原理

HBV模型是一个降雨—径流模型, 模型原理是水量平衡, 其方程定义为:

$$P-E-Q=\frac{d}{dt}[SP+SM+UZ+lakes]$$

式中: P为降水; E为蒸散发; Q为流量; SP为积雪; SM为土壤含水量; UZ为表层地下含水层; LZ为深层地下含水层; lakes为水体体积。

2.2 模型结构

HBV 模型考虑下垫面和降雨空间分布差异, 将流域 (district) 划分为多个子流域 (subbasin), 每个子流域又根据高程、植被类型划分为多个带 (zone), 然后根据流域水系拓朴结构, 分别模拟各子流域的径流过程, 确定各子流域产流到达总流域出口所流经的子流域, 计

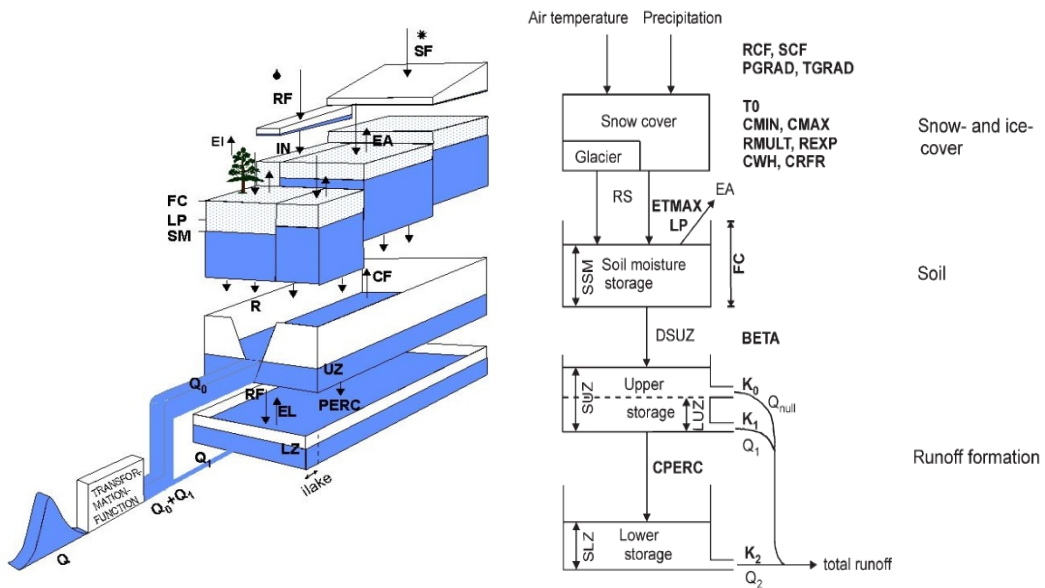
算各子流域径流到达总流域的出口时间, 最后根据汇流时间叠加总流域产流量, 形成流域总出口的径流过程。

HBV 模型主要包括三个子程序^[3]: 积雪及融雪模块在上层、土壤含水量计算在中层、响应路线在底层 (图2)。

2.2.1 积雪及融雪计算

① 流域面雨量、气温推算

流域面雨量、气温计算通过一个计算权重的程序进行, 权重计算结果由气候和地形因素或几何方法 (泰森多边形) 确定。



(1) HBV 模型概念图 (2) HBV 模型结构示意图

Fig.2 Schematic structure of the HBV model for one subbasin, with routines for snow (top), soil (middle) and response (bottom)

② 固态、液态降雨分离

固液态降水分离采用临界气温法, 根据子流域平均高程和温度判断降水方式, 即是降雨还是降雪, 如果流域温度 (T) > 阈值温度 (tt), 降水为降雨, 反之为降雪。流域降水经降水观测误差校正后表达式为:

$$RF = PCORR \cdot RFCF \cdot P \quad \text{if } T > tt$$

$$SF = PCORR \cdot SFCF \cdot P \quad \text{if } T < tt$$

式中: RF 为降雨; SF 为降雪; P 为观测的降水量; T 为流域气温; tt 为阈值温度; RFCF 为降雨修正因子; SFCF 为降雪修正因子; PCORR 为普通降水修正因子

③ 融雪计算

融雪量计算由度—日公式进行估算。当气温 (T) 大于阈值温度 (tt) 时开始融化, 融雪量:

$$\text{Snow melt} = CFMAX \cdot (T - tt)$$

式中: CFMAX 为雪度—日因子。融雪量只有超过液态水持雪能力后才会产生径流, 如

果 $T < t_t$ 融雪过程中断，则雪中自由水重新冻结，冻结量由下式表示：

$$\text{Refreezing melt water} = CFR \cdot CFMAX \cdot (t - T)$$

式中：CFR 为冻结系数，其他参数意义同上。

④ 冰川融水计算

当流域上的积雪完全消融后，冰川开始融化，融化量也是根据度—日公式进行计算

$$\text{Glacier melt} = GMELT \cdot (T - ttm)$$

式中：GMELT 是冰川度—日因子。

积雪及融雪模块产生的融雪、冰川融水和降雨量之和作为土壤模块输入的总水量，可以模拟土壤含水量。

2.2.2 土壤含水量计算

这个过程基于BETA、LP 和FC 三个参数进行，表达式为：

$$\Delta Q/\Delta P = (SM/FC)^{\beta}$$

式中： $\Delta Q/\Delta P$ 通常叫做径流系数；SM 为土壤含水量；FC 是最大土壤含水量；BETA 为土壤参数。LP 是蒸散发达到最大时的土壤含水量，参数 LP 作为 FC 的分数给出。 $\Delta Q/\Delta P$ 与土壤含水量关系见图 3， E_a/E_{pot} 与土壤含水量关系见图 4。

