

文章编号: 1000-0240(2000)-03-0243-07

天山乌鲁木齐河源1号冰川对降水影响的定量分析^①

张东启¹, 周尚哲²

(1.中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰芯与寒区环境开放研究实验室, 甘肃 兰州 730000;

2.兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 以天山乌鲁木齐河源1号冰川为例, 系统地分析了冰川区降水的形成因素, 阐述了冰川作为特殊性质的下垫面对降水产生影响的机制, 并定量地计算出了乌鲁木齐河源1号冰川对降水的贡献。冰川作为特殊性质下垫面对降水产生影响, 其主要是通过致冷效应以及由此引发的温跃现象、逆温现象、冰川风现象、凝结高度降低现象和水平降水现象的作用来实现的。乌鲁木齐河源1号冰川作为特殊性质的下垫面对年降水的贡献比重随高度的不同而变化, 从冰舌附近的1%向上逐渐增大, 在粒雪盆处达到最大, 占冰面年降水量的7.55%, 再向上又有所减小。平均来说, 冰川特殊下垫面对降水的贡献相当于冰川上年降水总量的5.60%。

关键词: 乌鲁木齐河源1号冰川; 降水; 冰川作用; 定量分析

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A

冰川与气候的关系是一个普遍感兴趣的课题, 但是冰川对气候的反馈作用, 尤其是山地冰川对降水影响的量化研究却很少有人涉及。本文以天山乌鲁木齐河源1号冰川为例(以下简称1号冰川), 尝试以量化方法研究该冰川对降水的贡献, 并希望引起人们对于干旱区山地冰川重要的环境功能意义的重视。

1 研究区域的基本情况

天山乌鲁木齐河源区(简称乌河源)位于天山中部喀拉乌成山主脉北坡, 区内山脊海拔4100~4300 m, 主峰天格尔II峰, 海拔4476 m。本区的气候可分为4季: 春季(3~5月)气温大都在0℃以下, 降水较少; 夏季(6~8月)气温大多在0℃以上, 降水集中于这个季节, 约占全年总降水量的三分之二以上, 降水多以雪、雹、霰等固态形式出现; 秋季(9~11月)气温逐渐转为0℃以下, 降水也显著减少; 冬季(12月至翌年2月)气温大都在-15℃以下, 很少降水。表1是根据大西沟气象站

1958~1992年统计资料对河源区气候特征的简单描述。

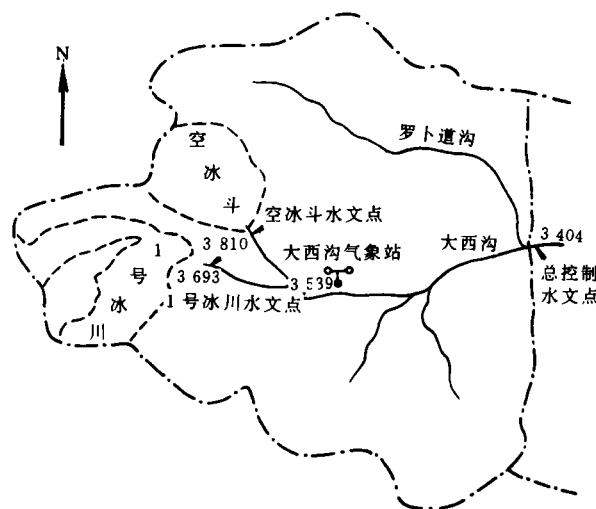


图1 乌鲁木齐河源区示意图

Fig. 1 Sketch map showing the headwaters of the Urumqi River

①收稿日期: 1999-07-12; 修订日期: 2000-03-05

基金项目: 中国科学院重大项目(KZ951-A1-402-03); 中国科学院天山冰川观测试验站基金(9905)资助项目

作者简介: 张东启(1971~), 男, 山东昌邑人, 1994年毕业于山东师范大学地理系, 1997年在兰州大学地理系获理学硕士学位, 现在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所攻读博士学位, 主要从事冰川与全球变化方面的研究。E-mail: jicecore@ns.lzb.ac.cn

表 1 大西沟气象站气候特征(1958~1992 年)

Table 1 The climatic features of Daxigou Meteorological Station (1958~1992)

气象要素	春 季 3~5 月	夏 季 6~8 月	秋 季 9~11 月	冬 季 12 月至翌年 2 月	多年平均
气 温 / $^{\circ}\text{C}$	-5.6	4.0	-5.1	-14.8	-5.3
降 水 / mm	81.0	280.7	56.3	8.9	421.3
相对湿度 / %	57	66	52	46	55
水 汽 压 / mb	2.4	5.4	2.4	0.9	2.7
蒸 发 量 / mm					480
风 速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	3.4	2.9	2.9	2.7	3.0

注: 据张寅生等^[1]资料计算整理.

