

青藏高原工程走廊冻土分布模型及其变化趋势

鲁嘉濠^{1 2 3}, 牛富俊¹, 程花⁴, 林战举¹, 刘华¹, 罗京¹

(1. 中国科学院冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 外生采矿与矿山环境重庆市重点实验室(重庆地质矿产研究院) , 重庆 400042;

3 煤炭资源与安全开采国家重点实验室重庆研究中心, 重庆 400042; 4. 重庆能源职业学院, 重庆 400042)

摘 要: 青藏高原工程走廊多年冻土是地气系统相互作用的产物, 气候环境决定了其分布的宏观格局, 但局地因素如坡向等, 在一定条件下, 对小区域多年冻土的影响往往会超过大气候背景。通过 Pearson 相关性分析, 选取了对青藏高原工程走廊多年冻土分布影响较大、在 GIS 技术支持下较容易量化的坡向, 结合区域内 29 个钻孔点的长期地温监测数据, 建立了年平均地温与高程、纬度及坡向之间的多元线性模型。根据青藏高原冻土工程地温分带指标, 制作出了走廊内符合实际的冻土分布图。运用随气候变化的响应模型, 预测了走廊内 50 a 后多年冻土将发生较大的变化: 1. 低温稳定区、低温基本稳定区的空间分布面积逐渐减小, 分布界线向高海拔迁移; 2. 高温不稳定区较大范围地向高温极不稳定区转化; 3. 高温极不稳定区将处于长期的退化过程。

关键词: 青藏高原; 多年冻土; 坡向; 模型; 趋势

中图分类号: P931.4

文献标志码: A

青藏高原是世界上中低纬度海拔最高、面积最大的多年冻土区, 随着全球气候的持续变暖、人类活动的增多和青藏铁路等工程的建造与运营, 青藏高原多年冻土正在逐渐退化。沿着青藏公路由楚玛尔河高原至风火山, 是青藏高原工程走廊的重要一段, 在公路两侧宽约 10 km 的区域上, 已经分布有公路、铁路、通信光缆、输油管道、天然气管道、青藏 ± 500 千伏直流电网等多条工程管线。该区域所属的青海高原近 40 年来气候存在着变暖的总趋势, 以 0. 25℃ /10a 升温率上升, 20 世纪 90 年代比 60 年代偏高了 1. 05℃^[1]。气候的持续增温将引起冻土地区环境和冻土工程特性的显著变化, 这一点正在为冰冻圈监测和近年来青藏公路沿线冻土变化的诸多研究成果所证实^[2-4], 只是受局地因素的影响存在一定的地区差异。

局地因素直接影响到地面接收太阳辐射的强度, 而青藏高原强烈的太阳辐射, 致使局地因素影响作用增强^[5]。例如, 在青藏高原上, 南坡接收热量最多, 北坡最少, 南坡季节性积雪融化要比北坡早, 进而造成不同的地温分布; 植被具有较好的隔热作用, 能较好地保护下伏的多年冻土。因此, 局地因素对小区域多年冻土的影响是不容忽视的。目前, 国外的一些冻土空间模型中, 有直接将冻土与气候、地形和坡向进行统计分析建模的^[6], 也有将坡度坡向对太阳辐射收入的影响折算成等效纬度进行计算^[7], 但国内已发表的有关冻土空间模型的文献中, 考虑局地因素尚属少见。然而气候变暖引起多年冻土的退化, 继而引发各种热融灾害, 如热融滑塌引起的斜坡失稳^[8-9], 数量逐渐增多面积逐渐变大的热融湖塘^[10]、公路路基的沉陷变形与翻浆^[11]、铁

收稿日期(Received date): 2012 - 10 - 07; 改回日期(Accepted): 2013 - 01 - 02。

基金项目(Foundation item): 科技部 973 计划项目(2012CB026101); 国家自然科学基金重点项目(41030741); 国家自然科学基金创新群体(41121061); 冻土工程国家重点实验室自主项目(SKLFSE - 2Y - 07) 资助。[Supported by the State Key Development Program of Basic Research of China(2012CB026101), the State Key Program of National Natural Science of China(41030741), the Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China(41121061) and the Independent Project of State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAS(SKLFSE - 2Y - 07) .]

作者简介(Biography): 鲁嘉濠(1986 -), 男, 湖南长沙人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为土地整治与灾害防治研究。[Lu Jiahao(1986 -), male, born in Hunan, master major in research on land consolidation and rehabilitation.] E - mail: lujiahao09@ mails.ucas.ac.cn

路路桥过渡段的沉降变形^[12]等给工程的正常运营均带来了一定的危害。为了保护区域内的冻土工程设施和进行灾害的评价、预测及防治,建立考虑局地因素的冻土分布模型和绘制相应的较大比例尺冻土分布图是有重要意义的。因此,本文利用GIS良好的空间分析和制图功能,提出了考虑局地因素坡向的冻土分布模型,输出研究区内冻土工程地温区划图,并结合气候转暖对地温的影响关系,预测了研究区50 a后冻土的变化趋势。

