

青藏高原多年生冰丘形成及其演变规律的探讨

——以青藏公路六十二道班冰丘为例

安钟元

(地质部水文地质工程地质研究所)

自昆仑山脉主脊南侧至唐古拉山脉主脊南侧的青藏高原腹地上广泛发育着多年生冰丘和季节性冰丘、冰椎。其中有名的多年生冰丘分布于62道班、85道班附近,瓦里百里滴东岸、86道班两侧及唐古拉垭口西南等处,后两者还伴随有大量的泉华堆积物。

这些冰丘多在山间谷地、坡地及断裂带附近成群出现,冰丘的大小由数平方米至一万余平方米不等。

冰丘的存在及其发展严重地威胁着附近交通运输和公路沿线国民经济建设,因此对冰丘的研究有其特殊的重要意义。

青藏公路62道班冰丘位于昆仑山垭口盆地的北缘、海拔4800米左右。盆地多年平均气温在 -5.0°C 以下,年降水量在280毫米以上,地表冻结期为7—8个月,湿润系数小于0.1,属寒冷干旱气候区。冰丘规模较大,长180余米,宽80余米,高15米的半月型大型冰丘,系多年生冰丘,分析表明可能有残余活动。

关于青藏高原多年生冰丘的形成条件问题

青藏高原虽然处于严寒的气候条件下

(多年平均气温概值为 -2.0°C — -7.0°C ,冬季长、冻结期达7—8个月等等),多年冻土普遍发育,巨大山系的主脊上发育着现代冰川,但是,并不是任何地方都可以形成多年生冻胀丘,更不是任何地方都可以形成多年生的大型冻胀丘。这种冻胀丘只是在一定的冻土-地质-水文地质条件下才形成的。

气候条件:多年生冰丘的形成适宜于寒冷、冬季长、尤其是初冬期低温寒冷的气候条件。因为地下热能与地表热能相差越大,越有利于形成冰丘,而这种差距最显著的季节,便发生在初冬寒冷气候条件下,结果冻结迅速、地下水的热能便向热能低的冻结方向传递,使水分强烈迁移和集中形成厚层冰,同时在其下产生足够的静水压力和带气体的高能量地下水,使冰层破裂,并继续冻结,造成鼓丘状地形。冬季长便有利于冰丘的继续发育,形成厚层至巨厚的冰层,并不易在暖季全部消融,从而促使多年生冰丘的发育。

青藏高原腹地,气候寒冷,多年平均气温在 -3.5°C — -5.0°C 以下,冬季降雪量小,冬季长达7—8个月以上。这种气候特征,符合上述形成冰丘的气候条件,因此,青藏

高原腹地特定的气候因素是形成多年生冰丘的前提。

地形条件：利于形成冰丘的地形，主要取决于地下水排泄地段的地形。青藏高原地下水的溢出带和上升泉集中排泄的地带，在一般情况下出露于盆地边缘，阶地前缘，河谷地带，斜坡地以及山区侵蚀形成的地段，然而形成多年生冰丘的有利地段，便集中于盆地边缘，山间谷地中上游及山前斜坡地前缘地段。这些地段正是处于地质构造，挽近构造活动强烈的地段，因此典型的大型多年生冰丘往往集中在上述地形中。

地形岩性条件：青藏高原腹地多年生冰丘所在的地段，在调查范围以内的勘探孔揭露，均有厚层湖相淤泥类土和弱含水层。表层岩性多为塑性或松散粘性土，即粘质砂土或砂质粘土，最薄的土层也大于2.0米以上，粘土以下为弱含水层组以及由各类淤泥质砂类，碎石及砾石等岩性所组成的含水层和淤泥类粘性土所组成的隔水层成互层状结构（图2）。

从地层岩性特征而言，有利于形成多年生冰丘的，则以湖相、河湖相地层为主。因为这些岩相具有多层结构特征，便决定了地下水处于缓慢的迳流状态。高原腹地的山间盆地，尤其是断陷谷地，便集中堆积着早-中更新统湖相、河湖相沉积物。

