

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0086

FAN Xingwen, LIN Zhanju, LUO Jing, et al. Long-term effects of embankment engineering behaviors on cold permafrost in high-altitude permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(5):1323-1333. [范星文, 林战举, 罗京, 等. 高海拔多年冻土区路基工程行为对低温多年冻土长期影响的监测研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(5):1323-1333.]

# 高海拔多年冻土区路基工程行为对低温多年冻土长期影响的监测研究

范星文<sup>1,2</sup>, 林战举<sup>1</sup>, 罗京<sup>1</sup>, 刘明浩<sup>1</sup>, 尹国安<sup>1</sup>, 高泽永<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 青藏铁路路基创造性采用了主动冷却路基的设计理念修建而成, 目前铁路已经安全运营超过 10 年。青藏铁路路基修筑在多年冻土之上, 路基下部冻土温度变化是衡量路基是否稳定的关键因素。基于长期(2008—2019 年)地温观测资料, 对昆仑山垭口南坡青藏铁路 K980+000 低温多年冻土区块石路基坡脚至坡脚外 30 m 范围内的冻土上限变化、年际地温变化、季节性地温变化进行分析, 研究了路基工程行为对低温多年冻土的长期影响机制。结果表明: 冻土地温不断升高, 冻土上限逐年下移; 与天然孔比较, 路基坡脚处地温增温幅度反而较小, 主要可能受块石路基冷却效应的影响; 冷季与暖季呈现出不对称的增温趋势。冻土路基普遍增温的趋势仍然存在, 出于对多年冻土的保护与保证工程稳定性的考虑, 应尽量采用冷却路基的思想修建路基。同时, 应加强对路基的监测, 分析长期增温过程后路基稳定性变化, 并对路基下部冻土的变化做出定量研究。

**关键词:** 青藏铁路; 低温多年冻土; 增温趋势; 路基工程影响

**中图分类号:** P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)05-1323-11

## 0 引言

青藏铁路是内地连通西藏的生命线工程, 是我国高海拔多年冻土区修建的第一条铁路。青藏铁路采取了“主动冷却路基”的设计理念, 2006 年全线建成通车, 目前已安全运营超过 10 年。青藏铁路格尔木至拉萨段(简称格拉段)全长约 1 100 km, 沿线平均海拔约 4 500 m, 穿越大片连续多年冻土区段约 550 km, 其中年平均地温大于  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  的高温多年冻土段约占 50%, 体积含冰量大于 20% 的富冰多年冻土段约占 40%<sup>[1]</sup>。

由于多年冻土含有冰, 对热扰动非常敏感。修建在多年冻土之上的铁路、公路等线性工程都不可避免的会对地表条件造成改变, 导致地表辐射能量结构与地表热量收支发生变化, 进而引起路基下部及坡脚附近多年冻土活动层厚度增加、冻土温度升高, 甚至多年冻土发生融化, 最终导致工程构筑物

稳定性下降, 路基沉陷、裂缝等病害发生<sup>[2-3]</sup>。

温度是判定多年冻土是否稳定的主要指标。铁路路基下部及坡脚附近温度场的变化主要由自然因素(包括: 全球尺度或区域尺度的气温、降水、地表覆盖等)和人为因素(包括: 工程施工、人为热源、铁路运营等)两方面引起<sup>[4]</sup>, 在这两类因素的综合作用下, 多年冻土可能会变暖, 从而引起冻土区面积减小、低温冻土向高温冻土转化等问题<sup>[5-11]</sup>。

为保障青藏铁路的正常运行, 大量学者及工程技术人员通过监测路基下部温度场变化来评价路基稳定性状况。其一是地域差异条件下路基下部冻土变化研究, 对青藏铁路沿线如西大滩、北麓河、风火山、唐古拉山等地区进行监测, 发现冻土活动层厚度不断增加, 多年冻土发生不同程度退化, 铁路路基病害主要表现为多年冻土退化之后易发生融沉<sup>[12-16]</sup>; 其二是不同路基结构的降温效果研究, 如

收稿日期: 2020-08-12; 修订日期: 2021-01-03

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0905); 国家自然科学基金项目(41971089)资助

作者简介: 范星文, 博士研究生, 主要从事寒区环境与工程研究. E-mail: fanxingwen18@mails.ucas.ac.cn

对块石路基、遮阳棚、热棒等路基结构的长期研究表明,路基结构在保护冻土、减缓冻土退化、减少路基病害方面发挥重要作用<sup>[17-20]</sup>。这些研究也证实了路基稳定性与其下部多年冻土条件密切关联。

同时也发现,目前的研究多集中于路基两侧能量平衡分析计算、多年冻土地气热收支分析、温度与路基沉降等方面<sup>[18-24]</sup>,也特别关注高温多年冻土区路基下部及坡脚地温场的变化及其与工程的相互作用,但缺少根据较长时间序列的实测地温数据,来评价工程行为对低温多年冻土的影响研究。短时间序列的工程行为对多年冻土影响的研究具有一定的局限性,不足以准确评估铁路路基稳定状况。

鉴于此,本文基于青藏铁路K980+000段2008—2019年的长期地温监测资料,分析了铁路工程运营对低温多年冻土的长期影响过程,包括路基下部多年冻土地温变化趋势、路基上限变化趋势、天然地温变化趋势等,研究结果对准确评估青藏高原冻土环

境变化以及维护青藏铁路安全运营具有重要意义。

## 1 研究区概况

### 1.1 区域地质地貌条件

青藏高原位于我国西南部,南自喜马拉雅山脉南缘,北到昆仑山-祁连山北侧,纵贯约13个纬度,南北宽达1 532 km,面积约为 $2.6 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,约占我国陆地总面积的26.8%<sup>[25]</sup>。青藏高原也是平均海拔最高的高原,大部分区域平均海拔超过4 500 m。较高的海拔导致空气稀薄、太阳辐射强、平均气温较低、日较差大等气候特点。现代冰川、冻土发育、冰缘地貌、寒冻风化作用普遍<sup>[26]</sup>。

研究区(图1)位于昆仑山南坡青藏铁路里程K980+000路基西侧处,距昆仑山垭口约3 km。南接楚玛尔河高平原,海拔约4 700 m,属于昆仑山大-中起伏高山地貌单元,大部分地区为冰水沉积或湖相沉积带,少部分为河流阶地,地形相对平缓。海拔5 100 m以上发育着现代冰川、石冰川<sup>[27]</sup>。