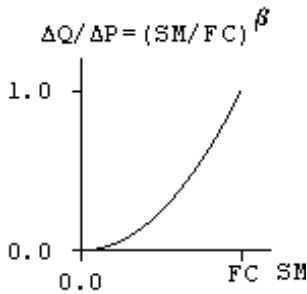


图3 $\Delta Q/\Delta P$ 与土壤含水量关系

Fig.3 Relation between $\Delta Q/\Delta P$ and soil moisture

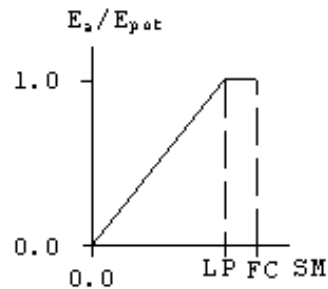


图4 E_a/E_{pot} 与土壤含水量关系

Fig.4 Relation between E_a/E_{pot} and soil moisture

2.2.3 径流响应计算

HBV 模型把径流形成过程概化为一个响应函数，该函数由一个上层非线性水库和一个下层线性水库组成 (图5)。

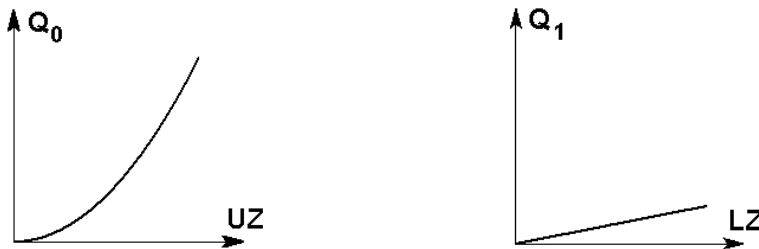


图5 上层非线性水库、下层线性水库示意图

Fig.5 The response routine consists of one upper, non-linear, and one lower, linear, reservoir

在HBV模型中，径流过程由上、下两个盒子来体现，见图2-2。上层响应盒子有两个出口，通过两个消退系数 K_0 、 K_1 完成。只要上层盒子里有水， K_1 就立即发挥作用，在上层储水量 UZ 超过 LZ 时， K_0 排水将会形成直接径流，并从最表层出口流出。下层盒子根据 k_2 表现为形成流域基流成分的地下水储存。上、下盒子的出流量 Q_0 和 Q_1 见图5，表达式为：

$$Q_0 = K \cdot UZ^{(1+ALFA)} \quad Q_1 = K_2 \cdot LZ$$

式中： Q_0 、 Q_1 为径流组成； K 为壤中流消退系数； K_2 为地下径流消退系数； UZ 为表层含水层； LZ 为地下含水层； $ALFA$ 为壤中流消退指数。 Q_0 、 Q_1 最后通过一个三角形权重函数 $maxbas$ 对产生的径流过程进行过滤修匀，见图6。

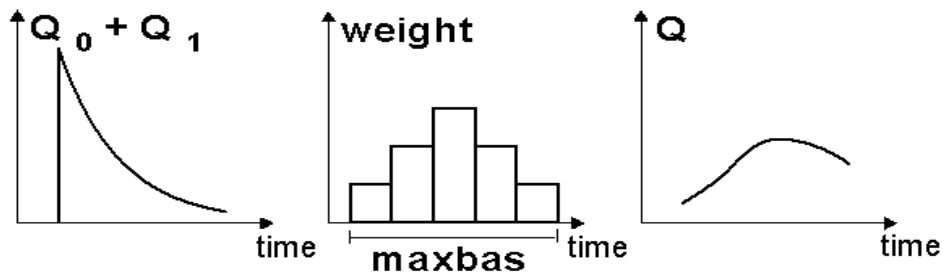


图6 径流过程

Fig.6 The course of runoff

3 输入数据和输出数据

输入数据通常需要气温和降水时间序列数据，某些站点需要流量观测数据对模型进行率定，此外，还需要有描述流域地理信息的数据，如DEM、土地利用、植被类型等，根据这些数据进行子流域划分和连接。模型输出数据有径流量、面降水量、融雪量、实际蒸发量、土壤含水量、地下水补给、径流系数等^[4]。模型用到的参数经过率定、校准过程确定。一般来说，HBV模型至少需要10~15年数据，校验需要10年以上水文数据，率定需要5年以上数据。表1是HBV模型的输入数据和输出数据。

表1 HBV模型的输入数据和输出数据

Table 1 Input data and output data in the HBV model

数据输入	数据输出
降水时间序列	径流量或水库入流量
温度时间序列	面降水量
潜在蒸散发估算	积雪量
流量时间序列	消融量
流域地理信息（DEM、土地覆被）	实际蒸发量
子流域划分和连接	土壤含水量
	地下水补给量、存储量

4 模型参数及意义

HBV 模型在初始状态下共有 29 个参数,如果流域只有一个子流域且只有一种植被类型,在这种最简单情况下也至少需要 12 个自由参数,如果流域划分为多个子流域,植被类型多个,则参数个数成倍增加。在众多参数中,有些参数可以根据流域地形、气候、降水特点等直接确定,还有些参数对模型的敏感性低,无需经过太多调试就可以确定参数值。在 HBV 模型中重点调试的参数是土壤含水量参数 (FC、LP、BETA、ALFA、ETF、CFLUX),这些参数主要影响产流量,其次是调试径流响应参数 (K_0 、 K_1 、 K_2 、PERC、ALFA、maxbas),这部分参数称为汇流过程参数,主要影响流量过程线的形状。表 2 是 HBV 模型主要率定的参数。

表 2 HBV 模型主要率定的参数

Table 2 Calibrated parameters in HBV model

参数	含义	单位
降雪路线		
PCALT	降水高程修正因子	
TCALT	温度直减率	°C
SFCF	降雪修正因子	
CFMAX	雪度-日因子	mm/(°Cd)
TT	阈值温度	
CFR	冻结系数	
WHC	雪持水能力	
土壤路线		
FC	最大土壤含水量	mm
LP	增发减少阈值	
BETA	土壤参数	
ETF	蒸发的温度修正系数	
CFLUX	最大毛管上升水	mm/d
响应路线		
K_0	上层响应盒子表层出流系数	d^{-1}
K_1	上层响应盒子底层出流系数	d^{-1}
K_2	下层盒子径流消退系数	d^{-1}
PERC	从上层到下层的渗漏量	mm/d
maxbas	权重函数的演算长度	d

5 模型率定及检验标准

模型率定通常采用人工试错法,通过不断改变参数值直到找到一个与观测值相符合的参数值为止。评价模型结果主要通过以下两种方式来判定。

(1) 统计学标准:通常使用由Nash和Sutcliffe于1970年提出的 R^2 值法。

(2) 图表形式:模拟流量和实测流量的累计误差曲线图,当模拟出的流量曲线和人工观测出的流量曲线一致性较好时,说明参数选择合理。

HBV模型结构相对简单、输入数据也不需要太多,该模型在世界各地的大量应用证明了它具有良好的通用性^[5]。使用该模型最关键的过程就是对其所应用对象的情况进行合理描述。HBV模型是一个降雨—径流模型,因此降雨估算在降雨—径流模拟中极为重要,这要求我们要对流域降雨的空间变化有比较好的了解。

