维普资讯 http://www.cqvip.com

文章编号:1004-0366(2003)S1-0050-05

青藏铁路多年冻土区段地质灾害危险性评估方法探讨

贾云翔，许 贵，李显伟
(铁道第一勘察设计院地质路基处，甘肃 兰州 730000)

摘 要： 多年冻土环境是青藏铁路建设必须面对和解决的一大难题．对多年冻土发生地质灾害机理进行分析研究，是评价多年冻土区地质灾害危险性的前提；对多年冻土区段发生地质灾害(融沉与冻胀)的危险度进行量化，是准确地进行地质灾害危险性综合分区，并达到评估目的的关键．

关键词： 青藏铁路；多年冻土；地质灾害；危险性；评估
中图分类号： P694 **文献标识码：** A

青藏铁路是我国西部开发的重点基础性工程之一，该铁路的建设是改善西部投资环境、促进西藏经济建设、造福沿线各族人民的主要举措．青藏铁路格尔木至拉萨段，位于青藏高原腹地，自格尔木市南面的南山口车站引出，基本沿青藏公路南行，终点拉萨，全长 1 142 km².

多年冻土环境是青藏铁路建设必须面对和解决的高原、冻土、环保三大难题之一．在青藏铁路建设用地地质灾害危险性评估工作中，对长大段落分布的多年冻土发生地质灾害(融沉与冻胀)的危险性进行准确评价和分区，是该项评估的关键．认识多年冻土灾害的属性特征、形成条件和活动规律，确定和量化体现地质灾害危险性的各种要素，是准确评价多年冻土地段地质灾害危险性和进行危险性区划的基础．通过深入分析多年冻土环境特征，确定了影响冻土的主要因素，并进行权重分析，制定量化指标，计算危险度，划分了危险性区段．供同行讨论．

1 青藏铁路沿线多年冻土分布情况

青藏铁路沿线岛状多年冻土分布的北部边界在昆仑山北麓、西大滩东段，高程 4 150～4 200 m，年平均气温约－2℃～－3℃；片状多年冻土分布的北部边界在昆仑山北坡往西到惊仙谷北口，高程 4 350～4 560 m，年平均气温约－4.0℃．片状多年冻土分布的南部边界则在西藏境内安多县以北附近．岛状冻土南界在安多以南约 90 km 处．青藏铁路在玉珠峰车站以南至安多以南约 550 km 长度穿越多年冻土区．

2 多年冻土发生地质灾害机理分析

冻土在其环境相对稳定状态下保持结构的稳定，不会成为致灾主体．冻土环境变化，尤其是发生水热交换，热融作用产生，引起冻土结构发生变化，从而产生冻融侵蚀和沉陷现象时，工

收稿日期：2003－02－22

维普资讯 http://www.cqvip.com

程设施场地范围的冻土将演化为致灾主体．多年冻土区对工程有影响的不良冻土现象从其本质上讲都是热交换过程的表象，季节冻结层（每年寒季冻结、暖季融化，其年平均地温高于0℃的地表层）的冻融循环产生冻胀问题，冻土热平衡破坏，导致冻土上限（多年冻土层顶面的埋藏深度）下降而产生融化下沉问题，因此说融沉和冻胀是冻土区地表变形和造成工程构筑物破坏的主要原因．

首先，冻土中含冰量的多少是冻土区地面变形程度（冻土的危害程度）的决定因素，多年冻土的融沉性和季节融化层（每年寒季冻结、暖季融化，其年平均地温低于0℃的地表层）冻胀性与冻土含冰类型相关，即融沉性和冻胀性分级与冻土岩性（松散层颗粒级配）、总含水量、冻前含水量相关．多年冻土含冰量类型与融沉性的对应关系为：少冰冻土—不融沉，多冰冻土—弱融沉，富冰冻土—融沉，饱冰冻土—强融沉，含土冰层—融陷．多年冻土季节融化层含水量大小与冻胀性也是相对应的，多年冻土区的冻胀一般较季节冻土区小，主要受控于季节冻结层的厚度（上限深度）；厚度大，冻胀性强．

其次，融沉和冻土的热灵敏性相关，即所谓"热融"和冻土的高温（0～－1°）是密切相连的．经多年实践认为，年平均地温是反映多年冻土稳定性的一个重要指标．年平均地温低，冻土的蓄冷量大，受扰动后不易融化，稳定性好；年平均地温高，冻土的蓄冷量小，受气候、植被、人为等因素变化影响后，多年冻土反映敏感，易发生融化．