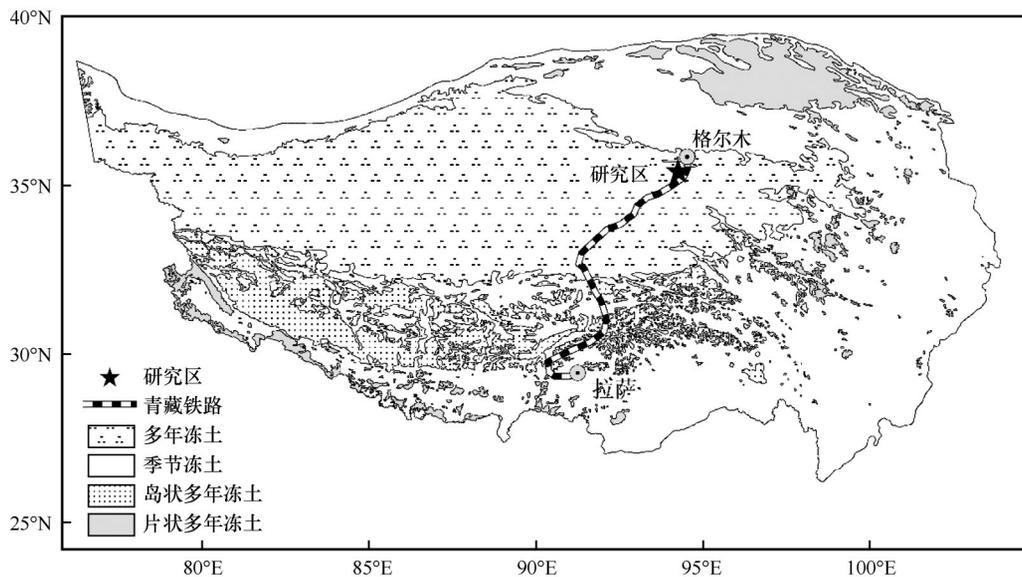


图1 青藏高原及研究区位置<sup>[26]</sup>

Fig. 1 Location of study site in Qinghai-Tibet Plateau (QTP)<sup>[26]</sup>

### 1.2 区域气象条件

研究区位于青藏高原北部,气候干旱,多风少雨,属于典型的内陆高原气候特征。研究结果显示<sup>[28-29]</sup>,距研究区南约50 km的清水河地区1957—2011年多年平均降雨量517.8 mm,年蒸发量1 163.3 mm,年平均风速 $4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,最大风速 $31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,最大积雪厚度15 cm。同时,根据2014年布设在该场地的HOBO系列气温传感器监测结果(表1),研究区2015—2018年多年平均气温 $-5.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,极端

高温 $20.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,极端低温 $-32.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ,平均冻结天数为247天,冻结指数为 $2 490 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ ,融化指数为 $523 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ ,冻融指数为4.76。

### 1.3 区域植被与冻土发育情况

研究区位于高寒草原区,主要植被类型为高寒草原(alpine grassland),原生建群种为小嵩草(*Kobresia pygmaea*)和紫花针茅(*Stipa purpurea*)<sup>[30-31]</sup>。且植被稀少,盖度不足20%,植株高度 $<15 \text{ cm}$ 。

研究区冻土基本呈大片连续分布,局部有融

表1 研究区 2015—2018 年气温情况

Table 1 Air temperatures in the study area from 2015 to 2018

年份	年均温度/℃	极端低温/℃	极端高温/℃	冻结天数/d	冻结指数/(℃·d)	融化天数/d	融化指数/(℃·d)	冻融指数
2015	-5.6	-25.3	13.6	251	2 458.2	114	420.9	5.8
2016	-5.1	-25.3	13.6	247	2 460.9	119	618.7	3.9
2017	-5.3	-23.4	13.6	241	2 432.4	124	502.9	4.8
2018	-5.7	-23.4	10.2	247	2 610.1	118	549.6	4.8

区。据前期调查,昆仑山南坡连续冻土下界在 4 450~4 560 m<sup>[32]</sup>。多年冻土厚度约为 60~120 m,天然上限深度约 1.5~2.5 m,垂向上 2~3 m 深度易受影响的区域发育着质量含水量超过 50% 的含土冰层,属富冰或饱冰冻土区,3~8 m 为富冰或饱冰冻土,含水率约 20%,13 m 以下为强风化泥灰岩区,发育饱冰或富冰冻土,部分区域有层状冰<sup>[29]</sup>。冻土冷生构造为网状、水平层状和裂隙脉状。

#### 1.4 研究区路基结构

块石路基广泛应用于青藏铁路路基。块石路基可分为块石基底路基、块石护坡路基、以及 U 型块石路基。研究区的路基结构为块石护坡路基,属于开放式块石路基。路基高度约为 4 m,块石护坡厚度约为 1 m[图 2(a)]。块石路基能有效抬升多年冻土上限,降低下部多年冻土温度。

## 2 研究方法

### 2.1 监测设备布设

2007 年 10—11 月进行现行路基单侧钻孔[图 2(b)],垂直路基布设钻孔 5 个,钻孔深度均为 15 m,1 号孔距离铁路路基坡脚约为 30 m,可近似认为是天然孔,铁路运营对该处的多年冻土基本没有扰动,或者扰动很小。2 号孔距离铁路路基坡脚约为 5 m,3 号孔距离路基坡脚约为 3.6 m,4 号孔距离路基坡脚约为 2 m,5 号孔位于路基坡脚处。每个钻孔安装高精度热敏电阻温度传感器 25 个(由中国科学院冻土工程国家重点实验室制作,标定测温精度为 $\pm 0.05$  ℃),用于实时监测冻土温度。从地面向下第 1 个温度传感器安装深度为 0.5 m,0.5~10 m 深度,每隔 0.5 m 安装 1 个;10~15 m,每隔 1 m 安装 1 个温度传感器。

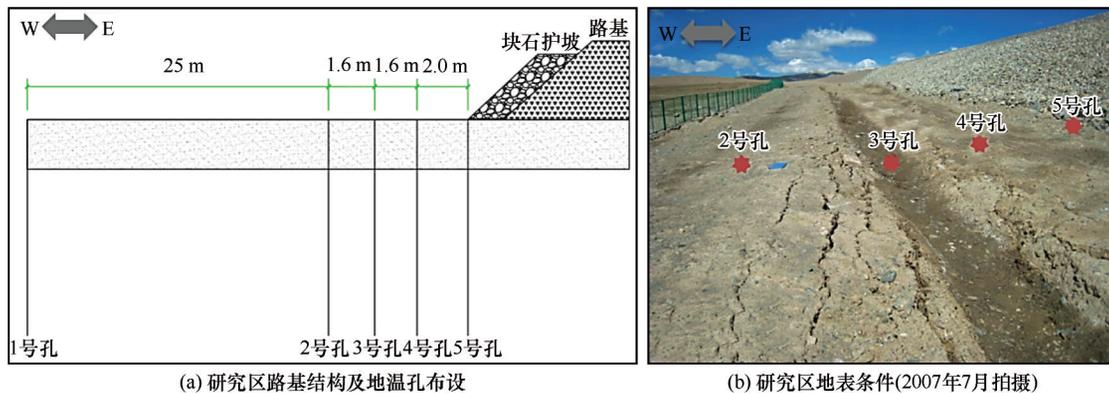


图2 K980+000段地温监测孔布设示意图

Fig. 2 Map of ground temperature monitoring holes in section of K980+000: subgrade structure and ground temperature holes at the study area (a); surface conditions at the study area (b)