1 研究区概况及样本点分布

研究区以青藏公路为基准线,向两侧各外延约5 km,北起楚玛尔河,南至风火山,纵长约110 km,海拔4 420~5 120 m,对应公路基桩号K2964~3073,介于34°41′~35°26′N与92°50′~93°30′E之间,面积约1 100 km²。29个样本点主要分布在楚玛尔河、五道梁、北麓河、风火山等地的青藏公路沿线(图1),从北向南纵穿该区域内的多年冻土区,在海拔上也基本体现了高原冻土的高海拔特征,因此这些样本点具备了较好的代表性。

2 局地因素的影响及因子选取

青藏高原多年冻土是地气系统长期相互作用的产物,大的气候背景决定了大范围多年冻土分布的宏观格局,但局地因素,如坡向、坡度、植被、岩性、雪盖的厚度及持续期、有机层和土壤的特性等的影响,在一定条件下,往往会超过大气候背景,造成同样气候环境下局部地区多年冻土的异常分布^[13]。局地因素通过影响太阳辐射、大气对流和热量传导等过程进而影响冻土区的地温,从而影响局地区域内多年冻土的存在与否。研究区内地形地貌多样,分布有高平原、山丘、河谷、盆地等,考虑其中的局地因素的影响,方能得到更精准的冻土分布结果。本文选取了研究区内较易量化的三个局地因素植被覆盖度、坡度、坡向进行分析对比,筛选出影响较大的因子参与建模。

2.1 植被的影响

植被的成土和水保作用已为人们所公认,它能消减降雨侵蚀能量,避免降雨直接击打地表土壤,调节地表径流,消减径流动能,阻滞泥沙迁移;植被还能吸收保持水分,改良土壤,增强土壤渗透性能,提高其抗冲性和抗蚀性。高原上的植被与多年冻土具

有互利作用,植被对下伏的多年冻土具有较好的保护作用,并促进有机质的积累和土壤的发育,而多年冻土的隔水作用,又使得植被得以在高寒干旱地区繁衍生存。例如,青藏高原的高寒草甸在冬季可形成隔热层,阻碍土壤热量散失,夏季可减少地面受热,能使地表年温差降低4~5℃^[14]。研究区内植被总体生长稀疏,植株低矮,生存周期短,覆盖度较低。植被主要分布于楚玛尔河高平原、五道梁盆地和北麓河盆地。通过对覆盖研究区的2006年8月的快鸟全色影像运用归一化植被指数NDVI进行计算,结合2011年9月的野外考察数据进行校核修正,获取研究区内的植被覆盖度图层(图1)。NDVI值的范围是-1~1,一般绿色植被区的范围是0.2~0.8,越大说明覆盖度越高。由图2知,通道内植被覆盖度指数为-0.378~0.394,覆盖度较低。

2.2 坡度的影响

坡度的缓急决定了土壤的厚度,一般缓坡土层较厚,陡坡土层较薄。坡度对植被的生长有较大影响,坡度越大越不利于植被生长。不同的坡度之间,物种多样性与丰富度也有较大的差异。坡地上辐射分布有随坡度而变化的规律,从而影响着坡地上的温度分布。地面亮温和地面湿度与坡度呈负的相关关系,随着坡度的变大而减低^[15]。图2是运用ArcGIS的空间分析得出的通道内的坡度图层,由图可知,通道内坡度整体较平缓,骤然抬升的区域较少。

2.3 坡向的影响

通常,在北半球,坡向指南,叫向阳坡,坡向指北,叫背阳坡。受空气流向的影响,一般还有迎风坡与背风坡之分。不同坡向的地域接受的太阳辐射差异极大,影响了水蒸发量、植被覆盖、坡面侵蚀等诸多因素,从而造成相同海拔高度上、不同坡向地域上多年冻土的分布明显不同^[16]。在祁连山,南北坡冻土下界分布高程差210 m左右;214国道K359+100阴阳坡面下0.3 m处年平均地温差达4.22℃^[17]。在风火山上,阴阳坡年平均地温差1.7~2.4℃,冻土厚度差50~70 m,地下冰发育情况在南北坡也明显不同^[18]。青藏铁路DK1139+670处实测数据表明,阴阳坡面下0.5 m处年平均温差为>3℃^[19]。在天山进行的观测^[20]证明坡向对多年冻土的影响是巨大的,在海拔相近的情况下,阴坡和阳坡处年平均地温的差值可达4.6℃(表1)。如果气温递减率按0.5℃/(100 m)计算,则坡向的影响相当于920 m高程差产生的结果。坡向的影响如此之大,以至于King^[21]提出了以坡向为主要依据的多年冻土分带