地质及挽近构造活动条件：地质和挽近构造活动，主要是通过控制地下水的迳流排泄及其强度来影响冰丘的形成及其演变过程。青藏高原腹地多年生冰丘与地质构造、挽近构造活动以及岩性之间的关系表明：

①断裂带发育于早-中更新统松散堆积中，或基岩断裂带之上覆盖不厚的松散堆积物的地方容易形成冰丘。

②在断裂带的组合关系中，压扭性断裂带与张扭性断裂带交汇处之张扭性断裂带的一侧易形成冰丘。

③差异性升降活动中，在上升区和下降区的接触带，即山区和盆地的过渡地带中盆地边缘易形成冰丘，然而盆地具有早期沉降、晚期上升特点的挽近构造活动带。

在上述诸因素的综合作用下冻结层地下水具有丰富的补给来源和含有大量的气体成份，使其具有潜在的高能量，从而冰丘具备了形成和演变的特定的水文地质条件。

在这种特定的水文地质条件下，参与冰丘形成的地下水具有下列特征：

（1）形成冰丘的地下水是来自于以融雪水作为补给的基岩山区冻结层地下水，从而到盆地边缘已具有较高的水头值，即具有较大的压力。

（2）冻结层地下水自山区进入盆地时，由于上述含水层特性，其迳流条件很差，从而迳流处于非常缓慢的状态，它仅仅依靠基岩和松散地层中的张扭性断裂带进行运移，由于冻土层的覆盖使其继续增长能量。

（3）由于冻土层地下水在上述淤泥类粘性土中迳流缓慢，水化学以胶体化学作用为主，并分解有机质，从而使其含盐量和气体成份继续增加。

（4）冰丘的地下水在补给区往往流经火成岩区，使其温度和气体含量增加，如唐古拉山垭口附近的地表水中 CO_2 的含量只有3.1毫克/升，而地下水流经沉积岩区时可增加到46毫克/升，当它流经火成岩区后增加到180毫克/升以上，并在蓄水盆地中滞缓迳流条件下可聚集到300—450毫克/升，从而看出冻结层地下水具有强大的能量。

除冻结层地下水的静水压力外，在冻结层覆盖条件下水中的气体得以保存，其中以 CO_2 为主要成份。它便成为形成冰丘的强大压力的来源。

由于冻土层的存在，高原冻结层地下水均具有承压性，因此在雪线附近就出现上升泉，在此下通过融区排泄通道不断消减其压

力。然而自补给源至冰丘段地下水，由于冻土层的连续分布，沿地下水迳流方向继续聚蓄其能量。

只有在具备上述特征的水文地质条件下，才能形成多年生冰丘。

以62道班冰丘为例具体分析其成因问题

62道班冰丘地处昆仑山垭口盆地北部边

缘，位于昆仑纬向构造带与青藏歹字型构造带的复合部位。

图1显示，盆地以纬向构造的压性断裂带为其北部边界，形成近东西向堆积地形，并在北西向谷地（属歹字型构造）中堆积了厚达500余米的河湖相堆积，是砂砾石与粘性土、粉砂互层结构，并富含水草等有机体。冰丘地区的南部边界以北西西向压扭性断裂带为界。挽近构造活动由于沿袭老构造运动，便产生了北西西向压性断裂和低序次