地温数据用美国 Compbell 公司生产的 CR3000 数据采集仪采集,数据采集开始时间为 2008 年 1 月 1 日,实施自动连续采集,采集频率为每天 4 次。本文分析数据截止日期为 2019 年 12 月 31 日,其中 2013 年 2—4 月的数据缺失,缺失数据通过前后两年同期数据内插补足,缺失数据小于全部分析数据的 2.3%,对平均值的计算影响很小。

2014 年 10 月,补充安装了一套 HOBO 系列外部温度数据记录器 HoboPro v2(U23-004),气温传感器被保护在太阳辐射罩内,安装高度为 2.0 m,地表温度传感器埋设在地表以下 5 cm 深度,标定的测量精度为 $\pm 0.21$  ℃,适用环境温度为 $-40\sim 100$  ℃。数据从 2014 年 10 月 5 日开始记录,每 30 分钟连续记录一次。本文分析数据截止日期为 2020 年 2 月

29日。

## 2.2 数据分析方法

### 2.2.1 平均气温、平均地温计算

年平均温度是指一年内365(或366)天的平均值,本文年平均气温是指每年1月1日至12月31日的17 520个(2个/小时×24小时×365天)气温数据的平均值。不同深度土体年平均温度是指每年1月1日至12月31日的1460个(4个/天×365天)地温数据的平均值。月平均温度是指每月温度的平均值。

### 2.2.2 冷暖季平均温度计算

青藏高原四季不分明,通常分为冷暖两季。在全球增温的背景下,区分不同季节的增温,有利于采取不同的措施,更好的保护铁路。本文选取将5—10月份作为暖季(地表温度为正温,处于融化状态),11月—次年4月作为冷季,分析冷暖季不同的

增温趋势。冷季与暖季的增温率均为年均冷季/暖季增温率。在进行计算年均增温速率时,采用最小二乘法进行计算。

## 3 结果分析

### 3.1 冻土上限变化趋势

冻土上限一般指0℃等温线在土体中达到的最大深度,是多年冻土区冻土融化最大深度<sup>[32-33]</sup>。利用线性插值方法,估算了各个监测孔的冻土上限(图3)。结果表明2008年监测初期,1号孔、2号孔冻土上限相差不大,均约为1.8 m,5号孔上限深度为1.26 m。到2019年监测孔冻土上限均有不同程度的下降,4号孔冻土上限深度达到2.27 m,下降了56 cm,在所有的监测孔中最大,5号孔冻土上限约1.67 m,在所有的监测孔中为最小,下降了41 cm。

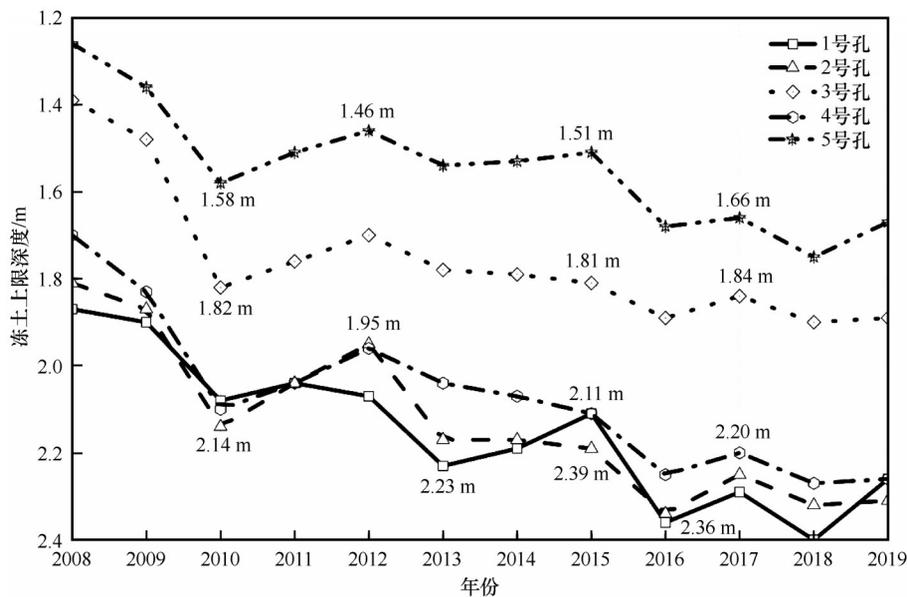


图3 冻土上限随时间变化(2008—2019年)

Fig. 3 Annual variations of permafrost table during 2008—2019

监测期(2008—2019年)所有监测点的冻土上限都在波动中下降。2010年和2016年有一个“跳跃”(两个年份的冻土上限下降量超过10 cm),可能由于极端气候的影响或者是地下热量累积后产生突变,其余时间下降趋势都比较缓慢。同时,从下降率来看,5个监测孔冻土上限下降的速率大体一致,1号孔、2号孔、4号孔冻土上限下降幅度均大于 $4 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,3号孔、5号孔冻土上限下降幅度约为 $3 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ ;但5号孔(靠近路基的孔)维持了较浅的冻土上限,表明非气候源的扰动可能在此处很小,并且块石路基很好的保护了上层多年冻土,使其处于

放热大于吸热状态,保持了较浅的冻土上限深度。

### 3.2 地温年均升温趋势

对地温数据进行分析,将两年温度的平均值做成一个系列的数据,绘成地温剖面图(图4)。结果显示,在同一深度,尽管土体年平均温度可能存在一定波动,但总体呈现出增温的趋势,上层增温大于下层增温。1号孔2008—2013年的浅层平均地温接近,从2014年以后,地温显示出明显的增加趋势。2号孔的地温逐年递增,2014—2015年地温在这10年中表现出最暖(-7 m以上),外界环境(气温、降雨、热扰动等)的影响大,但总体呈现出波动

