·水文地质·环境地质·

青藏高原北部铁路沿线移动冰丘的特征及其灾害效应

吴珍汉,胡道功,吴中海,叶培盛,刘琦胜
WU Zhen-han, HU Dao-gong, WU Zhong-hai, YE Pei-sheng, LIU Qi-sheng

中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081
Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, *China*

摘要:青藏高原北部常年冻土地区部分断裂破碎带发育移动冰丘。青藏铁路沿线典型移动冰丘包括不冻泉活动断裂诱发移动冰丘、乌丽活动断裂诱发86道班移动冰丘、二道沟盆南断裂破碎带桥梁施工诱发雅玛尔河移动冰丘、断裂破碎带桥基施工诱发83道班移动冰丘和乌丽盆北断裂破碎带DK1202+668大桥中部桥墩施工诱发85道班移动冰丘。移动冰丘的形成演化与活动断裂、地下水运动、气温变化存在动力学成因联系,是青藏高原北部常年冻土地区内动力与外营力相互耦合的标志和产物。移动冰丘能够穿刺公路路基、拱曲破坏涵洞结构、导致桥梁墩台破裂和输油管道拱曲变形,产生显著的灾害效应,成为高寒环境地质灾害的重要类型。采用适当的工程措施,通过疏导、排放地下泉水,能够有效地防治移动冰丘及灾害效应。

关键词:移动冰丘;地质灾害;活动断裂;青藏铁路沿线
中图分类号:P931.4;X43　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-2552(2006)01~02-0233-11

Wu Z H, Hu D G, Wu Z H, Ye P S, Liu Q S. Migrating pingos and their hazard effects in the vicinity of the railway across the northern Tibetan Plateau. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(1-2):233-243

Abstract: Migrating pingos are developed in some fracture zones in permafrost areas of the northern Qinghai-Tibet Plateau. Those typical ones along the Qinghai-Tibet Railway include the migrating pingo induced by the Budongquan active fault, migration pingo induced by the Wuli active fault near the 86th highway maintenance station, Yamar River migrating pingo induced by construction of a bridge in a fracture zone in south branch active faults of the Erdaogou basin, migrating pingo induced by construction of the bridge foundation in a fracture zone at the 83rd highway maintenance station and migrating pingo induced by construction of bridge piers in the central segment of the DK1202+668 railway bridge in a fracture zone at the 85th highway maintenance station north of the Wuli basin. The formation and evolution of these migrating pingos have dynamic genetic relation to active faults, groundwater movement and temperature change. They are the marker and product of coupling of the internal and external agents in permafrost areas on the northern Qinghai-Tibet Plateau. The migrating pingos can pierce the foundation of the highway, arch up and destruct the culverts and cause breaking of bridge piers and arched deformation of oil pipelines, producing serious hazard effects on engineering works. They are an important type of geological hazard in the high-altitude and cold environment. Appropriate engineering measures such as drainage of underground springwater, can effectively help prevent and control migrating pingos and reduce geological hazards.

Key words: migrating pingo; geological hazard; active fault; Qinghai-Tibet Railway

青藏高原处于印度大陆俯冲产生的强烈挤压环境,是中国大陆现今构造活动最强的地区,发育不同性质的活动断裂[1-5],频频发生7级以上的强烈地震[6,7]。青藏高原的地壳变形、断裂运动、地震活动与青藏高原的形成演化关系密切,成为国际地球科学领域广泛关注的前沿性科学问题[7-10]。但对活动断裂与地表环境耦合产生的移动冰丘,则缺乏必要的研究工作。

收稿日期:2004-06-11;**修订日期**:2005-02-16
地调项目:中国地质调查局国土资源调查项目《青藏铁路沿线活动断层调查与地应力测量》(1212010340302)与科技部2001CB711001子项目成果。
作者简介:吴珍汉(1965-),男,博士,研究员,从事青藏高原区域地质调查、活动断层勘测与大陆动力学研究。E-mail: wuzhenhan@sohu.com

作为地球表面最大、最高的大陆高原,青藏高原平均海拔高度达4500~5000 m,发育特殊的大陆性高寒气候环境,低温、干燥、空气稀薄、昼夜温差大、紫外线强。唐古拉山以南地区年平均气温约7~8℃,冬季平均气温约-4℃。唐古拉山以北地区年平均气温约-4~-5℃,冬季平均气温约-10~-15℃;尤其在寒冬季节,白天气温低达-20~-35℃,夜晚气温低达-30~-40℃。青藏高原北部地表常年处于冰冻环境,形成厚度数米至百余米的冻土层[11~13];冬季广泛发育不同形态、不同规模、不同特点的冰椎或冰丘,泛称为冰丘,沿部分断裂破碎带发育移动冰丘[5]。

因为冰丘能够对铁路、公路、输油管道、通讯光缆等线路工程和房屋、桥梁、涵洞产生不同程度的影响和灾害效应,因此颇受国内外地质学家和工程地质学界的关注。国外地质学家对高纬度地区的冰丘成因和融冻效应进行了观测和研究,如Bostrom[14]论述了常年冻土区的地下冻融与地表变形的关系;Thom[15]通过观测地表裂隙-冻融塌陷-冰丘演化的相互关系,分析高纬度地区小型冰丘的形成机理;Embleton等[16]和Mackay[17~19]认为较大规模的冰丘发育与地下冰层膨胀、地下水压力变化存在成因联系;Barosh[20]在高纬度地区观测到寒冬季节因不均匀冻胀产生的冰层爆破(froquake)现象;Hamilton等[21]对阿拉斯加山岳冰丘进行了观测;Yoshikawa等[22]对地球极区冰丘的生长发育周期进行了观测和分析。但国外对中低纬度地区高寒环境的冰丘和冻胀灾害研究相对较少。

中国地质学家于20世纪70年代后期至80年代初期对青藏高原常年冻土地区的冰丘进行了比较详细的野外勘测和研究工作,积累了宝贵的观测资料[11]。胡海涛等[23]将青藏高原北部冻胀丘划分为冰椎、冰丘、爆炸性充水鼓丘3种不同类型;王邵令[24]对清水河两岸冻胀丘分布规律和控制因素进行了观测和分析;樊溶河等[25]曾观测研究唐古拉山南侧央尕尔纳茸盆地地下水运动与冻胀丘分布的关系;尚建义等[26]探讨了青藏公路62道班冰丘的形成条件和演化过程。胡海涛等[27]、易明初[28]、郭东信[14]、吴珍汉等[29]分析了青藏高原北部冰丘-构造相互关系及工程影响。前人在青藏高原划分的冻胀丘、冰锥、冰丘,对应于同一个英文名称"pingo",统称为冰丘[5]。