参考文献 (References)

- [1] Lindström G, Johansson B, Persson M, et al. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model [J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 201: 272-288.
- [2] Hagg W, Braun L N, Kuhn M, et al. Modeling of hydrological response to climate change in glacierized Central Asian catchments [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 332: 40-53.
- [3] Hagg W, Braun L N, Weber M, et al. Runoff modeling in glacierized Central Asian catchments for present-day and future climate [J]. *Nordic Hydrology*, 2006, 1:1-13.
- [4] LideÅn R, Harlin J. Analysis of conceptual rainfall-runoff modeling performance indifferent climates[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 238: 231-247.
- [5] Braun L, Renner C B. Application of a conceptual runoff model in different physiographic regions of Switzerland [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1992, 37: 217-231.

托木尔峰青冰滩72号冰川径流氢氧同位素 观测研究

冯 芳

(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, 甘肃 兰州 730000)

地球表面的水通过蒸发、凝结、降落、渗透和径流形成水循环, 由于水的热力学性质使得三态转化过程中引起自然水体中氢氧同位素分馏, 造成各种水体中的同位素比率产生区域性特征。氢氧同位素在水文循环过程中的研究应用, 始于 20 世纪 50 年代初, 大范围有组织的取样工作开始于 1961 年。国际原子能机构 IAEA (the International Atomic Energy Agency) 和世界气象组织 WMO (the World Meteorological Organization) 联合建立了全球大气降水同位素监测网 (GNIP), 为研究全球尺度下降水中稳定同位素的时空变化规律提供基础资料, 目前已有大量学者通过 GNIP 提供的数据对地区大气降水和流域稳定同位素特征进行了研究 [1-3]。

1 冰川径流氢氧同位素观测的意义

随着质谱仪分析技术的不断完善, 精确测定水样中稳定同位素含量成为可能, 使稳定同位素技术能广泛地应用于现代水文学, 用以解决传统水文学中的一些关键问题。稳定同位素冰川学是冰川水文学的重要分支, 研究的内容主要是分析水体中的氢氧同位素关系。应用稳定同位素指示方法研究冰川积雪和地表径流, 特别是由于极地和高山冰川积雪中所保留氢氧同位素变化具有季节、纬度和高度效应, 系统测量积雪和冰川的氢氧同位素组成, 可以研究十万年以来的冰川流动、积雪速率和气候变异等现象, 一直受到国内外冰川学家的广泛关注 [4-6]。我国冰川学者从 20 世纪 90 年代始, 较详细地研究了青藏高原冰川区大气降水中稳定同位素的分布和水文循环特征, 并取得了大量的研究成果 [7-8]。目前, 为弄清冰川和冰川作用区大气降水、冰川积雪和融水径流系统内稳定同位素比率在空间上和时间上的分布特征, 以及利用氢氧同位素示踪冰川径流在河水径流中所占比例和探索冰川融水径流未来变化趋势, 需要对冰川区的积雪和冰川融水径流进行系统的采样分析 [9]。

2 研究区概况

托木尔峰位于我国境内天山山脉的西端, 海拔 7483 m, 是亚洲内陆最大的冰川发育区, 塔里木河的主要发源地之一。该区处于西风带, 降水主要靠来自大西洋和北冰洋的潮湿气流补给。夏、冬两季降水量相对较多, 其中 5~9 月份降水量约占全年的 70%。南坡冰川积累区降水丰沛, 多年平均降水估计可达 1000 mm 以上, 冰川末端估计在 400~600 mm, 山区丰富

的降水和冰雪融水共同成为山前河流主要的补给来源^[10-13]。

天山冰川站从2007年开始对托木尔地区冰川学进行考察,并在青冰滩72号建立冰川定位观测点。72号冰川位于阿克苏地区昆马力克河源头处,昆马力克河是阿克苏农一师垦区用于灌溉的主要河流之一,因此,对该冰川的水文气象进行研究具有重要意义。据中国冰川编目,72号冰川的地理坐标为:41°45'31" N, 79°54'26" E,平均海拔4 200 m,平均长度7.3 km,平均宽度 0.7 km,平均厚度 76 m,冰储量0.3975 km³,属于复合型山谷冰川。2008年野外调查结果表明,72号冰川消融十分强烈,末端退缩至海拔3720 m处,冰川面积从1964年的7.27 km²缩减为2008年的5.52 km²,共减少了1.75 km² (0.039 km²/a)。本文初步研究托木尔峰青冰滩72号冰川融水径流样品中氢氧同位素的特征及其与其它水文气象特征之间的联系,为今后冰川融水径流样品的系统采集提供依据。

3 径流样品的采集和分析

本次冰川径流样品采集于距72号冰川末端约 1100 m处的水文断面 (41°44'26" N, 79°52'28" E,海拔3603 m),流域控制面积约为 8.98 km²,其中冰川面积为 5.4 km²。每日 14 h 用去离子水清洗过的样品瓶采集径流水样,径流样品取样前用流水冲洗三次之后装样,样品采集后为减少蒸发作用的影响,应立即盖紧瓶盖密封保存。样品从野外运回后立即放入 -15 °C 低温室保存,在分析前两天取出并在密封状态下室温融化成液态,用 DLT-100 液态同位素分析仪测定 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的组成,测定的氢氧稳定同位素的浓度按惯例用相对Vienna标准平均海洋水 (V. SMOW) 的千分差表示,单位是 ‰。

$$\delta^{18}\text{O} = [({}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O})_{\text{sample}} - ({}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}] / ({}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O})_{\text{SMOW}} \times 10^3 \text{‰}$$

$$\delta\text{D} = [(D/H)_{\text{sample}} - (D/H)_{\text{SMOW}}] / (D/H)_{\text{SMOW}} \times 10^3 \text{‰}$$