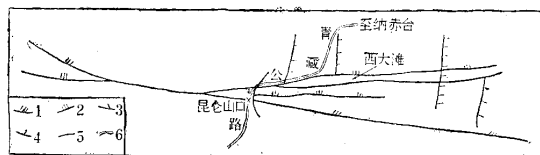


图1 根据卫星照片解释昆仑山口构造形迹示意图

(1) 压扭性断裂；(2) 压性断裂；(3) 张扭性断裂；(4) 张性断裂；
(5) 性质不明断裂；(6) 公路

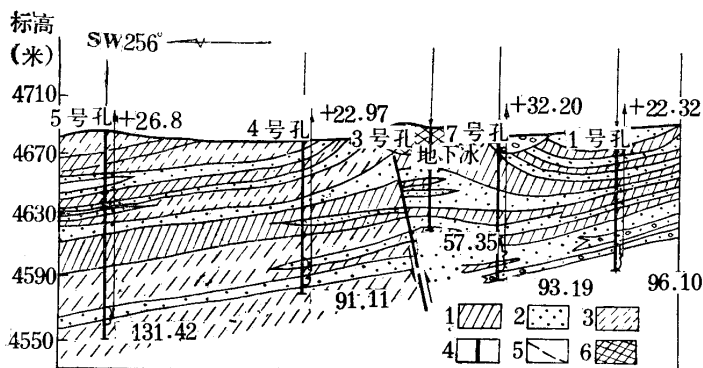


图2 62道班冰丘附近水文地质剖面图

(1) 粘性土隔水层；(2) 粉砂粗砂含水层；(3) 粘质砂土弱含水层；
(4) 钻孔及其编号，底下数字为孔深(米)；(5) 断层；(6) 冰丘范围

的东西向压扭性和张扭性断裂，其断裂带宽度为20米左右，上升幅度达200余米。盆地的东、北及东南由基岩山地构成，西南则为

巨厚的河湖相堆积段。这一地质、岩性及地形等条件便控制了冰丘地区地下水活动。

盆地中含水层发育于冻土层(下限值为

55—75米)以下的粉砂-粗砂及粘质砂土的砂砾石中。其顶板埋深为72—115米,含水层厚度在钻孔所揭露的范围内达5—24米,渗透系数为0.017—0.33米/昼夜,单位涌水量为0.011—0.032升/秒米。这一特征表明,地下水处于非常缓慢的迳流状态。

区域性迳流特征和图3表明,在压扭性和压性断裂带控制下,地下水由东向西,西南流。在形成冰丘及其演变过程中,其水头

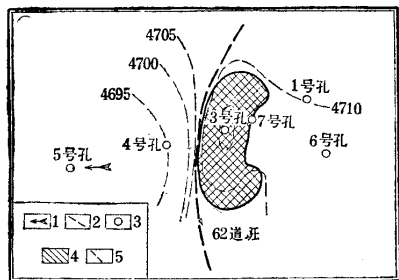


图3 62道班冰丘附近等水位线图
(比例尺1:5000)

(1)箭头表示地下水流向;(2)等水位线;(3)钻孔位置,数字代表钻孔编号;(4)冰丘范围;(5)断裂面

变化由东部的10%在冰丘附近变为200%,在张扭性断裂带附近突变为500%,向西逐渐变为200%,这一特征表明,张扭性断裂带成为冻结层下水的迳流上升排泄的主要通道。由于冰丘的形成及演变过程中能量的释放引起水头值的急剧变化,冰丘附近的冻结层下水向厚层地下冰迁移,同时造成局部的,剧烈地改变着区域流向的总特征。

62道班冰丘的水化学特征表明(见表1):

(1)地下水在碱性条件下处于盐分的富集趋势。这是由于在粘土矿物,胶体中较高的盐分得以分解,交替置换的结果,对此冰丘上游,中心及下游,沿地下水流向出现明显的增加趋势。

(2)地下水处于非常缓慢的迳流环境中,使有机质得以分解,分离出CO₂、N₂、H₂S等气体。由于PH值超过8.3—8.4,地下水中HCO₃离子也部份地转化为CO₂气体,使其气体含量增加。冰丘的上游地区经火成岩体同样游离水中的CO₂,结果在冻土层连续分布的条件下气体成份继续聚积,成为冰丘强大压力,即地下水的能量逐增,