尽管前人对不同地区冰丘的形态、产状、分布和成因进行过大量的研究工作,但迄今为止,国内外尚缺乏对移动冰丘的详细观测资料,还没有文献系统地论述移动冰丘的灾害效应和工程影响。本文在青藏铁路沿线活动断裂勘测和断裂诱发地质灾害跨季节对比观测的基础上,以青藏高原北部常年冻土区典型移动冰丘为实例(图1),分析断裂破碎带移动冰丘的地质特征、灾害效应和演化过程,探讨移动冰丘的控制因素和形成机理,希望能够为青藏铁路病害"诊治"和地质灾害防治提供科学依据。

1 不冻泉移动冰丘及灾害效应

不冻泉移动冰丘发育于北东走向的断陷谷地北部,处于北东向不冻泉活动断裂(BQF)与东西向断裂的交叉复合部位(图1)。不冻泉活动断裂(BQF)西南段错断晚更新世砂土和砾石层(图2-b),断裂北东段切割晚更新世泉华台地(图2-a),在泉华台地形成北东向和近东西向的地表破裂。沿BQF断裂破碎带,夏季形成线性分布的上涌泉水,冬季形成串珠状排列的冰丘和移动冰丘(图3)。

不冻泉移动冰丘在20世纪80—90年代青藏公路改扩建期间远离青藏公路。自2000年冬季至2001年春季开始形成规模较小的单个冰丘,发育于青藏公路东部边缘,冰丘呈圆锥状,直径约1.5 m,高约80 cm(图3-a、b);冬季冰丘穿刺青藏公路路基,导致路基局部拱曲变形(图3-a、b),夏季冰丘消融,路基变形不显著。自2003年冬季至2004年春季,不冻泉移动冰丘的位置、规模和形态均发生显著变化;垂直断裂走向,冰丘中心位置向东移动6~8 m至青藏公路东侧(图3-e);沿BQF断裂破碎带,冰丘分布范围向北东方向扩展约300 m,形成线性排列的冰丘群(图3-c)。单个冰丘形态均呈椭圆形,长16~20 m,宽6~9 m,高1.2~2.5 m;冰丘长轴走向北东,明显受BQF断裂控制。在2001年3月,不冻泉移动冰丘西侧的青藏公路为平整的柏油路面,未形成明显的路面裂缝(图3-a、b),但2004年3月,不冻泉移动冰丘西侧的青藏公路柏油路面发生显著变形,形成北东走向、长达百余米、宽达10~25 cm的路面裂缝(图3-d),属2003年末至2004年初BQF断裂活动诱发的不均匀冻胀的产物。

不冻泉断陷盆地处于南昆仑活动断裂(SKF)的南侧,现今区域构造活动比较强烈。南昆仑活动断裂(SKF)曾于2001年11月14日发生昆仑山8.1级强烈地震,形成长达400 km、穿切青藏公路的巨型地震破裂带[7];随后在断裂两侧纳赤台—西大滩—不冻泉发生大量震级小于6级的余震,产生大幅度应力调整[30]。2003年冬至2004年春形成的不冻泉冰丘移动(图3-e)和同期发生的青藏公路线性破裂(图3-d),反映不冻泉断裂(BQF)在昆仑山8.1级地震后发生显著活动,断裂活动诱发不冻泉冰丘向北东方向扩展和东向移动(图3-c、d、e)。BQF断裂活动可能与昆仑山8.1级地震后区域构造应力场调整存在成因联系。

不冻泉移动冰丘对青藏公路产生了比较显著的灾害效应。2001年3月观测到的移动冰丘虽然规模较小,但发育于青藏公路东缘,穿刺公路路基,导致局部路基拱曲变形(图3-a、b);但由于冰丘规模较小,而且位置偏离柏油路面,因此对青藏公路产生的灾害效应不甚显著,对公路交通安全的影响不大。2004年3月观测到的移动冰丘虽然规模较大、成群出现、线性排列,但由于冰丘群发育于青藏公路东侧,偏离公路6~8 m(图3-e),因此移动冰丘对青藏公路的路基和交通安全未造成显著影响。尽管如此,2004年3月发现青藏公路东侧的移动冰丘经过涵洞向青藏公路西侧延伸,泉水冻胀和冰丘拱曲导致公路西侧涵洞破裂,涵洞顶板向上隆起12~15 cm(图3-f),产生一定的灾害效应。另外,2004年3月发现BQF断裂活动破坏青藏公路路基的冻土结构,诱发不均匀冻胀变形,产生平行于断裂走向的路面裂缝(图3-d),对公路工程质量和交通