4 结论与讨论

4.1 径流中同位素与大气降水同位素的关系

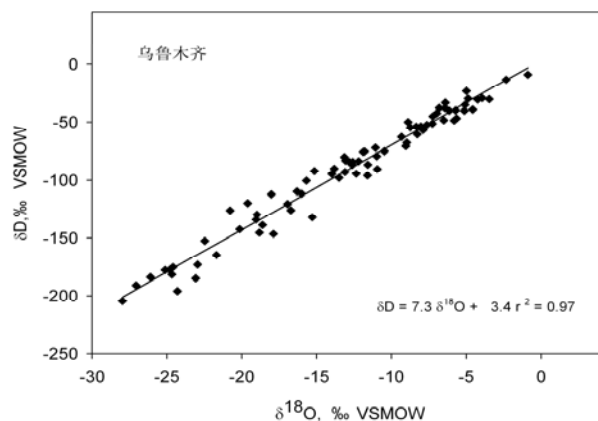


图1 乌鲁木齐地区大气降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系

Fig.1 The plot of $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ of precipitation in Urumqi

从全球大气降水同位素监测公开数据库 (GNIP) 可知, 在新疆范围内有 1 个监测站, 此站位于乌鲁木齐市。为探讨 72 号冰川融水径流和地区大气降水同位素组成之间的关系, 利用此监测站 131 对 ($\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$) 数据求出了新疆范围内大气降水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系线 (图 1), 依据实测径流 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 求出 72 号冰川融水径流的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系线进行对比 (图 2)。

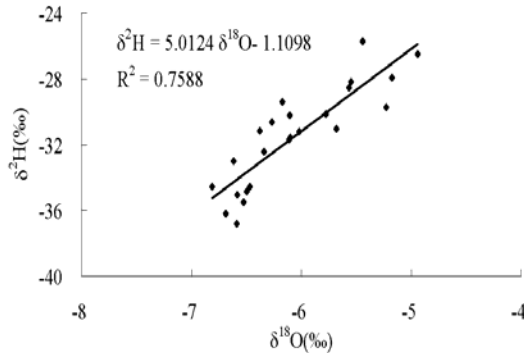


图 2 72 号冰川融水径流中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系

Fig. 2 The plot of $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ in glacial meltwater runoff of the No. 72 Glacier

从图 1, 2 可知, 新疆大气降水线的斜率和截距分别为 7.3 和 3.4, 72 号冰川融水径流的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系线斜率和截距分别为 5.01 和 -1.1, 两者相差较大。分析原因, 由于采样期为 8 月, 正好是冰川消融期, 研究区的温度也相对较高, 此时的冰川融水径流实质是由冰川融水、降水和地下水共同补给组成, 各种水体来源的同位素组成差异明显加上各个时期补给的比例也不一样, 使得冰川融水径流的氢氧同位素值与降水存在明显差异。另外径流中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 含量受到的影响因子较多, 不仅受来源的影响, 蒸发引起的分馏也是一个重要因素。

4.2 径流中同位素与气温、降水、水温的关系

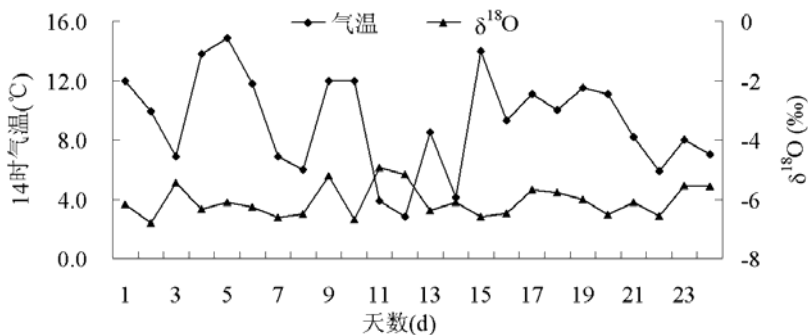


图 3 72 号冰川融水径流中 $\delta^{18}\text{O}$ 和气温关系

Fig. 3 The $\delta^{18}\text{O}$ and temperature in glacial meltwater runoff of the No. 72 Glacier

如图 3, 分析结果表明, 8 月份 72 号冰川融水径流样品中 $\delta^{18}\text{O}$ 的波动范围不大, $\delta^{18}\text{O}$ 最小值为 -6.81 ‰, 最大值为 -4.94 ‰, 全部样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 算术平均值为 -6.07 ‰。乌鲁木齐市站降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 算术平均值为 -12.42 ‰, 较 72 号冰川融水径流样品小。另外, 72 号冰川融水径流样品 $\delta^{18}\text{O}$ 值与取样时 14 h 气温仅呈低相关性, 相关系数为 0.36, 而与取样时的水温没有相关性。

已有研究表明, 大气降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温之间一般存在显著的正相关关系, 大气降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 可作为气温的替代指标, 这一研究结果对于天山地区的冰芯研究具有重要意义。分析表明72号冰川径流中的 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温仅呈低度相关, 表明大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温之间的正相关关系在冰川融水中已不明显。

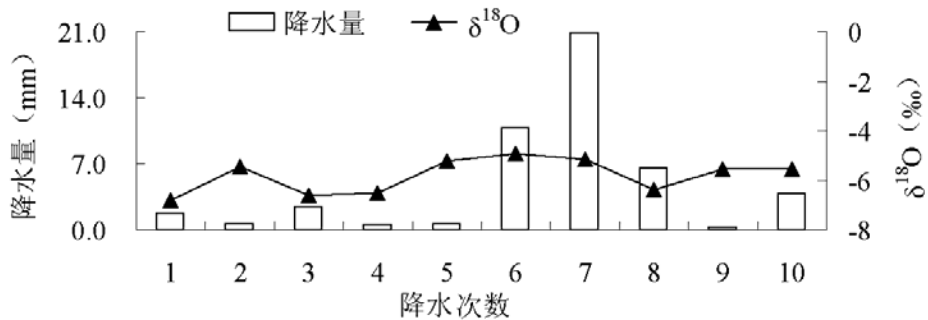


图4 72号冰川融水径流中 $\delta^{18}\text{O}$ 和降水量关系

Fig.4 The $\delta^{18}\text{O}$ and precipitation in glacial meltwater runoff of the No.72 Glacier

