天山乌鲁木齐河源区石冰川的温度结构类型与运动机制*

崔之久** 朱诚

(北京大学地理系)

关键词 倒石堆、倒石堆前缘堤、大陆性冷底石冰川、海洋性暖底石冰川

乌鲁木齐河源区冰缘地貌现象丰富多采. 六十年代以来，季子修[1]、李树德等[2]及邱国庆等***曾对本区岩石风化、石环、石河、拔石、冻胀丘等做过初步的解剖分析，积累了宝贵资料。但前人对石冰川几乎未涉及. 1985—1987 年，作者对本区石冰川进行了较系统的定位观测和研究，得出以下主要结果.

一、形态和分布

本区石冰川有十数条，几乎全部由倒石堆或倒石堆前缘堤演化而来，按一般成因划分属倒石堆型石冰川(如 RG3、RG4、RG5) 或倒石堆前缘堤型石冰川(如 RG2)，按作者之一的石冰川分类则多属于科罗拉多型[3](意即由倒石堆演变而来).

本区石冰川可单独或成群出现，单独出现的石冰川具有下述特点：(1) 一般长 30—60m，宽 100—150m，前缘高 20—40m；(2)前缘坡度较大(30°—41°—60°)，从顶到前缘坡有一明显坡折；(3) 有的石冰川坡脚延伸出一个因挤压而成的翘起平台或顶部出现槽和脊. 这些特征形态是原始倒石堆所不应具有的.

倒石堆直接演变的石冰川和倒石堆前缘堤型石冰川有一定区别：前者的形成是由于本区倒石堆大多集中于阴坡坡麓，雨水、融雪水渗入倒石堆后受低温影响不易融化，加之地形、坡度等影响便使倒石堆具有向前蠕动的特性，蠕动过程长期进行便演化为雏型石冰川，并进一步转化为目前所见的叶状石冰川. 倒石堆前缘堤型石冰川的形成，首先是由沿倒石堆前缘呈弧线状延伸的堤状堆积体 (即倒石堆前缘堤). 由于雪斑融水和雨水的流入以及重新冻结，此堤内常有冰岩混合体，易产生蠕动现象. 而且其后侧倒石堆规模亦在不断扩大，随时间推移，两者连成一体便形成典型的叶状或舌状石冰川 (如图 1). 此类石冰川以其前缘反倾坡 (8°—17°)为特点. 与倒石堆型石冰川明显有别(图 2).

瑞士 W. Haeberli 曾根据阿尔卑斯山的状况提出了石冰川的理论分布模式[4]. 他认为石冰川多在冻土下界以上和冰川零平衡线以下之间的地带内发育. 在乌鲁木齐河源区，冰川零平衡线约 4050m，多年冻土下界为 3200m，而石冰川分布上界约 3900m，与 Haeberli 分布

本文 1987 年 9 月 17 日收到. 1988 年 7 月 4 日收到修改稿.

* 本课题属中国科学院兰州冰川冻土研究所天山冰川站计划课题之一.

** 为中国科学院兰州冰川冻土研究所兼职研究员.

*** 见"天山站附近高山冻土与冰冻现象的一些新资料"，天山冰川站年报第 1 号，1981，113—124，中国科学院兰州冰川冻土研究所编.

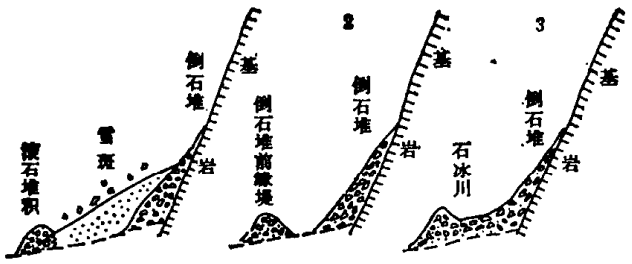


图 1　倒石堆前缘堤的形成及其向石冰川的转化(按 1—3 顺序)