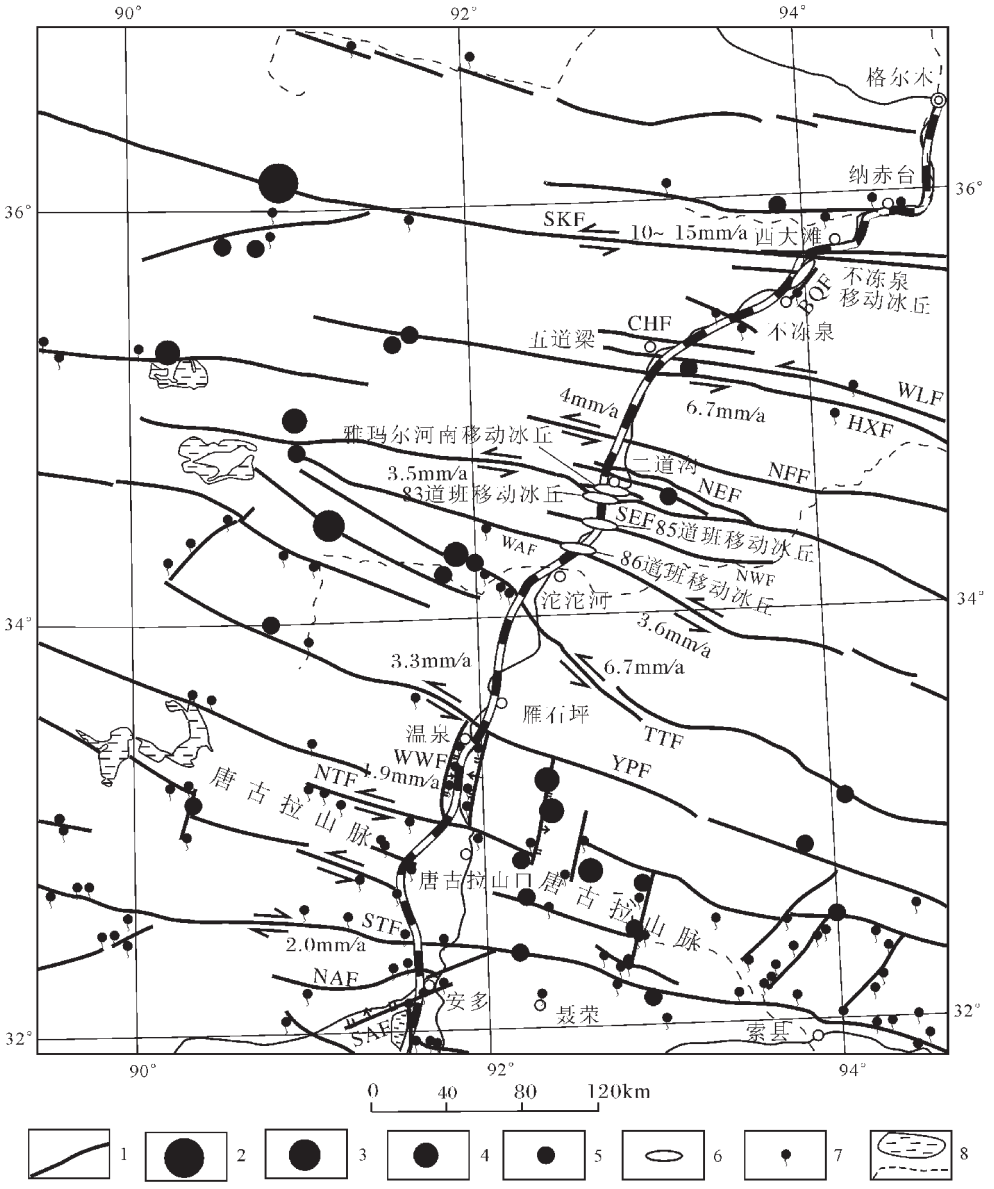

图1　青藏高原北部铁路沿线活动断裂与移动冰丘的分布

Fig.1　Active faults and migrating pingos along the railway across the northern Qinghai-Tibet Plateau

1—活动断裂;2—8级以上地震;3—7~7.9级地震;4—6~6.9级地震;5—5~5.9级地震;6—移动冰丘;7—泉水;8—重要湖泊和主干河流。SKF—南昆仑断裂;BQF—不冻泉断裂;CHF—楚玛尔河断裂;WLF—五道梁断裂;HXF—可可西里断裂;NFF—风火山北麓断裂;NEF—二道沟盆北断裂;SEF—二道沟盆南断裂;NWF—乌丽盆北断裂;WAF—乌丽断裂;TTF—通天河断裂;YPF—雁石坪断裂;WWF—温泉盆西断裂;NTF—唐古拉山北断裂;STF—唐古拉山南断裂;NAF—安多盆北断裂;SAF—安多盆南断裂

运输安全产生不良影响。

2　83道班东侧断裂破碎带铁路桥梁施工诱发移动冰丘及灾害效应

在青藏公路83道班东侧,铁路大桥横穿二道沟盆南活动断裂(SEF),其南分支断层切割第三纪红层和第四系砂砾石层(图2-d)。部分桥墩设置在SEF南分支断层破碎带,桥基施工诱发上涌泉水,冬季产生移动冰丘,命名为83道班移动冰丘(图1)。在2002年1—2月铁路大桥施工前,青藏公路83道班东侧沿二道沟盆南活动断裂(SEF)南分支断层谷地虽然发育冲沟、溪流和构造融区,但夏季和秋季地表水流量较小,冬季仅形成少量地表薄冰,在设计铁路大桥附近不存在厚大冰层