冰丘附近水化学特征

表1

| 孔号 | 矿化度 (克/升) 及水化学类型 | 离子间毫克当量比例关系特征 | | | | | $\frac{Fe^{+++}}{Fe^{++}}$ | PH值 | 微量元素(1) (毫克/升) | | | 微量元素(2) (毫克/升) | | |
|-----|------------------------|-------------------------|-------------------|---------------------|-------------------|--------------------------|----------------------------|------|-------------------|-----------------|-------|-------------------|-----------------|-----------------|
| | | $\frac{rHCO_3}{rCa+Mg}$ | $\frac{rNa}{rCl}$ | $\frac{rSO_4}{rCl}$ | $\frac{rCa}{rMg}$ | $\frac{rCl+SO_4}{rK+Na}$ | | | F | BO ₂ | Cl/Br | NH ₄ | NO ₃ | NO ₂ |
| 6号孔 | 1.46HL—N | $\frac{HCO_3}{Ca+Mg} >$ | > 2 | < 1 | < 1 | < 1 | < 1 | 8.65 | 5.6 | 19.3 | 990 | 1.5 | 0.3 | 0.0 |
| 1号孔 | 2.32HL—N | " | " | " | " | " | " | 8.68 | 0.1 | 40.0 | | 0.4 | 0.6 | 0.7 |
| 7号孔 | 1.68HL—N | " | " | " | > 1 | " | " | 8.65 | 7.0 | 18.0 | | 0.3 | 0.0 | 0.0 |
| 8号孔 | 2.10LH—N | " | > 1 1.36 | " | > 2 | " | " | 8.1 | | | | | | |
| 4号孔 | 3.02LO—N | " | > 1 1.02 | " | " | " | " | 8.3 | 0.0 | 6.1 | 4000 | 5.0 | 0.0 | 0.02 |
| 5号孔 | 2.7LH—N | " | > 1 1.44 | " | " | " | " | 8.5 | 0.4 | 12.3 | | 2.3 | 0.0 | 0.0 |
| 备注 | | | | | | 3号孔 以简分 析资料 | | | | | | | | |

水头递增。

纵观青藏高原腹地大型的多年生冰丘，基本上具备了类似62道班冰丘的那些冻土-地质因素，因此冻结层下水具有较高的能量，并促使冰丘的生成和发育乃至爆炸性冰丘的形成。所不同的只是其规模小大，冰层厚度，数目的多寡。从而其演变特征也趋于一致。

关于多年生冻丘的演变趋势问题

多年生冰丘同任何事物一样，均经历着其发生、发展和消亡的过程。

冰丘的形成和演变过程应从能量的转换关系中分析其内在规律，定量解释，并提出发展趋势，这在没有定点观测资料的情况下，就无法解决这一问题。然而这个问题在未具备上述条件下已经被提出来要求解决，因此撰写此文只是在个别资料和水文地质分析基础上大胆提出看法，以便进行讨论，以求在实践中解决。

