

# 青藏公路多年冻土区路基病害易发性概率模型

柴明堂<sup>1,2</sup>, 张建明<sup>1</sup>, 穆彦虎<sup>1</sup>, 刘戈<sup>3</sup>, 周国庆<sup>4</sup>

(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. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075; 4. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008)

**摘要:**为研究青藏公路多年冻土区路基病害的分布规律,探究路基病害与其影响因素之间的相互关系,定量计算各因子对路基病害的影响权重,最终达到预测路基病害易发性概率的目的,以青藏公路西大滩至唐古拉山约 470 km 范围内多年冻土段作为评价路段,选取体积含冰量、年平均地表温度、路堤高度、路堤走向、天然地表植被覆盖度、地表径流 6 个影响因子,通过已有图件地理信息提取、路基设计资料数据统计分析以及现场调查的方式,充分收集各因子的原始属性数据。同时,制作评价路段所在工程走廊内的径流分布图,通过图件与实地调查相结合的方式明确径流与公路相交的地点,并获取 2014 年青藏公路评价路段路基沉降面积的实测资料,以影响因子为自变量,以实测路基病害数据为因变量,引入 Logistic 模型进行回归分析,建立多年冻土区公路路基病害易发性的概率模型,计算评价路段内每个评价单元的路基病害易发性概率。研究结果表明:该概率模型回归结果的正确率为 76.3%;易发性概率小于 15% 的路段占 28.62%,易发性概率大于 50% 的路段占 5.59%;易发性概率高的路段主要位于北麓河至风火山之间(K3064~K3066、K3070~K3071)、风火山至雅玛尔河之间(K3084~K3086)、沱沱河至开心岭之间(K3161~K3165)、开心岭至通天河之间(K3171、K3176~K3182、K3185)、雁石坪至唐古拉山之间(K3246)。

**关键词:**道路工程;青藏公路;多年冻土;路基病害;易发性;Logistic 回归

**中图分类号:**U419.92

**文献标志码:**A

## Probability model for subgrade hazards susceptibility of Qinghai-Tibet Highway in permafrost regions

CHAI Ming-tang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jian-ming<sup>1</sup>, MU Yan-hu<sup>1</sup>, LIU Ge<sup>3</sup>, ZHOU Guo-qing<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute of Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China; 4. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to analyze the distribution characteristics of subgrade distresses of the Qinghai-Tibet Highway (QTH) in permafrost regions, explore the relationship between influencing factors and diseases, quantitatively calculate the weight of each factor on diseases and ultimately forecast the

收稿日期:2017-02-20

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2012CB026106);国家自然科学基金青年科学基金项目(41401087);中国科学院西部之光人才培养计划“西部博士项目”(51Y351211)

作者简介:柴明堂(1990-),男,甘肃会宁人,工学博士研究生,E-mail:chaimingtang13@mails.ucas.ac.cn。

通讯作者:张建明(1963-),男,陕西汉中,研究员,博士研究生导师,E-mail:zhangjm@lzb.ac.cn。

probability of susceptibility of subgrade diseases, this paper selected permafrost sections in the range of about 470 km along the QTH from Xidatan to Tanggula Mountain as evaluation section. Six factors were selected as influence factors, which were volumetric ice content, annual mean ground surface temperature, embankment height, embankment trend, vegetation coverage and surface runoff. According to the extraction of geographic information through the existing map, statistical analysis of design data and field investigation, the original data of each factor was adequately collected. Runoff distribution map of the engineering corridor was drawn. The location where runoff intersected with the QTH was checked by field investigation and maps, and the measured data of subgrade settlement of the QTH evaluation section in 2014 were obtained. The Logistic model was introduced to conduct regression analysis, in which influencing factors were set as independent variables and the measured data of subgrade diseases was set as dependent variable. This paper established a probability model for subgrade diseases susceptibility of the QTH in permafrost regions, and calculated the probability of subgrade diseases in each evaluation unit within the evaluation section. The results show that accuracy of the calculation results is 76.3%. Among all the evaluation sections, the sections in which the probability of susceptibility is less than 15% occupies for 28.62%, and the sections in which the probability of susceptibility is larger than 50% occupies for 5.59%. The sections which are the most probable to develop subgrade diseases distribute from Beilu River to Fenghuo Mountain (K3064 to K3066, K3070 to K3071), Fenghuo Mountain to Yamaer River (K3084 to K3086), Tuotuo River to Kaixin Mountain (K3161 to K3165), Kaixin Mountain to Tongtian River (K3171, K3176 to K3182, K3185), Yanshiping to Tanggula Mountain (K3246). 4 tabs, 7 figs, 25 refs.

