

# 海螺沟冰川：“无处不在”的海洋型温冰川消融

文、图 / 刘巧

冰川是我们这颗蓝色星球上的水体以固态形式存在的方式之一，与积雪、冻土、海冰和河湖冰等要素共同构成了地球冰冻圈。冰川屹立在天地间，看似不言不语、不动不移，其实它们一刻也没有“安静”下来过。



“城门洞”崩塌破碎现场（红框处）

冰川是高寒地区的降雪经过粒雪化、密实变质成冰后在重力作用下缓慢流动的自然冰体。运动或流动是冰川最基本的特征之一，也是冰川与其他地表冰体最为本质的区别。

中国是一个山地冰川大国。在藏东南以及横断山地区分布着一种特殊类型的山地冰川——海洋型温冰川，如贡嘎山现代冰川。贡嘎山主峰周围共发育有现代冰川 75 条，是在季风海洋性气候条件下形成的，是我国西部山地冰川中除藏东南外的主要海洋型冰川分布区，位于东坡的海螺沟冰川是其中

最长的一条。

消融即冰川冰量的物质损失过程。在冰川学专业术语中，“melt”和“ablation”两个英文单词均可译为冰川消融。二者看似并无区别，但准确来讲，“melt”仅仅是指冰体直接融化过程的消融，而“ablation”则涵盖了所有形式的冰川物质损失过程。如在极地冰架的崩解过程中，冰架通过直接崩解断裂而损失冰量，这类冰物质损失也是冰川“ablation”的重要部分。海洋型温冰川除了显著的面消融外，冰川损失冰体物质的方式和过程可

以说也是全方位、无处不在的。

### 来自表面的消融

冰川表面直接接收来自太阳辐射的热量，是发生消融的主要界面。由于海洋型温冰川的冰温整体上比冷型冰川高，因此其对温度升高更敏感。对冰面消融的直接观测，一般使用热水蒸气钻在冰川上融化出一个垂直向下的孔，然后插入测量花杆，标记下冰面的初始位置，定期测量消融后新的冰面位置与前一次标记的距离，即为观测时间段的冰川消融量。通过在冰川上的不同部位和海拔处布设花杆测量网，可掌握冰川整体的消融情况。

使用该方法，我们在海螺沟冰川消融区曾观测到单个夏季消融期冰川消融深度高达 10 ~ 20 米，平均每天冰面的融化量接近 10 厘米，消融速率是惊人的。

### “潜藏”在内部的消融

海洋型冰川内部和底部有复杂的排水系统，冰川热喀斯特（由于气温和地温升高，多年冻土和冰川区的内部冰体融化产生类似石灰岩区的岩溶现象）过程非常活跃。在海螺沟冰舌段，来自冰面融水、液态降水以及冰川两侧支沟的大量水体，通过裂隙、竖井以及两侧的支流入水口进入了冰川内部或下部。这些水体温度一般高于冰川冰的温度，可持续不断地融蚀冰体，从而引起冰内或冰下的冰川消融和坍塌。我们在海螺沟冰川两侧的支流入水口附近看到，周边冰体呈现出明显的凹陷特征。

海螺沟冰川消融区发育了大量冰裂隙，也为冰面融水和夏季液态降水进入冰川内部甚至底部提供了重要通道，因此我们很难在冰面上看到稳定连续的冰面河流。由于温冰川的物理特性，这些支流入水或冰内冰下融水很难再次冻结，所经之处必然是冰川底部消融最为强烈的区域。我们通过多年对海螺沟冰舌区表面地貌的动态变化观察发现，冰舌呈现出明显沿冰川谷地纵向的凹陷地形，表明因冰川内部强烈消融而引起的冰面坍塌过程是非常显著的。

### 看不见的快速流动

与海洋型温冰川相对应的是大陆型或极大陆型冰川，海洋型温冰川的流动速度一般比大陆型冰川快。对于海洋型温冰川而言，一方面冰温高（整体接近于零度左右的压力熔点），冰体在同等应力条件下蠕变速率更快；另一方面，冰川底部有大量融水，可在冰川与底部基岩间起到润滑减阻作用，从