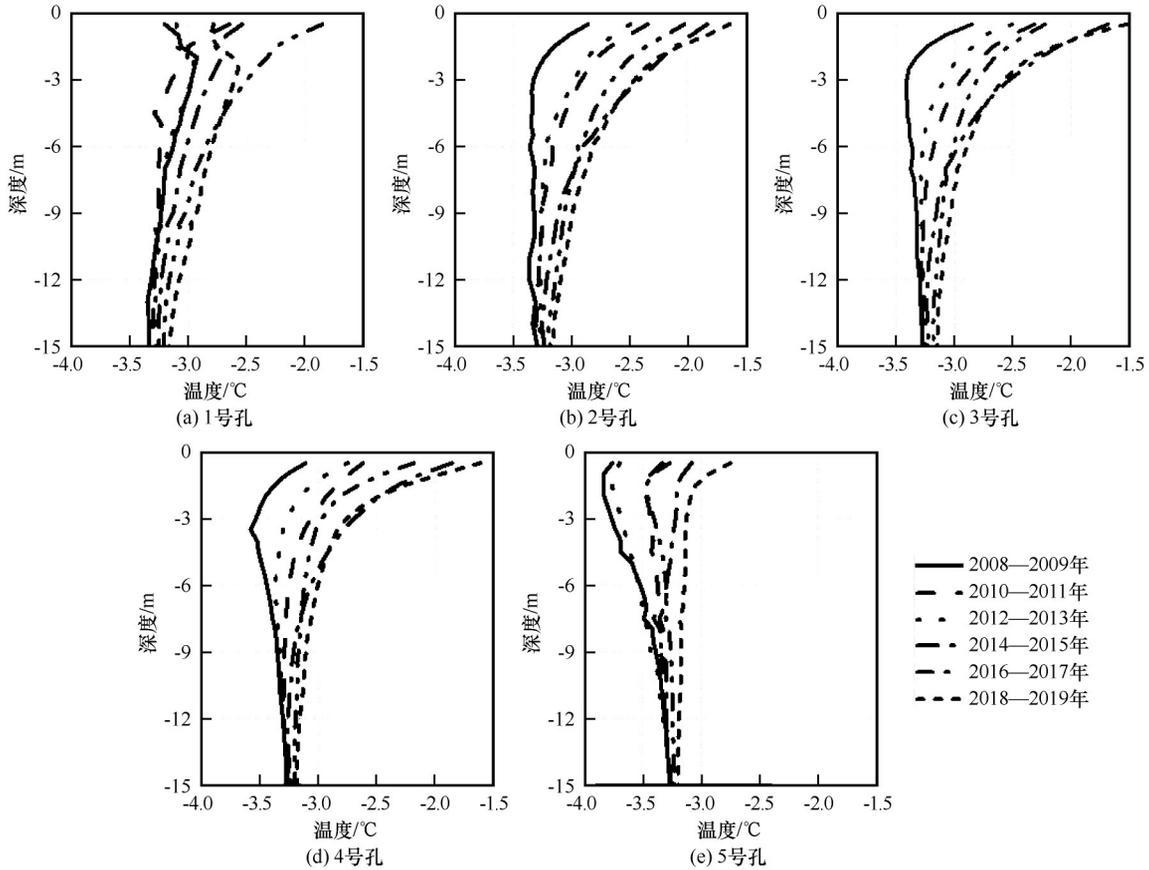


图4 监测孔地温剖面随时间变化(一个地温曲线代表两年的平均地温)(2008—2019年)  
 Fig. 4 Ground temperature profile at five boreholes during 2008—2019 (A profile represents the average ground temperature in two years)

增温的趋势, -7 m 以下, 受外界环境影响很小, 地温同样表现出随时间增温趋势。3号孔、4号孔、5号孔温度变化趋势与2号孔相同, 即2014—2015年平均地温表现出反常的高温(-7 m 以上), 但其下部的地温也随时间不断增加。同时, 对-7 m 以下深度的地温进行分析, 2号孔、3号孔、4号孔、5号孔下部温度增温速率不同, 2号孔2008—2015年增温较大(表现为年平均地温曲线间距较大), 5号孔2008—2015年增温较小(表现为年平均地温曲线间距较小), 但2016—2017年的地温均表现出了一个“跳跃”(与气温变化一致), 即所有监测钻孔深度(-7 m 到-15 m)温度相较前几年显著的增加。根据地温曲线, 所有的监测孔地温曲线逐渐由“稳定型地温曲线”变为“退化型地温曲线”, 这一过程随时间推移不断加剧。

利用线性回归分析方法, 计算出每个观测点不同深度每年的升温率(图5)。该区域的地温整体表现出升温的趋势, 升温率随深度的增加呈现出递减的趋势。将-0.5 m 处地温看作活动层上部, -1.5 m

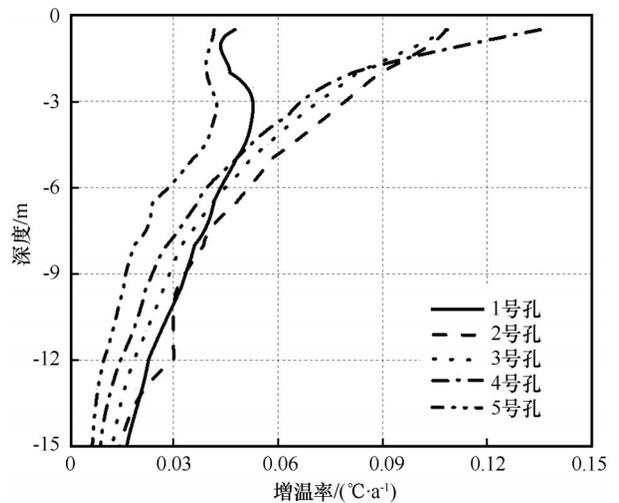


图5 研究区各钻孔11年年均增温随深度变化趋势(2008—2018年)  
 Fig. 5 Annual increase rate of ground temperature in different depth at each borehole during 2008—2018

处看作是活动层下部, -2.5 m 处看作是冻土顶部, -5 m、-10 m、-15 m 分别看作是浅、中、深三个不同的冻土深度, 计算了它们的年均升温率(表2)。

地温年均升温最显著的为活动层(表现为所有监测孔-2 m 深度以上年均增温比-2 m 深度以下大), 在-2 m 深度以上, 对应的最大年均增温值1号孔约 0.048 °C·a<sup>-1</sup>, 2号孔 0.108 °C·a<sup>-1</sup>, 3号孔 0.108 °C·a<sup>-1</sup>, 4号孔 0.135 °C·a<sup>-1</sup>, 5号孔 0.042 °C·a<sup>-1</sup>。5号孔增温趋势较1号天然孔快, 4号孔靠近路基, 在-2 m 深度以上, 增温趋势较快, 在-2 m 深度以下, 增温缓慢。在-10 m 深度以下排除局地因素的差异以及仪器的误差, 1~5号孔表现出相似的增温趋势, 并且距离路基越近增温幅度越小。