**Key words:** road engineering; Qinghai-Tibet Highway (QTH); permafrost; embankment hazard; susceptibility; Logistic regression

## 0 引言

青藏公路于1954年建成通车,格尔木至拉萨段全长1 131 km,其中有550 km路段穿越大片连续多年冻土区。“八五改建”后,青藏公路全线达到Ⅱ级公路标准<sup>[1]</sup>。然而,随着运行时间的增加,加之公路修筑后沥青路面的显著吸热作用及封闭的沥青结构体系,破坏了下伏冻土的水热平衡和水分运移条件,其产生的与冻土地基及活动层季节冻融作用有关的病害逐年增多,严重降低了道路的服役性,增加了工程后期运营及维护成本。截至目前,青藏公路总共经历过4次大规模整治重修,耗资巨大。青藏公路多年冻土区的病害主要分为路面病害和路基病害两大类:路面病害主要表现为裂缝类(龟裂、网裂等)、变形类(沉陷、车辙等)、松散类(坑槽、脱皮等)、其他类(泛油、翻浆等)<sup>[1]</sup>;路基病害主要表现为不均匀沉降<sup>[2]</sup>、局部塌陷。路基病害与路面病害相互关联,相互影响,路基病害与下伏冻土特征、周围环境要素关系密切,而路面病害与路面结构及材料、施工工艺息息相关,也可由路基病害引起。现场调查及统计结果表明,青藏公路多年冻土区典型的路基病害主要由冻土路基的冻

胀和融沉引起,其中因多年冻土融化导致的融沉病害占总病害的85%<sup>[3]</sup>。

已有针对路基路面病害的研究大致可以分为3个部分:一是通过现场调查,分析道路病害的类型、发育性状及空间分布特征;二是基于上述调查资料,定性统计分析病害与各影响因子诸如冻土类型、年平均地温及路堤高度等之间的关系,以此分析道路病害的发生机理;三是从室内试验或现场监测的角度,结合理论推导来解释路基路面病害发生的机理。窦明健等研究了青藏公路路面病害的分布规律和影响因素,得出路面病害发生的主要原因是恶劣的气候条件和多年冻土的变化,并认为冻土稳定性差,运行时间长,坡面朝阳路段的沉陷和纵裂较为严重<sup>[4-5]</sup>;陈建兵等研究发现,青藏公路高路基病害与路基高度和坡向密切相关,融化盘和融化夹层分别是路基小于和大于临界高度时路基病害的主要原因<sup>[6]</sup>;温智等基于青藏公路和青康(西宁—玉树,G214线)公路在退化性多年冻土区的变形监测资料,分析了路基地温和变形特征,发现路基下伏地温和含冰量对路基路面变形起决定性作用<sup>[7]</sup>;徐安花以年平均地温和含冰量为指标,计算了青康公路沿线路面病害对年平均地温和含冰

量的敏感度<sup>[8]</sup>;Yu 等分层监测了青藏公路多年冻土区路基的沉降变形特征,并分析了沉降变形的不同阶段<sup>[9]</sup>;Qi 等研究了青藏公路路基融化固结特征及其影响因素,解释了一些地区冻土融化后路基仍然产生沉降的原因<sup>[10-11]</sup>。

上述研究通过大量现场调查数据定性阐释了病害的发生机理及其与影响因子之间的关系,对于提升多年冻土区道路病害的认识具有重要意义。然而,目前对多年冻土区道路工程病害的易发性并未开展深入的研究,因此很难直接服务于实际工程。易发性是指在一定区域内,在特定的地质环境条件下,新的地质灾害在将来发生的可能性大小<sup>[12]</sup>。在这方面研究中,学者们多采用支持向量机<sup>[13]</sup>、层次分析<sup>[14]</sup>、证据权模型<sup>[15]</sup>、Logistic 模型<sup>[16]</sup>等方法。基于此,本文对青藏公路多年冻土区的病害易发性开展研究,采用病害发生概率来表征青藏公路多年冻土区路基病害的易发性,选取影响路基病害易发性的各项因子作为自变量,实测路基病害作为因变量,进行 Logistic 回归,并根据回归结果计算评价路段的路基病害易发性概率。

1 路基病害影响因子选取

在气候变暖及工程活动等因素的影响下,青藏

工程走廊内多年冻土的温度不断升高,活动层厚度逐渐增大,从而导致地下冰融化,对青藏公路的路基热稳定性产生显著影响,进而降低了路基稳定性和路面使用性能<sup>[17]</sup>。窦明健等将冻土路基的热稳定性影响因子概括为外部条件(太阳辐射、气温等)、内在因素(地下冰含量、冻土上限等)、工程特点(路基高度、路线走向等)3 个部分<sup>[5]</sup>。本文参考冻土路基热稳定性影响因子分类,结合研究内容,将选取的影响因子划分为冻土特征、工程条件、地理要素 3 类。