河源总控制水文点(简称总控水文点, 图 1)以上流域面积为 28.9 km^2 , 共发育有 7 条冰川, 总面积约 8 km^2 , 占该流域面积的 27%. 总控水文点以上的河源区又可细分为大西沟和罗卜道沟两个小流域. 1 号冰川位于大西沟内, 是乌鲁木齐河的源头. 该冰川由东西两支冰斗-山谷冰川组成, 长 2.3 km , 面积 1.8 km^2 , 末端海拔 3710 m . 本文将 1 号冰川作为主要研究对象, 把总控水文点以上的大西沟流域作为重点研究区域, 1 号冰川水文点以上至冰川源头为冰川直接作用区(图 1). 选定上述区域的主要依据如下:

(1) 1 号冰川面积占 1 号冰川水文点控制流域面积的 58.4%, 小气候环境明显区别于周围其它下垫面, 对冰川作用区降水的影响不容忽视. 1 号冰川水文点控制范围内的气象要素及其它性质与周围其它区域差异显著, 如年均温低(1986~1995 年平均为 -6.5°C), 全年有近 9 个月的时间月均温在 0°C 以下; 年均降水量(观测值为 421.1 mm)比海拔高于该测点 117 m 的空冰斗水文点还要高, 说明该区域受 1 号冰川作用的影响明显. 因此, 把这一区域作为冰川直接作用区(面积约 3.34 km^2).

(2) 冰川观测试验站自 1959 年建站以来, 进行了长期的冰川观测和有关现象的考察研究, 各种资料比较丰富. 总控水文点以上大西沟流域内共设有 3 处水文点(均附有气象观测设备), 在 1 号冰川上不同部位及其周围不同地点曾进行过包括气象方面在内的许多观测研究; 另外, 紧邻冰川站还设有新疆气象局所属的大西沟气象站(1958 年建站), 气象资料翔实而完整, 这些资料为我们从定量化角度进行分析研究奠定了基础.

2 冰川作为特殊性质的下垫面对降水的影响

山地冰川区降水是天气系统、地形、下垫面等

因素综合作用的结果, 前两者为主导因素, 但特定环境下后者的作用也很重要. 这里结合 1 号冰川具体分析冰川作为特殊性质的下垫面对降水的影响.

2.1 冰川下垫面的物理特征

冰川作为特殊下垫面与周围山地、冰碛、草甸等下垫面的不同之处主要表现在以下几个方面:

(1) 热传导率低: 新鲜的干雪是普通物质表面最好的热绝缘体, 它的导热率(包括由水汽扩散引起的热量传递)很小, 可以有效地阻止冰面与大气之间的热量交换.

(2) 反射率大: 夏季消融期内, 1 号冰川自然冰雪面上的平均反射率变化于 25%~70%之间^[2], 远大于一般有植物的地面反射率(15%~20%)和土壤的反射率(5%~10%).

(3) 热发射率高: 许多资料给出雪的发射率为 $0.98 \sim 0.99$, 雪层上部的辐射损失约 $69.8 \text{ J} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$, 且对空气温度的依赖性很小.

(4) 表面水汽含量低: 雪的水汽压仅相当于水在 0°C 时的水汽压, 为 6.1 mb . 这是一个相当低的数值, 更冷的雪层水汽压会更低. 这样雪原就成了大气中水汽的一个汇^[3].

2.2 冰雪下垫面的小气候特征

冰雪表面的发射率大, 能够吸收的太阳辐射能量少, 这是冰雪表面致冷的一个重要因素^[4]. 又因为雪被辐射长波的能力很强, 并且具有不善导热的特性, 所以当活动表面向外辐射热能时, 雪被下面的热量不能源源接济, 雪面在夜间或冬季就冷却过甚^[5]. 此外, 雪的蒸发潜热远大于融化潜热, 而 1 号冰川表面夏季 6~8 月份 3 个月的蒸发量可达 49.7 mm ^[6], 这就有效地抑制了冰雪表面温度的突增. 正是由于以上原因导致了冰川表面的冷却效应.