而引起冰川的快速滑动，冰川运动速度往往更快。

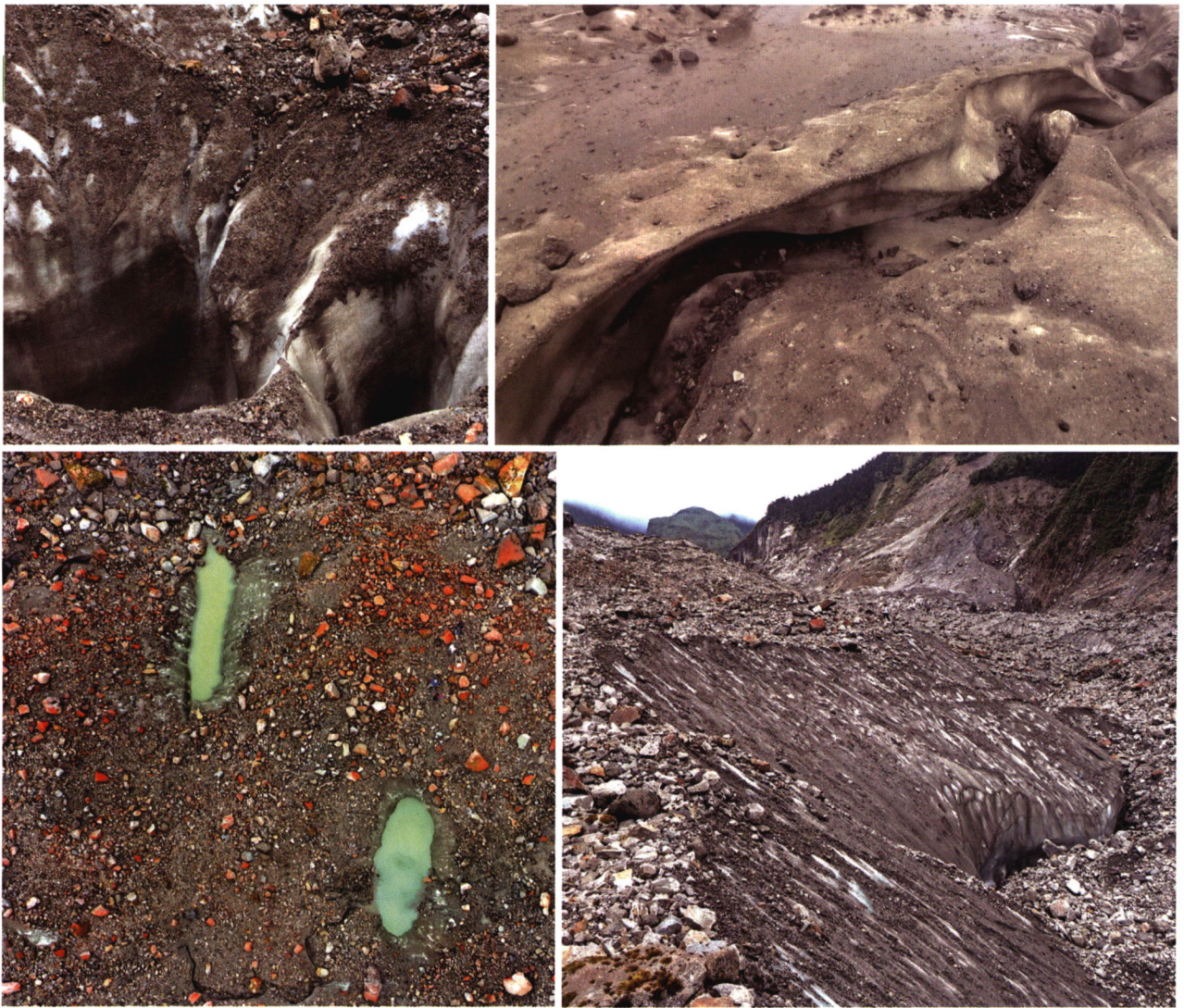
尽管海洋型温冰川的流速较快，但它们的流动过程我们仍然是无法用肉眼直接观测到的，需要借助延时摄影的手段。利用遥感手段提取冰川流速就类似于对冰川进行延时拍照，通过对比一定时间间隔的同位影像，借助图像匹配算法，可对冰川表面具有相似特征的区域进行跟踪并估算其位移量，从而得到研究时间段内的冰川流速。这种基于特征点跟踪技术的冰川流速遥感提取，相比传统实地测量更能高效获取整条或整个区域的冰川流速信息。

海螺沟冰川是一条流速相对较快的冰斗 - 山谷冰川，其冰瀑布上游附近流速高达每年约 500 米，而冰瀑布主体区域流速更高。海螺沟冰川积累区大量冰川物质在冰瀑布上沿的狭窄谷地收敛后，立即流入陡峭地形（接近冰岩陡坎），形成垂直落差高达 1080 米左右的冰瀑布，导致该段冰流速显著升高。海螺沟冰川冰舌段的平均流速约为每年 100 米，也远高于西部地区大多数冰川每年 30 ~ 50 米的流动速度。

快速流动的冰川如同一条高速传送带，源源不断地将上游侵蚀产生的冰碛物向下游搬运，最终堆积在冰川末端和两侧。同时，快速流动的冰川也补给了下游低海拔区域快速消融的冰体，相当于冰川自身的“新陈代谢”过程，可维持冰川总体的“生命”平衡。然而，随着气候变暖以及高海拔的固态降雪越来越少，冰川的补给速度已经越发赶不上冰川消融的速率了，于是冰川呈现出加速的减薄与退缩状态。