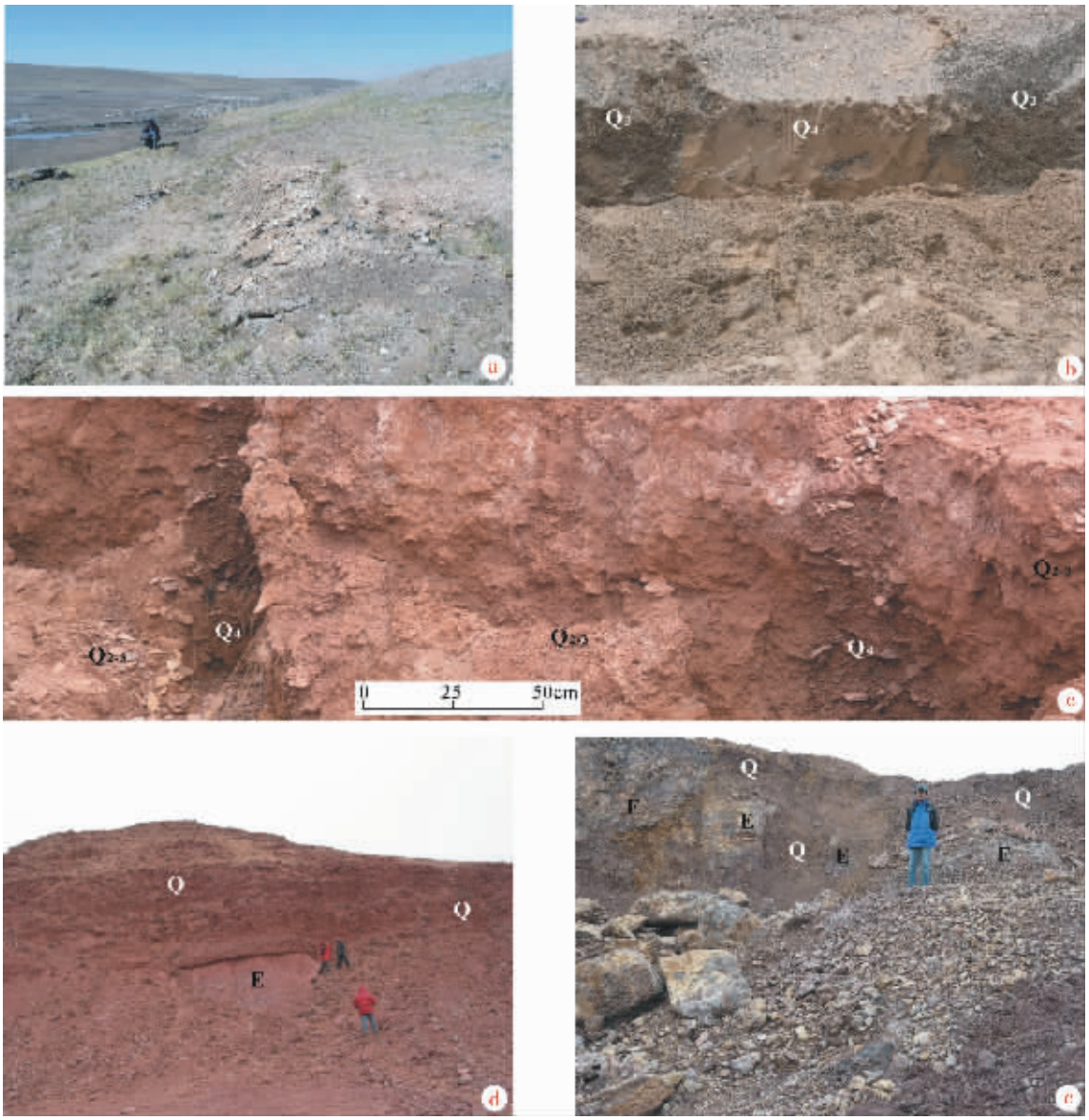

图2 青藏铁路沿线部分活动断裂的野外照片

Fig.2 Photos of active faults along the Qinghai-Tibet Railway

a—不冻泉活动断裂(BQF)北东段错断晚更新世泉华台地(镜头向南东);b—不冻泉活动断裂(BQF)西南段切割晚更新世砂土(镜头向南);c—雅玛尔河南侧SEF分支断层裂缝充填全新世砾石(镜头向北东);d—83道班东侧二道沟盆南SEF分支断层错断第四纪砂砾石层(镜头向东);e—乌丽86道班东侧WAF断裂错断第四纪砂砾石层(镜头向西)。Q—第四系;Q_{2-3}—中上更新统;Q_3—上更新统;Q_4—全新统;E—古近系

和较大冰丘(图4-a)。自2002年夏季开始建设横穿活动断裂SEF的近南北向铁路大桥,部分桥墩建于SEF南分支断层破碎带内部,桥墩地下基础工程施工(即水泥桩基)深入地下约10 m深度, 穿透断层破碎带的富水构造和地下水通道,诱发大流量上涌泉水, 冬季形成厚度约50 cm的大面积地表冰层(图4-b),局部形成较大规模的移动冰丘(图4-c)。在大桥南部, 建于SEF南分支断裂破碎带的桥墩因桥基施工诱发上涌泉水,冬季在地表附近形成高达2.5 m的移动冰丘,冰丘呈圆锥状。2004年3月已经部分消融的冰丘锥顶尚抵达路轨下方的横梁(图4-c),冬季最寒冷时期的冰丘锥顶能够抵达并顶托路轨。如果不采取必要的工程防治措施,铁路建成通车后,在移动冰丘发育部位,SEF断裂活动和机车震动等因素能够诱发更大流量的上涌泉水,冬季形成更大、更高的移动冰丘,影响桥梁工程质量和铁路运输安全,甚至可能造成重大安全事故。根据2004年3月的观测资料,在83道班东侧铁路大桥中部,部分墩台由于地下冰层的冻胀、顶托作用,发生透入

性横向破裂(图4-d),影响墩台的工程质量,威胁桥梁工程的安全。

在雅玛尔河南岸，发现部分铁路桥墩建于二道沟盆南活动断裂(SEF)的北分支断层破碎带,断层穿切第四系砂土,形成断层裂缝,其中充填全新世砂砾石(图2-c)。断层破碎带桥墩施工诱发的上涌泉水汇集于桥墩西侧，冬季形成椭圆形冰丘,称为雅玛尔河南侧移动冰丘(图1、图5)。根据2004年3月野外观测资料,雅玛尔河南岸移动冰丘长8 m,宽4 m,高1.6 m,长轴平行于SEF分支断层,呈近东西走向,发育于墩台西侧(图5)。在移动冰丘顶部,沿冰丘长轴发育宽20~40 cm的冰裂缝,低温泉水沿冰丘顶部冰裂缝流动,向东流向墩台,在墩台西侧冻结形成地表冰层,在墩台部位冬季

图3　不冻泉移动冰丘位置及灾害效应

Fig.3　Location and hazard effects of the Budongquan migrating pingos near the highway

a—2001年3月移动冰丘穿刺青藏公路路基(镜头向南);b—2001年3月移动冰丘穿刺青藏公路路基(镜头向北);c—2004年3月不冻泉公路东侧线性冰丘群(镜头向南);d—2004年3月冰丘西侧青藏公路路面裂缝(镜头向南);e—2004年3月冰丘东移偏离青藏公路(镜头向南);f—冰丘拱曲破坏青藏公路涵洞(镜头向东)

图4 青藏公路83道班东侧SEF南分支断层破碎带桥基施工诱发移动冰丘及灾害效应

Fig.4 Migrating pingo induced by construction of the railway bridge foundation in a fracture zone in the south branch fault of SEF on the east side of the 83rd maintenance station of the Qinghai-Tibet Highway and its hazard effects

a—2002年1-2月桥梁施工前沿SEF断层谷形成少量薄冰(镜头向东);b—SEF断裂破碎带桥基施工诱发大流量上涌泉水经冬季冻结形成大面积地表厚冰(摄于2004年3月,镜头向南);c—SEF断裂破碎带桥基施工诱发移动冰丘(摄于2004年3月,镜头向南);d—SEF断裂破碎带桥基施工诱发的上涌泉水冬季冻胀导致墩台破裂(摄于2004年3月,镜头向东)