冰川的冷却效应是冰川下垫面对降水产生影响的基础, 从而引发了冰川下垫面不同于其它物质

下垫面的局地小气候效应。这些小气候效应包括以下几个方面:

2.2.1 温跃现象

温跃现象即温度“跃动”,指温度随平面空间或随高度的突变现象。特别是在由非冰川表面过渡到冰川表面时,温度梯度突然增大,甚至接近或超过干绝热梯度的现象^[7]。这种温跃现象,主要是由于冰川的冷却作用加大了气温差异所致^[8]。白重媛根据 1983 年 7 月 5~20 日观测资料求得 1 号冰川作用区内气温直减率由冰碛谷内的 $0.476^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 上升至冰川谷地-冰舌末端的 $0.833^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,并于冰舌中上部达到最大值,为 $1.176^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ^[2]。温跃现象的存在,会对冰川上空的降水或水平降水产生一定的影响,因为沿河谷上升的暖湿气流一旦爬升到冰川表面,由于温度及湿度发生较大的变化,汽团性质必然会逐渐有所改变,产生凝结的可能性会大大增加。

2.2.2 逆温现象

逆温现象是指近冰面空气层中温度的垂直分布随高度而递增的现象。这种逆温现象是由冰雪下垫面较强的发射率、长波辐射能力以及冰面蒸发耗热等因素引起的。逆温现象的强弱与云量、风速等天气因素有关。云量多、风速大,则温度梯度减小,反之增大。逆温现象是冰川冷却效应的反映,夏季 1 号冰川冰面附近(1.5 m 以下)的温度梯度相当于一般自由大气的 200 倍以上^[9],对冰川表面的湿度产生影响,并在冰面大气中形成一较稳定层结,最终对水平降水产生影响。

2.2.3 冰川风

冰川风也是由于冰川的致冷作用形成的一种气流现象。由于冰川的致冷作用,使近冰面空气冷却下沉,密度较大的冷空气沿冰川表面向下流动就形成了冰川风。冰川风的大小与冰川规模、天气状况有关。冰川风对降水的意义在于当其沿冰面下沉,与来自河谷沿冰面上升的暖湿气流相遇时,会产生类似于地面锋面的效果,增大了冰面上空(尤其是冰舌附近)降水的可能性。

2.2.4 冰川对凝结高度的影响

乌鲁木齐河源夏季降水集中,虽然以系统性天气引发的降水占主要部分,但从降水次数上看则以

地方性对流天气引发的降水居多^[10,11]。

下面探讨冰雪下垫面对对流云块凝结高度产生的影响。

乌河源对流性云体(积云)的发展主要是局地热力作用形成的。计算对流云的云底高度可简单地用公式 $h=120(T-T_d)$ 来表示^[12]。式中: h 为云底相对高度, T 和 T_d 分别为地面温度和露点温度。

1987 年 7 月, Hiroyuki OHNO 在 1 号冰川积累区海拔 4 010 m 处进行了一些气象观测^①, 我们选择了其中资料齐全的 11 d 并与同期大西沟气象站的资料进行了对比。根据其气温和相对湿度资料,可计算出冰面水汽压。方法如下:

根据饱和水汽压与温度关系的马格努斯(Magnus)经验公式:

$$E = E_0 \times 10^{(\alpha \times t / (\beta + t))} \quad (1)$$

式中: $E_0=6.11\text{ mb}$; α 、 β 为经验常数,对冰面而言, $\alpha=9.5$, $\beta=265.5$ ^[13]。又因为相对湿度 f 为空气中的实际水汽压与同温度下的饱和水汽压的比值,冰面水汽压可由饱和水汽压与相对湿度求得:

$$e = E \times f \quad (2)$$

由水汽压查算露点温度表^[14]得出露点温度,最后根据公式 $h=120(T-T_d)$ 来算出两地的凝结高度及其差值(表 2)。

对比大西沟气象站和 1 号冰川上空对流云的凝结高度(表 2),可发现冰川上空的凝结高度基本上比气象站的要低,11 d 平均低 146 m。我们认为这正是冰雪下垫面影响的一种表现。这种冰川对对流云的凝结高度的拉低作用加上冰川周围地形作用就会影响到对流云的降水。

