

文章编号:1004-4574(2012)02-0142-08

多年冻土区冻融灾害风险性评价

张中琼¹, 吴青柏¹, 周兆叶²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要:青藏高原多年冻土区由于自然环境变化和人为活动的影响, 不少区域存在如热融滑塌、冻胀丘、融沉、冻胀等与冻土变化相关的冻融灾害。冻融灾害的存在与发展给冻土区环境与开发带来极大影响。在广泛现场调查和查阅相关资料的基础上, 分析了各种灾害的形成机制以及冻融灾害的主要影响因素。结合地质灾害形成机理和多年冻土区工程建设的实际情况, 确定了以岩土性质、活动层厚度、植被覆盖度、坡度、海拔、纬度为内因, 年平均气温变化、人为活动为外因的评价模式。评价结果表明, 整个青藏高原在现状条件下以中低风险性为主。中高风险区主要分布在年平均地温较高、人类活动强度较大的区域。

关键词:多年冻土; 灾害; 风险; 评价

中图分类号: P694

文献标志码: A

Risk assessment of freeze thawing disaster in permafrost zone

ZHANG Zhongqiong¹, WU Qingbai¹, ZHOU Zhaoye²

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute; CAS, Lanzhou 730000 China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute; CAS, Lanzhou 730000 China)

Abstract: Because of the impact of environment change and human activities, some part of the Qinghai-Tibet permafrost areas exist freeze-thawing disasters related to the permafrost change, such as the thaw slumping, frost heaving, thaw subsidence, frost boil and so on. The existence and development of freezing and thawing hazards have a significant effect on the permafrost environment and economic development. This study identified the main types of geological hazards of permafrost zone and analyzed the formation mechanism of various disasters and their main factors based on field investigation and consulting relevant information. Combining geological hazards mechanism with the actual situation of engineering construction in permafrost regions, an evaluation model that takes geotechnical properties, active layer depth, vegetation coverage, slope, elevation, and latitude as internal factors, and annual mean temperature changes, human activities as external factors, was determined. Evaluation's results show that Qinghai-Tibet Plateau is mainly in medium-to-low risk in the current conditions. Medium-to-high risk areas are mainly distributed in areas where the average ground temperature is relatively higher, and intensity of human activity is relatively stronger.

Key words: permafrost; disaster; risks; assessment

收稿日期: 2010-09-14; 修回日期: 2011-01-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB951402); 中国科学院重要方向群项目(KZCX2-YW-Q03-08); 国家杰出青年基金项目(40625004)

作者简介: 张中琼(1984-), 女, 博士研究生, 主要从事特殊土工程地质研究. E-mail: zhongqionghao@163.com

多年冻土区冻融灾害主要由冻土冻结和融化过程岩土体热力学稳定性变化所引发的特殊地质灾害。冻土区地质灾害的发生发展与冻土的工程性质密切相关,冻土工程性质的不可逆性加剧了冻融灾害的发生和发展。由于气候变暖以及多年冻土区人为活动强度日益增强的影响,多年冻土区冻融灾害受到广泛重视。

国内外对灾害的研究历史非常久远。20世纪60年代以前,地质灾害的研究主要限于灾害机理及预测研究,重点调查分析灾害形成条件和活动过程^[1]。主要是以美国 Petak 和 Atkission^[2]所著的《自然灾害风险评估与减灾对策》为代表,该书系统阐述了自然灾害风险评估的基本理论和方法,把灾害风险评估内容概括为风险辨识、风险估算和风险评价3个相互联系的组成部分。1984年,联合国教科文组织的一项研究对比计划中,美国滑坡专家 Varnes 提出了自然灾害风险评估的基本概念和模式^[3]。在单类自然灾害风险研究不断发展的同时,综合性自然灾害风险研究也开始起步。于光远、马宗晋、高庆华、张业成、黄崇福、于庆东等对自然灾害风险特征、风险要素、指标体系、评价模型等进行了广泛探索,使自然灾害风险评估理论与方法得到不断发展丰富^[4-9]。冻土地质灾害研究起步较晚,周幼吾^[10]在《中国冻土》中对多年冻土斜坡失稳进行划分。牛富俊^[11]对青藏高原的斜坡失稳类型和变形特征进行了描述。余绍水等^[12]讨论了影响青藏铁路建设的不良冻土现象,其中离线路较近的冻融灾害的发育对路基稳定性构成一定的威胁。刘建厚等^[13]从影响横贯青藏高原的±500kV输电线路选线定位的因素出发,分析了热融湖塘等不良冻土现象对冻土区工程选线的影响并提出工程策略。在灾害评估方面:Nelson^[14]以植被、冻土连续性、冻土热物理性质为评价要素分析不同气候变化模式下环北极地区冻土变化后引发的冻融灾害。Oleg Anisimov^[15]以降水、植被、岩土类型、气温等作为评价要素,分析了俄罗斯北部地区在气候变化条件下冻土的融沉变形情况。