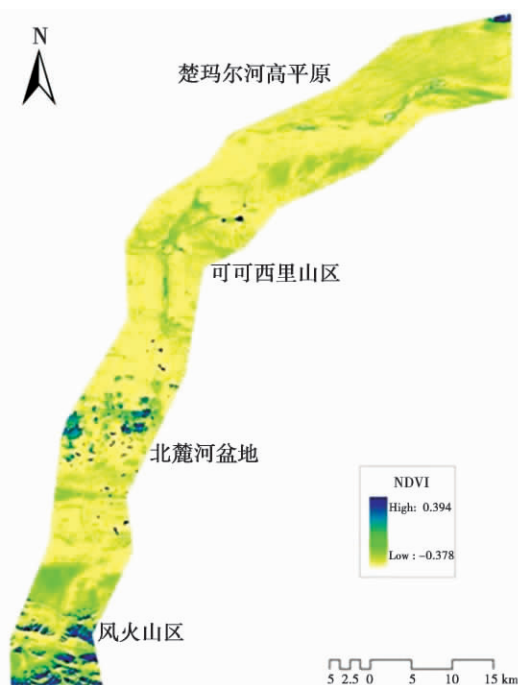


图1 植被覆盖度图层

Fig. 1 The layer of NDVI

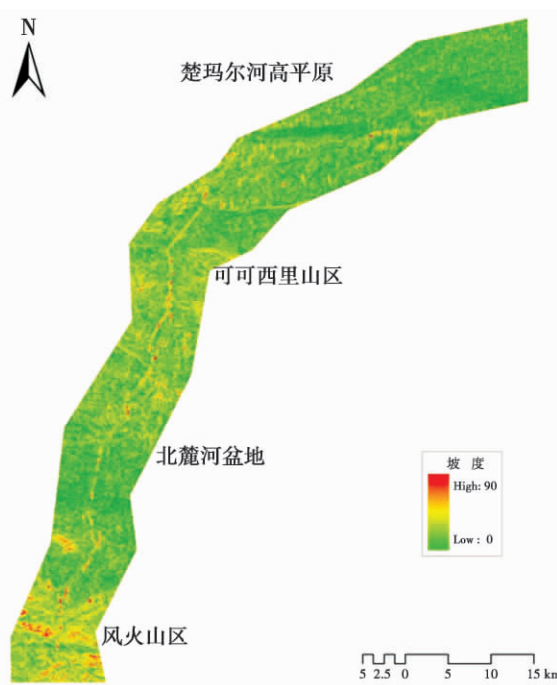


图2 坡度图层

Fig. 2 The layer of Slope

方案: 将南坡无多年冻土的最高海拔定义为连续多年冻土下界, 而将北坡出现多年冻土的最低海拔定义为不连续多年冻土下界。因此, 在青藏高原进行小区域冻土空间建模时, 坡向是局地因素中不可忽视的一个影响因子。

表1 坡向对年平均地温的影响¹⁾

Table 1 The influence of the aspect to the mean annual ground temperature

孔号	坡向	海拔/m	年平均地温/℃	多年冻土厚度/m
D202	阴坡	2 987.5	-2.4	100
冻5	西坡	2 990.0	-0.2	<20
冻9	阳坡	2 927.0	+2.2	0

1) 据周幼吾等^[20]。

坡向通过影响太阳辐射、大气对流和热量传导等过程而影响冻土区的地温, 从而决定局区域内多年冻土的存在与否。本文主要考虑研究区内坡向所造成的南北方向的地温差异, 故假定: ①南北方向坡向影响大小相等, 方向相反; ②东西方向影响大小相等, 方向相同。

坡向数据的获取具体如下: 首先, 在 ArcGIS 平台上, 对研究区的数字高程数据 DEM 进行空间分析获取坡向图层(图3)。然后, 参考天山的观测数据, 运用算式 $2.3 \cos \theta$ (θ 为坡向 $\rho^\circ \sim 360^\circ$) 将坡向量度

转化为线性量度, 其值域为 $-2.3 \sim 2.3$, 结果如图4。

2.4 因子选取

对研究区内 29 个钻孔点的经纬度、高程、坡度、归一化坡向及其植被覆盖度与对应的年平均地温值进行 Pearson 相关性分析(结果见表2)。从表2可以看出, 大尺度因素纬度、高程都与年均地温在 0.01 显著水平下呈现负显著相关关系, 经度与年均地温在 0.05 显著水平下为正相关, 而且相关系数 $| \text{高程} | > | \text{纬度} | > | \text{经度} |$ 。局地因素坡向(归一化数据)与年平均地温在 0.05 显著水平下的相关系数为 0.268, 在局地因素中最大, 体现了小区域中阴阳坡效应的重要影响。基于此, 选取纬度、高程及坡向作为影响因子, 构建研究区多年冻土分布模型。

3 青藏高原冻土分布模型

随着青藏高原冻土研究的不断深入, 众多的研究发展了一系列冻土模型或者冻土对气候的响应模型。这些模型总体可分为建立在传热学基础上的物理模型和适合于冻土制图的经验模型^[22]。经验模型大都只使用有限的变量, 与地理信息系统结合紧密, 具有空间性的优点, 青藏高原应用较广泛的是高程模型和基于年平均地温的回归模型。