综上分析，多年冻土热融沉陷和冻胀的强弱程度决定了多年冻土区发生地质灾害的危险性大小．

3　多年冻土致灾因素影响分析及权重赋值

影响冻土热融沉陷和冻胀的因素很多，综合确定为环境条件、冻土特征和人为活动．环境条件是形成高含冰量冻土的决定性因素，包括地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质条件等；冻土特征与环境条件是息息相关的，是冻土发生危害及其危险度大小的内在因素，包括冻土类型、厚度、上限深度、地温分区、季节融化层冻胀性等；人为活动主要指工程行为对冻土的扰动情况，为冻土灾害发生的外在诱发因素，包括工程设施类型、施工行为、人员生活活动等．

3.1　环境条件对多年冻土的影响

高程是造成各区段冻土温度、厚度差别诸多因素中的最主要因素．同一冻土地貌单元，高程上升、冻土温度降低、厚度增大，这是普遍规律．本线多年冻土平均地温随高程升高的降低率为0.5℃～0.8℃/100 m．在其他条件相同时，纬度对冻土环境也有较大影响，大致纬度每降低1°，多年冻土区年平均地温升高0.5℃，冻土厚度减薄15 m左右．

不同地貌单元中，各类冻土的分布有较大的差异性，低高山区中高含冰量冻土，特别是含土冰层占的比例最大，中高山区次之，而河谷平原地区最少．青藏高原多年冻土分布有明显的垂直地带性规律．山坡坡向及沟底谷坡的不同也导致了地温及多年冻土厚度的不同，南、北坡年平均地温可相差2℃．在同一低高山区，当其他条件相同时，阳坡较之阴坡接受的太阳辐射多，地温相对较高，蒸发的水分亦多，故一般阳坡的地下冰不如阴坡发育．不同地形条件，冻土不良现象集中发育情况不同，斜坡地形易发热融滑塌或融冻泥流；平原区热融湖塘一般比较发育；而低洼地区，往往容易积水而形成冻土湿地．

植被对多年冻土的影响主要是冻土地温值随植被层覆盖度的减少而增加，冻土的退化与植被退化及沙化之间呈正反馈机制．

维普资讯 http://www.cqvip.com

土的成因类型反映了土的成分、含水量、密实程度及分布的地形地貌部位等特征的综合，所以土中含冰量的多寡往往因土的成因类型不同而异．湖相沉积和坡积层中，高含冰量冻土，尤其是含土冰层的比例最大．

地质构造因素对冻土的影响是多方面的．地质条件复杂地段的冻土特征变化较大．构造地热活动和地下水活动往往可以形成贯通性融区，是其安全的一面，而若不能形成贯通性融区时，则可能形成高温不稳定冻土，冻胀丘、冰椎、冰幔的形成也与地下水溢出相关．冻结层上水发育情况与季节融化层的沉陷强度以及冻胀强度相关，而且与冻土湿地的形成是相联系的．冻结层上水发育，则表明季节融化层含水量丰富，寒季冻结冻胀量大，暖季融化沉陷量大．地表沼泽化的地段，有利于高含冰量冻土的生成．

3.2 冻土特征致灾因素分析

冻土类型、厚度、上限深度、地温分区、季节融化层冻胀性及不良冻土现象发育情况，反映了冻土的本质特征．冻土类型与冻土的融沉性密切相关，高含冰量冻土具有较强的融沉性；冻土厚度、上限深度、地温分区则反映了冻土的稳定性，三者相互关联，地温是决定性因素，地温高，冻土薄，上限深，对于外界热干扰敏感度高，其工程稳定性差；地温低，冻土厚，上限浅，对于外界热干扰敏感度低，其工程稳定性比较好．

3.3 人为活动对冻土的影响

根据青藏公路及沿线民用建筑物的多年冻土环境调查分析，人为活动作用下的多年冻土环境问题主要是热融侵蚀、沙化、地表植被及沼泽湿地衰退、地表景观的破坏等，特殊自然条件（无霜期短，冬季漫长，植物赖以生长的粘性土层薄）下生态环境十分脆弱，一些环境变化均是不可逆变化，从而会产生比较严重的后果．人为活动因素影响下的多年冻土环境的变化表现在以下几个方面：①高温冻土区的冻土退化；②高含冰量冻土地段，地表状态的破坏导致热融沉陷（洼地和湖塘）的发生和发展；③高含冰量、坡度较陡的斜坡地段，由于地表状态的破坏产生热融滑塌和融冻泥流；④引起其他次生的冻土环境问题，如冰椎、冻胀丘等．但不同的工程类型产生的影响是不同的．