2.2.5 水平降水

在山地中,云在移动的时候常常可以接触到坡地,因此云中或雾中小水滴就容易直接降落,这种降水就是所谓的水平降水^[4]。林之光指出,在挪威、冰岛以及斯匹次卑尔根的冰川和冻土的地面上,由于从海面上来的潮湿气流的接触冷却而产生的白霜(与雾凇不同)大大地增加了这些寒冷纬度山区的有效降水量^[15]。有人指出,在中亚细亚高山区的冰川表面,暖空气流经其上时,其中的水汽直

①Hiroyuki OHNO, Basic meteorological elements in boundary layer on Glacier No.1, Tianshan in melting and nonmelting season, 天山冰川站年报, 1988, (7): 23~45.

表 2 1987 年 7 月大西沟气象站和 1 号冰川上空对流云的凝结高度对比

Table 2 Comparison of coagulation height between Daxigou Meteorological Station and Glacier No.1 in July, 1987

月-日	大西沟气象站(海拔 3 539 m)					1号冰川上空(海拔 4 010 m)							凝结高度差值 / m
	气 温 / °C	水汽压 / mb	露 点 / °C	云底相 对高度 / m	凝结 高度 海拔 / m	气 温 / °C	相 对 湿 度 / %	饱和水 汽 压 / mb	水汽压 / mb	露 点 / °C	云底相 对高度 / m	凝结 高度 海拔 / m	
7-11	8.6	6.3	0.4	984	4 523	4.3	91	8.3	7.6	3.0	156	4 166	357
7-12	7.7	6.4	0.6	852	4 391	4.0	93	8.1	7.6	3.0	120	4 130	261
7-13	7.3	7.6	3.0	516	4 055	3.4	97	7.8	7.6	3.0	168	4 178	-123
7-19	5.8	5.2	-2.3	972	4 511	4.1	72	8.2	5.9	-0.6	564	4 574	-63
7-20	6.7	6.2	0.1	792	4 331	4.0	96	8.1	7.8	3.4	72	4 082	249
7-21	7.3	6.6	1.0	756	4 295	4.3	92	8.3	7.6	3.0	156	4 166	129
7-22	7.0	6.7	1.2	696	4 235	3.3	95	7.7	7.4	2.6	84	4 094	141
7-23	8.0	6.3	0.4	912	4 451	4.4	90	8.4	7.5	2.8	192	4 202	249
7-24	7.8	6.3	0.4	888	4 427	3.3	92	7.7	7.1	2.1	144	4 154	273
7-25	7.2	6.7	1.2	720	4 259	4.0	96	8.1	7.8	3.4	72	4 082	177
7-29	4.8	3.2	-8.7	1 620	5 159	3.1	48	7.6	3.7	-6.8	1 188	5 198	-39
平均	7.1	6.1	-0.2	883	4 422	3.8	87	8.0	7.1	1.7	265	4 527	146

表 3 1986~1994 年各气象点间 5~9 月气温直减率对比表(°C / 100 m)

Table 3 Comparison of temperature gradient between stations in 1986~1994(°C / 100 m)

月 份	基本营地 (海拔 2 130 m)	总控水文点——大西沟 (海拔 3 404 m)	1 号冰川水文点 (海拔 3 693 m)	大西沟——空冰斗 (海拔 3 539 m) (海拔 3 810 m)
5		-0.60	-0.32	-0.58
6		-0.60	-0.26	-0.65
7		-0.57	-0.26	-0.68
8		-0.55	-0.32	-0.60
9		-0.54	-0.26	-0.95
平 均		-0.57	-0.28	-0.69

接在冰川表面发生凝结。由此推论，1 号冰川上存在水平降水也不足为奇。

3 冰川对降水的贡献

从上面的论述中可知，乌河源的降水是地形与大气环流共同作用的结果，但这之中也有特殊下垫面——冰川的贡献。要单独地把冰川对降水的贡献定量化地表达出来，必须把地形因素所起的作用剔除出去。本文以下面的思路对这个问题进行探讨：假设 1 号冰川不存在(为裸露岩石所代替)，求此时 1 号冰川上方的降水量，所求降水量与降水的相对真值相比较，就可获得 1 号冰川存在时对总降水的贡献。