青藏高原多年冻土区拥有丰富自然资源,地质环境脆弱,冻融灾害有显著的增强趋势。为了达到防灾减灾的目的,对青藏高原多年冻土区地质灾害的调查和评价是必要的。本文在实地调查分析的基础上,提出了以岩土性质、活动层厚度、植被覆盖度、坡度、海拔、纬度为内因,年平均气温变化、人为活动为外因的冻融灾害风险性评价模式,对青藏高原多年冻土区冻融灾害风险现状进行了区划研究。

1 多年冻土区地质灾害类型

青藏高原北起昆仑山,南至喜马拉雅山,西抵国界,东达横断山脉西部、巴颜喀拉山和阿尼马卿山东南部,青藏高原的腹部分布着大片多年冻土、周边为岛状多年冻土及季节冻土。地势海拔控制和制约青藏高原冻土发育的差异性,服从纬度地带性的一般规律^[10]。青藏高原以高原低山丘陵为主,间有宽阔的盆地和谷地,地貌上属高原湖盆区。湖泊星罗棋布,河流多以湖泊为中心的放射状内流水系,为短小的时令河。

多年冻土区冻融灾害主要由冻土热力学稳定性变化引起的冻胀和融沉,以及伴生的冷生现象引起的地质灾害,如冻胀丘、热融滑塌、冰锥等。其次为地震、泥石流、滑坡、崩塌、水土流失等^[16-19]。伴随融雪活动而发生的,在一些地区形成比较密集的冻融泥石流活动区。各种地质灾害的主要危害作用不同:地震、崩滑流、冻胀、冷拔等突发性地质灾害以直接破坏作用为主;水土流失、冻融泥流等累进性灾害以间接破坏作用和深远危害为主。

(1) 冻胀丘、冰锥

多年冻土区冬季冻结过程中,随着气温的变化地表冻土层逐渐增厚。活动层下伏多年冻土层的低渗透性,使季节活动层中未冻结部位地下水流动受阻。含水层性质由原来的潜水含水层变成承压含水层。当孔隙水压力足够大时,上覆季节冻结层被不断增加的孔隙水压力顶托而逐渐隆起,在地表较薄弱处形成丘状地形。若孔隙水突破地层至地表延流而形成冰锥(图1)。特别是在断裂带处,断裂带处上升泉流出漫溢而形成冰漫,地貌上多处于山麓、垭口和沟口地带。工程建筑物兴建之后,由于原来地下水通道受阻而外溢,地表水冻结而形成冰锥。青藏高原广泛分布河滩-河床型冻胀丘,受河床下冻结层上水和融区水补给。在河流湖泊分布的区域,由于冬季水面冻结,改变了河(湖)水的径流条件,孔隙水压力升高,突破上层冰面而形成冰锥。北起昆仑河,南至安多捷布曲河之间的大河、大湖岸边都发现了冰锥,高度一般1~2m。冻胀丘、冰锥的出现严重影响已建工程建筑的安全,对道路工程危害尤其严重。

(2) 冻融滑塌

在地下冰发育的斜坡上,由于人为活动或河流侵蚀,使地下冰层或富冰土层外露,且不断融化滑面出露。

造成滑面上土层蠕滑、后缘拉裂破坏(图 2)。多发生在一般为 $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 的山坡,饱水后摩擦系数甚低的土体,顺着地下冰面或冻土层面往下滑动。滑塌体一般长 $30 \sim 250 \text{ m}$,宽 $20 \sim 100 \text{ m}$ 不等。风火山的规模最大,长 500 m ,宽 $100 \sim 150 \text{ m}$ 。分布于丘陵山地,特别是地下冰发育的山坡,如昆仑山垭口、五道梁、风火山、唐古拉山南坡等。