图4选取8月1~31日有降水的10天中所取的72号冰川融水径流样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 进行分析, 结果表明, 降水量增大, 径流中 $\delta^{18}\text{O}$ 值就降低, 主要是由于降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值较低, 降水径流汇合到融水径流中引起融水径流中 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低。计算表明, 融水径流中 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量也呈低度相关, 相关系数为0.42, 较之与温度相关性稍高。本文仅是对08年野外在青冰滩72号首次采集的31个冰川径流样品中氢氧同位素的组成进行测定和分析, 并结合相关水文气象要素进行讨论, 得出一些初步的结论, 对于该区冰川径流的同位素组成特征更加具体、系统的分析有待于进一步样品采样分析和研究。

参考文献 (References)

- [1] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964, 16(4): 436-468.
- [2] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. *科学通报*, 1983, 28(13): 801-806.
- [3] 黄天明, 聂中青, 袁利娟. 西部降水氢氧稳定同位素温度及地理效应[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(8): 76-81.
- [4] Epstein S, Sharp R P, Dow A J. Six-year record of oxygen and hydrogen isotopic variations in South Pole firn [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1965, 70(8): 1809-1841.
- [5] 郑永飞. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 133-164.
- [6] Gonfiantini R. Some Results on oxygen isotope stratigraphy in the deep drilling at King Baudouin Station, Antarctica [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1965, 70 (8): 1815-1819.
- [7] 姚檀栋, 秦大河, 徐柏青, 等. 冰芯记录的去 1000 年青藏高原温度变化[J]. *气候变化研究进展*, 2006, 2(3): 99-103.
- [8] Zhang X P, Nakawo M, Yao T D, et al. Variations of stable isotopic compositions in precipitation on the Tibetan Plateau and its adjacent regions [J]. *Science in China, Ser. D*, 2002, 45(6): 481-493.

- [9] 何元庆, 庞洪喜, 卢爱刚, 等. 中国西部不同类型冰川区积雪及其融水径流中稳定[J]. 冰川冻土, 2006, 28(1): 22-28.
- [10] 康尔泗, 朱守森, 黄明敏. 托木尔峰地区的冰川水文特性[A]. 天山托木尔峰地区的冰川与气象[C]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985: 99-119.
- [11] 蒋艳, 周成虎, 程维明. 阿克苏河流域径流补给及径流变化特征分析[J]. 自然资源学报, 2005, 20(1): 27-34.
- [12] 谢昌卫, 丁永建, 刘时银, 等. 托木尔峰南坡冰川水文特征及其对径流的影响分析[J]. 干旱区地理, 2004, 27(4): 570-575.
- [13] 谢昌卫, 丁永建, 刘时银, 等. 托木尔峰南麓径流变化的气候因素分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(2): 269-275.

冰川区大气气溶胶的单颗粒分析

赵淑惠

(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, 甘肃 兰州 730000)

1 研究意义

气溶胶的单颗粒分析是近年来表征大气颗粒物化学行为的一种重要手段^[1-3], 它能够提供更整体颗粒分析方法中无法提供的大量信息, 如单个颗粒物的微观形貌、化学组成、形状及其尺寸等特征。这些信息对研究气溶胶的来源, 气溶胶辐射效应, 估算大气辐射强迫以及冰川区反照率的改变具有重要的意义。本文主要概述了气溶胶的单颗粒分析方法, 并简单总结了在乌鲁木齐河源 1 号冰川 (以下简称 1 号冰川) 上采集的气溶胶样品的单颗粒分析特征。

2 样品的采集与分析

气溶胶样品的采集方法详见 18 卷年报^[4]: 主要采用 Zeflour Teflon 膜 (直径 47 mm, 孔径 2 μm) 进行气溶胶样品的采集; 为了更有效快速的进行单颗粒分析, 2010 年 1 月在原有气溶胶样品采集的同时, 使用英国 Whatman 公司生产的聚碳酸酯 Nuclepore 径迹蚀刻膜 (直径 47 mm, 孔径 0.4 μm) 在采样点进行同时对比采样, 采样条件及方法保持一致。

分析样品前首先使用内径为 10.6 mm、外径为 11.9 mm 的打孔器在超净台上对采样所得的 Teflon 膜及聚碳酸酯滤膜进行切割。切掉的圆形小滤膜用导电胶粘贴在样品桩上, 真空下溅射镀上一层极薄的金膜 (16 nm)。然后使用日本电子光学公司的配有 X 射线能量色散谱仪 (美国 KeveX 公司) 的 JSM5600-LV 型低真空扫描电镜 (SEM-EDX) 和同样配有 X 射线能量色散谱仪 (美国 Thermo 公司) 的高分辨 JEOL JSM-6701F 冷场发射型扫描电镜 (FESEM-EDX) 联合进行单颗粒的特征分析。仪器加速电压分别为 20 KV 和 5~10 kV, 电子束电流为 60 μA 、1.0 nA, 工作距离为 20 mm、10 mm, 信号采集时间 30 s、60 s, 放大倍数为 500~100000 倍。在获得颗粒形貌的同时, 对选定的颗粒进行 X 射线能谱分析, 使用能谱仪自带的软件对颗粒物的元素成分含量自动进行 ZAF 校正。能谱仪中使用的为 Si (Li) 检测器的铍窗口限制了超轻元素的测量, 因此只能分析出原子序数大于 11 的元素。此外, 所得扫描电镜图像使用 ImagePro-Plus 软件 (Media Cybernetics, Inc. U.S.A) 进行颗粒尺寸等再分析, 具体方法同文献^[5]: 将所得电镜图像导入软件中, 确定颗粒物后选择手动或自动测量, 颗粒的面积及周长即可自动测出, 然后将其导入到 Microsoft Excel 以进行下一步处理。

3 气溶胶的单颗粒特征分析

3.1 颗粒物的形貌特征

扫描电镜图像可以清晰地显示颗粒物的微观形貌, 如图 1 所示。为了对气溶胶颗粒形状

使用参数进行统计分析，并加入辐射强迫计算的公式中，颗粒物的形状通常使用圆指数 (roundness factor)^[6]或者环度 (circularity)^[3]来描述，公式如下：

$$C = L^2 / (4\pi A)$$

其中 C 是环度 (无量纲)，L 是颗粒物的周长 (单位为 μm)，A 是颗粒物在扫描电镜图像上的二维面积 (单位为 μm^2)。形状为圆的颗粒物其环度值为 1.0，形状为正方形的颗粒物其环度值为 1.27，即颗粒物的形状越复杂越不规则其环度值越大，因此颗粒物的环度值通常是大于等于 1.0。但是由于颗粒物的周长和面积是从颗粒物的扫描电镜图像上获得，对于较小的颗粒物就会存在很大的误差，因此导致了一些非常小的颗粒物的环度值小于 1.0。对于很小的颗粒物需要有放大更多倍的图像来计算其环度，而这种系统误差的存在将直接导致对颗粒物形状复杂度的理解。在进行统计计算时，我们将环度小于 1.0 的颗粒物予以忽略。使用该方法所得的 1 号冰川区气溶胶颗粒环度分布情况如图 2 所示。