监测数据表明, 研究区地温在冷季和暖季表现出不同的增温趋势, 全年表现出不均衡增温状态(图6)。暖季, 5个监测孔地温都表现出增温趋势,

随深度增加, 增温幅度下降。路基孔年均增温较天然孔小, 天然孔与2号、3号孔表现出大致相等的增温幅度, 靠近路基的4号监测孔在0 m到-2 m 深度显示出较强的增温趋势, -2 m 以下, 各监测孔表现出大致相等的增温幅度。在冷季, 5个监测孔同样显示出增温趋势。-2 m 深度以上所有钻孔都显示随深度增加而增温率逐渐增大; -2 m 到-3 m 深度, 增温趋势最大; -3 m 深度以下, 随深度增加增温趋势逐渐减小; -8 m 以下, 增温趋势大致相等。综合来看, 暖季与冷季表现出不均衡的增温趋势, 暖季增温趋势在0到-2 m 深度时较冷季大, -2 m 到-10 m 暖季增温趋势较冷季小, -10 m 到-15 m 深度, 冷季与暖季增温趋势大致相等, 相差±0.001 °C。

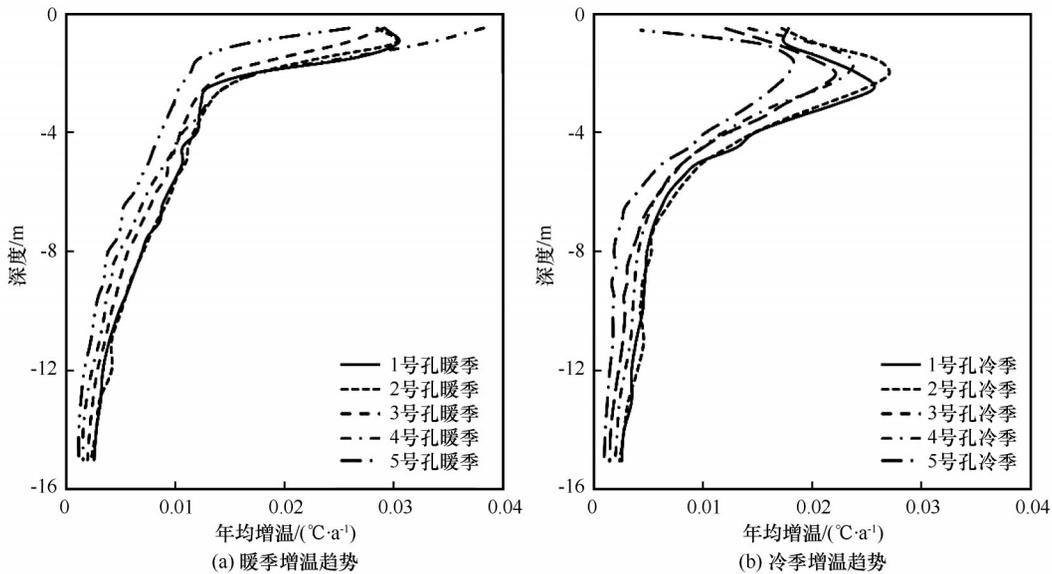


图6 暖季与冷季不均衡增温趋势

Fig. 6 Unbalanced warming in warm season and cold season, warm season (a) and cold season (b)

表3 不同深度年均增温速率以及对应的相关系数(R<sup>2</sup>)

Table 3 Annual average temperature increase rate and correlation coefficient at different depths

孔号	参数	深度/m					
		-0.5	-1.5	-2.5	-5	-10	-15
1号孔	增温率/(°C·a <sup>-1</sup> )	0.048	0.046	0.053	0.048	0.030	0.016
	R <sup>2</sup>	0.13	0.24	0.47	0.67	0.97	0.98
2号孔	增温率/(°C·a <sup>-1</sup> )	0.108	0.097	0.083	0.058	0.03	0.015
	R <sup>2</sup>	0.53	0.74	0.76	0.86	0.94	0.98
3号孔	增温率/(°C·a <sup>-1</sup> )	0.108	0.091	0.078	0.052	0.025	0.012
	R <sup>2</sup>	0.44	0.52	0.54	0.72	0.89	0.96
4号孔	增温率/(°C·a <sup>-1</sup> )	0.135	0.095	0.072	0.048	0.021	0.009
	R <sup>2</sup>	0.53	0.52	0.49	0.65	0.83	0.93
5号孔	增温率/(°C·a <sup>-1</sup> )	0.042	0.038	0.040	0.036	0.014	0.007
	R <sup>2</sup>	0.37	0.39	0.42	0.57	0.70	0.79

## 4 讨论

### 4.1 地温变化及其对路基影响

在监测时间内, 计算了地温的年际增温趋势、季节增温趋势, 这两种趋势都表明地温是在缓慢增加。不同监测孔、监测孔的不同深度年际增温率不同, 但这种增温都导致活动层厚度的增加, 多年冻土层部分融化, 路基以及天然孔面临着沉降的风险。增温的原因是气候变化和工程扰动的双重效应。

气候的变化直接影响着多年冻土的发展。全球气候变化主要以气候变暖的形式出现, IPCC 的报告指出, 过去 100 年来全球地表温度升高了 0.3~0.6 °C, 自 19 世纪 90 年代以来全球变暖幅度明显升高, 预计未来 100 年内全球气温可能升高 2.5 °C, 可能的范围为 1.4~5.8 °C<sup>[34]</sup>。青藏高原作为全球气候变化的指示器, 其升温速率会高于全球平均值<sup>[35-36]</sup>, 从 1981 年至 2010 年期间, 青藏高原气温平均升高率为 0.04~0.05 °C·a<sup>-1</sup><sup>[37]</sup>, 同时, 1995 年至 2007 年期间, 青藏公路沿线的多年冻土活动层厚度持续增加, 年平均速率为 4.5 cm·a<sup>-1</sup><sup>[35]</sup>。从研究区来看, 其活动层的厚度持续增加, 天然孔年平均增加速率为 4.2 cm·a<sup>-1</sup>, 略小于 1995—2007 年的 4.5 cm·a<sup>-1</sup>; 路基孔的活动层厚度年增加速率为 3.3 cm·a<sup>-1</sup>, 远小于沿线的活动层厚度的年均增加率。与之相对的, 3 号孔活动层增加速率 4.0 cm·a<sup>-1</sup>, 4 号孔 4.6 cm·a<sup>-1</sup>, 2 号孔 4.7 cm·a<sup>-1</sup>。块石路基减缓了多年冻土活动层厚度的增加速率, 但活动层厚度增加趋势仍会持续。

气候变暖下, 大部分地区的工程热扰动的叠加作用加速了工程下部多年冻土的退化<sup>[38]</sup>。多年冻土区的路基工程改变了地表物理性质, 破坏了原有的能量平衡特征, 其下部的冻土热状态发生了显著的变化。在研究区域, 活动层厚度不断增加、冻土温度升高。

### 4.2 路基地温随距离的变化特征

路基一侧的 5 个孔, 1 号孔离路基最远(30 m), 5 号孔在路基坡脚处。图 7 列出了 1~5 号孔 2008—2019 年年平均地温。2~5 号孔, 测温孔的年平均地温随离路基距离的增加, 存在显著增加趋势。5 号孔(路基孔)的年平均地温在检测时间内显著小于 2 号孔。