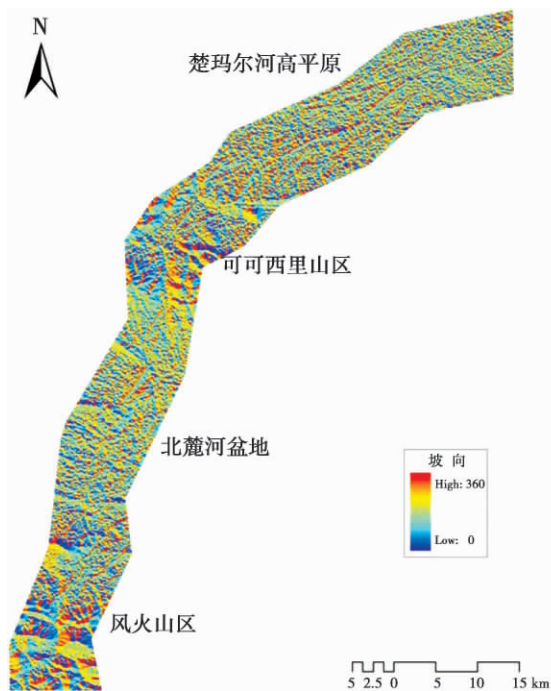


图 3 空间分析得到的坡向
Fig.3 Aspect gained by spatial analysis

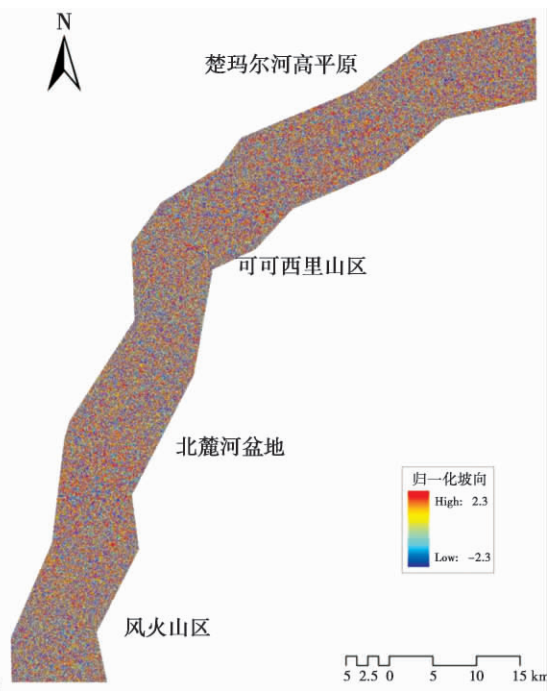


图 4 归一化的坡向
Fig.4 The normalization of aspect

表 2 年平均地温与各影响因素的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between the mean annual ground temperature and main factors

相关性	年平均地温	高程	纬度	经度	坡度	归一化坡向	植被覆盖度
Pearson 相关系数	1.000	-0.451 **	-0.359 **	0.236 *	-0.062	-0.278 *	-0.035
显著水平		0.00	0.01	0.021	0.047	0.016	0.073
统计量	29	29	29	29	29	29	29

3.1 高程模型

青藏高原多年冻土的分布具有明显的三向地带性,由热量南北差异引起的纬度地带性,由距海洋远近和大气环流特点造成的水分状况不同所产生的干燥度地带性,由热量和水分随海拔变化造成的垂直地带性,其分布下界和年平均地温均与海拔和纬度具有较好的相关关系。程国栋^[23]综合总结了纬度地带性规律,用高斯曲线对北半球高海拔多年冻土下界资料进行拟合,得到了如下关系

$$H = 3650 \exp[-0.003\varphi - 25.37]^2 + 1428 \quad (1)$$

式中 H 为多年冻土下界高度(m), φ 为地理纬度(°)。该模型能较好地反映青藏公路沿线多年冻土的分布下界^[3]。徐学祖等^[24]认为多年冻土下界高度主要受纬度、年平均气温、高度变化率和年平均地气温差的影响,根据年平均气温与海拔、纬度的统计关系,并推断下界处的年平均气温为 -2.0°C ,得到

多年冻土下界分布高程模型

$$H_L = \frac{56.02 - T - 1.02L}{0.562} \times 100 \quad (\text{青海})$$
$$H_L = \frac{40.24 - T - 0.491L}{0.572} \times 100 \quad (\text{西藏}) \quad (2)$$

式中 H_L 为下界海拔(m), T 为年平均气温($^{\circ}\text{C}$), L 为纬度(°)。

3.2 基于年平均地温的回归模型

年平均地温是指多年冻土年较差为零的深度处的地温^[25],是冻土分带的主要指标之一,它有利于反映高海拔多年冻土的特征,较好地反映了多年冻土的地带性和区域性因素的综合影响。年平均地温不仅对应一定的多年冻土厚度,一定的平面分布的连续性,及垂直剖面上的衔接特征,而且在工程意义上也反映多年冻土的稳定性。

吴青柏等^[26]根据青藏公路沿线实测年平均地温与海拔、纬度的线性多元回归统计关系,得到了基

于年平均地温的地温带分布计算机模拟模型

$$T_z = 68.827 - 0.00827H - 0.927L \quad (3)$$

式中 T_z 为年平均地温(℃), H 为海拔(m), L 为纬度(°)。南卓铜等^[27]为实现基于年平均地温的青藏高原冻土分布制图,对青藏高原 76 个监测点的年平均地温值与纬度、高程进行线性多元回归统计,得到了如下关系

$$T_{ep} = -0.83\varphi - 0.0049E + 50.63341 \quad (4)$$

式中 T_{ep} 为年平均地温(℃), φ 为十进制表示的纬度(°), E 为高程(m)。

3.3 考虑坡向模型的建立

上述模型都未考虑局地因素的影响,本文根据研究区内 29 个钻孔点 2000—2010 年间的监测数据,对钻孔点的年平均地温与高程、纬度和归一化坡向进行线性多元回归统计,得到了考虑局地因子坡向的关系式

$$T = 65.461 - 1.222\varphi - 0.005H - 0.299\cos\theta \quad (5)$$

式中 T 为年平均地温(℃), φ 为十进制表示的纬度(°), H 为高程(m), θ 为坡向(°)。年平均地温与高程、纬度及坡向之间的复相关系数为 0.936,具有较好的相关性。