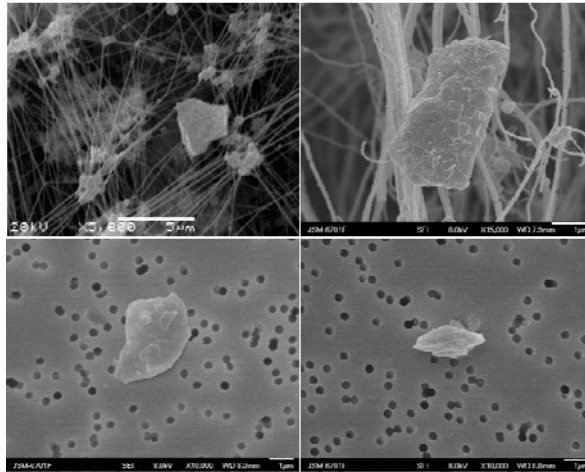


图1 由SEM和FESEM获得的气溶胶颗粒的扫描电镜图像

Fig.1 Secondary electron images of aerosol particles detected by SEM and FESEM

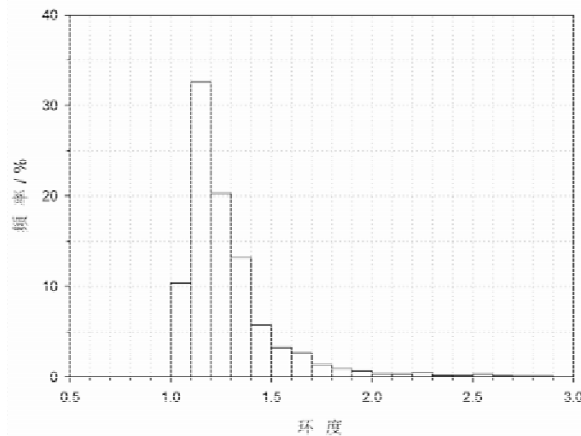


图 2 气溶胶颗粒的环度分布

Fig. 2 Circularity distributions of the aerosol particles

由图 2 可见,1 号冰川区气溶胶颗粒的环度值主要集中在 1.0 到 2.6 之间。其中在 1.1~1.4 之间出现有明显的峰值,该区间的颗粒数目约占总颗粒数目的 66%,表明 1 号冰川区大气气溶胶颗粒主要以形状不规则的非圆颗粒为主。参数环度值的统计结果与扫描电镜图的观察结果基本一致,表明环度值成功的反映了颗粒物的形貌特征。

3.2 粒度分布特征

气溶胶粒径的分布能反映出源区和传输机制的一些基本特征,且不同尺寸的气溶胶颗粒的光学特性也不同。通过研究颗粒物的粒径分布不仅可以分析气溶胶颗粒的来源,也可以为进一步研究其光学特性奠定基础。利用扫描电镜图像对颗粒物尺寸进行衡量时通常有三种方法:(1)颗粒物的最长尺寸和与其正交的宽度值的平均值^[7]; (2)颗粒物面积的平方根^[3]; (3)颗粒物的等效球/圆直径 (ESD)^[5,6,8]。本文采用了使用较多的第三种方法,即以颗粒物的等效球直径来进行衡量。在获得颗粒物面积的基础上,颗粒物的等效球直径的计算如下所示:

$$ESD = 2 \times \sqrt{area/\pi}$$

使用该方法所得的颗粒物尺寸的粒径分布情况如图 3 所示。可以看出,颗粒的粒径主要分布在 0.1 到 5 μm 之间,其中 $\leq 2.0 \mu\text{m}$ 的颗粒约占总颗粒的 70% 以上,表明该地区的颗粒以积聚态的细粒子为主。5 μm 后的颗粒所占比例很小,而 10 μm 后的颗粒几乎没有。这可能与尺寸较大的颗粒会因重力沉降作用很快沉降到冰川表面上在大气中的寿命不长有关。

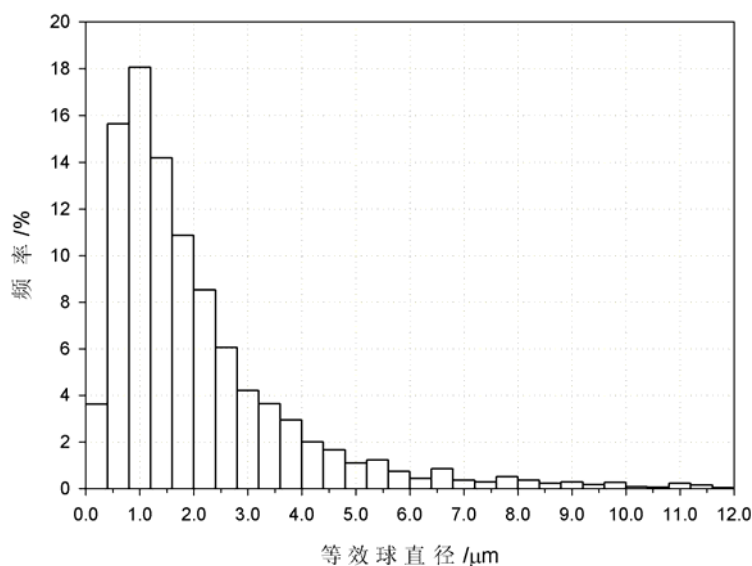


图 3 气溶胶颗粒的粒径分布图

Fig.3 Number-size distribution of the aerosol particles

3.3 颗粒物的元素组成特征

能谱分析 (EDX) 给出了气溶胶颗粒元素组成的相关信息。在 EDX 对单个颗粒进行元素分析的基础上,将所有颗粒物作为一个整体进行聚类分析可以获得该地区气溶胶颗粒的主要组成特征^[1,3]。1 号冰川区气溶胶颗粒的具体组成见表 1,主要分为 5 类:富含 Si 颗粒物,富含 Ca 颗粒物,富含 Fe 颗粒物,富含 K 颗粒物,富含 S 颗粒物。