从总体上看, 离路基越近, 多年冻土年平均地温越低。为进一步研究不同深度这种变化的差异性, 选

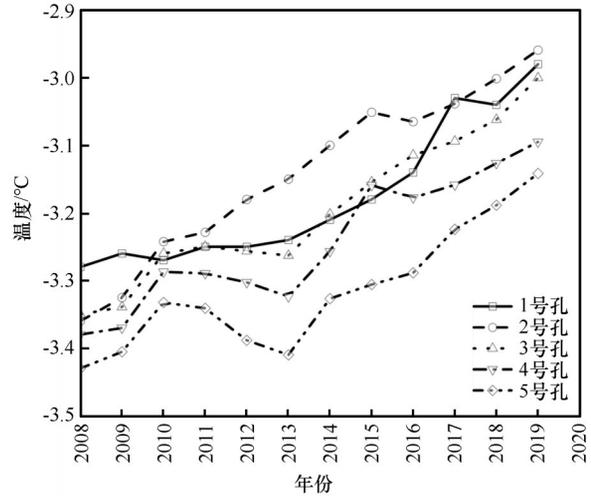


图 7 测温孔年平均地温

Fig. 7 Annual mean ground temperature in different boreholes

取深度为 -0.5 m、-1 m、-1.5 m、-2.5 m、-5 m、-10 m、-15 m 各层的地温数据作为因变量, 以到路基的相对距离为因子等级分别进行单因素方差分析来研究路基一侧地温随路基不同距离的变化特征。

从表 4 方差分析结果可以看出, 在深度为 -0.5 m 时, 5 号孔与其余 4 个孔不存在显著性的差异, 即在该层上工程带来的热作用不明显。随深度增加, 在 -3 m 时, 5 号孔与 4 号孔土体温度开始出现差异; 此时, 5 号孔与 3 号孔以及 2 号孔出现极显著的差异, 与 1 号孔出现显著性差异。极显著的差异在 -5 m 以下时表现明显。因此, 地温虽然在一定范围内随路基距离的增大而逐渐增大时, 各深度的增大速率并不一致。路基的大致影响范围在 2.0~3.6 m 之间。

块石路基夏季通过隔热降低路基下部土体的温

表 4 方差分析结果

Table 4 Result of the ANOVA analysis

变量	5HK-4HK	5HK-3HK	5HK-2HK	5HK-1HK
-0.5				
-1.0		+	+	
-1.5		+	+	
-2.0		++	+	+
-2.5		++	++	+
-3.0	+	+++	+++	++
-5.0	++	+++	+++	+++
-10.0	+++	+++	+++	+++
-15.0	+++	+++	+++	+++

注: +为显著性水平  $P$  在 0.05~0.01 之间; ++表示  $P$  在 0.01~0.005 之间; +++表示  $P$  小于 0.005。

度,而冬季通过对流换热来储藏冷量,起到了“热半导体”的作用<sup>[39-40]</sup>。因而,在冻土上限附近(-3 m)、-10 m处,路基以及相邻区域的土体温度较天然孔

低。在监测的深层(-15 m),天然孔的平均地温比路基孔以及受路基影响的孔(2号孔、3号孔、4号孔)要低,但升温较快。相反,5号孔升温较慢(图8)。

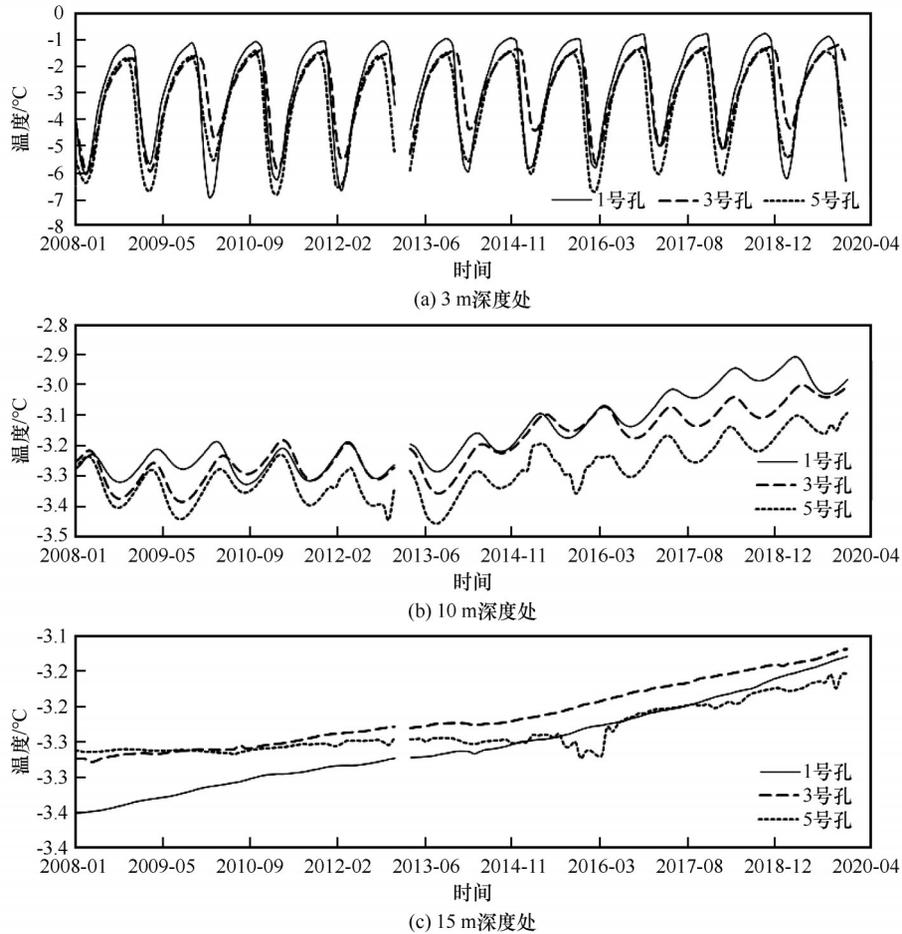


图8 不同深度处的土体温度

Fig. 8 Soil temperature in different depth

## 5 结论

(1)长期的监测数据表明,过去12年(2008—2019年)低温冻土活动层厚度不断增加,冷却路基监测孔的活动层厚度增加最小,且年均增加较小。

(2)所有监测孔都显示出长期的增温趋势,增温不仅体现为年际增温,也体现为季节性不对称增温。路基孔的增温小于其余的孔,天然孔的增温小于受路基影响的监测孔。

(3)气候变暖以及工程热扰动的叠加导致路基一侧的冻土地温增加,年平均地温不断升高。工程建筑物的影响局限在一定的区域,并减小了气候变暖的影响,使路基附近的地温增加较小且趋势较缓。