图 1 研究区发育的冻胀丘 - 冰锥

Fig. 1 Frost mount-icing in research area



图 2 研究区冻融滑塌

Fig. 2 Freezing-thawing landslide in research area

(3) 热融湖塘与热融沉陷

由于不同成因的负地形积水后破坏了多年冻土的热平衡,致使冻土或地下冰部分融化,在上覆土层自重以及工程构筑物荷载作用下,加深负地形,逐渐形成热融湖塘和热融沉陷(图 3)。此成因的湖塘的规模较小,往往成群分布。如楚玛尔河高平原、通天河南岸、扎加藏布河两岸都有存在。对线性工程造成了较大的危害,影响了局部地段的线路选线和路基的热、力学稳定性。

(4) 冻融泥石流

由于冻融作用,冻土结构破坏,上部融化土与下部冻土界面成为滑动面,饱和融土在自重作用下顺坡向下缓慢蠕动形成泥石流,其组合物多为饱和状态的草皮苔鲜、泥炭和土、砂类混合物,蠕动后的滑动面成为无地表植被的光秃秃的滑动面(图 4),可能掩埋道路、壅塞桥涵,加速路基的软化湿陷。多发生在缓坡地段的富冰冻土内。



图 3 研究区热融形成的负地形

Fig. 3 Subsidence caused by thermokarst in research area



图 4 研究区热融泥石流

Fig. 4 Thermal mud flow in research area

发育于青藏高原风火山地区一缓坡开阔冲沟中的泥石流阶地斜坡整体坡度为 10° ,呈高度依次降低的台阶状地形,共 10 级,每级宽 $5 \sim 10 \text{ m}$,植被十分发育,并存在大量由于水流作用形成的网状沟槽,深度 $10 \sim 30 \text{ cm}$ 不等。

2 冻融灾害评估方法及评价要素

冻融灾害是自然环境变化以及人类工程活动影响下冻土热学力学特征异常变化对人类生命财产和生活、生产以及支持人类生存与发展的资源、环境的破坏现象或过程。冻土灾害的研究主要是关于多年冻土在

外部条件影响下地表形态上的变化和对人类工程活动的影响。

传统灾害风险性评价采用“盛置过滤制图法”。其评价过程可以概括为:第 1 步,在对区域地质灾害详细研究和调查的基础上,确定构成其危险的主要条件和因素(即风险性因子)。第 2 步,筛选危险性因子,并转化为图形表示。筛选因子遵循原则:必须是具有高度的概括性和综合性的因子,各个指标具有明确的物理意义、能够量化、含有明确的分布信息,同时要容易获取。第 3 步,各个因子由于对总量的影响不同,对选定的评价因子赋予不同的权重。将各因子图叠置,然后计算各层的综合得分,区分风险性的大小。

调查发现青藏高原多年冻土区主要是与冻土变化有关的冻胀和融沉灾害。其研究重点为人类活动和气候变化条件下形成的热融洼地、热融沉陷、热融滑塌、融冻泥石流等冻融灾害,是自然环境变化与人类活动共同作用的结果^[15-21]。

冻土的性质及其变化受到诸多因素的影响。内部因素主要指冻土的本身的性质,比如土质、含水量、含冰量、年平均地温等。外部因素一般指气候因素、地形地貌、第四纪地质因素、人类活动因素等。在众多影响要素中选择出最具有代表性的因子进行风险性评价。

冻土区别于其他土的重要特征就是土中含有数量不等的地下冰。地下冰的形成和发展与地貌条件有较为密切的关系。研究表明:坡度小于 10°的山坡上,一般地下冰发育,尤以 4°~8°的坡度最有利于地下冰生长;10°~16°的坡度上,地下冰发育条件较差;大于 16°的山坡上一般见不到厚层地下冰;坡度大于 25°时,一般只有裂隙冰存在。当坡度在 5°~25°时,是热融滑塌和融冻泥石流产生的最佳坡度^[22]。同时,地下冰的形成也受土质条件影响。不同土质条件的析冰能力的,松散土中,粒径为 0.05~0.002 mm 的粉粘粒是分凝冰形成的最佳粒度范围。对于细粒土而言,析冰能力依序减弱:粉质亚粘土、亚粘土、粉质亚砂土、粘土、亚砂土、粉砂。对粗粒土来说,主要取决于小于 0.05 mm 粒径的含量,当其含量大于 15% 的粗粒土,在充分饱水条件下也可形成高含冰量的冻土。

气温的变化是冻土变化必要条件。气温的变化通过对流、传导等方式传递到冻土中,下垫面的特征影响着冻土的吸热状况。青藏高原多年冻土区下垫面以不同类型的植被、裸岩以及工程建筑为主。特别在植被和积雪覆盖的多年冻土区,影响更加显著。植被和积雪的存在改变了多年冻土的热边界,制约着土壤-大气间的热交换,引起地表热交换的变化。青藏公路沿线植被分布与地下冰分布有较好的关系,一般植被覆盖率高,地下冰较发育,反之亦然^[23]。