形成冻结成冰的泉水坑(图5)。虽然SEF断裂破碎带桥墩施工诱发的移动冰丘在2003年冬季至2004年春季向西偏离墩台,暂不影响墩台工程安全,但移动冰丘东侧的墩台泉坑仍然存在流量不大的上涌泉水,反映墩台下部桩基与断裂破碎带的泉水通道存在密切联系,移动冰丘存在继续向东移动的趋势和迹象(图5)。铁路建成通车后,机车震动和断裂活动等因素能够扩大墩台底部SEF断裂破碎带地下泉水的运移通道,诱发更大流量的上涌泉水,并可能导致冬季冰丘向墩台方向移动,威胁桥梁工程质量和铁路运输安全,产生比较严重的灾害隐患。

3 乌丽85道班断裂破碎带桥基施工诱发泉水涌动及安全隐患

青藏铁路DK1202+668大桥位于青藏公路85道班南侧、青藏公路西侧,设计桥长120 m,横跨近东西走向的乌丽盆北活动断裂(NWF)(图6、图7、图8-a)。在DK1202+668大桥东、西两侧,沿断层谷地夏季发育线性分布的泉水(图6、图8-a),

图5 雅玛尔河南侧SEF北分支断裂破碎带铁路桥基施工诱发移动冰丘(摄于2004年3月,镜头向西)

Fig.5 Migrating pingo induced by construction of the railway bridge foundation in a fracture zone in the north branch fault of SEF south of the Yamar River

泉水含一定浓度的H_2S,属来源较深的低温温泉,冬季发育斜列冰丘群。在DK1202+668大桥施工以前,NWF断层谷地夏季低温温泉和冬季冰丘均偏离设计桥墩(图6),对桥梁安全影响不明显。

对比分析早期工程地质勘探资料[27]和2002年1—2月至2004年3月不同季节的分期观测资料,发现乌丽85道班南侧的DK1202+668铁路大桥中部桥墩建于NWF断裂破碎带。DK1202+668大桥中部桥墩的桩基施工深达37 m,打通了NWF断裂破碎带的低温温泉通道,在墩台下方诱发较大流量的上涌泉水,泉水汇集于桥墩周围基坑,形成较大面积的泉水塘,在深达1~2 m的泉水塘水面,2003年8月观测到多个泉水上涌水柱(图8-b)。如此流量的上涌泉水如果得不到及时疏导和排放,在青藏高原北部冬季的极端寒冷气候环境下能够形成高2~4 m、直径达15~20 m的较大规模移动冰丘(图8-c),对墩台产生非常强大的顶托力,从而破坏桥墩结构,威胁DK1202+668大桥安全,构成重大灾害隐患。

对乌丽85道班南侧NWF断裂破碎带桥墩施工诱发的上涌泉水和灾害隐患,笔者及时以公函方式报送青藏铁路设计部门,即铁道第一勘察设计院,并提出如下防灾建议:①改变桥梁设计:加大横梁长度,加固断裂两侧桥墩,将横梁置于断裂两侧桥墩上,废弃断裂破碎带受移动冰丘威胁的中部桥墩;②疏通温泉泉水:对断裂中心部位桥墩进行工程处理,沿断裂开挖地下排水通道,疏通温泉泉水,防止冬季形成移动冰丘;③铁路适当改线:将85道班铁路向西进行改线处理,避开断裂交叉复合部位温泉集中区,彻底消除移动冰丘对铁路安全的隐患。铁道第一勘察设计院在收到DK1202+668大桥灾害隐患报告后,采纳上述疏排水建议,立即组织技术人员对NWF断裂破碎带桥墩施工诱发的泉水进行地下工程疏导。通过开挖地下排水通道,自北向南疏通墩台下方断裂破碎带的低温泉水,并在墩台与桩基接触部位铺设隔水层,防治冬季形成威胁桥梁安全的移动冰丘,收到良好的工程防灾效果(图8-d)。

4　乌丽86道班移动冰丘及灾害效应

乌丽盆南发育近东西走向的活动断裂(WAF),切割、错断晚更新世—全新世砂砾石层(图2-e)和现代水系,在青藏公路86道班东、西两侧形成比较开阔的断层谷地,成为地下水运移、富集的良好场所,夏季形成构造融区和低温温泉,冬季形成不同规模的冰丘或冰丘群(图9)。根据2001—2004年不同季节的对比观测资料,发现沿乌丽WAF断裂发育较大规模的移动冰丘(图9),命名为86道班移动冰丘。

乌丽86道班公路东侧冰丘移动方向不是平行于WAF断裂破碎带,而是斜交或垂直于断裂破碎带的走向移动,冰丘大小、形态和轴向在不同年代呈现不同特征。如2001年3月发现乌丽86道班东侧冰丘规模较小(图9-a),高度小于80 cm,呈椭圆形,长轴呈近东西走向,平行于WAF断层谷;2002年1—2月,乌丽86道班东侧冰丘中心位置向南西迁移约7 m,移至公路涵洞东约4~8 m处,长轴走向N60°E,宽8 m,长15 m,高2~2.5 m(图9-b)。由于乌丽86道班移动冰丘位于人口稀少的青藏高原北部,输油管道铺设后没有显著的人工活动扰动迹象,通讯光缆埋设地点距离输油管道较远,当时青藏铁路建设尚未全面展开,基本排除了2001—2002年断裂破碎带人类活动诱发移动冰丘的可能性。据此推断,斜交WAF断裂破碎带发生的乌丽86道班冰丘移动,其形成原因应归于自然营力