3.1 无冰川条件下 1 号冰川上的降水

乌鲁木齐河源现有的所有降水观测资料无疑是地形与冰川共同作用的结果。要剔除冰川对降水观测资料的影响，必须寻找一个不为冰川作用影响的观测点。从河源区地形图上看，本研究区 3 个观测点(1 号冰川水文点、空冰斗水文点和总控水文点)

的观测资料都或多或少地受到冰川作用的影响。如 1 号冰川水文点距 1 号冰川冰舌末端仅 300 m，以 1 号冰川水平作用范围 500 m 计，1 号冰川对其影响就很明显，况且它又处于 2 号冰川冰坎不远处，两条冰川的作用不容忽视；空冰斗水文点虽然高出 1 号冰川冰舌约 100 m，但其位置在空冰斗的半环型包围之中，上层西风可频繁侵入，空冰斗背侧两条冰川的存在使得其降水资料仍可能受到冰川的影响；总控水文点处于哈依萨岩盆的底部，其右上方又悬挂着 5 号冰川，冷空气易于积聚，对降水也会产生影响。从各气象点间的气温直减率的关系来看，上述 3 个气象点的资料也明显受到冰川作用的影响(表 3)。只有大西沟气象站，位于河源区高山环境的中心部位，附近地势起伏不大，距各条冰川的距离都比较远，受冰川作用的影响也应该最小。加之其为国家基本气象站，观测资料规范、连续、翔实、可靠，最适合作为降水对比的基本观测点。

本文再选取位于乌鲁木齐河谷中的天山冰川站基本营地(海拔 2 130 m)作为另一个降水对比的基

表 4 大西沟与基本营地降水相对真值及降水递增率

Table 4 The true precipitation and precipitation gradient of Daxigou Station and the Base Camp

年 份	基本营地(海拔 2 130 m)		大西沟(海拔 3 539 m)		基本营地—大西沟降水 递增率 / $\text{mm} \cdot 100 \text{ m}^{-1}$
	观测值 / mm	相对真值 / mm	观测值 / mm	相对真值 / mm	
1986	347.5	392.4	392.8	514.2	8.64
1987	387.8	440.2	433.5	567.5	9.03
1988	393.2	446.3	486.9	637.4	13.56
1990	474.4	538.9	407.0	532.8	-0.43
1991	353.3	401.0	489.6	640.9	17.03
1992	377.6	428.6	409.3	535.8	7.61
1993	415.4	471.5	462.6	605.5	9.51
1994	473.4	537.4	568.7	744.4	14.69
平 均					10.11

本观测点,把基本营地与大西沟气象站之间的降水递变率作为乌鲁木齐河谷中山带以上的降水递变率,根据这个递变率,以大西沟气象站的降水资料为基准向冰川上方延伸,就可求出假设无冰川条件下 1 号冰川上的降水量。

大西沟气象站和天山站基本营地分别位于乌鲁木齐河流域的高山带和中山带,其降水观测均采用普通雨量计进行。由于受到诸多因素的影响(包括风速、蒸发率、温度、降水形态等),降水观测值与实际降水量之间不可避免地产生一定的偏差。一般情况下这种偏差是负值,即雨量计观测值比实际降水量偏小。造成这种误差的原因主要是动力损失、湿润损失和蒸发损失^[16]。因此,只有对现有观测值进行系统误差修正,得出降水相对真值,才能对各气象点的降水资料进行对比来求得较为真实的降水递变率。杨大庆等人曾于 1986~1987 年在乌鲁木齐河流域进行了降水观测系统误差分析和修正实验,修正了该流域降水观测系统误差。根据其研究,乌鲁木齐河流域降水观测系统误差总修正量从高山和平原向中山带递减。大西沟气象站年总修正量达 140.5 mm,相当于观测降水量的 30.9%;冰川站基本营地到跃进桥水文站的中山带,年总修正量在 52 mm 左右,相当于年观测降水量的 13.5%^[17]。

根据大西沟气象站和天山站基本营地 1986~1994 年降水观测资料,按照两者的降水年平均修正率(分别取 30.9%和 13.5%),求得两个气象点 1986~1994 年降水的相对真值及两者之间的降水变化梯度(表 4)。