人类活动对冻土主要影响是改变了下垫面原有的特性。下垫面性质的改变影响着下伏冻土中的水热传输过程。人类在工程活动中铲除草皮,挖填原有的土壤,改变了地表形态,特别是工程的建设过程中土石方的开挖、地表植被的破坏、建筑材料的堆放,都改变下垫面性质,引起冻土的变化和灾害的发展。工程建设人为的扰动很难恢复。比如:青藏公路沥青路面的铺设改变了路面下水热传输,加剧路面下冻土的融化。

冻土的年平均地温能够较好的反映冻土的形成情况,同时也反映了冻土自身的物理性质、力学性质、工程稳定性、发生冻融灾害的可能性。温度越低,其未冻水含量越少,强度越高,同时抵御外界环境条件变化的能力越强。吴青柏等^[24]根据青藏公路沿线的实测数据分析年平均地温和纬度海拔等的相关性。

灾害发生的程度以及危害程度是灾害评价的重要内容。冻土的变化主要体现在冻土厚度及冻土温度的变化。冻土厚度变化的同时活动层厚度也在发生变化,而且两者的变化是此消彼长的。冻土层的消融引起的变化可以通过活动层厚度的变化来体现。活动层的厚度与土的热物理性质、平均气温、土的物理性质以及含水状况密切相关。由于水分迁移,冻土地下冰富集在冻结锋面附近,即活动层的底板、多年冻土的顶板,活动层厚度变化造成大量的地下冰发生融化。活动层厚度厚度的变化,反映了冻融灾害发生的深度和广度。

综上所述,确定以植被覆盖度、土类型、坡度、经度、纬度、高程、土热物理参数、含水特征、下垫面特征、融化指数等作为多年冻土区冻融灾害评价的评价要素(图 5)。

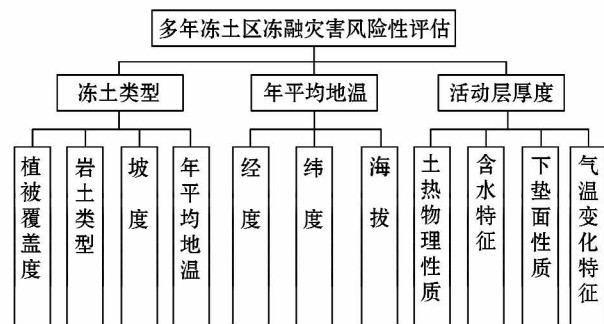


图 5 冻土灾害风险性评价思路框架

Fig. 5 Thinking frame of frozen soil disaster risk assessment

3 评价要素或指标的确定

确定评价目标风险性的评价因子之后,本文采用层次分析方法(AHP)来确定各指标的权重。向从事冻土研究、环境评价和地质灾害等领域专家咨询,判定各要素的相对的重要程度。用 Saaty 提出的 1~9 比较标度法标定各因子间的重要性,再综合专家的意见,分别建立了冻土类型、冻融灾害风险性的判断矩阵计算各个要素的权重(表 1)。

表 1 各要素的权重
Table 1 Weights of factors

冻土类型要素	权重	冻土风险要素	权重
植被覆盖度	0.28	冻土类型	0.493 4
岩土类型	0.33	年平均地温	0.310 8
坡度	0.23	活动层厚度	0.195 8
年平均地温	0.13		

用青藏公路沿线实测数据回归得到年平均地温与经度、纬度、高程的关系(式(1)),计算整个研究区域的年平均地温。年平均地温 0.5℃作为多年冻土和季节冻土的分界线。

$$\begin{cases} T_{cp} = 62.05 - 0.11E - 0.74N - 0.006H, \\ R^2 = 0.62. \end{cases} \quad (1)$$

式中: E 为经度($^{\circ}$); N 为纬度($^{\circ}$); H 为海拔(m);