图 2　大西沟气象站 3600 m 处 RG2 石冰川全景(箭头所示)

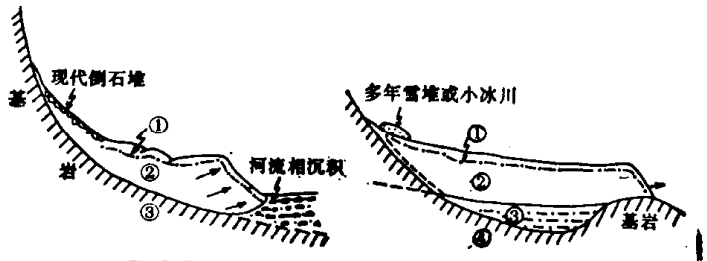
模式大体相同.

二、结 构 模 式

1. 坑探资料　我们曾于 1986 年 6—7 月两次在 RG3 和 RG5 石冰川顶部不同部位进行爆破坑探，6 月底在 RG3 石冰川表面以下 1.31 m 处发现 20 × 15 × 8cm 规模的冰透镜体,冰体洁净,其四周为片麻岩块,岩块间有细粒岩屑充填. 在 RG5 石冰川表面以下 0.8m 深处见含粒状冰的冻结角砾土、在 1.2m 深处见含孔隙冰的冻结岩屑，在其细粒物质间有多层厚度为 1—3mm 的层状冰. 7 月底的爆破发现与上述有类似特征,只是深度有所加大.

由坑探得知: 本区石冰川中有一活动层和冻结层，其活动层 7 月底深度范围在 1.43—1.9m 之间; 其冻结层由含冰透镜体和孔隙冰的冻结岩屑体组成. 这些均为冰胶结型石冰川的典型特征.

2. 物探资料　用 DDC-2A 型电子自动补偿仪对本区石冰川进行电测深[1],发现该区石冰川可分为三层结构. 第一层为活动层,电阻率 2500Ωm,厚度 1.5m (由二层量板确定);第二层根据坑探资料分析应属于冻结砂砾石层,由于含冰故电阻率增至 3.7 × 10^4Ωm; 在 $AB/2$为 110m 处电阻率逐渐降至 3.2 × 10^4Ωm，由于此处深度仅为百余米,且电阻率虽有下降但仍比未冻结沉积物具有的电阻率 0.5—5 × 10^3Ωm 更高一个数量级.由此推测此层应为电阻率比含冰冻结砂砾石低的基岩(电测处表面所见基岩为花岗岩、硅质岩，事实上这两种基岩电阻率也



①活动层;
②冻结砂砾石层;
③基岩

①活动层;
②冻结砂砾石层;
③未冻结沉积物层;
④基岩

图 3　天山型(左)与阿尔卑斯山型(右,据 W. Haeberli, 1985) 石冰川结构比较

[1] 物探曲线解释得到姚增同志帮助.

往往低于含冰冻结砂砾石)；在 $AB/2$ 为 160m 左右，电阻率再次升至 3.7 万 Ωm 左右，推测分析是为基岩岩性变化所致．根据坑探和物探资料可做出本区三层式与阿尔卑斯山四层式石冰川结构对比图(图 3)．可以说，我们首次发现了世界上有两种温度和结构类型的石冰川；即前者反映了"一冻到底"的大陆性山地冷底石冰川的特征，亦即"冷性石冰川"，后者反映了"暖底的"海洋性"暖性石冰川"的特征．

三、运 动 特 征

我们采用大平板仪定点重复测绘、布设定位油漆基线、定位编号砾石并结合砾向组构量测等来观测石冰川运动．通过观测，总结出以下若干特征．

1. 运动缓慢——基本稳定型　位于总控水文点下游 250m 的 RG1 石冰川长约百米、宽 60 余米，为本区少有的舌状石冰川之一．从目前其表面植被增多和前缘年运动速率仅为 1cm 左右的情况看，它是逐渐趋于稳定的．