4 多年冻土分布模拟与制图

冻土环境影响工程建筑物的稳定性,线性工程的设计施工与维护保养尤其要考虑冻土因素^[28]。研究区是高原上管线工程较为密集的地区,故进行多年冻土分布模拟与制图具有重要的意义。本文利用“回归方程模拟值+修正值”的方法计算得到研究区的年平均地温,依据高原工程地温分区标准^[29]进行划分,获取相应的工程地温分区图件。具体操作如下:首先,运用 ArcGIS 平台的栅格计算模块,将高程因子、纬度因子和归一化坡向因子代入回归公式(5)计算得到年平均地温模拟值图层;接着,对钻孔样本点的地温实测值与模拟值求残差,用反距离权重法将残差插值到整个研究区,得到相应的残差

值图层;最后,将年平均地温模拟值图层与残差值图层叠置求和,得到研究区修正后的年平均地温图层。

反距离权重插值法是以样本点与插值点间的距离为权重的一种加权平均法,离插值点越近的样本点赋予的估值权重越大,其表达式如下

$$z = \left[\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_i^2} \right] / \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2} \right] \quad (6)$$

式中 z 为所要估计的网格点的年平均地温残差值, z_i 为第 i 个钻孔点的残差值, d_i 为插值点到第 i 个钻孔点的距离, n 为用于插值的钻孔点数目。

结合 ArcGIS 良好的数据分析和制图功能,依据表 3 进行重分类和矢量化,产生的图 5 即为研究区多年冻土工程地温区划图。计算输出的结果表明,研究区内多年冻土地温带划分与实际的空间分布基本相符。根据分带指标进行面积统计知,多年冻土区占总面积的 94.06%,其中,低温稳定带占多年冻土区面积的 15.94%,主要分布在风火山和可可西里的高山基岩区;低温基本稳定带占 16.97%,主要分布在风火山及可可西里丘陵地带;高温不稳定带占 48%,主要分布于可可西里和北麓河盆地东缘;高温极不稳地带占 19.09%,主要分布于北麓河盆地和楚玛尔河高平原;季节冻土区或融区因较难用模型来模拟,本文结合历史资料和专家经验进行数字化修正叠加到多年冻土工程地温分区图上。

5 气候变化下多年冻土地温带响应模型

随着全球气候的转暖,冻土过程和寒区环境都发生了深刻的变化,如多年冻土的退化、工程环境的破坏、沙漠化的形成、对已有的寒区工程建筑物的影响以及对拟建建筑的干扰等。

气候变暖后研究区内多年冻土地温带将发生变化,带界处年平均地温升高,致使地温带的界线向海拔高处上移,各地温带分布面积产生变化,多年冻土也逐渐退化。根据青藏公路沿线年平均气温与年平均地温间的相关统计模型^[3]

表 3 冻土分布区划及面积统计

Table 3 the permafrost zonation and Area statistics

冻土工程地温 分区	低温稳定区 TCP-IV	低温基本稳定区 TCP-III	高温不稳定区 TCP-II	高温极不稳定区 TCP-I	多年冻土区	季节冻土区 或融区
年平均地温/℃	$T \leq 2.0$	$2.0 < T \leq 1.0$	$1.0 < T \leq 0.5$	$0.5 < T \leq 0$	$T \leq 0$	$T > 0$
区域面积/km ²	151.61	161.39	456.58	181.62	951.2	60.11

$$T_z = -(0.414 \exp(0.326 T_a) - 1) \quad (7)$$

式中 T_z 为年平均地温($^{\circ}\text{C}$), T_a 为年平均气温($^{\circ}\text{C}$)取绝对值。该方程在年平均气温为负值时是有效地。由汪青春等^[1]根据青海高原上的52个气象站观测资料的分析结果得知,研究区50 a后的年平均气温将升高约 1.25°C ,据此来预测多年冻土地温带的变化特征。与此同时,假设气温升高的结果直接引起多年冻土年平均地温的升高,忽略积雪等因素对多年冻土的影响。根据上述假设,用方程(7)计算出不同地温带界处气温升高后引起的地温变化值,代入方程(5)得到多年冻土地温带对气候变化的响应模型

$$T = 65.461 - 1.222\varphi - 0.005H - 0.299\cos\theta + \Delta T_z \quad (8)$$

式中 ΔT_z 为年平均气温变化引起的地温变化值。同模型(5),运用 ArcGIS 模拟生成50 a后研究区内的冻土区划图(图6)。对比图5知,随着气候的转暖,研究区内多年冻土各地温带将发生较大的变化,低温稳定区、低温基本稳定区、高温不稳定区的空间分布面积逐渐减小,分布界线向更高海拔区域迁移。50 a尺度内,低温稳定区由现在的14.98%缩小到4.81%,低温基本稳定带由15.96%减小为14.45%,高温不稳定区则由45.14%变化为32.54%。高温

极不稳定区随着气温的升高,空间分布面积逐渐扩大,由现在的17.96%增长为31.19%,主要发生在楚玛尔河高平原区。这充分说明了各地温带间受气候转暖的影响,正在发生转化,低温稳定带向低温基本稳定带转化,低温基本稳定带向高温不稳定地带转化,高温不稳定带向高温极不稳定带转化,高温极不稳定带则处于长期的冻土退化阶段。