运用 Stafen 公式计算活动层厚度(式(2))。该公式计算以岩土类型为基础的。土壤类型依据中国科学院南京土壤研究所完成的 1:100 万数字化的土壤数据库《1:100 万中华人民共和国土壤图》中土壤发生学分类结合土的分类标准(GB/T50145 - 2007)对青藏高原范围内的土壤重新进行工程分类。分类结果表明,青藏高原第四纪沉积物主要以粉质亚粘土、亚粘土为主,砂土、粘土分布较少。式(2)中下垫面特征通过 n_f 反映。文献[25 - 26]中给出青藏铁路沿线不同植被类型条件下 n_f 因子。根据《1:100 万中华人民共和国植被图》中不同植被类型的划分确定下垫面类型并赋值。根据青藏公路沿线多年冻土含水量测试,其平均含水量为 18.1%^[26]。在已知多年冻土容重和含水量条件下,根据冻土工程地质勘察规范(GB50324 - 2001)附录 K 确定相应物理性质下各种岩土的热参数。未冻水含量是随温度不断变化的。根据青藏高原多年冻土区 D110 站实测冻结亚砂土的未冻水含量在 4% ~ 6%,本文选平均未冻水含量 5% 进行计算。

$$Z = \sqrt{\frac{2\lambda n_f \bar{T}_a t}{L\gamma_{ck}(W - W_u)}} \quad (2)$$

式中: Z ——活动层厚度(m);

λ ——土的导热系数(W/m·℃);

n_f ——系数;

\bar{T}_a ——融化季节平均气温(℃);

t ——融化季节持续时间;

L ——冰融化的潜热, 3.3×10^5 J/kg;

γ_{ck} ——土的干容重(kg/m³);

W ——融化时土的总含水量(%);

W_u ——冻土中未冻水含量(%)。

本文中使用的 IPCC 第四次评估报告(IPCC Fourth Assessment Report, IPCC AR4)中 2010 年暖季月平均气温计算融化指数。IPCC 报告是基于 BCC - CM1 气候模式对中国大陆地区温度进行估计。BCC - CM1 气候模式根据人口规模、社会发展水平、能源供应和技术发展的适应程度等分为 3 个框架水平即 A1B 情景、A2 情景、B1 情景。其中 A1B 情景相对其他两个模式气温升高程度较高^[27]。

将计算得到参评因子数据归一到 0~1 之间,采用公式 3 计算冻融灾害风险性的综合值

$$F = \sum w_i X_{ij} \quad (3)$$

式中: F 为评价值; w_i 为第 i 个分级指标的权重; X_{ij} 为第 i 个分级指标第 j 个等级的标准值。

4 多年冻土冻融灾害风险性评价

运用表 2 中的数据计算冻土地下冰含量,将计算结果归一到 0~1 之间。利用式(1)~(3)计算出青藏

高原多年冻土冻融灾害的综合值,该数值分布在0~1之间。按照表3的标准进行冻土类型和风险性划分。综合值越高,说明发生冻融灾害的风险性越高。将冻融灾害风险性分为四个等级:

(1)稳定区:表示该区冻土年平均地温较低,活动层厚度很小,冻土类型以少冰冻土或多冰冻土为主,发生灾害的可能性非常小。

(2)低风险区:表示该区以中低温冻土为主,活动层厚度小于1.5 m,冻土类型以多冰冻土或富冰冻土为主,发生灾害的可能性很小。

(3)中风险区:表示该区中高温冻土为主,活动层厚度一般为1.5~3.0 m,冻土类型以富冰冻土或饱冰冻土为主,发生灾害的可能性较大。

(4)高风险区:表示该区高温冻土为主,活动层厚度大于3.0 m,冻土类型以饱冰冻土或含土冰层为主,发生灾害的可能性非常大。

表2 冻土类型分类标准
Table 2 Classification criterion of frozen soil

指标/权重	分类标准					指标/权重	分类标准				
	I	II	III	IV	V		I	II	III	IV	V
植被覆盖度/%	≤10	10~30	30~50	50~70	>70	坡度/(°)	<4	4~8	8~16	16~25	>25
权重	0.09	0.14	0.2	0.26	0.31	权重	0.27	0.35	0.19	0.12	0.07
岩土类型	非第四纪 覆盖区	粉质亚 粘土	亚粘土	粘土	砂土	年平均 地温/°C	0.5~ -0.5°C	-0.5~ -1.5°C	-1.5~ -3.0°C	-3.0~ -5.0°C	<-5.0°C
权重	0	0.38	0.3	0.2	0.12	权重	0.11	0.23	0.28	0.21	0.17