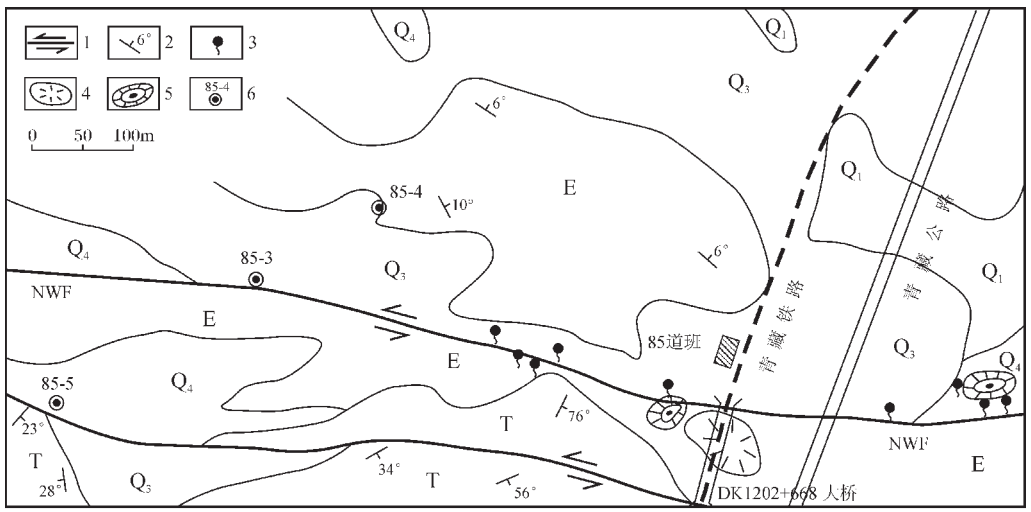

图6　乌丽85道班地质图(据参考文献[27]修编)

Fig.6　Geological map of the 85th maintenance station of the Qinghai-Tibet Highway and its vicinity near Wuli

1—走滑断裂;2—地层产状;3—泉水;4—泉华丘;5—冰椎消融凹坎;6—钻孔及编号;
Q_4—全新世细砂;Q_3—晚更新世砂碎石;Q_1—早更新世灰绿色泥岩;E—古近纪含砾泥岩;
T—三叠纪黄绿色砂岩、页岩、泥灰岩;NWF—乌丽盆北活动断裂

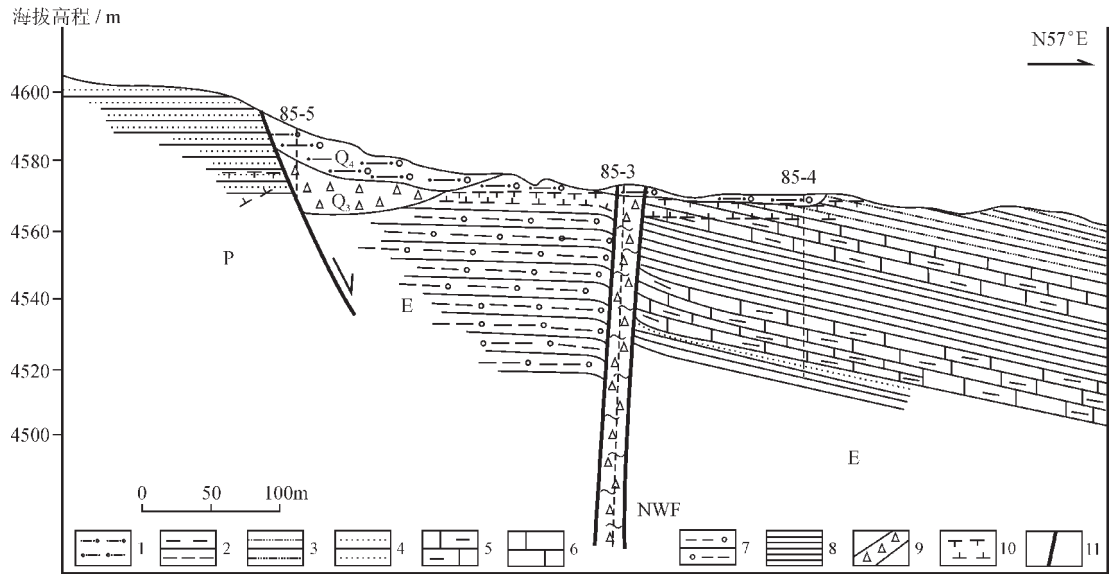

图7 青藏公路85道班西侧地质剖面[27]

Fig.7 Geological section across the west side of the 85th maintenance station of the Qinghai-Tibet Highway

1—泥质砂砾岩;2—泥岩;3—泥质粉砂岩;4—砂岩;5—泥质灰岩;6—灰岩;7—含砾泥岩;8—页岩;9—断层角砾岩;10—冻土界线;11—断层面;85-3、85-4、85-5—钻孔及编号(位置见图6);P—二叠系;E—古近系;Q_4—全新统;NWF—乌丽盆北断裂

作用;而WAF断裂活动是改变断裂破碎带结构和地下水运移通道、形成上涌泉水局部富集、冬季隔水层底部泉水冻胀形成移动冰丘的主要原因。

乌丽活动断裂(WAF)破碎带发育的86道班移动冰丘由于偏离青藏公路和远离青藏铁路,对公路和铁路均未造成显著影响,但对格尔木—拉萨输油管道产生显著破坏,导致长达15 m的地下输油管道发生约2 m高度的拱曲变形(图9-c、d)。乌丽86道班东侧移动冰丘在2001年冬季至2002年春季生长发育期间,冰丘内部富集的上涌泉水因逐步冻结和体积膨胀,产生显著的顶托效应,导致埋设于地下一定深度的输油管道逐步向上抬升和拱曲变形。

在2002年1—2月,由于天气寒冷,冰丘表层形成厚度较大的冰层,覆盖于拱曲变形的输油管道上方,输油管道并未暴露地表(图9-b)。2002年4—5月,乌丽86道班移动冰丘因天气转暖而发生部分消融,随着顶部冰层的不断融化,拱曲变形的输油管道逐步暴露于地表,而变形管道的下部和周边仍然保留有未完全消融的移动冰丘残余(图9-c)。2002年6—7月,随着气温进一步升高,移动冰丘完全融化,拱曲变形的输油管道全部暴露出来,呈弧形弯曲的输油管道暴露于地表,并在移动冰丘的发育部位形成沼泽泥塘(图9-d)。2002年8月,管道管理部门派技术人员将弯曲变形的输油管道拆除,用新的管道替换,并重新埋设于地下一定深度。为了防止输油管道在冬季再遭冰丘顶托破坏,施工单位采取了必要的工程防治措施,沿断裂破碎带开挖一定深度后,填埋粗大石块和砾石(图9-e),较好地消除了断裂破碎带顶部堆积的隔水砂土层,疏通了地下泉水的上涌通道,避免上涌泉水在断裂破碎带的局部富集,因此2002年冬季和2003年冬季至2004年春季在乌丽86道班公路涵洞东侧没有再次形成冰丘(图9-f),收到良好的防灾效果,输油管道安全得到良好保障,为青藏高原常年冻土区断裂诱发移动冰丘的工程防治提供了有益经验。