1.1 冻土特征

冻土特征包括体积含冰量、年平均地温、冻土上限等,本文选取能够方便获取数据的体积含冰量和年平均地表温度作为冻土特征影响因子。体积含冰量越大,且地表温度越高,路基下越容易形成融化夹层,路基融沉病害越严重<sup>[3]</sup>。体积含冰量分布来源于青藏直联网工程±500 kV 输电线路 1:25 万冻土分布图(唐北段),由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与西北电力设计院联合编制完成;年平均地表温度数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>)(以下简称“镜像网站”),采用 MODIS 地表温度合成产品,其中 2010 年每月 1 日白天和夜间温度的平均值见图 1。

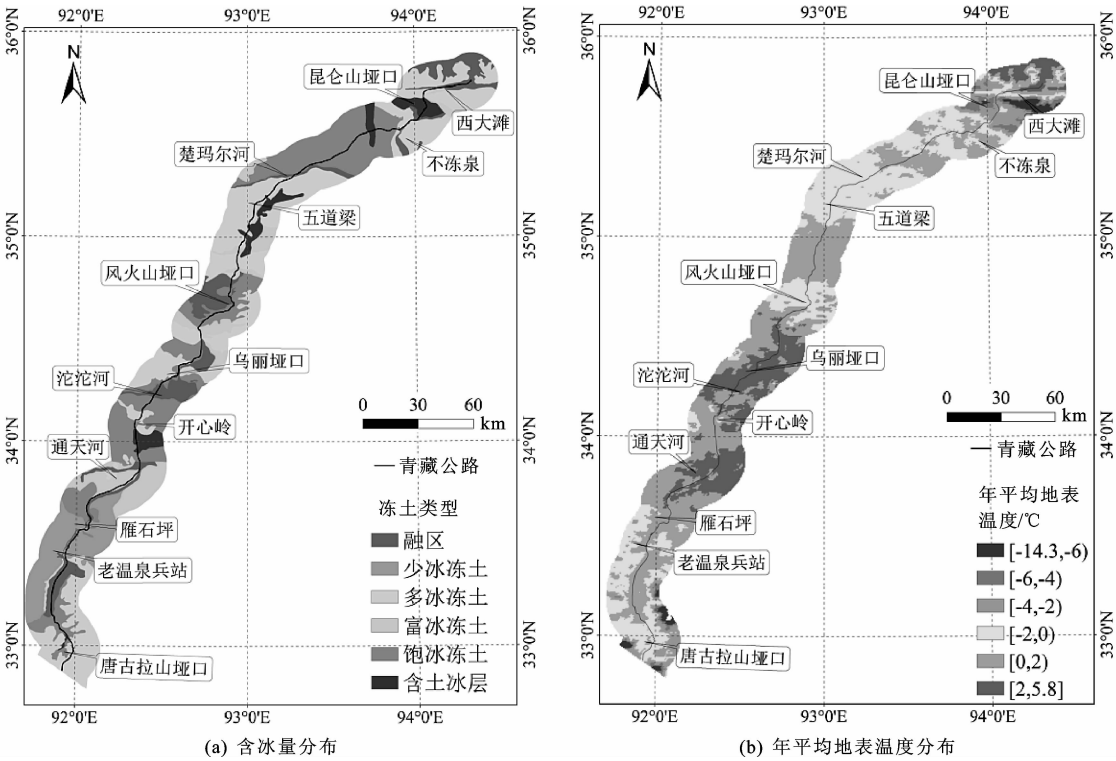


图 1 多年冻土区青藏公路沿线冻土特征分布  
Fig. 1 Characteristic distributions of permafrost along the QTH in permafrost regions

1.2 工程条件

由于青藏公路多年冻土区特殊结构路基(如 XPS 板路基、块碎石路基、热管路基、复合式路基等)所占比例较小<sup>[18-19]</sup>,故本文不予考虑。本文选取路堤高度和路堤走向作为工程条件影响因子。在合理的路堤高度内,路堤高度越高,沉陷病害越少;路堤走向主要体现为阴阳坡效应,阴阳坡效应越明显,纵向裂缝越发育<sup>[3,20]</sup>。路堤高度数据来源于中交第一公路勘察设计研究院有限公司(以下简称中交一院)编制的青藏公路一期整治、二期整治、整治改建(“保通工程”)、改建完善共 4 期整治的施工设计图。路堤走向通过已有图件(来源于 <http://westdc.westgis.ac.cn/>)中的道路矢量图在 ArcGIS 软件中提取得到,走向分布状况如图 2 所示,其中,E、W、S、N 分别表示东、西、南、北。图 2 中每类走向的长度表示此类走向的路段所占比例的大小。由图 2 可知,青藏公路主要为东北-西南走向,此走向路段约占 20%,接近东-西走向的路段约占 16%,因此,在研究病害易发性时必须考虑阴阳坡效应<sup>[3,21]</sup>。