表3 冻土风险性分类标准
Table 3 Classification criterion of frozen soil risk

风险性等级	冻土类型(含冰量)	年平均地温/°C	活动层厚度/m	综合值
稳定区域	0.08	<-5.0	<0.5	0~0.35
低风险性区域	0.08~0.25	-3.0~-5.0	0.5~1.5	0.35~0.55
中等风险性区域	0.25~0.45	-1.5~-3.0	1.5~3.0	0.55~0.65
高风险性区域	0.45	0.5~-1.5	>3.0	>0.65

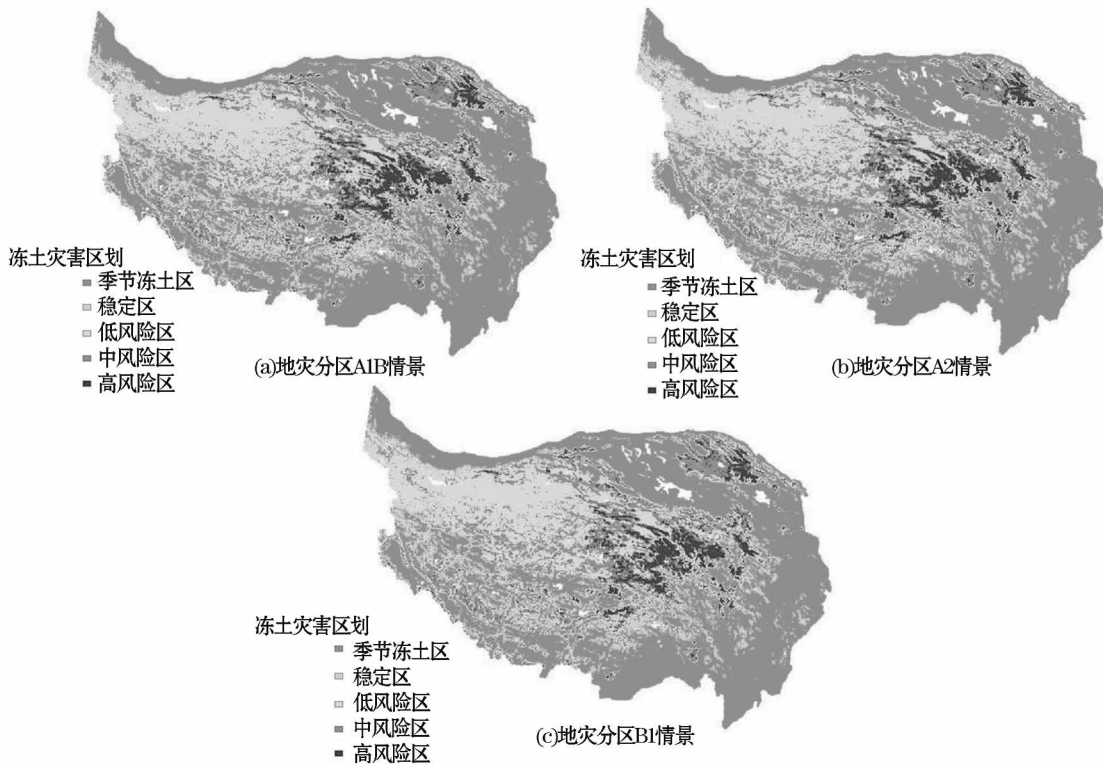


图6 2010年冻融灾害危险性评估

Fig.6 Risk assessment of freeze thawing disaster in 2010

结合 Arcmap 栅格计算功能对青藏高原多年冻土区冻融灾害评价结果用图 6 表示。

评价结果表明:在 3 种气候变化模式下,整个青藏高原在现状条件下以中低风险性为主。高风险区主要在祁连山区、西昆仑山南、青南山原中部、冈底斯山和念青唐古拉山南麓、喜马拉雅山南麓部分区域。山麓的缓坡地形为灾害的发生提供了地形条件,这些区域人类活动强度大,年平均地温较高,所以灾害危险性等级较高。其中 A1B 情景的冻融灾害分布的范围要比其他两种模式分布范围大。青藏公路、新藏公路影响范围内冻土热融灾害风险性较高。在工程建设过程中土石方的开挖,植被的破坏等影响冻土稳定性。工程建设后下垫面性质的改变也对冻土有很大影响。总之,人类活动对热融灾害的发展有很大影响。