6 结论与讨论

1. 通过 Pearson 相关性分析,筛选出局地因素——坡向参与研究区冻土分布模型的构建。该模型能较充分地反映研究区内多年冻土的分布特征,输出了符合实际的工程地温区划图。

2. 多年冻土区占据整个区域的94.06%,其中,低温稳定带占多年冻土区面积的15.94%,主要分布在风火山和可可西里的高山基岩区;低温基本稳定带占16.97%,主要分布在风火山及可可西里丘陵地带;高温不稳定带占48%,主要分布于可可西里和北麓河盆地东缘;高温极不稳定地带占19.09%,主要分布于北麓河盆地和楚玛尔河高平原,符合研究区的实际情况。因此,局地因素是进行小区域较大比例尺冻土分布制图不容忽视的影响因子。

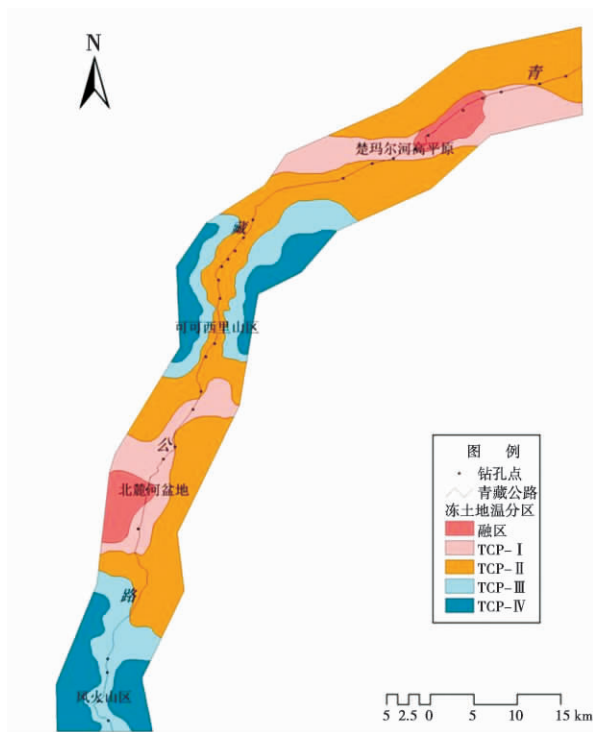


图5 冻土工程地温区划图

Fig. 5 Ground temperature zonation for permafrost engineering

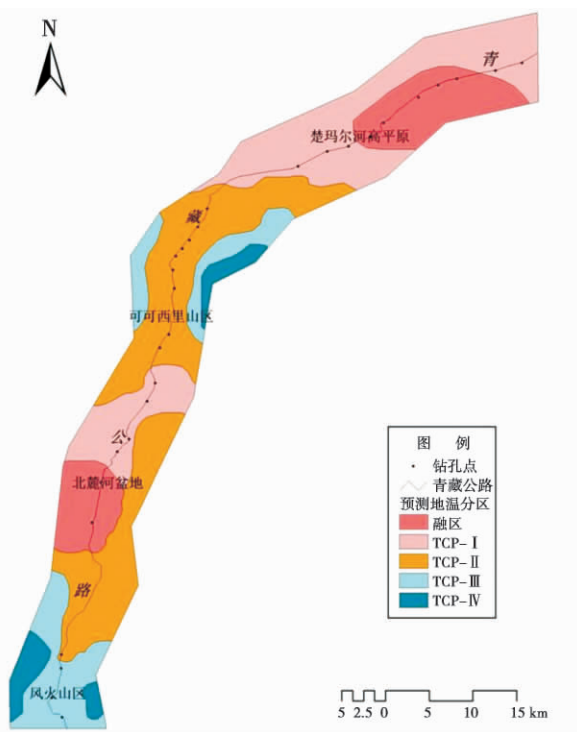


图6 冻土分布预测图(50 a)

Fig. 6 The prediction of permafrost distribution in the future 50 a

3. 运用响应模型预测了研究区内 50 a 尺度多年冻土的变化趋势: 低温稳定区、低温基本稳定区的空间分布面积逐渐减小, 分布界线向更高海拔区域迁移。高温不稳定区较大范围地向高温极不稳定区转化, 而高温极不稳定区将处于长期的退化过程。

4. 多年冻土的变化将对区域内工程建筑物产生较大的影响, 如青藏公路部分路段会发生较严重的破坏, 因此建议必要时可在工程建筑物附近采取一些保护冻土的原则, 以滞缓其不良变化, 减轻可能造成的破坏。

致谢: 感谢国际科学数据服务平台提供的 DEM 数据。

参考文献(References)