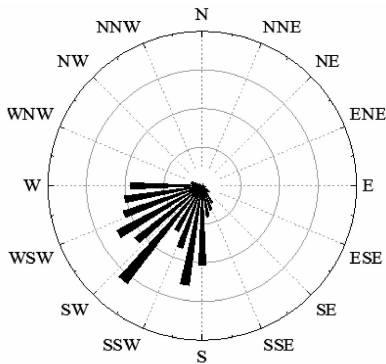


图 2 多年冻土区青藏公路路基走向分布  
Fig.2 Subgrade trend distribution along the QTH in permafrost regions

1.3 地理要素

植被、径流等自然地理要素均可影响地表温度和含冰量,从而影响青藏公路冻土区病害的易发性,植被覆盖度越高,地温越低<sup>[22]</sup>。本文采用来源于镜像网站的 MODIS 250 m 分辨率的归一化植被指数(NDVI)产品。由于青藏工程走廊内地表径流分布较为广泛,在径流流经的区域中,往往形成融区,导致多年冻土退化<sup>[23]</sup>;且在地表径流与公路的相交路段采取了桥梁、涵洞等工程措施进行引流,但随着运营时间的增加,这些相交路段容易造成路基坡脚积水,路面病害多。通过以往及 2015 年最新现场调查发现,青藏公路与径流相交路段的坡脚积水范围最大为 200 m(图 3),因此本文选取公路距径流 200 m 作为影响因子。用 ArcGIS 软件中的水文分析模块

对青藏工程走廊内来源于镜像网站的 90 m 分辨率数字高程模型(DEM)提取径流,并按照几何形态中下级支流汇入上级支流的顺序依次分级。现场调查了径流与公路相交路段的里程(图 4),发现这些里程处均采用架桥的方式进行引流。据此,统计来源于 2013 年中交一院青藏公路病害 79 个现场调查点数据,发现距径流 200 m 内,优类调查点所占的比例明显偏低,差类调查点所占的比例明显偏高(下页图 5)。



图 3 青藏公路 K2926 处径流与公路相交  
Fig.3 Intersection between highway and runoff at K2926 of the QTH



图 4 青藏公路多年冻土区径流分布  
Fig.4 Runoff distributions along the QTH in permafrost regions

2 病害易发性计算

2.1 原始数据获取

选取多年冻土区西大滩至唐古拉山(K2868~

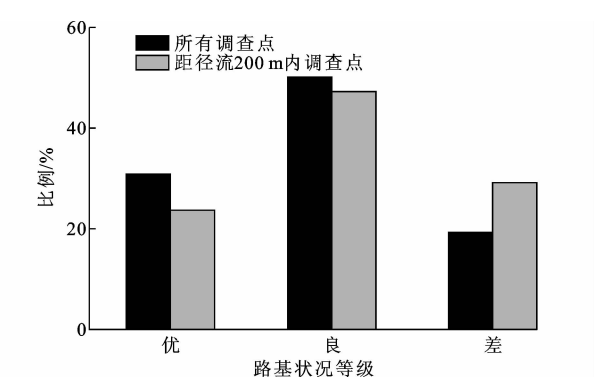


图5 距径流 200 m 内各类调查点所占比例统计  
Fig. 5 Statistical proportions of survey points within 200 m to runoff network