冰丘从开始发生到第一期冰丘形成，为

其发展过程中能量转化的第一阶段。此阶段，冻结层下水在强大的能量作用下，沿断裂带进行水分的上移集中，造成地下冰和鼓丘地形，并逐年增大成巨厚冰和大型多年生冰丘。

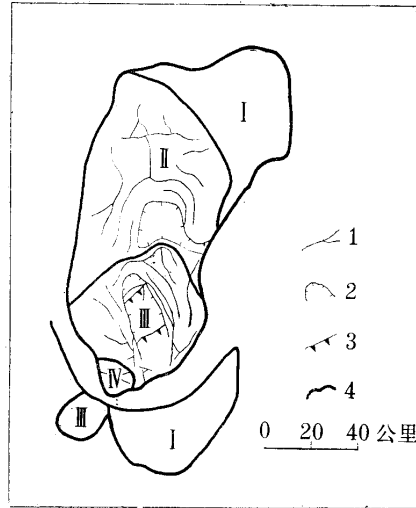


图4 62道班冰丘分期及地貌图

I—IV代表各冰丘期
1.冻张裂隙；2.冰丘塌陷；3.洼陷阶段；4.各期冰丘界线

各期冰丘特征说明

表2

| 冰丘期 | 代号 | 形态特征描述 |
|-----|-----|--|
| 第一期 | I | 分布范围最大，长180余米，宽80余米，半月形向西突出，遗迹仅残存于南北两端，上复土层较密实，前缘尚有消融而形成的泥流阶地，其上为草皮及植被所复，基本处于稳定状态，推测高度15米以上。 |
| 第二期 | II | 分布仅次于第一期，长120余米，宽60余米，半月型向西突出，并与第一期陡坡相接，在分界处多有小冲沟发育，丘内尚有厚层地下冰，由冻胀融沉形成的放射状，环状断裂缝仍较清楚，仍可见到沿被充填的裂缝发育的线状小沟，为暖季地下冰融化水的排泄通道，陷落最剧部分已下沉9米，形成直径24米，向东开口的洼地。 |
| 第三期 | III | 分布范围较第二期小，长60余米，宽50余米，北端与前紧连，且以一小阶台相接，丘内有厚层地下冰，上复土层松散，放射状，环状裂隙清晰，并见到呈迷瓦式外倾的冰缝，在裂面上可见到由于下陷地下冰相互摩擦留下的光滑小沟槽陷落，坍塌成向西南敞开的簸箕状洼地，在洼陷内有两个阶坎，每坎高0.5米。 |
| 第四期 | IV | 分布范围较小，呈直径18米，高约1.5米的盾状小丘，位于第一、三期冰丘间的冲沟北侧，北端与第三期冰丘以高约3米的陡坎相接，丘上土层疏松，冰胀裂缝纵横，几成网状，并将土层分割成直径20—50厘米的块体，目前处于消融阶段。 |

从冰丘的形态与地下水的关系中看出，冰丘的长轴方向基本上与地下水流向相垂直，长轴的弯曲程度与断裂带的展布方向有关，冰丘沿着其展布方向发展。

任何一个构造活动都是与地应力这一能量的集中和释放相联的，挽近构造的差异性上升活动过程是继续释放能量的过程。联系到冰丘的形成过程中通过地下水这一介质不断释放能量的特征，可以理解为其能量在不断地消耗，并转化为冰丘的生成和发展。因此在一个相对稳定的地质历史时期内，对冰丘来说随着冰丘历史的进程，不断地消耗能量的方向发展，从而决定了自第一期冰丘以来，尽管发生了周期性的多次变化，仍沿着消亡的方向发展和演变。而这一过程又是沿着其薄弱的环节——南南西方向发展。但由于所处的地形地貌条件和构造线方向的不同，其后期的冰丘在第一期冰丘内所发展的部位也不尽相同，又因当地的具体环境有所不同，有的形成冰丘群，有的伴随大量的泉华堆积物，但冰丘的成因及其冰丘期的周期性和演变趋势等在调查范围内有些共同特征，随着调查研究工作的深入将会发现不同类型和不同特点。

从62道班冰丘的调查正如图4所示，按其形态特征，可以划分为冰丘发展演变的四期活动情况。

关于冰丘发展的趋势 分析问题

在冰丘的消亡过程中有没有新的活动？由于工作条件所限，只能在已有资料的基础上提出一点看法。

从水文地质条件的分析中看出，在冻土

发育的高原腹地有利于汇水的断陷盆地构造，张扭性断裂带以及冻结层下水的存在是客观事实，关键的问题是地下水的能量并没有耗尽，仍然存在增长其能量的部分因素，归纳起来：

(1) 冻结层下水水头值的变化有些地方仍然很高，高出平均水头值，特别是7号钻孔水头值远大于1号孔。表明7号孔附近地下水的能量并未全部释放。

(2) 水化学特征表明，1、4号孔附近盐分在富集，有机体的分解过程还在进行，尤其是1号孔附近这一分解过程较明显。

因此考虑到4号孔附近的能量通过第四期冰丘继续释放的条件下，1号孔附近地下水中气体成分仍继续增加，由7号孔附近高水头的能量向1号孔方向传递，因此在1号孔附近可能向着沿断裂带展布方向蓄积能量。

能否发生新的冰丘就涉及整个区域性气候的演变情况和挽近构造活动情况，目前的资料还未显示出这一情况的改变。

从生成冰丘的规律性中可以寻找其防治途径，那就是有计划地在这些断裂带附近开挖人工坑道，把高能量的冻结层下水引出来释放其能量、或者用爆破冰丘疏通地下水排泄通道释放其能量，也可采用人工灌注水，迫使地下高能量趋于分散，都可以消除冰丘的危害。

在编写本文时得到青海省第一水文地质工程地质队同志们热情支持和提供有关62道班冰丘的资料，得到了地质力学所许贵森、水文地质工程地质研究所翟荣庭等工程师的帮助，对此表示感谢。