- [1] Wang Qingchun, Li Lin, Li Dongliang, et al. Response of permafrost over Qinghai Plateau to climate warming[J]. Plateau Meteorology 2005 24(5): 708 - 713 [汪春林, 李林, 李栋梁, 等. 青海高原多年冻土对气候变暖的响应[J]. 高原气象, 2005 24(5): 708 - 713]
- [2] Li Shuxun, Cheng Guodong, Guo Dongxin. The future thermal regime of numerical simulating permafrost on Qinghai - Xizang (Tibet) Plateau, China, under climate warming. Science in China: Ser D, 1996 39(4): 434 - 441 [李述训, 程国栋, 郭东信. 气候持续转暖条件下青藏高原多年冻土变化趋势[J]. 中国科学: D 辑, 1996, 26(4): 342 - 347]
- [3] Wu Qingbai, Li Xin, Li Wenjun. The response model of permafrost along the Qinghai - Tibetan Highway under Climate Change. Journal of glaciology and geocryology [J], 2001 23(1): 1 - 6 [吴青柏, 李新, 李文君. 全球气候变化下青藏公路沿线冻土变化响应模型的研究[J]. 冰川冻土, 2001 23(1): 1 - 6]
- [4] Jiang Yongjian, Li Shijie, Shen Defu, et al. Climate Change and Its Impact on the Regional Environment in the Source Regions of the Yangtze, Yellow and Lantsang Rivers in Qinghai - Tibetan Plateau during 1971-2008[J]. Journal of Mountain Science 2012 30(4): 461 - 469 [姜永见, 李世杰, 沈德福, 等. 青藏高原江河源区近 40 年来气候变化特征及其对区域环境的影响[J]. 山地学报, 2012 30(4): 461 - 469]
- [5] Tong Boliang, Li Shude. Some characteristics of permafrost on Qinghai - Xizang Plateau and a few factors affecting them [G]//Professional papers on permafrost studies of Qinghai - XXizang Plateau. Beijing: science Press, 1983: 1 - 11 [童伯良, 李树德. 青藏高原多年冻土的某些特征及其影响因素[G]//青藏冻土研究论文集. 北京: 科学出版社, 1983: 1 - 11]
- [6] Keller F. Automated mapping of mountain permafrost using the program PERMAKART within the geographic information system ARC/INFO[J]. Permafrost and Periglacial Process, 1992 3(2): 139 - 142
- [7] Morrissey L A, Strong L L. Mapping permafrost in the Boreal forest with Thematic Mapper Satellite data[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1986 52: 1531 - 1519
- [8] Fujun Niu, Guodong Cheng, Wankui Ni, et al. Engineering-related slope failure in permafrost regions of the Qinghai - Tibet Plateau[J]. Cold Regions Science and Technology 2005 42(3): 215 - 225
- [9] Niu Fujun, Cheng Guodong, Lan Yuanming, et al. Instability study on thaw slump in permafrost regions of Qinghai - Tibet Plateau [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004 26(3): 402 - 406 [牛富俊, 程国栋, 赖远明, 等. 青藏高原多年冻土区热融滑塌型斜坡失稳研究[J]. 岩土工程学报, 2004 26(3): 402 - 406]
- [10] Lin Zhanju, Niu Fujun, Xu Zhiying, et al. Developing features of thaw grooves and their influence on stability of roadbed along Qinghai - Tibet Railway [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011 33(4): 566 - 573 [林战举, 牛富俊, 徐志英, 等. 青藏铁路沿线热融沟发展特征及其对路基热稳定性的影响[J]. 岩土工程学报, 2011 33(4): 566 - 573]
- [11] Wu Qingbai, Shi Bin, Liu Yongzhi. Interaction study of permafrost and highway along Qinghai - Xizang Highway [J]. Science in China: Ser D, 2002 45(10): 893 - 902 [吴青柏, 施斌, 刘永智. 青藏公路沿线多年冻土与公路相互作用研究[J]. 中国科学: D 辑, 2002 46(2): 97 - 105]
- [12] Niu Fujun, Lin Zhanju, Lu Jiahao, et al. Study of the influencing factors of roadbed settlement in embankment-bridge transition section along Qinghai - Tibet Railway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011 32(2): 372 - 377 [牛富俊, 林战举, 鲁嘉涛, 等. 青藏铁路路桥过渡段沉降变形影响因素分析[J]. 岩土力学, 2011 32(2): 372 - 377]
- [13] Camill P, Clark G S. Climate change disequilibrium of boreal permafrost peatlands caused by local processes. American Naturalist, 1998 151(3): 207 - 222
- [14] Wang AiJun. Study on Water & Soil Conservation at Qinghai - Tibet Railway Geemu - Lasa Section [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. [王爱军. 青藏铁路格尔木至拉萨段水土保持研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.]
- [15] Zhang Xiuying, Feng Xuezh. Digital terrain model based Temporal and spatial distributions of solar radiation in mountainous area [J]. Plateau Meteorology, 2006 25(1): 123 - 127 [张秀英, 冯学智. 基于数字地形模型的山区太阳辐射的时空分布模型[J]. 高原气象, 2006 25(1): 123 - 127]
- [16] Cheng Guodong. Influences of local factors on permafrost occurrence and their implications for Qinghai - Xizang Railway design [J]. Science in China: Series D, 2004 47(8): 704 - 709 [程国栋. 局地因素对多年冻土分布的影响及其对青藏铁路设计的启示[J]. 中国科学(D 辑), 2003 33(6): 602 - 607]
- [17] Chou Yaling, Sheng Yu, Li Jinping. Analysis of transverse thermal asymmetry of highway high embankment in permafrost region [J]. Roadbed Engineering, 2007 4(2): 4 - 6 [丑亚玲, 盛煜, 李金平. 多年冻土区公路高路基横向热状况不对称性分析[J]. 路基工程, 2007 4(2): 4 - 6]
- [18] Zhou Youwu, Guo Dongxin. Principal characteristics of permafrost in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1982 4(1): 1 - 19 [周幼吾, 郭东信. 我国多年冻土的主要特征[J]. 冰川冻土, 1982 4(1): 1 - 19]
- [19] Sheng Yu, Ma Wei, Wen Zhi, et al. Analysis of difference in thermal state between south faced slope and north faced slope of railway embankment in permafrost region [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005 24(17): 3197 - 3201 [盛煜, 马巍, 温智, 等. 多年冻土区铁路路基阴阳坡面热状况差异分析[J]. 岩土力学与工程学报, 2005 24(17): 3197 - 3201]