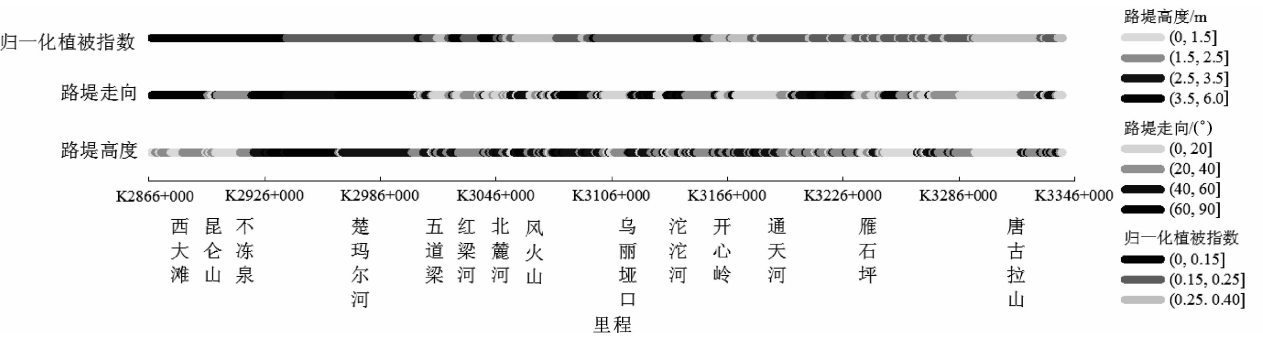


图6 青藏公路多年冻土区各因子原始属性分布  
Fig. 6 Primitive attribution distribution of each factor along the QTH in permafrost regions

《公路技术状况评定标准》(JTG H20—2007)中规定的路基病害包括了 8 种路基损毁类型,本文选取与冻土条件密切相关的路基沉降数据进行拟合,该数据来源于中交一院 2014 年现场实测,评价路段路基沉降状况如表 1 所示。沉降较多的路段分布在楚玛尔河附近、北麓河至风火山之间、乌丽垭口附近、开心岭至通天河之间。

表 1 青藏公路多年冻土区路基沉降路段比例  
Tab. 1 Percentages of embankment settlement along the QTH in permafrost regions

沉降面积/(m <sup>2</sup> ·km <sup>-1</sup> )	所占比例/%
0	60.04
(0,50]	20.30
(50,100]	8.12
(100,200]	7.05
(200,500]	4.49

2.2 Logistic 回归及易发性计算

Logistic 回归模型在滑坡敏感性制图及预测<sup>[24]</sup>、寻找主要影响因子<sup>[25]</sup>等方面已取得广泛应用。该模型克服了线性回归对于因变量和自变量类型的限定,将因变量定义为二值化变量(1 表示事件发生,0 表示事件未发生),定义  $p$  为事件(路基病

K3341)段作为评价路段,以 1 km 为评价单元进行划分,提取划分单元的原始属性,并与路基沉降实测数据进行匹配,共得到 304 个评价单元,提取每个评价单元的各影响因子属性,评价路段各原始属性分布如图 6 所示。体积含冰量较高的路段主要分布在不冻泉、风火山、开心岭至通天河之间的路段;年平均地表温度较高的路段主要集中在乌丽垭口附近;路堤高度较低的路段位于西大滩至不冻泉、雁石坪等路段;路堤走向接近东-西的路段主要在西大滩、风火山、通天河路段;植被覆盖较少的路段主要集中在西大滩至楚玛尔河、红梁河等路段。

害)发生的概率,将  $p$  看作与自变量各影响因子  $X_i(i=1,2,\cdots,k)$  线性相关的函数,即

$$p=b_0+bX_1+b_2X_2+\cdots+b_kX_k+\epsilon$$
 (1)

对其进行 logit 变换,得

$$q(p)=\ln\left(\frac{p}{1-p}\right)=b_0+b_1X_1+b_2X_2+\cdots+b_kX_k+\epsilon$$
 (2)

解方程,得

$$p=\frac{e^q}{1+e^q}=\frac{e^{b_0+b_1X_1+b_2X_2+\cdots+b_kX_k+\epsilon}}{1+e^{b_0+b_1X_1+b_2X_2+\cdots+b_kX_k+\epsilon}}$$
 (3)

式中: $b_0$  为自变量为 0 时事件发生与不发生之比的自然对数; $b_i$  为自变量  $X_i$  改变 1 个单位时事件发生与不发生之比的自然对数改变量, $i=1,2,\cdots,k$ ;  $q(p)$  为进行 logit 变换的函数; $\epsilon$  为常数。

获取每个评价单元各影响因子属性后,对原始数据进行多重共线性检验,检验结果如下页表 2 所示。6 个影响因子的容忍度均大于 0.4,方差膨胀系数均小于 2,共线性程度很低,可进行 Logistic 回归。

将 6 个影响因子作为自变量,将二值化后的实测沉降数据作为因变量,代入 Logistic 模型中进行回归,其中,距径流是否在 200 m 内为分类变量。

表 2 多重共线性检验结果

Tab. 2 Test results of multicollinearity

选取指标	容忍度	方差膨胀系数
体积含冰量	0.857	1.166
年平均地表温度	0.859	1.164
路堤高度	0.963	1.038
路堤走向	0.987	1.013
归一化植被指数	0.964	1.037