3.4 各类影响因素权重赋值及危险度值计算公式的建立

结合青藏铁路勘察统计资料和青藏公路病害调查统计资料，对上述各种因素引起冻土发生变化而致灾的影响程度进行加权分析，赋以权重值（K）；K 值总和确定为 1，其中环境条件 0.24（24%），冻土特征 0.65（65%），人为活动 0.11（11%）．并分析各种因素的四种条件状态（极严重、严重、中等、一般）给出分值（N）（与其权重相关的经验值，以能形成较差为宜）．如表 1 所示．危险度值 W 计算公式：

$$W=\sum_{i=1}^{10} Ki \cdot Ni,$$

根据验算确定：$W\geqslant 6$ 危险度大，危险性大区（Ⅰ）；$6>W\geqslant 4$ 危险度中等，危险性小区（Ⅱ）；$W<4$ 危险度小，危险性小区．

4 危险度计算实例及应用情况

4.1 危险度计算实例

例 1：DK977＋500～DK978＋500 段，处于昆仑山区斜坡，阴坡，坡度 8°（$K \cdot N_A=0.81$）；坡积粉土（0.54）；暖季有泉水渗出（0.24）；冻土厚度60～120m，上限3m（0.06）；含土冰层

表1　多年冻土地区危险性判别量指标表

一级判别指标	二级判别指标	权重 K	影响因素量化分级：环境条件极复杂或各种因素影响极严重	赋值 N_A	加权值 $K \cdot N_A$	环境条件复杂或各种因素影响严重	赋值 N_A	加权值 $K \cdot N_A$	环境条件一般或影响程度中等	赋值 N_A	加权值 $K \cdot N_A$	环境条件简单或影响程度轻微	赋值 N_A	加权值 $K \cdot N_A$
环境条件	地形地貌	0.09	低高山区，阴坡，斜坡坡度5°～10°；河谷平原区一级阶地；山间洼地，植被覆盖率低于20%	9	0.81	低高山区，阴坡，坡度10～16°；河谷平原区二级阶地，阶地后缘；山间盆地，植被覆盖率20%～40%	6	0.54	低高山区，阴坡，坡度16～25°，或坡度小于5°；河谷平原区三级阶地，植被覆盖率40～80%	3	0.27	中高山区，阴坡；低高山区阳坡，坡度16～25°，植被覆盖率80%以上，山前砾质倾斜平原区	1	0.09
	地层成因及其岩性	0.09	粉质粘土，含有高价阳离子、腐殖质或植物残体．湖积、坡积成因为主．	9	0.81	粉土，粗颗粒土粉粘粒（粒径0.002～0.05 mm的颗粒）含量大于50%．残坡积、冲洪积成因，基底为软质岩	6	0.54	粘土、粉砂，粗颗粒土粉粘粒（粒径0.002～0.05 mm的颗粒）含量大于20%，小于50%．冲洪积成因，基底为软质岩	3	0.27	覆盖层厚度小于3m，粘性土及粗颗粒土，小于0.05 mm颗粒含量大于15%，小于20%，冰水沉积、冲积成因，基底以硬质岩为主	1	0.09
	冻结层上水发育情况	0.06	地势低洼，有泉水出露，地表排水条件不好，暖季地表有积水	6	0.36	斜坡坡脚有地下水渗出或低洼地带地表轻微沼泽化	4	0.24	大气降水比较大，季节融化层潮湿，地下水位埋藏浅	2	0.12	大气降水比较小，季节融化层稍湿，地下水位埋藏比较深	1	0.06
冻土特征	冻土类型	0.15	厚层地下冰或含土冰层发育	15	2.25	饱冰冻土	10	1.5	富冰冻土	5	0.75	多冰冻土，少冰冻土	1	0.15
	冻土厚度与上限	0.06	10～30 m；>3.0 m	6	0.36	30～40 m；2.0～3.0 m	4	0.24	40～60 m；1.5～2.0 m	2	0.12	>60 m；<1.5 m	1	0.06
	季节融化层冻胀性分级	0.08	平均冻胀率 $\eta>12$，Ⅴ级特强冻胀	8	0.64	$6<\eta\leqslant12$，Ⅳ级强冻胀	5	0.40	$3.5<\eta\leqslant6$，Ⅲ级冻胀	2	0.16	$1<\eta\leqslant3.5$，Ⅱ级弱冻胀，$\eta\leqslant1$，Ⅰ级不冻胀	1	0.08
	冻土融沉性分级	0.10	平均融沉系数 $\delta_0>25$，Ⅴ级融陷	10	1.0	$10<\delta_0\leqslant25$，Ⅳ级强融沉	7	0.7	$3<\delta_0\leqslant10$，Ⅲ级融沉	4	0.4	$1<\delta_0\leqslant3$，Ⅱ级弱融沉 $\delta_0\leqslant1$，Ⅰ级不融沉	1	0.1
	不良冻土现象发育情况	0.11	斜坡分布生长期融冻滑塌、融冻泥流，冻胀冰锥；河谷平原亚区分布发展期热融湖塘，冻土湿地、冰锥、冻胀丘	11	1.21	斜坡地表存在有蠕动或滑动痕迹；地表面破坏前缘有泉水、湿地；分布小型积水洼地；分布小型冻胀丘	7	0.77	斜坡坡度大于5°，有厚层地下冰发育；分布有干枯湖形凹地；地面有冻裂缝	3	0.44	地势比较平坦或斜坡坡度小于5°，地下冰不发育；未见冻胀现象	1	0.11
	地温分区	0.15	高温极不稳定区，Tcp≥−0.5℃>	15	2.25	高温不稳定区，−0.5℃> Tcp≥−1℃	10	1.5	低温基本稳定区，−1.0℃> Tcp≥−2℃	5	0.75	低温稳定区，Tcp<−2℃融区	1	0.15
人为活动	工程行为	0.11	路堑、隧道、涵洞挖基、管道等工程，对冻土扰动极严重	11	1.21	低路堤、零断面路基，房屋建筑，取土等工程，对冻土扰动严重	7	0.77	满足路堤临界高度的路堤，桥梁桩基，施工用水泄漏等工程行为，对冻土扰动比较严重	3	0.33	工程机械活动，对冻土扰动轻微施工人员生活活动，主要是生活垃圾污染，包括污水排放等	1	0.11