5 结 论

通过对研究区实地调查和现有水文工程资料分析的基础上,多年冻土区主要存在的地质灾害为冻胀和融沉及其伴生的冷生现象引起的灾害。比如冻融泥流、冷拔、热融塌陷等。分析不同灾害的特征,人为多年冻土地质灾害主要受气温条件、冻土工程地质条件、水文地质条件等影响。确定以冻土类型、活动层厚度、年平均地温作为多年冻土区冻融灾害评价的一级评价要素。AHP 方法结合专家建议确定个待评要素的权重,进行现状条件下冻土灾害的评价,评价结果表明整个青藏高原以中低风险性为主。高风险区域主要在祁连山区大部、西昆仑山南麓、青南山原中部、冈底斯山和念青唐古拉山南麓、喜马拉雅山南麓部分区域。人类活动对冻融灾害的发展有重要作用。

参 考 文 献:

- [1] 张梁,张业成,罗元华,等. 地质灾害灾情评估理论与实践[M]. 北京:地质出版社,1998.
ZHANG Liang,ZHANG Yecheng,LUO Yuanhua,et al. Geological Hazards Assessment Theory and Practice [M]. Beijing: Geological Publishing House,1998. (in Chinese)
- [2] William J P, Arthur A A. 自然灾害风险评价与减灾对策[M]. 向立云,程晓陶,译. 北京:地震出版社,1993.
William J P, Arthur A A. Natural Hazard Risk Assessment and Public Policy [M]. XIANG Liyun, CHENG Xiaotao Translated. Beijing: Earthquake Press,1998. (in Chinese)
- [3] 张梁,张建军. 地质灾害风险区划理论与方法[J]. 地质灾害与环境保护,2000,11(4):323-328.
ZHANG Liang ZHANG Jianjun. The theory and method of zonation of geo-hazard[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation,2000,11(4):323-328. (in Chinese)
- [4] 张业成,张春山,张梁,等. 中国地质灾害系统层次分析与综合灾度计算[C]//中国地质科学院文集. 北京:地质出版社,1993,(27/28):139-154.
ZHANG Yecheng,ZHANG Chunshan,ZHANG Liang,et al. Analytic hierarchy processing and computation of the aggregative extent of disaster damage on China's geological disaster system [C]//Proceedings of Chinese Academy of Geological Sciences. Beijing:Geological Publishing House. 1993,(27/28):139-154. (in Chinese)
- [5] 张业成. 中国崩塌、滑坡、泥石流成灾特点与减灾社会化[J]. 中国减灾,1996,6(1):27-30.
ZHANG Yecheng. Characteristics of disaster forming and social reduction for collapse,landslide,debris flow in China[J]. Disaster reduction in China,1996,6(1):27-30. (in Chinese)
- [6] 黄崇福,刘新立,周国贤,等. 以历史灾情资料为依据的农业自然灾害风险评估方法[J]. 自然灾害学报,1998,7(2):1-9.
HUANG Chongfu,LIU Xinli,ZHOU Guoxian,et al. Agricultural natural disaster risk assessment method according to the historic disaster data[J]. Journal of Natural Disasters,1998,7(2):1-9. (in Chinese)
- [7] 黄崇福. 自然灾害风险评价理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2005.
HUANG Chunfu. Natural Hazard Risk Assessment Theory and Practice [M]. Beijing:Science Press,2005. (in Chinese)
- [8] 于庆东,沈荣芳. 灾害经济损失评估理论与方法探讨[J]. 灾害学,1996,8(2):6-10.
YU Qingdong,SHEN Rongfang. Assessment methods of disaster economic loss[J]. Journal of Catastrophology,1996,8(2):6-10. (in Chinese)
- [9] 樊运晓. 区域承灾体脆弱性综合评价研究[D]. 北京:中国地质大学,2000.
FAN Yunxiao. Reseach on Synthetic Evaluation about Vulnerable Degree of Regional Sustaining-hazard Body[D]. Beijing: China University of Geoscience,2000. (in Chinese)
- [10] 周幼吾,郭东信,邱国庆,等. 中国冻土[M]. 北京:科学出版社,2000:115-126.
ZHOU Youwu,GUO Dongxin,QIU Guoqing,et al. Geocryology in china [M]. Beijing: Science Press,2000:115-126. (in Chinese)
- [11] NIU Fujun,CHENG Guodong,XIE Qun. Study on Instability of slopes in Permafrost Regions of Qinghai-Tibet High plateau [C]// Kamensky RM (Editor). Proceedings of the 5th International Symposium on Permafrost Engineering. Yakutsk: Permafrost Inst. SB RAS Press,2002:192-197.
- [12] 余绍水,潘卫东,史聪慧,等. 青藏铁路沿线主要次生不良冻土现象的调查和机理分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(6):1082-