2. 较活动型　利用定位基线重复观测发现 RG2 石冰川前缘顶部的 37 块涂漆巨砾每年运动约 11cm，利用大平板仪重复测图发现 RG3 各测点平均沿主流向前进 75cm/a，RG4 为 49cm/a，RG5 为 15.5cm/a．

3. 卸载量和堆积速率　在 RG4 前缘，我们观测了石冰川卸载量和堆积率．此石冰川前缘坡脚为 1960 年废弃的公路路面，原路面宽 5.5m，现因路面上侧石冰川运动和岩屑覆盖使路面宽仅 4m，25 年内推移 1.5m，石冰川前缘平均每年向前推进 6cm．1960—1985 年间总的卸载量为 1764m^3，平均每年卸载量为 70.56m^3/a，换算成单位卸载量则为 0.47m^3/m^2/a．这为公路道班的工作量提供了具体的数据．

4. 运动速率的不规则性　根据掩埋公路面推算出的 RG4 平均运动速率 6cm 是可靠的．但 1985—1986 年用大平板仪测出的流速比前 25 年快得多，测量表明其 15 个测点在 1985—1986 年间平均前移竟达 49cm/a．对石冰川来说这种不规则运动是常有的事．如 White[5] 根据对 Arapaho 石冰川表面涂漆砾石的观测，发现其在 1961—1964 年间平均运动速率为 2cm/a，1964—1966 年间却增大到 12cm/a．类似现象还出现在瑞士阿尔卑斯山等许多地区的石冰川观测中，这表明石冰川运动和冰川运动类似有一定的不规则性．

四、运动机制的探讨

分析发现石冰川存在层间运动的差异，主要表现在：

1. 主动运动的冻结岩屑层　在活动性较强的 RG2 石冰川前缘坡可以发现其中部 20m 范围内石块运动较快，而上下两部分石块运动较慢，上部砾石扁平面多呈水平状镶嵌在斜坡内、下部砾石扁平面多呈叠瓦状分布．至于石冰川各层间运动的差异，根据 RG2 前缘坡中段运动快且表面有细粒岩屑出现，以及各石冰川表面砾石有局部后退等现象，可以推测处于活动层以下的冻结层其蠕动速率比表层和冻结的底层要快．也就是说，主动运动的一方是界于表层和冻结底层之间的冻结砂砾石层，被动的一方是表面松散岩屑的活动层．当中层冻结岩屑层沿剪切面逆冲前进时，拖拽其上松散岩屑作局部滚动、滑动，表现为既有前进下降又有后退抬升等复杂现象．

2. 被动运动的表层及其流场形式　砾向组构也反映了石冰川一定的表面流场形式．此外，运动的石冰川表面中部的流速最快是一般规律．作者发现：(1) RG2 石冰川表层各沉积

部位 AB 面倾向均有一个主密部，最高密度 19—22%，主密部倾向与各自的沉积面坡向基本一致。(2)从 RG3 活动层内组构看，A 轴平均倾向 284°NW，与石冰川主流向 285°NW 很接近。而 AB 面倾向有两处，最大主密部 75°NE 基本与石冰川主流向相反。推测这可能是石冰川内部受冻融蠕流作用挤压变形以及石块沿流动方向蠕动时被拖拽前进所致。(3) 从各测点组构反映的石冰川表层流场看，该区叶状石冰川总方向是自谷壁向外并垂直于石冰川表面等高线方向流动的(即顺压力释放方向流动)，在前缘顶部反倾坡则有局部岩屑的逆向滚动和滑动。

参 考 文 献

[1] 季子修,冰川冻土, **2**(1980), 3: 5—6.

[2] 李树德、崔之久、张振拴,冰川冻土, **3**(1981), 增刊: 114—118.

[3] 崔之久,科学通报, **29**(1984), 13: 810—813.

[4] Haeberli, W., Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of alpine rock glaciers, Nr. 77, *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, Zürich, 1985, 24—105.

[5] White, S. E., *Arctic and Alpine Research*, **3**(1971), 1: 43—64.