以表 4 中所求得的基本营地与大西沟气象站 8 a 平均降水递变率 $10.11 \text{ mm} / 100 \text{ m}$ 作为乌鲁木齐河流域中山带以上的降水垂直递变率,以大西沟气

象站为基准向上延伸,就可求得 1 号冰川上方假设无冰川状况下的理论降水量。大西沟气象站多年平均观测降水量为 $421.3 \text{ mm}^{[1]}$,则其相对真值 $P_k = 421.3 \times (1+30.9\%) = 551.5 \text{ mm}$ 。

那么 1 号冰川上任意海拔高度(X)处降水理论值为 $P = 551.5 + 10.11 \times (X - 3\,539) / 100$

3.2 1 号冰川对降水的贡献

前一节求出了只考虑地形作用下乌鲁木齐河流域中山带以上降水随高度的理论递增率,该理论递增率与河源区实际观测递增率 $18.3 \text{ mm} / 100 \text{ m}^{[16]}$ 、 $25 \text{ mm} / 100 \text{ m}^{[18]}$ 是明显不同的,这也正反映出河源区的降水除受地形作用外,还受到冰川下垫面、局地环流形式等因素的影响,这些影响使得河源区降水梯度增大。如何区分出冰川特殊下垫面对总降水量的贡献呢?我们认为,冰川上实际观测降水的相对真值与理论计算值的差值就是冰川的贡献量。由于到目前为止尚没有对 1 号冰川的年降水量进行直接和精确的观测,而广泛采用的是根据大西沟气象站的观测值用不同降水梯度推导出来的不同高度上的年平均降水量,它们基本上反映了 1 号冰川上不同高度的多年平均实际降水量。这里就把这些资料作为 1 号冰川上降水的相对真值来

表 5 1 号冰川对降水的贡献量

Table 5 The contribution of Glacier No.1 to precipitation

海 拔 m	理论计 算值	相对真 值 / mm	降水梯度 $\text{mm} \cdot 100 \text{ m}^{-1}$	冰川贡献 比重 / %
3 740	571.8	577.6 ^[16]	21.5	1.00
4 005	598.6	634.7 ^[19]	33.0	5.69
4 015	599.6	638.0 ^[20]	81.3	6.02
4 030	601.1	650.2 ^[17]	-22.0	7.55
4 050	603.2	645.8 ^[16]	12.3	6.60
4 098	608.0	651.7		6.71
平 均	597.1	633.0	25.2	5.60

估算不同高度上冰川对降水的贡献比重。

从表 5 中可以看出, 冰川对降水的贡献随高度的不同而变化。在冰舌末端冰川的贡献量仅为年降水量的 1%, 随高度上升而贡献量不断加大, 在海拔 4 030 m 处冰川的贡献量达到最大, 占年降水量的 7.55%。高度再升高冰川贡献量又有所减小。平均而言 1 号冰川冰面上年平均降水总量中有 5.60% 的降水是由于特殊下垫面——冰川的作用而产生的。而冰川区降水梯度变化也同样遵循这一规律。冰川区降水梯度平均为 25.2 mm/100 m, 远大于中山区至高山区的降水梯度值 10.11 mm/100 m, 这正是冰川特殊下垫面影响的结果。降水梯度从冰舌末端向上逐渐增大, 到粒雪盆(海拔 4 030 m)处达到最大, 再向上则又逐渐减小。这一现象是因为水汽团沿冰川表面上升时逐渐变性并以降水的形式“卸载”, 大约到达粒雪盆时变性达到最深, 降水卸载量也最大, 再向上因变性不明显, 水汽含量减少等原因而降水梯度减小, 使得冰川贡献量也逐渐减小。

4 结论

对 1 号冰川的定性和定量分析表明, 冰川作为特殊性质的下垫面对降水产生影响, 并通过冷却效应、温跃现象、逆温现象、冰川风现象、对流云凝结高度降低现象和水平降水现象的综合作用来实现。1 号冰川作为特殊性质的下垫面对年降水的贡献量相当于冰川上年降水总量的 5.60%。规模更大的冰川其对降水的影响可能会更明显。

致谢: 任贾文研究员审阅全文并提出宝贵的修改意见; 天山冰川观测试验站的全体人员在资料的收集过程中给予了大力支持和帮助, 在此一并表示衷心的感谢。

参考文献(References):