由表 1 可以看出,富含 Si 和 Ca 的颗粒是 1 号冰川区气溶胶颗粒的主要组成,这两种类

型的颗粒占总颗粒的 85.1%。这些颗粒主要为石英 (SiO₂)、硅铝酸盐、石灰石等来自于地壳的粘土矿物颗粒及沙尘颗粒, 其中占组分较少的富含 Fe 和富含 K 的颗粒中也大多以硅酸盐形式存在的颗粒为主。富含 S 的颗粒物主要来源于人类活动, 但所占比例很小。综上所述, 1 号冰川区受人类活动影响程度较低, 大气较为清洁, 大气中主要以富含 Si、Ca 等自然来源的气溶胶颗粒为主。

表1 由相对含量及聚类分析所得的气溶胶颗粒成分的分类

Table 1 Individual-particle types determined by clustering and their relative abundance

类型	簇类别	所占比例(%)	相对质量含量									
			Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Ti	Fe	S
Si-rich	C1	12.6	0.001	0.01	0.12	0.51	0.071	0.092	0.12	0.054	0.016	-
	C5	16.3	0.001	0.035	0.14	0.37	0.042	0.11	0.095	0.048	0.16	-
	C8	3.1	-	0.039	0.122	0.22	0.047	0.15	0.21	0.21	-	-
	C9	8.1	-	0.01	0.061	0.72	0.043	0.068	0.058	0.029	0.011	-
	C17	14.9	0.001	0.015	0.16	0.39	0.053	0.21	0.086	0.053	0.04	-
Ca-rich	C2	7.3	-	0.019	0.047	0.079	0.025	0.025	0.76	0.04	0.003	-
	C4	0.6	-	-	-	-	-	0.018	0.64	0.084	0.26	-
	C12	1.4	-	0.017	0.027	0.054	0.037	0.031	0.46	0.036	0.022	0.31
	C15	8.7	0.001	0.019	0.106	0.30	0.046	0.089	0.33	0.047	0.071	-
	C18	12.1	0.001	0.039	0.078	0.16	0.046	0.062	0.53	0.063	0.025	-
Fe-rich	C3	0.3	-	-	-	0.13	-	0.21	0.23	-	0.44	-
	C11	4.2	-	0.045	0.15	0.30	0.036	0.073	0.041	0.032	0.33	-
	C13	0.6	-	-	-	-	-	0.027	0.096	0.051	0.83	-
	C14	1.4	-	-	-	-	-	0.07	0.27	0.101	0.56	-
K-rich	C6	7.0	0.011	0.017	0.102	0.18	0.16	0.20	0.17	0.102	0.01	-
	C16	0.3	-	0.015	0.078	0.09	0.069	0.56	0.11	0.075	-	-
S-rich	C7	0.8	0.016	0.008	0.032	0.27	0.081	0.104	0.088	0.009	0.029	0.37
	C10	0.3	-	-	-	-	-	0.082	0.19	0.11	0.14	0.48

参考文献 (References)

- [1] Anderson J R, Buseck P R, Patterson T L, et al. Characterization of the Bermuda tropospheric aerosol by combined individual-particle and bulk-aerosol analysis [J]. Atmospheric Environment, 1996, 30: 319-338.
- [2] Okada K, Heintzenberg J, Kai K, et al. Shape of atmospheric mineral particles collected in three Chinese arid-regions [J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28 (16): 3123-3126.

-
- [3] Gao Y, Anderson J R, Hua X. Dust characteristics over the North Pacific observed through shipboard measurements during the ACE-Asia experiment [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41: 7907-7922.
- [4] 赵淑慧. 天山地区大气气溶胶样品采集及分析的历史与现状[R]. 天山冰川站年报, 第 18 卷: 110-116.
- [5] Yue W, Li X, Liu J, et al. Characterization of PM_{2.5} in the ambient air of shanghai city by analyzing individual particle [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 368: 916-925.
- [6] Reid E A, Reid J S, Meier M M, et al. Characterization of African dust transport to Puerto Rica by individual particle and size segregated bulk analysis [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 (D19), 8591, doi:10.1029/2002JD002935.
- [7] Okada K, Kai K. Atmospheric mineral particles collected at Qira in the Taklamakan Desert, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 6927-6935.
- [8] Xie R K, Seip H M, Leinum J R, et al. Chemical characterization of individual particles (PM₁₀) from ambient air in Guiyang City, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 343: 261-272.

来站工作客座人员一览表 (2007-2008)

(排名不分先后)

姓名	性别	职 称	研究方向	工作单位
崔之久	男	教授	自然地理学	北京大学
刘耕年	男	教 授	自然地理学	北京大学
易朝路	男	研究员	地球物理	中科院青藏高原研究所
谭敦炎	男	教 授	植物学	新疆农业大学
安黎哲	男	教授	植物学	兰州大学
冯虎元	男	教授	环境生物学	兰州大学
向 云	男	副教授	植物学	兰州大学
朱 诚	男	教授	自然地理学	南京大学
何元庆	男	研究员	自然地理学	中科院寒旱所
沈永平	男	研究员	气候变化	中科院寒旱所
高前兆	男	研究员	冰川水文学	中科院寒旱所
效存得	男	研究员	自然地理学	中科院寒旱所
陈 拓	男	研究员	自然地理学	中科院寒旱所
侯书贵	男	研究员	雪冰化学	中科院寒旱所
张明军	男	教授	自然地理学	西北师范大学
赵井东	男	博士	自然地理学	中科院寒旱所
庞忠和	男	研究员	同位素水文学	中科院地质所
周尚哲	男	教授	自然地理学	华南师范大学
王居里	男	教授	矿床学	西北大学
周石砦	男	副研究员	同位素水文学	中科院青藏高原研究所