经过2004年3月的复测,发现乌丽86道班东侧发育新的冰丘,新形成的冰丘垂直、斜交断裂WAF走向发生向南和北东向迁移。向南迁移28 m形成较大规模的圆锥状冰丘,锥底直径约16 m,锥顶高1.8~2 m。向北东方向迁移20 m,形成圆锥状低矮冰丘,直径12 m,高94 cm(图9-f)。由于2003年冬季至2004年春季WAF断裂诱发移动冰丘的位置偏离公路、铁路和输油管道,因此没有造成显著的灾害效应。

5 移动冰丘形成机理

青藏铁路沿线的移动冰丘,是青藏高原北部常年冻土地区内动力和外营力相互耦合的必然产物,属高寒环境地质灾害的重要类型。青藏铁路沿线发现的典型移动冰丘,主要发育于断裂破碎带(图1)。断裂活动或断裂破碎带工程施工都能够诱发移动冰丘,如不冻泉断裂活动(BQF)诱发不冻泉移动冰丘(图3)、二道沟盆南活动断裂(SEF)分支断层破碎带的桥梁

图8　乌丽85道班DK1202+668铁路大桥中部桥墩施工诱发泉水及工程防治效果

Fig.8　Hot spring induced by construction of piers in the central segment of the DK1202+668 railway bridge at the 85th highway maintenance station and results of its prevention and control

a—乌丽NWF断层谷与低温温泉(摄于2003年7月,镜头向东);b—DK1202+668中部桥墩施工诱发的大流量上涌泉水汇集形成泉水塘(摄于2003年8月,镜头向东);c—如果不采取工程排放措施,DK1202+668中部桥墩施工诱发的泉水冬季冻结可能形成的移动冰丘形态;d—DK1202+668中部桥墩施工诱发泉水经地下工程疏导排放的效果,圆形坑表示地下引流工程位置(摄于2004年3月,镜头向南)

施工诱发雅玛尔河移动冰丘(图5)和83道班移动冰丘(图4)、乌丽盆北断裂破碎带(NWF)桥梁施工诱发85道班移动冰丘(图8)、乌丽断裂活动(WAF)诱发86道班移动冰丘(图9)。

青藏高原北部移动冰丘的形成演化与活动断裂、地下水运动、气温变化存在动力学成因联系。在印度大陆北向俯冲产生的强烈挤压构造环境中[31],青藏高原现今地壳运动非常强烈[9],很多断裂现今具有不同程度的构造活动性[32]。断裂粘滑、蠕滑或地震触发均能够产生新的破裂或裂隙,切割并破坏地下冰层、地表冻土和浅部隔水层,从而改变断裂破碎带的结构,形成地下水运移的新通道或地下水富集的新场所,夏季沿新生构造裂隙形成新的泉水露头,冬季在新生破裂部位产生新的冰丘,形成断裂活动诱发移动冰丘。通过不同年份跨季节对比观测断裂活动前后泉水(夏季)或冰丘(冬季)的发育部位,能够很好地确定泉水(夏季)和冰丘(冬季)空间位置沿断裂破碎带的迁移规律,如断裂活动诱发的不冻泉移动冰丘(图3)、乌丽86道班移动冰丘(图9)。

断裂破碎带的人类活动如工程施工也能够破坏地表冻土层和隔水层的结构,改变断裂破碎带的地下水运动方向,产生新的地下水运移通道,形成地下水新的富集空间,夏季诱发不同流量的上涌泉水,冬季形成移动冰丘。工程施工深度越大,对断裂破碎带冻土结构和地下水状态的扰动越强,诱发上涌泉水的流量和产生移动冰丘的规模也越大。如青藏铁路DK1202+668大桥中部桥墩的桥基施工,在NWF断裂破碎带内部构建支撑承台的4个桩基,钻探深度达37 m,远远超过NWF断裂内部冻土层厚度和地表隔水层深度,从而大幅度改变了断裂破碎带的泉水运移方向和富集部位,诱发较大流量的上涌泉水,在桥基周围形成新的泉眼和泉水湖塘(图8-b);如果不及时采取合理的地下工程对上涌泉水进行有效的疏导和排放,冬季将形成较大规模的移动冰丘(图8-c),威胁桥梁工程和铁路运输的安全。断裂破碎带桥墩施工诱发的移

图9 乌丽86道班活动断裂诱发移动冰丘及工程危害

Fig.9 Migrating pingo induced by active faults and its hazard effect on engineering works at the 86th highway maintenance station near Wuli

a—2001年3月小冰丘(镜头向东);b—2002年1-2月较大规模移动冰丘(镜头向东);c—2002年5月部分消融后残留冰丘顶部露出拱曲变形的输油管道(镜头向东);d—2002年7月移动冰丘完全消融后遗留拱曲变形的输油管道(镜头向西);e—2002年8月经过工程治理的移动冰丘遗迹(镜头向东);f—2004年3月在治理现场南北两侧新形成的移动冰丘(镜头向南)

动冰丘实例还有雅玛尔河南侧移动冰丘(图5)和83道班西侧移动冰丘(图4)。

由于断裂破碎带岩石松散,冻土厚度较小,地表隔水层较薄,即便断裂不发生新活动,铁路建成通车后重型机车运行产生的桥墩振动也能够对冻土结构产生一定的扰动,影响地下水的运移和排泄途径;甚至疏通地下水上涌通道,导致浅层泉水局部富集或溢出地表,冬季冻结形成移动冰丘。目前尚缺乏青藏高原铁路机车振动诱发移动冰丘的实例,但在铁路运营期间应注意相关观测与研究工作。另外,在楚玛尔河也发现冰丘群向东迁移的现象,2001年春季冰丘群主要发

育于新公路大桥附近,2002年冰丘群向东移至铁路大桥两侧,2004年春季冰丘群主要发育于铁路大桥东侧3~5 km处。但由于楚玛尔河移动冰丘位于沿断裂破碎带发育的现代河谷和河漫滩,冰丘移动可能与断裂活动存在密切关系,也可能与楚玛尔河的地表径流变化存在成因联系,有待于更多观测资料的检验。

参考文献:

[1]Tapponnier P, Molnar P. Active faulting and tectonics of China [J]. Journal of Geophysical Research, 1977, 82: 2905-2930.