- [20] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing et al. Geocryology in China [M]. Beijing: Science Press, 2000: 242 [周幼吾, 邱国庆, 郭东信, 等. 中国冻土. 北京: 科学出版社, 2000: 242]
- [21] King L. Zonation and ecology of high mountain Permafrost in Scandinavia [J]. Geografiska Annaler, 1986, 68A(3): 131–139
- [22] Li Xin, Cheng Guodong. Review on the Interaction models between climatic system and frozen soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 23(3): 315–321 [李新, 程国栋. 冻土–气候关系模型评述. 冰川冻土, 2002, 23(3): 315–321]
- [23] Cheng Guodong. Problems on zonation of high-altitude permafrost [J]. Acta Geographica Sinica, 1984, 39(2): 185–193 [程国栋. 我国高海拔多年冻土地带性规律之探讨 [J]. 地理学报, 1984, 39(2): 185–193]
- [24] Xu Xiaozu, Wang Jiacheng. Preliminary discussion on the distribution of frozen ground and its zonality in China [G] // Proceedings of 2nd National Conference on Permafrost (Selection). Beijing: Science Press, 1982: 3–12 [徐学祖, 王家澄. 中国冻土分布及其地带性规律的初步探讨 [G] // 第二届全国冻土学术会议论文选集. 北京: 科学出版社, 1982: 3–12]
- [25] Qiu Guoqing, Liu Jinren, Liu Hongxu. Geocryological glossary [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1994: 66 [邱国庆, 刘经仁, 刘鸿绪. 冻土学辞典 [M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1994: 66]
- [26] 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 [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]
- [27] Nan Zhuotong, Li Shuxun, Liu Yongzhi. Mean annual ground temperature distribution on the Tibetan Plateau: permafrost distribution mapping and further application [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(2): 142–148 [南卓铜, 李述训, 刘永智. 基于年平均地温的青藏高原冻土分布制图及应用 [J]. 冰川冻土, 2002, 24(2): 142–148]
- [28] Wu Qingbai, Zhu Yuanlin, Shi Bing. Study of frozen soil environment relation to engineering activities [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(2): 200–207 [吴青柏, 朱元林, 施斌. 工程活动下的冻土环境研究 [J]. 冰川冻土, 2001, 23(2): 200–207]
- [29] Railway Construction and Management Bureau. Tentative provisions for Qinghai–Tibetan railway engineering design in permafrost regions on Plateau [Z]. Beijing: Ministry of Railway of PRC, 2001: 11 [铁道部建设管理司. 青藏铁路高原冻土区工程设计暂行规定 [Z]. 北京: 中华人民共和国铁道部, 2001: 11]

The Permafrost Distribution Model and Its Change Trend of Qinghai–Tibet Engineering Corridor

LU Jiahao^{1,2,3}, NIU Fujun¹, Cheng Hua⁴, LIN Zhanju¹, LIU Hua¹, Luo Jing¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAS, Lanzhou Gansu 730000, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Exogenic Mineralization and Mine Environment, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China; 3. Chongqing Research Center of State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Chongqing 400042, China;

4. Chongqing Energy College, Chongqing 400042, China)

Abstract: The permafrost in the Qinghai–Tibet Plateau is resulted from the interaction of the atmosphere–earth system. The atmosphere controls the macrostructure of the permafrost. However, some local factors such as slope–aspect, also greatly affect the permafrost status. According to the consequence of Pearson Correlation Analysis, we select some factors greatly influencing the permafrost distribution in a section from the Chumaer River to the Fenghuo Mountain in the Qinghai–Tibet Engineering Corridor. The factors that can be easily quantified by GIS were latitude, elevation and slope–aspect. Based on records of the mean annual ground temperature from 29 boreholes in the section, the relationship model between the mean annual ground and the elevation, latitude and slope–aspects is constructed using regression analysis method. When multiple correlation coefficient is significant with a value of 0.936. Then a simulated map of permafrost distribution is produced through the indices for cold region engineering purpose. Every zone's area is also calculated. Then, we predict the permafrost change in the study area after 50a, supposing the air temperature might rise 1.25°C. The prediction shows that the low temperature stable zone and sub-stable zone might shrink from 14.98%, 15.96% at present to 4.81%, 14.45% respectively. At the same time, the high temperature unstable zone might greatly transform into high temperature extreme unstable zone, which might be in the degradation. Such changes will influence the local infrastructures seriously in future.

Key words: the Qinghai–Tibet Plateau; permafrost; model; slope–aspect; trend