## 参考文献(References):

- [1] Cheng Guodong, Sun Zhizhong, Niu Fujun. Application of the roadbed cooling approach in Qinghai-Tibet railway engineering [J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 53 (3) : 241-258.
- [2] Wu Qingbai, Niu Fujun. Permafrost changes and engineering stability in Qinghai-Xizang Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(2): 115-130. [吴青柏, 牛富俊. 青藏高原多年冻土变化与工程稳定性[J]. 科学通报, 2013, 58 (2) : 115-130.]
- [3] Liu Hua, Niu Zelin, Niu Fujun, et al. Numerical investigation on freeze characteristic and thermal influence areas of roadbed-bridge transition section in cold regions high-speed railways [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42 (4) : 1256-1266. [刘华, 牛泽林, 牛富俊, 等. 寒区高速铁路桥过渡段冻结特征及热影响区域数值分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42 (4) : 1256-1266.]
- [4] Cheng Guodong, Yang Chongsong. Mechanics related with frozen ground in construction of Qinghai-Tibet Railway [J]. Me-

- chanics in Engineering, 2006, 28(3): 1-8. [程国栋, 杨成松. 青藏铁路建设中的冻土力学问题[J]. 力学与实践, 2006, 28(3): 1-8.]
- [5] Wu Jichun, Sheng Yu, Wu Qingbai, et al. Processes and modes of permafrost degradation on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Science China: Series D Earth Sciences, 2009, 39(11): 1570-1578. [吴吉春, 盛煜, 吴青柏, 等. 青藏高原多年冻土退化过程及方式[J]. 中国科学: D辑 地球科学, 2009, 39(11): 1570-1578.]
- [6] Wu Qingbai, Liu Yongzhi. Ground temperature monitoring and its recent change in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 38(2): 85-92.
- [7] Liu Deping, Wang Shuangjie, Jin Long, et al. Engineering geological characteristics of the permafrost and degradation analysis of national road 214 [J]. Subgrade Engineering, 2013(1): 1-5. [刘德平, 汪双杰, 金龙, 等. 国道214线多年冻土工程地质特征及退化分析[J]. 路基工程, 2013(1): 1-5.]
- [8] Sun Zhizhong, Wu Guilong, Yun Hanbo, et al. Permafrost degradation under an embankment of the Qinghai-Tibet Railway in the southern limit of permafrost [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 767-771. [孙志忠, 武贵龙, 袁汉伯, 等. 多年冻土南界附近青藏铁路路基下的冻土退化[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 767-771.]
- [9] Yin Guoan, Niu Fujun, Lin Zhanju, et al. The distribution characteristics of permafrost along the Qinghai-Tibet Railway and their response to environmental change [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 772-781. [尹国安, 牛富俊, 林战举, 等. 青藏铁路沿线多年冻土分布特征及其对环境变化的响应[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 772-781.]
- [10] Jiao Shihui, Wang Lingyue, Liu Gengnian. Prediction of Tibetan Plateau permafrost distribution in global warming [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2016, 52(2): 249-256. [焦世晖, 王凌越, 刘耕年. 全球变暖背景下青藏高原多年冻土分布变化预测[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2016, 52(2): 249-256.]
- [11] Ding Yongjian, Zhang Shiqiang, Zhao Lin, et al. Global warming weakening the inherent stability of glaciers and permafrost [J]. Science Bulletin, 2019, 64(4): 245-253.
- [12] An Guodong, Mi Long, Zhu Benzhen. Study and application of long-term monitoring system for permafrost area along Qinghai-Tibet Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(3): 1-6. [安国栋, 米隆, 朱本珍, 等. 青藏铁路多年冻土区长期监测系统的研究与应用[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(3): 1-6.]
- [13] Wang Xiaojun, Mi Weijun, Wei Yongliang, et al. The change characteristics of the artificial upper limit of the roadbed and its relationship with the stability for Qinghai-Tibet Railway in the permafrost region [J]. China Railway Science, 2010, 31(5): 1-7. [王小军, 米维军, 魏永梁, 等. 青藏铁路多年冻土区路基人为上限的变化特点及其与稳定性的关系[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(5): 1-7.]
- [14] Cai Hancheng, Li Yong, Yang Yongpeng, et al. Variation of temperature and permafrost along Qinghai-Tibet Railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1434-1444. [蔡汉成, 李勇, 杨永鹏, 等. 青藏铁路沿线多年冻土区气温和多年冻土变化特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1434-1444.]
- [15] Hu Da, Yu Wenbing, Yi Xin, et al. Boundary temperature features of the embankment in Qumar River region along the Qinghai-Tibet transportation engineering corridor [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(5): 1332-1339. [胡达, 喻文兵, 易鑫, 等. 青藏工程走廊楚玛尔河高平原区路基边界温度特征[J]. 冰川冻土, 2016, 38(5): 1332-1339.]
- [16] Wang Honglei, Sun Zhizhong, Liu Yongzhi, et al. Thermal state of embankment with thawed interlayer in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Railway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(5): 934-942. [王宏磊, 孙志忠, 刘永智, 等. 青藏铁路多年冻土区含融化夹层路基的热状态[J]. 冰川冻土, 2018, 40(5): 934-942.]
- [17] Mu Yanhu, Ma Wei, Sun Zhizhong, et al. Comparative analysis of cooling effect of crushed rock embankment along the Qinghai-Tibet Railway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1): 284-292. [穆彦虎, 马巍, 孙志忠, 等. 青藏铁路块石路基冷却降温效果对比分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 284-292.]
- [18] Xu Zhiying, Niu Fujun. Analysis of permafrost subgrade temperature in qumar river region along Qinghai-Tibet Railway [J]. Subgrade Engineering, 2011(3): 5-8. [徐志英, 牛富俊. 青藏铁路楚玛尔河地区冻土路基地温状况分析[J]. 路基工程, 2011(3): 5-8.]
- [19] Xu Anhua. Numerical simulation study of the thermosyphon applied to wide embankment in permafrost regions of Gonghe-Yushu Expressway of National Highway 214 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 987-993. [徐安花. 热棒技术在国道214线共和-玉树高速公路宽幅冻土路基中应用的数值模拟研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 987-993.]
- [20] Zhang Mingli, Wang Bin, Zhou Zhixiong, et al. Monitoring and analysis of the thermal conductivity of railway subgrade in the permafrost regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2): 457-466. [张明礼, 王斌, 周志雄, 等. 多年冻土区铁路路基导热系数监测与分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2): 457-466.]
- [21] Cheng Guodong. Interaction between Qinghai-Tibet Railway engineering and permafrost and environmental effects [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2002, 17(1): 21-25. [程国栋. 青藏铁路工程与多年冻土相互作用及环境效应[J]. 中国科学院院刊, 2002, 17(1): 21-25.]
- [22] Mu Yanhu, Ma Wei, Niu Fujun, et al. Monitoring and analyzing the thermal conditions of traditional embankments along the Qinghai-Tibet Railway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 953-961. [穆彦虎, 马巍, 牛富俊, 等. 青藏铁路多年冻土区普通路基热状况监测分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 953-961.]
- [23] Sun Zhizhong, Ma Wei, Mu Yanhu, et al. Permafrost change under natural sites along the Qinghai-Tibet Railway during the years of 2006—2015 [J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(3): 248-256. [孙志忠, 马巍, 穆彦虎, 等. 青藏铁路沿线天然场地多年冻土变化[J]. 地球科学进展, 2018, 33(3): 248-256.]
- [24] Wang Honglei, Sun Zhizhong, Liu Yongzhi, et al. The monitoring analysis of the thermal-mechanical response on embankment with thawed interlayer along Qinghai-Tibet Railway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(7): 2815-2824. [王宏磊, 孙志忠, 刘永智, 等. 青藏铁路含融化夹层路基热力响应监测分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2815-2824.]
- [25] Zhang Yili, Li Bingyuan, Zheng Du. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China [J]. Geographical Research, 2002, 21(1): 1-8. [张懿锂, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积[J]. 地理研究, 2002, 21(1): 1-8.]
- [26] Li Shude, Cheng Guodong. Map of frozen ground on Qinghai-