邬光剑	男	副研究员	自然地理学	中科院青藏高原研究所
徐世建	男	博士	植物学	兰州大学
章高森	男	博士后	植物学	中科院寒旱所
张威	男	博士	植物学	中科院寒旱所
戴攀峰	女	硕士生	植物学	新疆农业大学
王勇	男	博士生	植物学	新疆农业大学
张跃	男	博士	自然地理学	北京大学
Lorenz Joseph King	男	研究员	地球科学	德国吉森大学
Nozomu Takeuchi	男	博士	冰川微生物	日本千叶大学
Ross Edwards	男	博士	雪冰化学	美国沙漠研究所
Francoiswa	男	博士	水文学	法国巴黎第七大学
Eva Huintjes	女	博士	冰川物理学	德国 Achen 大学
Roger Barry	男	教授	国际雪冰中心	美国
Chow, J.C.	女	教授	大气科学	美国内华达沙漠研究所
J.G. Watson	男	教授	大气科学	美国内华达沙漠研究所
Willian Y.B. Chang	男	教授	自然地理学	美国基金会
Carine C	男	博士	地球物理学	巴黎地球物理研究所
Sophie M	女	博士	地球物理学	巴黎第一大学
Stephan Josef Imbery	男	博士	地球科学	德国吉森大学
Johannes Bernhard Schneider	男	博士	地球科学	德国吉森大学

学术论文摘要

据统计, 2009 年天山冰川站固定人员和客座研究人员发表或接受的各类研究论文 23 篇 (其中 SCI 论文 8 篇), 专著 3 部。以下是站固定人员和客座人员依托天山冰川站发表和接受的文章目录。

1. Dong Zhiwen, Li Zhongqin, Wang Feiteng, et al. Characteristics of atmospheric dust deposition in snow on the glaciers of the eastern Tien Shan, China. *Journal of Glaciology*, 2009, 55(193): 797-804.
2. Dong Zhiwen, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, et al. The pH value and electrical conductivity of atmospheric environment from ice cores in the Tianshan Mountains. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 4: 416-426.
3. Di Cuixia, Li Ming, Long Feng, et al. Molecular cloning, functional analysis and localization of a novel gene encoding polygalacturonase-inhibiting protein in *Chorispora bungeana*. *Planta*, 2009, 231(1): 169-178.
4. Liu Yajie, Zhao Zhiguang, Si Jing, et al. Brassinosteroids alleviate chilling-induced oxidative damage by enhancing antioxidant defense system in suspension cultured cells of *Chorispora bungeana*. *Plant Growth Regulation*, 2009, 59: 207-214.
5. Ming Jing, Xiao Cunde, Cachier Helene, et al. Black Carbon (BC) in the snow of glaciers in west China and its potential effects on albedos. *Atmospheric Research*, 2009, 1: 114-123.
6. Ping Kong, David Fink, Chunguang Na, et al. Late Quaternary glaciation of the Tianshan, Central Asia, using cosmogenic ^{10}Be surface exposure dating. *Quaternary Research*, 2009, 72: 229-233.
7. Zhang Lijing, Si Jing, Zeng Fuli, et al. Molecular cloning and characterization of a ferritin gene upregulated by cold stress in *Chorispora bungeana*. *Biological trace element research*, 2009, 128(3): 269-283.

8. Wu Jianmin, Qu Tao, Chen Shuyan, et al. Molecular cloning and characterization of a γ -glutamylcysteine synthetase gene from *Chorispora bungeana*. *Protoplasma*, 2009, 235(1-4): 27-36.
9. 李忠勤. 中国冰川定位观测与研究—天山冰川站 50 年回顾与展望. 中国寒区旱区环境与工程科学 50 年. 科学出版社, 2009, 585-596.
10. 李慧林, 李忠勤, 秦大河. 冰川动力学模式基本原理和参数观测指南. 气象出版社, 2009, 专著.
11. 叶建荣, 李忠勤. 揭开冰川的面纱. 四川科学技术出版社, 2009, 专著.
12. 成小军, 谭敦炎. 短命植物异喙菊异形果实的两头下注策略. *植物生态学报*, 2009, 5: 901-910.
13. 董志文, 李忠勤, 王飞腾, 等. 天山东部冰芯 pH 值和电导率的大气环境空间差异. *地理学报*, 2009, 64(1): 103-112.
14. 董志文, 李忠勤, 王飞腾, 等. 天山乌鲁木齐河源冰川积雪内不溶粉尘特征: 沙尘与非沙尘活动季节的比较. *环境科学*, 2009, 30(6): 1818-1825.
15. 韩添丁, 叶柏生, 李向应, 等. 乌鲁木齐河源径流电导率和 TDS 的变化特征. *冰川冻土*, 2009, 31(4): 759-765.
16. 焦克勤, 井哲帆, 成鹏. 天山奎屯河哈希勒根 51 号冰川变化监测结果分析. *干旱区地理*, 2009, 32(5): 733-738.
17. 金爽, 张明军, 李忠勤, 等. 托木尔峰青冰滩 72 号冰川水文气象特征初步分析. *安徽农业科学*, 2009, 37(18): 8587-8589.
18. 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. *第四纪研究*, 2010, 30(1): 96-106.
19. 王林, 李忠勤, 王飞腾. 乌鲁木齐河源 1 号冰川冰芯剖面物理特征及其形成机理研究. *冰川冻土*, 2009, 31(1): 11-18.
20. 徐保国, 刘晓红, 陈拓, 等. 新疆哈密八大石森林上限树轮记录的温度变化信息. *山地学报*, 2009, 27(4): 402-410.

21. 张明军, 李瑞雪, 贾文雄, 等. 中国天山山区潜在蒸发量的时空变化. 地理学报, 2009, 64(7): 798-806.
22. 张明军, 周平, 李忠勤, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川雪冰中 $\delta^{18}\text{O}$ 的演化过程. 兰大学学报 (自然科学版), 2009, 45(5): 36-40.
23. 张宁宁, 李忠勤, 何元庆, 王飞腾. 乌鲁木齐河源 1 号冰川积累区气溶胶和表层雪中 SO_4^{2-} 的季节变化及成因分析. 冰川冻土, 2009, 31(1): 62-67.
24. 张洋, 谭敦炎. 地下结实植物白番红花的繁育系统与传粉生物学. 生物多样性, 2009, 5: 468-475.
25. 周平, 张明军, 李忠勤, 赵淑惠, 金爽. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川气溶胶可溶性离子昼夜变化研究. 冰川冻土, 2009, 31(3): 474-482.
26. 周在明, 李忠勤, 李慧林. 天山乌鲁木齐河源区 1 号冰川运动速度特征及其动力学模拟. 冰川冻土, 2009, 31(1): 55-61.