- (1) Zhang Yinsheng, Kang Ersi, Liu Chaohai. The climatic features of Tianshan Urūmqi River Valley[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994, 16(4): 333~341. [张寅生, 康尔泗, 刘潮海. 天山乌鲁木齐河流域山区气候特征分析[J]. *冰川冻土*, 1994, 16(4): 333~341.]
- (2) Bai Chongyuan. A study of relationship between climate and mountain glaciers [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1989, 11(4): 287~309. [白重媛. 冰川与气候关系的研究[J]. *冰川冻土*, 1989, 11(4): 287~309.]
- (3) Lax J N, Schwerdtfeger W. Terrain-induced vertical motion and occurrence of ice crystal fall at the South Pole in summer [J]. *Antarctic Journal of the United States*, 1976, 11(3): 144~145.
- (4) Zhou Shuzhen, Zhang Ruyi, Zhang Chao. *Meteorology and Climatology* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1985. [周淑贞, 张如一, 张超. *气象学与气候学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.]
- (5) Yao Zhensheng. *Principles of Climatology* [M]. Beijing: Science Press, 1959. [幺枕生. *气候学原理*[M]. 北京: 科学出版社, 1959.]
- (6) Zhang Yinsheng, Kang Ersi, Yang Daqing. Experimental study on the evaporation in the high-altitude area of the Urūmqi River Basin [A]. *Formation and Estimation of mountain water resources in the Urūmqi River Basin* [C]. Beijing: Science Press, 1992. 79~89. [张寅生, 康尔泗, 杨大庆. 乌鲁木齐河流域高寒区蒸发量观测试验研究[A]. *乌鲁木齐河山区水资源形成和估算*[C]. 北京: 科学出版社, 1992. 79~89.]
- (7) Liu Chaohai. Calculation of ice surface temperature and determination of temperature jump value in Qilian Mountain[A]. *Memoirs of Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences*. No.7[C]. Beijing: Science Press, 1992. 34~39. [刘潮海. 祁连山冰面气温的推算和温度跃动值的确定[A]. *中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊*, 第 7 号[C]. 北京: 科学出版社, 1992. 34~39.]
- (8) Shi Yafeng, Huang Maohuan, Ren Binghui. *An Introduction to the Glaciers in China*[M]. Beijing: Science Press, 1988. [施雅风等. *中国冰川概论*[M]. 北京: 科学出版社, 1988.]
- (9) Chen Jinxi, Xiao Shu. The summer microclimate of Glacier No.1, Shengli Daban, Tianshan [A]. *Collections of Glacier and Snow Study in Xinjiang*[C]. Science and Technology Committee of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 1964. 137~145. [陈金玺, 肖铎. 天山胜利达坂 1 号冰川夏季小气候[A]. *新疆冰川积雪研究文集*[C]. 新疆维吾尔自治区科学技术委员会, 1964. 137~145.]
- (10) Wang Dehui, Zhang Piyuan. On the valley climate of the Urumqi River Valley in the Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1985, 7(3): 239~248. [王德辉, 张丕远. 天山乌鲁木齐河谷气候特征[J]. *冰川冻土*, 1985, 7(3): 239~248.]
- (11) Atsumu Ohmura, Herbert Lang, Felix Blumer, *et al*. Glacial climate research in the Tianshan [A]. *Research report on project glacier No.1, 1985~1987* [C]. Zurich, 1990.
- (12) Barry R G, Chorley R J. *Atmosphere, Weather & Climate (Third Edition)* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1976. [施尚文, 张如一等译. *大气、天气和气候*. 北京: 高等教育出版社, 1982.]
- (13) Zou Jinshang, Liu Changsheng, Liu Wenbao. *Base of Atmospheric Physics* [M]. Beijing: Meteorology Press, 1982. 34. [邹进上, 刘长盛, 刘文保. *大气物理基础*[M]. 北京: 气象出版社, 1982. 34.]
- (14) Central Meteorology Bureau of China. *Ground Weather Observation criterion*[M]. Beijing: Meteorology Press, 1979. 168. [中央气象局. *地面气象观测规范*[M]. 北京: 气象出版社, 1979. 168.]
- (15) Lin Zhiguang. *Climatology of Topographic Precipitation* [M]. Beijing: Science Press, 1995. [林之光. *地形降水气候学*[M]. 北京: 科学出版社, 1995.]
- (16) Yang Daqing, Jiang Tong, Zhang Yinsheng, *et al*. Analysis and correction of errors in precipitation measurement at the