对拟合结果中各统计量进行判定,拟合优度统计量中预测总正确率为 76.3%,表明预测正确率较高,拟合结果如表 3 所示。

表 3 各影响因子系数及结果检验

Tab. 3 Coefficient of each factor and results inspection

影响因子	系数 $b_i$	归一化标准 误差/%	Wald 统计量	显著性水平	发生概率/%	发生概率 95% 的置信区间	
						下限	上限
体积含冰量 $X_1$	1.793	0.201	140.94	0.000	10.89	7.34	16.15
年平均地表温度 $X_2$	0.155	0.144	51.63	0.000	2.82	2.13	3.75
路堤高度 $X_3$	0.202	0.188	107.05	0.000	0.14	0.10	0.21
路堤走向 $X_4$	-0.002	0.137	110.24	0.000	4.23	3.23	5.54
归一化植被指数 $X_5$	10.107	0.136	46.38	0.000	0.40	0.30	0.52
距径流是否 200 m 内 $X_6$	0.205	0.333	4.05	0.044	1.96	1.02	3.76
常量 $\epsilon$	-4.442	0.303	12.68	0.000	0.34		

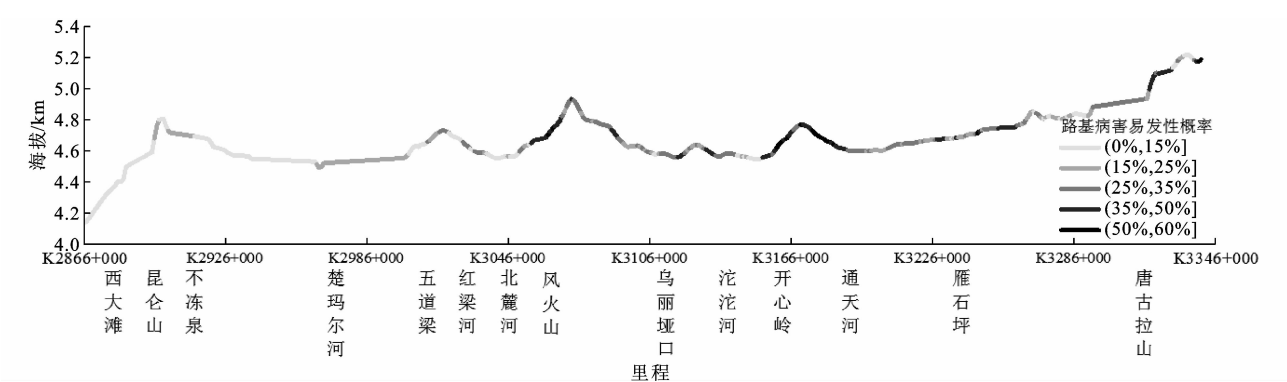


图 7 评价路段病害易发性等级分布

Fig. 7 Grade distributions of hazard susceptibility along evaluation section

表 4 易发性概率统计

Tab. 4 Statistical results of susceptibility

易发性概率	所占比例/%
(0,0.15]	28.62
(0.15,0.25]	23.69
(0.25,0.35]	26.64
(0.35,0.5]	15.46
(0.5,0.6]	5.59

在本文模型计算结果中,少数评价单元的易发性概率与现场实测路基沉降数据不一致,其原因可能与特殊路基结构及其整治历史有关,如采用了特殊的工程措施,处于路桥过渡段以及路基频繁整治

由拟合结果可知,青藏公路多年冻土区路基病害易发性概率模型为

$$p = \frac{e^q}{1 + e^q} \tag{4}$$

$$q = -4.442 + 1.793X_1 + 0.155X_2 + 0.202 \cdot X_3 - 0.002X_4 + 10.107X_5 + 0.205X_6 \tag{5}$$

式中: $X_1 \sim X_6$  分别为体积含冰量、年平均地表温度、路堤高度、路堤走向、归一化植被指数、距径流是否在 200 m 以内。

根据上述回归结果计算评价路段路基病害易发性概率,结果如图 7 所示。易发性概率统计结果如表 4 所示。

等。对此,2015 年 9 月,笔者通过实地调查分析了这些评价单元产生异常的原因,例如:K3085~K3087 路段病害易发性模型计算值极低,现场调查后发现,由于此段处于山前缓坡地带,故降雨引起的坡脚积水导致的病害较多;K3105 附近病害易发性模型计算值极高,但由于对新修路段进行了改道,因此病害较少;K3143 附近病害易发性模型计算值极低,所处地带较为开阔,无较大规模径流,但边坡有积水,导致病害较多;K3145~K3147、K3149~K3150 路段病害易发性模型计算值极高,但由于此路段也为新修路段,因此病害也很少。