海螺沟冰川两侧的支流汇入冰川内部



海螺沟冰川的冰面消融景观：竖井（左上）、冰面河道的融蚀下切（右上）、冰面湖（左下）、冰崖（右下）

### 表碛覆盖影响下的消融

夏季，海螺沟冰川的消融区在没有积雪覆盖时，表面上映入眼帘的除了大小不一的砾石外，大部分冰体呈现出单调的灰色。很多初次见到这种冰川景观的游客，诧异地以为整个山谷只是一个大型采石场。其实，这只是冰川表面被表碛物质覆盖了。山地冰川在运动过程中通过刨蚀、磨蚀和拔蚀从冰床上获得冰碛物，冻融作用、冰/雪崩和冰缘崩塌失稳等也会导致冰川两侧山坡上的岩屑物质崩落至冰川表面，或进入冰川内部随着冰川消融成为融出碛，最终在冰川表面富集形成表碛。表碛随着冰川流动缓慢地向下游输送，通常越靠近冰川下游表碛层越厚。

海螺沟冰川就是一条典型的表碛覆盖型冰川，属于中国西部较为常见的一种冰川类型，如天山和喜马拉雅山区的很多大型山谷冰川均有表碛覆盖。

表碛层存在于大气-冰川冰界面，强烈影响着大气圈与冰冻圈之间的热交换。冰川表碛的存在如同给洁白的冰川盖上了一层“隔热被”，可阻挡太

阳辐射，降低冰川消融速率。与裸冰或积雪相比，表碛覆盖层由于反照率、颗粒度和热传导速率等物理性质的差异，具有独特的热力过程，从而影响其下覆冰川的消融过程。表碛具有双面性：一方面，较厚的表碛可隔绝太阳辐射的热量，减缓冰川的融化；但另一方面，非常薄的表碛反而会降低冰川的反照率，更易吸热，加速冰川的融化。表碛覆盖的这种双重效应取决于表碛层的厚度，其临界厚度为2~3厘米。在冰川运动与重力共同作用下，冰面表碛物的重新分配无时无刻不在发生着，导致冰面的消融速率呈现出此消彼长、复杂多样的过程，同时也造就了表碛覆盖型冰川冰面千姿百态的消融景观。

### 多样的冰面消融景观

相比冰内或冰下看不见的消融，海螺沟冰面的消融景观更是丰富多样。

在冰舌的中上部，冰面河往往会突然“断流”，其原因并不是融水变少，恰恰相反的是冰面融水找到了进入冰川内部的入口，即冰川流水穿洞或称“竖井”。

这些竖井往往深不见底，直径宽达数米，周边是光滑的白冰，人一定要与之保持一定距离。在冰面河曾经流经之处，冰川被流水“侵蚀”切割出一道道蜿蜒曲折的沟道，充分说明了携带热量流经温冰川的液态水体在冰川消融过程中的作用不容忽视。

此外，海螺沟冰川上还经常可见冰面湖和冰崖等差异消融景观。冰面湖大多形成于冰面相对凹陷的盆地，有时也形成于闭合过程中的裂隙。冰面湖融水蓄积到一定规模后，湖水相对于周边冰体更容易吸收热量而升温。湖水通过水体的对流和热交换不断“融蚀”其底部和四周的冰体，自身也随之扩张变深。当然，冰面湖扩张到一定规模后，终究会遭遇到冰裂隙或冰内排水通道，冰湖蓄水会迅速排空，因此，冰面湖大多是周期性或季节性地存在于冰川消融区。

冰崖往往与冰面湖相伴存在，在海螺沟冰川上

也很常见。冰崖表面由于附着一层薄薄的灰色表碛物质，可通过吸收太阳辐射而加速局部冰体的融化，也是冰川舌区的消融“热点”区域。

近年来，由于冰川消融加剧，冰川厚度持续减薄，海螺沟冰川末端出水口附近的坍塌规模和频率也显著增加。减薄后的冰体塑性变形能力越来越有限，受到外力作用后更容易破碎断裂，冰川在下部融化后更易崩塌断裂。在过去冰川较厚时期，如果有人近距离观看海螺沟末端出水口，会觉得非常壮观宏伟，当地人称其为“城门洞”，这个地名直到今天仍被沿用。现今，冰川末端出水口的冰体仅有二三十米厚，照此消融态势，当下方的排水通道扩大到十多米时，空洞上方的单薄冰体极易发生崩塌断裂，过去的那种“城门洞”景观再难重现。

作者单位：中国科学院、水利部  
成都山地灾害与环境研究所 ■



2013年6月7日拍摄



2022年6月9日拍摄

海螺沟冰川表碛覆盖区全景及其近年变化对比