1085.
YU Shaoshui, PAN Weidong, SHI Conghui, et al. Investigation and mechanism analysis of the major secondary harmful frozen – soil phenomena along Qinghai – Xizang railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 1082 – 1085. (in Chinese)
- [13] 刘厚健,程东幸,俞祁浩,等. 高海拔输电线路的冻土工程问题及对策研究[J]. 工程勘察, 2009, 4: 32 – 36.
LIU Houjian, CHENG Dongxing, YU Qihao, et al. Study on permafrost engineering problems and engineering countermeasure of transmission line [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, 4: 32 – 36. (in Chinese)
- [14] Nelson F E, Anisimov O A, Shiklomanov N I. Climate change and hazard zonation in the circum – Arctic permafrost regions [J]. Natural Hazards, 2002, 26: 203 – 225.
- [15] Oleg Anisimov and Svetlana Reneva. Permafrost and changing climate: the Russian perspective [J]. Royal Swedish Academy of Sciences, 2006, 35 (4): 169 – 705
- [16] 王文宝. 多年冻土地区铁路路基边坡滑塌及其整治 [C]//中国科学院兰州冰川冻土研究所, 第三届全国冻土学术会议论文集. 北京: 科学出版社, 1989: 353 – 358.
WANG Wenbao. Sliding of the slope of railway embankment in permafrost region and its treatment [C]// The Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology of the Chinese Academy of Sciences. Proceedings of the 3th National Conference on Permafrost. Beijing: Science Press, 1989: 353 – 358. (in Chinese)
- [17] Roberts E C, Morgenstern N R. The stability of thawing slopes [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1974, 11(4): 447 – 469.
- [18] Clark M J. Advance in Periglacial Geomorphology [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 1988: 325 – 359.
- [19] 郭东信, 黄以职, 赵秀锋. 青藏公路风火山垭口盆地融冻泥流阶地初步研究 [J]. 冰川冻土, 1993, 15(1): 58 – 62.
GUO Dongxin, HUANG Yizhi, ZHAO Xiufeng. Study on the thawing mud terrace in Qinghai – Tibet Highway Fenghuoshan passes area Basin [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1993, 15 (1): 58 – 62. (in Chinese)
- [20] 王绍令. 青藏公路风火山地区的热融滑塌 [J]. 冰川冻土, 1990, 12(1): 63 – 70.
WANG Shaoling. Thaw slumping in Fenghuoshan region of the Qinghai – Tibet Highway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1990, 12(1): 63 – 70. (in Chinese)
- [21] Wang B, French H M. In situ creep of frozen soil [J]. Tibet plateau, China. Can. Geotech J., 1995, 23: 545 – 552.
- [22] 吴青柏. 人为活动下冻土环境变化和工程适应性研究 [D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2002.
WU Qingbai. Study on Change of Frozen Soil Environment and Engineering Suitability under Human Activities [D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Science, 2002. (in Chinese)
- [23] 吴紫汪. 冻土路基工程 [M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1988.
WU Ziwan. Roadbed Engineering in Permafrost Region [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1988. (in Chinese)
- [24] 吴青柏, 李新, 李文君. 青藏公路沿线冻土区域分布计算机模拟与制图 [J]. 冰川冻土, 2000, 22(4): 323 – 326.
WU Qingbai, LI Xin, LI Wenjun. Computer simulation and mapping of the regional distribution of permafrost along the Qinghai – Xizang highway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(4): 323 – 326. (in Chinese)
- [25] 赵红岩, 江灏, 王可丽. 青藏铁路沿线地表融冻指数的计算分析 [J]. 冰川冻土, 2008, 30(4): 617 – 623.
ZHAO Hongyan, JIANG Hao, WANG Keli. The surface thawing – freezing indexes along the Qinghai – Tibet railway: analysis and calculation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(4): 617 – 623. (in Chinese)
- [26] 南卓铜. 青藏高原冻土分布研究及青藏铁路数字路基建设 [D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2003.
NAN Zhuotong. Study on Characteristics of Permafrost Distribution on the Qinghai – Tibet Plateau and Construction of Digital Roadbed of the Qinghai – Tibet Railway [D]. Lanzhou: Cold and arid regions environmental and engineering research institute, Chinese academy of science, 2003. (in Chinese)
- [27] 国家气候中心. 中国地区气候变化预估数据集 Version 1.0 使用说明 [Z]. 2008.
China National Climate Center. China Regional Climate Change Projection Data Set Version 1.0 for Use [Z]. 2008. (in Chinese)