### 3 结 语

(1)病害易发性概率模型计算结果可直观且较为准确地反映路段各评价单元的病害易发性等级。由计算结果可知,病害易发性极高的路段有:北麓河至风火山之间的 K3064~K3066、K3070~K3071 路段;风火山至雅玛尔河之间的 K3084~K3086 路段;沱沱河至开心岭之间的 K3161~K3165 路段;开心岭至通天河之间的 K3171、K3176~K3182、K3185 路段;雁石坪至唐古拉山之间的 K3246 路段。

(2)对计算结果中病害易发性极高的各路段主要病害成因进行分析结果为:K3064~K3066、K3070~K3071 路段距径流较近,导致地温较高;K3084~K3086、K3121~K3126 路段路堤接近东西走向,阴阳坡效应明显;K3161~K3165、K3171、K3182、K3185 路段属于高温高含冰量路段;K3246 路段地下冰含量丰富,且路堤高度较低。

(3)建立的适用于青藏公路多年冻土区病害易发性概率模型能准确反映各影响因子与路基病害易发性之间的定量关系。模型中各影响因子与病害易发性的相关程度及权重与已有观测及研究结果一致,可以准确地解释评价路段产生病害的原因,为进一步认识病害机理提供了理论依据。研究结果可为公路养护部门进行已建工程运营维护,公路设计部门开展新建工程选线设计提供科学依据和理论指导。

(4)本文通过考虑由径流引起的坡脚积水对青藏公路多年冻土区病害易发性的影响,并根据常规地区径流对滑坡的影响范围,结合获取的原始资料的最大分辨率及现场调查数据,尝试将径流与公路相交路段径流对病害易发性的影响范围确定为 200 m,这是目前较为可行的反映地表水对多年冻土区道路工程稳定性影响的方法。在今后研究中,首先应采用更准确的方法进一步修正这一影响范围;其次,对于局部地形的改变(如地表取土)、斜坡路堤(改变地表径流)、季节性河流、热融湖塘等的影响,目前还无法在模型中体现,需要开展进一步研究。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 刘和平. 青藏公路多年冻土区公路病害与处置对策研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2011.  
LIU He-ping. Qinghai-Tibet Highway in permafrost regions highway disease and treatment strategies[D].

- Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2011.
- [2] 李金平,王 佐,张 娟,等. 多年冻土路基不均匀变形成因分析[J]. 中国公路学报,2015,28(12):78-85.  
LI Jin-ping, WANG Zuo, ZHANG Juan, et al. Cause analysis on uneven deformation of embankment in permafrost regions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(12): 78-85.
- [3] WU Qing-bai, LIU Yong-zhi, ZHANG Jian-ming, et al. A review of recent frozen soil engineering in permafrost regions along Qinghai-Tibet Highway, China[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2002, 13(3): 199-205.
- [4] 窦明健,胡长顺,多吉罗布,等. 青藏公路路面病害成因分析[J]. 冰川冻土,2003,25(4):439-444.  
DOU Ming-jian, HU Chang-shun, DUOJI Ruo-bu, et al. Analysis on surface troubles of the Qinghai-Tibet Highway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(4): 439-444.
- [5] 窦明健,胡长顺,何子文,等. 青藏公路多年冻土段路基病害分布规律[J]. 冰川冻土,2002,24(6):780-784.  
DOU Ming-jian, HU Chang-shun, HE Zi-wen, et al. Distributing regularities of subgrade disease in permafrost section of the Qinghai-Tibetan Highway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(6): 780-784.
- [6] 陈建兵,汪双杰,章金钊,等. 青藏公路高路基病害的形成及其机理[J]. 长安大学学报:自然科学版,2008,28(6):30-35.  
CHEN Jian-bing, WANG Shuang-jie, ZHANG Jin-zhao, et al. Formation and mechanism of high subgrade diseases of Qinghai-Tibet Highway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(6): 30-35.
- [7] 温 智,盛 煜,马 巍,等. 退化性多年冻土地区公路路基地温和变形规律[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(7):1477-1483.  
WEN Zhi, SHENG Yu, MA Wei, et al. Ground temperature and deformation laws of highway embankments in degenerative permafrost regions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1477-1483.
- [8] 徐安花. 多年冻土区公路病害对冻土地温和含冰类型的敏感性分析[J]. 冰川冻土,2014,36(3):622-625.  
XU An-hua. Analysis of the sensitivity of highway diseases in permafrost regions to ground temperatures and ice contents[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 622-625.
- [9] YU Fan, QI Ji-lin, YAO Xiao-liang, et al. In-situ mo-