[2]Molnar P, Tapponnier P. Active tectonics of Tibet[J]. Journal of Geophysical Research, 1978, 83: 5361-5375.

[3]Armijo R, Tapponnier P, Han T. Late Cenozoic right-lateral strike-slip faulting in southern Tibet[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94: 2787-2838.

[4]Kidd W S F, Molnar P. Quaternary and present active faults of Lhasa-Golmud of the Tibetan Plateau[J]. Roy. Soc. London. A, 1990, 327: 332-352.

[5]Wu Zhenhan, Barosh P J, Hu Daogong, et al. Hazards posed by active major faults along the Golmud-Lhasa railway route, Tibetan Plateau, China [J]. Engineering Geology, 2004, 74: 163-182.

[6]吴章明.西藏高原震中分布与活动断层[J].地震研究,1992,15(2): 57-64.

[7]Lin Aiming,Fu Bihong,Guo Jianming,et al. Co-seismic strike-slip and rupture length produced by the 2001 Ms 8.1 Central Kunlun Earthquake[J]. Science, 2002, 296: 2015-2017.

[8]Tapponnier P, Xu Z, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibetan Plateau[J]. Science, 2001, 294: 1671-1677.

[9]Wang Qi, Zheng Peizhen, Freymueller J, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements[J]. Science, 2001, 294: 574-577.

[10]Taylor Michael, Yin An, Ryerson J, et al. Conjugate Strike-slip faulting along the Bangong-Nujiang suture zone accommodate coeval east-west extension and north-south shortening in the interior of the Tibetan Plateau[J]. Tectonics, 2003, 22 (4): 1029-1044.

[11]Cheng Guodong. Progress of research on permanent freezing and underground ice of high elevation areas[J]. Bulletin of Science of China, 1990, 35(9): 1441-1443.

[12]Cheng Guodong, Huang X, Kang X. Recent permafrost degradation along the Qinghai-Tibet Highway[A]. In: Proceedings of the 6th International Conference on Permafrost 2 [C]. 1993. 1010-1013.

[13]郭东信.地质构造对多年冻土的影响[J].地理科学,1985,5(2): 97-105.

[14]Bostrom R C. Water expulsion and pingo formation in a region affected by subsidence [J]. Journal of Glaciaology, 1967, 61: 568-572.

[15]Thom G. Disruption of bedrock by the growth and collapse of ice lenses[J]. Journal of Glaciology, 1978, 20: 571-575.

[16]Embleton C, King C A M. Glacial and periglacial geomorphology[M]. St. Martin's Press, New York, 1968. 603.

[17]Mackay J R. Pingos of the Pleistocene Mackenzie Delta[J]. Geographical Bulletin, 1962, 18: 21-63.

[18]Mackay J R. Pulsating pingos, Tuktoyaktuk Peninsula, N. W. T.[J]. Canadian Journal of Earth Science, 1977, 14: 209-222.

[19]Mackay J R. Some mechanical aspects of pingo growth and failure, western Arctic coast, Canada[J]. Canadian Journal of Earth Science, 1986, 24: 1108-1119.

[20]Barosh P J. Frostquakes in Ncw England[J]. Enginecring Geology, 1999, 56: 389-394.

[21]Hamilton T D, Obi C M. Pingos in the Brooks Range, northern Alaska, U.S.A.[J]. Arctic and Alpine Research, 1982, 14: 13-20.

[22]Yoshikawa K, Nakamura T. Pingo growth ages in the delta area, Advendalen, Spitsbergen[J]. Polar Record, 1996, 32: 347-352.

[23]胡海涛,任国林,孙存煜.青南—藏北高原多年冻土区近代冻融物理地质现象的类型及其特征[A].见:地质矿产部青藏高原地质文集编委会主编.青藏高原地质文集(5)[C].北京:地质出版社,1982.1-112.

[24]王邵令.青藏高原清水河两岸的冻胀丘[J].冰川冻土,1981,3(3): 58-62.

[25]樊溶河,袁成林.藏北高原央尕尔纳茸谷地构造复合部位泉水和冰丘的形成分布规律[A].见:地质矿产部青藏高原地质文集编委会主编.青藏高原地质文集(5)[C].北京:地质出版社,1982.52-57.

[26]尚建义,丁家光.青藏公路62道班冰丘的形成条件及其发展规律[A].见:地质矿产部青藏高原地质文集编委会主编.青藏高原地质文集(5)[C].北京:地质出版社,1982.113-118.

[27]胡海涛,许贵森.青南—藏北高原的构造体系及其对地下水的控制[A].见:地质矿产部青藏高原地质文集编委会主编.青藏高原地质文集(5)[C].北京:地质出版社,1982.1-40.

[28]易明初.青藏线(格尔木—不冻泉)晚近构造及其对道路工程建设的影响[A].见:地质矿产部青藏高原地质文集编委会主编.青藏高原地质文集(5)[C].北京:地质出版社,1982.119-129.

[29]吴珍汉,吴中海,张永双,等.青海西南部乌丽活动断裂系的地质特征及灾害效应[J].地质通报,2003,22(6):437-444.

[30]Liao Chunting, Zhang Chunshan, Wu Manlu, et al. Stress Change near the Kunlun Fault before and after the Ms 8.1 Kunlun Earthquake[J]. Geophysical Research Letter, 2003, 30 (20): 2027-2030.

[31]Zhao W, Nelson K D and Project INDEPTH Team. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet[J]. Nature, 1993, 366: 557-559.

[32]吴珍汉,叶培盛,吴中海,等.青藏铁路沿线活动断裂的灾害效应[J].现代地质,2003,17(1):1-7.