- head of Ürümqi River, Tianshan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1988, **10**(4): 384~399. [杨大庆, 姜彤, 张寅生, 等. 天山乌鲁木齐河源降水观测误差分析及其改正[J]. 冰川冻土, 1988, **10**(4): 384~399.]
- (17) Yang Daqing, Shi Yafeng, Kang Ersi, *et al.* Analysis and correction of systematic errors in precipitation measurement in the Urumqi River Basin, Tianshan [A]. *Formation and Estimation of Mountain Water Resources in the Ürümqi River Basin* [C]. Beijing: Science Press, 1992. 14~40. [杨大庆, 施雅风, 康尔泗, 等. 天山乌鲁木齐河流域降水观测系统误差分析和修正[A]. 乌鲁木齐河山区水资源形成和估算[C]. 北京: 科学出版社, 1992. 14~40.]
- (18) Xie Zichu, Ge Guangwen. Accumulation, melt and mass balance of Glacier No. 1 at the head of the Ürümqi River, Tianshan Mountains [A]. *Study of Glaciers and Hydrology of the Ürümqi River, Tianshan Mountains* [C]. Beijing: Science Press, 1965. 14~24. [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[A]. 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.]
- (19) Wang Ninglian. Grey relational analysis of the leading climatic factor influencing the changes of the equilibrium line [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, **17**(1): 8~15. [王宁练. 冰川平衡线变化的主导气候因子灰色关联分析[J]. 冰川冻土, 1995, **17**(1): 8~15.]
- (20) Yang Xinyuan. Climatic characteristic and glacial runoff in the source of Ürümqi River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994, **16**(2): 147~155. [杨新元. 乌鲁木齐河源气候特征与冰川融水径流[J]. 冰川冻土, 1994, **16**(2): 147~155.]

Quantitative Analysis of the Glacial Effect on Precipitation of Glacier No. 1 at the Headwaters of the Urumqi River, Tianshan Mountains

ZHANG Dong-qi¹, ZHOU Shang-zhe²

(1. Laboratory of Ice Core and Cold Regions Environment, CAREERI, CAS, Lanzhou Gansu 730000, China; 2. Resource and Environment College of Lanzhou University, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: Generally speaking, precipitation on mountain glaciers is an integrated result of weather system, terrain and specific property of the surface. The first two factors are dominant but the last one is quite important in some circumstances. In this paper, the Glacier No.1 at the headwaters of the Urumqi River, Tianshan Mountains, is selected to be a representative glacier and the factors producing precipitation on the glacial zone are systematically analyzed. The effect of the glacier surface on precipitation is elaborated and the contribution rate of the Glacier No.1 to the precipitation is calculated. The influence of glacier on precipitation due to its special surface is brought about through the cooling effect and its consequent phenomena: temperature jump, temperature reverse, glacier wind, coagulation height drop and horizontal precipitation. Owing to the special surface of snow and ice, the coagulation height above the Glacier No. 1 is about 146 m lower than that of Daxigou Meteorological Station about 1 000 m far away in July. The

mean precipitation gradient of the Urumqi River basin (above 2 130 m) is 10.11 mm / 100 m, different to the glacial zone, about 25 mm / 100 m. The contribution of the Glacier No.1 to precipitation is changing with height. At the tongue of the glacier only 1% of precipitation is contributed by glacier and the percentage increases gradually with height. At the firn basin (about 4 030 m) the contribution achieves the maximum, 7.55% of annual precipitation, and then decreases with height. The changing feature of air mass causes this phenomenon. When the air mass moves from the tongue of a glacier to the firn basin, its feature gradually changes and its mass loses through precipitation. When it arrives the firn basin its feature changes greatly and loses most of its mass. So when it moves up no more mass could lose and the contribution of glacier will decrease. In general, about 5.60% of the annual precipitation can be attributed to the glacier because of its special surface.

Key words: Glacier No.1 at the Headwaters of the Urumqi River; precipitation; glacial effect; quantitative analysis