- nitroting of settlement at different layers under embankments in permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Engineering Geology*, 2013, 160: 44-53.
- [10] QI Ji-lin, YAO Xiao-liang, YU Fan, et al. Study on thaw consolidation of permafrost under roadway embankment[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 81: 48-54.
- [11] WANG Song-he, QI Ji-lin, YU Fan, et al. A novel method for estimating settlement of embankments in cold regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, 88: 50-58.
- [12] CONOSCENTI C, DI MAGGIO C, ROTIGLIANO E. GIS analysis to assess landslide susceptibility in a fluvial basin of NW Sicily (Italy) [J]. *Geomorphology*, 2008, 94(3/4): 325-339.
- [13] 武雪玲, 任 福, 牛瑞卿, 等. 斜坡单元支持下的滑坡易发性评价支持向量机模型[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2013, 38(12): 1499-1503.
- WU Xue-ling, REN Fu, NIU Rui-qing, et al. Landslide spatial prediction based on slope units and support vector machines[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(12): 1499-1503.
- [14] 许 冲, 戴福初, 姚 鑫, 等. GIS支持下基于层次分析法的汶川地震区滑坡易发性评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(增2): 3978-3985.
- XU Chong, DAI Fu-chu, YAO Xin, et al. GIS-based landslide susceptibility assessment using analytical hierarchy process in Wenchuan Earthquake Region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(S2): 3978-3985.
- [15] 焦方谦, 赵新生, 陈 川. 证据权模型在泥石流灾害易发性评价中的应用[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(6): 1111-1124.
- JIAO Fang-qian, ZHAO Xin-sheng, CHEN Chuan. Debris flow hazard susceptibility evaluation application with weighted evidences model[J]. *Arid Land Geography*, 2013, 36(6): 1111-1124.
- [16] 邹 强, 王 青, 刘延国. 基于 GIS 与 Logistic 模型的公路泥石流易发性分析[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(3): 185-189.
- ZOU Qiang, WANG Qing, LIU Yan-guo. Evaluation method of debris-flow susceptibility using GIS and Logistic model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(3): 185-189.
- [17] WU Qing-bai, NIU Fu-jun. Permafrost changes and engineering stability in Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(10): 1079-1094.
- [18] JIN Long, WANG Shuang-jie, CHEN Jian-bing, et al. Study on the height effect of highway embankments in permafrost regions [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 83: 122-130.
- [19] 张 坤, 李东庆, 童刚强. 通风管-块石复合路基降温效果的数值分析[J]. *中国矿业大学学报*, 2011, 40(1): 35-42.
- ZHANG Kun, LI Dong-qing, TONG Gang-qiang. Numerical analysis of the cooling effect of an embankment with ventilated ducts and closed block stones [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2011, 40(1): 35-42.
- [20] 王铁行, 窦明健, 胡长顺. 多年冻土地区路基临界高度研究[J]. *土木工程学报*, 2003, 36(4): 94-98.
- WANG Tie-hang, DOU Ming-jian, HU Chang-shun. Study on critical thickness of subgrade permafrost area[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2003, 36(4): 94-98.
- [21] CHOU Y L, SHENG Y, WEI Z M. Evaluation on thermal stability of embankments with different strikes in permafrost regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 58(3): 151-157.
- [22] 金会军, 孙立平, 王绍令, 等. 青藏高原中、东部局地因素对地温的双重影响(I): 植被和雪盖[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(4): 535-545.
- JIN Hui-jun, SUN Li-ping, WANG Shao-ling, et al. Dual influences of local environmental variables on ground temperatures on the interior-eastern Qinghai-Tibet Plateau (I): Vegetation and snow cover[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(4): 535-545.
- [23] 彭 惠, 马 巍, 穆彦虎, 等. 青藏公路普通填土路基长期变形特征与路基病害调查分析[J]. *岩土力学*, 2015, 36(7): 2049-2056.
- PENG Hui, MA Wei, MU Yan-hu, et al. Analysis of disease investigation and long-term deformation characteristics of common fill embankment of the Qinghai-Tibet Highway[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(7): 2049-2056.
- [24] OH H J, LEE S, CHOTIKASATHIEN W, et al. Predictive landslide susceptibility mapping using spatial information in the Pechabun area of Thailand[J]. *Environmental Geology*, 2009, 57(3): 641-651.
- [25] 李 洪, 宫兆宁, 赵文吉, 等. 基于 Logistic 回归模型的北京市水库湿地演变驱动力分析[J]. *地理学报*, 2012, 67(3): 357-367.
- LI Hong, GONG Zhao-ning, ZHAO Wen-ji, et al. Driving forces analysis of reservoir wetland evolution in Beijing based on Logistic regression model[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(3): 357-367.