- Xizang Plateau [M]. Lanzhou: Gansu Culture Press, 1996. [李树德, 程国栋. 青藏高原冻土图[M]. 兰州: 甘肃文化出版社, 1996.]
- [27] Zheng Du, Li Bingyuan. Recent process of geographical studies on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1990, 45(2): 235-244. [郑度, 李炳元. 青藏高原自然地理研究的进展[J]. *地理学报*, 1990, 45(2): 235-244.]
- [28] Wang Qingchun, Qin Ningsheng, Tang Hongyu, et al. Study on climate change facts and their characteristics in the Qinghai Plateau in recent 44 years [J]. *Arid Zone Research*, 2007, 4(2): 234-239. [汪青春, 秦宁生, 唐红玉, 等. 青海高原近44年来气候变化的事实及其特征[J]. *干旱区研究*, 2007, 4(2): 234-239.]
- [29] 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.]
- [30] Liu Qiang, Fu Yongshuo, Zeng Zhenzhong, et al. Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(2): 644-655.
- [31] Kong Dongdong, Zhang Qiang, Huang Wenlin, et al. Vegetation phenology change in Tibetan Plateau from 1982 to 2013 and its related meteorological factors [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 39-52. [孔冬冬, 张强, 黄文琳, 等. 1982—2013年青藏高原植被物候变化及气象因素影响[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 39-52.]
- [32] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. Chinese permafrost [M]. Beijing: China Publishing House, 2000: 330-334. [周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 中国出版社, 2000: 330-334.]
- [33] Xu Xiaozu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin. Physics of frozen soil [M]. Beijing: Science Press, 2009: 75-82. [徐敦祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 112-116.]
- [34] IPCC. Climate Change 2001: The scientific basis, summary for policymakers and technical summary of Working Group I report [M]//Houghton J T, Ding Yihui, Griggs D, et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 98.
- [35] Wu Qingbai, Zhang Tingjun. Recent permafrost warming on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Journal Geography Research*, 2008, 113: D13108.
- [36] Ma Junjie, Li Ren, Liu Hongchao, et al. A review on the development of study on hydrothermal characteristics of active layer in permafrost areas in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(1): 195-204. [马俊杰, 李韧, 刘宏超, 等. 青藏高原多年冻土区活动层水热特性研究进展[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(1): 195-204.]
- [37] Wang Pengling, Tang Guoli, Cao Lijuan, et al. Surface air temperature variability and its relationship with altitude and latitude over the Tibetan Plateau in 1981—2010 [J]. *Climate Change Research*. 2012, 8(5): 4-10. [王朋岭, 唐国利, 曹丽娟, 等. 1981—2010年青藏高原地区气温变化与高程及纬度的关系[J]. *气候变化研究进展*, 2012, 8(5): 4-10.]
- [38] Wu Qingbai, Zhang Zhongqiong, Liu Ge. The relationship between climate warming on the Qinghai-Tibet Plateau and permafrost engineering [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(2): 342-352. [吴青柏, 张中琼, 刘戈. 青藏高原气候变暖与冻土工程的关系[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(2): 342-352.]
- [39] Cheng Guodong, Wu Qingbai, Ma Wei. Engineering effect of active cooling subgrade of Qinghai-Tibet Railway [J]. *Science China: Series E Technological Sciences*, 2009, 39(1): 16-22. [程国栋, 吴青柏, 马巍. 青藏铁路主动冷却路基的工程效果[J]. *中国科学: E辑 技术科学*, 2009, 39(1): 16-22.]
- [40] Niu Fujun, Liu Minghao, Cheng Guodong, et al. Long-term thermal regimes of the Qinghai-Tibet Railway embankments in plateau permafrost regions [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2015, 45(8): 1220-1228. [牛富俊, 刘明浩, 程国栋, 等. 多年冻土区青藏铁路路基的长期热状况[J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(8): 1220-1228.]

## Long-term effects of embankment engineering behaviors on cold permafrost in high-altitude permafrost regions

FAN Xingwen<sup>1,2</sup>, LIN Zhanju<sup>1</sup>, LUO Jing<sup>1</sup>, LIU Minghao<sup>1</sup>, YIN Guo'an<sup>1</sup>, GAO Zeyong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The Qinghai-Tibet Railway (QTP) embankment was constructed based on the method of active cooling embankment. At present, the railway has been safely operating for more than 10 years. The subgrade of QTP is built on the permafrost, and temperature change of the permafrost under the subgrade is a key factor in measuring the stability of the subgrade. Based on the long-term (2008—2019) observation, the permafrost table and the annual ground temperature in five boreholes which were drilled within 30 m range to the slope foot mileage K980+000 was analyzed. Inter-annual ground temperature changes and seasonal temperature changes were analyzed and the long-term effects of engineering behavior on cold permafrost were examined. The results show that the permafrost temperature has been increasing and permafrost table has been decreasing. Compared with the natural hole, the ground temperature of the borehole at the foot of the slope is less increased by the cooling effect of the roadbed. The cold season and the warm season are asymmetrical. Due to the consideration of the protection of permafrost and the stability of the project, the roadbed should be built with the idea of cooling roadbed as much as possible, so that the ground temperature at the foot of the roadbed slope is lower than the temperature of the frozen soil under the natural state, but the roadbed of the frozen soil is generally warmed. The trend still exists. At the same time, the monitoring of the subgrade should be strengthened, the stability of the subgrade after the long-term warming process should be analyzed, and the quantitative study on the change of the frozen soil under the subgrade should be processed.

**Key words:** Qinghai-Tibet Railway; cold permafrost; warming trend; embankment engineering impact

(责任编辑: 吴青柏; 编辑: 周成林)