维普资讯 http://www.cqvip.com

维普资讯 http://www.cqvip.com

(2.25);特强冻胀(0.64);融陷(1.0);Tcp－Ⅳ(0.15);发育热融滑塌和融冻泥流(1.21);以桥代路工程(0.33). W＝0.81＋0.54＋0.24＋0.06＋2.25＋0.64＋1.0＋0.15＋1.21＋0.33＝7.08＞6,该段为危险性大的区段.

例2:DK1008＋150～DK1012＋100段,处于楚玛尔平原高阶地($K \cdot N_A$＝0.27);冲积粘土(0.27);地下水位埋藏比较深,季节融化层潮湿(0.12);少冰冻土(0.15);冻土厚度40～60 m,上限2 m(0.12);弱冻胀(0.08);弱融沉(0.1);Tcp－Ⅲ(0.75);融沉和冻胀现象不发育(0.11),满足临界高度路堤(0.33). W＝0.27＋0.27＋0.12＋0.15＋0.12＋0.08＋0.1＋0.75＋0.11＋0.33＝2.03＜4,该段为危险性小的区段.

4.2 应用情况

上述示例的危险度计算方法,应用在青藏铁路玉珠峰至开心岭多年冻土地段地质灾害危险性综合评估与分区中. 该区段线路长度约294 km,危险性大的地段总长约64.681 km,占多年冻土区线路总长的22%. 危险性中等地段总长度约145.521 km,占多年冻土区线路总长的49.52%. 危险性小地段总长度约83.798 km,占多年冻土区线路总长的28.48%. 基本准确划分了多年冻土地段地质灾害危险性.

参考文献:

[1] 铁道第一勘察设计院. 青藏铁路格拉段初、定测工程地质勘察资料[Z]. 兰州:2001.
[2] 铁道第一勘察设计院. 青藏铁路格拉段格尔木至唐古拉山环境影响报告书[Z]. 兰州:2001.
[3] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 青藏公路冻土路基研究组. 冻土路基工程[M]. 兰州:兰州大学出版社,1988.

DISCUSSION ON THE RISK ASSESSMENT OF THE GEOLOGICAL DISASTERS IN PERMAFROST SECTION OF QINGHAI-XIZANG RAILWAY

JIA Yun-xiang, XU Gui, LI Xian-wei
(Department of Geology and Subgrade, The First Railways Survey and Design Institute, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The permafrost environment is a big knot that has to be faced and settled in the construction of Qinghai－Xizang Railway. The authors analyze and research the genetic mechanism of the geologic disasters in permafrost section, which is the premise of evaluating the risk of geologic disasters happening in permafrost section; and additionally, quantify the risk degree of the geologic disasters (inc. thaw settlement and frost heaving) occurring in permafrost section, which is the key to a zone the permafrost area properly and comprehensively and to realize the assessment purpose finally.

Key words: Qinghai-Xizang Railway; permafrost; geologic disaster; risk; assessment

作者简介:

贾云翔,(1966-)男,甘肃省成县人,1986年毕业于兰州铁路工程职工大学铁道道路工程专业,现任铁道第一勘察设计院地质路基处工程师,现主要从事水文地质工程地质工作.