

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0155

XU Yuezen, SHEN Mingde, ZHOU Zhiwei, et al. Long-term thermal stability study of the typical embankment along the Qinghai-Tibet Railway in warm permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(6):1784-1795. [徐岳震, 申明德, 周志伟, 等. 青藏铁路高温多年冻土区典型路基的长期热稳定性研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(6):1784-1795.]

青藏铁路高温多年冻土区典型路基的 长期热稳定性研究

徐岳震^{1,2}, 申明德^{1,2}, 周志伟^{1,2}, 马 巍^{1,2}, 李国玉^{1,2}

(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: 利用2006—2020年青藏铁路沿线多年冻土区长期地温监测资料,选取高温多年冻土区内三类典型路基结构(普通路基、U型块石路基、块石护坡路基)对应的长期监测断面,对15年间路基下20 m深度范围内温度场、年平均地层温度及年最高地层温度的演化规律进行分析和研究。监测和分析结果表明:普通路基左右路肩下冻土层的年平均地层温度增长速率高于天然场地同深度冻土层的增长速率。U型块石路基下年平均地温始终低于天然场地年平均地温并保持一定差值,且左右路肩下的地温差异不可忽视。块石护坡路基左路肩的年平均地温与天然孔相差不大,而右路肩的年平均地温始终低于天然孔,左右路肩下的地温差异要小于U型块石路基。普通路基下人为多年冻土上限始终低于天然多年冻土上限。U型块石路基和块石护坡路基左右路肩的人为多年冻土上限均已抬升至路基本体内部,左右路肩的融深差值为1.0~1.5 m,块石护坡路基融深差值略低于U型块石路基。综合来看,由于工程及气候变暖等热扰动的影响,高温多年冻土区内的普通路基已不能维持其下多年冻土的热稳定性,需采取一定的主动降温补强措施。U型块石路基及块石护坡路基对其下多年冻土具有一定的主动降温效果,但左右路肩的地温差异问题仍需引起重视。

关键词: 青藏铁路; 高温多年冻土区; 块石路基; 冻土上限; 温度场; 长期运维

中图分类号: U213.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)06-1784-12

0 引言

青藏铁路是全球海拔最高和里程最长的高原高寒地区铁路,全线运营里程约1 925 km,格尔木—拉萨段约1 118 km,其中在海拔4 000 m以上约965 km。青藏铁路穿越高原多年冻土区达到632 km,包括:岛状、片状不连续多年冻土区约82 km,大区域连续多年冻土区约550 km,其中高温高含冰量多年冻土区约为355 km^[1-4]。青藏铁路在多年冻土区的安全运行首要解决的问题是保证高温高含冰量冻土路基的融沉变形在可控的安全范围内,相关“主动冷却路基”工程措施的目的就是确保多年冻土热稳定性,使得多年冻土上限不发生明显下移,控制冻土

地温的升温速率,避免多年冻土区路基产生过大的融化沉降变形和高温冻土的蠕变沉降变形^[5-9]。

青藏铁路采用“主动冷却路基”思路积极保护多年冻土,利用块碎石材料、通风管、遮阳棚(板)、热棒等工程措施,通过调整和控制热对流、太阳辐射或热传导的思路,降低传入路基内部的热量,避免路基下多年冻土温度的升高^[10-14]。其中,通过调控热传导换热机制的块石基底路基、块石护坡路基、U型块石路基在不同的路段被大量采用,三种类型的块石路基结构在青藏铁路多年冻土区运营里程中占到了60%以上^[15-17]:(1)块石基底路基结构是不同高度的路基填料层下铺设一定厚度的块石层基底;(2)块石护坡路基结构是指路基边坡铺设一

收稿日期: 2022-07-25; 修订日期: 2022-10-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41630636);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0905)资助

作者简介: 徐岳震,博士研究生,主要从事冻土力学与寒区工程研究. E-mail: xuyuezen@lzb.ac.cn

通信作者: 马巍,研究员,主要从事冻土力学与冻土工程研究. E-mail: mawei@lzb.ac.cn

定厚度的块石层护坡;(3)U型路基结构是综合上述两种路基结构,在路基填料层下铺设块石层,在边坡再铺设一定厚度的块石层护坡。块石路基主动降温的原理主要是由于块石层内存在的强制对流和自然对流,基于冬季的空气对流换热作用和夏季的隔热作用,可以有效地主动冷却块石路基下的多年冻土层^[18-20]。但也有研究表明,块石路基在低温冻土区的降温效果较好,而在高温多年冻土区降温效果不太理想^[21-23]。此外,青藏高原多年冻土区对近年来全球气候变暖的响应极其敏感,青藏高原冻土工程走廊内线性工程的修筑和运营,又进一步叠加了人类活动对多年冻土地区温度场的影响,并引起了广大多年冻土区的渐进退化,威胁到多年冻土区内的青藏铁路路基热稳定,尤其是位于高温、富冰区的路基地段^[4,24-28]。到目前为止,多年冻土区内的青藏铁路已建成并安全运行了16年以上。在长期的运营过程中,多年冻土区内未采取冷却措施的某些普通路基路段,已出现路基下多年冻土加速退化的趋势,特别是在高温及富冰的多年冻土区^[29-31]。对普通路基的维修补强措施主要以块石护坡、护道为主,并在个别地段增设了热棒,对路基下的多年冻土取得了一定的主动降温效果^[32-34]。在青藏铁路穿越的个别沙漠化较为严重的多年冻土区段,风积沙堵塞了块石路基的孔隙,降低了块石结构的孔隙率,影响了块石结构调节多年冻土温度的能力^[35-37]。此前已有大量文献通过现场监测资料,分析了不同路基结构的热状况^[9,12,14,21-23],但这些研究大多基于短期的现场监测数据,长期运营后路基热稳定状态的相关研究仍然较少,考虑到高温冻土区内的多年冻土对温度变化的敏感性更高,因此,对于青藏铁路高温多年冻土区内的不同路基结构,其在长周期条件下的多年冻土路基热稳定性是迫切值得关注的问题。

本文基于青藏铁路长期监测系统所获取的长达15年完整周期的地温监测资料(2006—2020年),分别选取了高温多年冻土区内三个典型路基结构断面(普通路基、U型块石路基、块石护坡路基)的地温监测数据,分析和讨论了15年间三个监测断面的温度场、年平均地层温度和年最高地层温度的长期演化规律以及引起相应变化的主要原因,旨在加深对高温多年冻土区内这几类路基长期热稳定性的认识,为青藏铁路多年冻土区路基的维护与补强提供科学依据及指导意见。

1 监测断面介绍

选用青藏铁路沿线多年冻土区内的三个长期监测断面进行分析,三个监测断面(图1中P17、P30、P43)均位于高温多年冻土区,年平均地温高于 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$,且含冰丰富,为饱冰、富冰冻土(以体积含冰量 i_v 划分, $20\% < i_v \leq 30\%$,富冰冻土; $30\% < i_v \leq 50\%$,饱冰冻土^[38])。其中P17断面位于二道沟西段谷地坡脚,P30断面位于布曲河西岸阶地,P43断面位于多年冻土南界附近的托居谷地西侧斜坡,监测断面具体信息如表1。监测断面的路基结构是青藏铁路最常见的三种典型路基结构形式,即普通路基(P17断面)、U型块石路基(P30断面)以及块石护坡路基(P43断面)。从3个监测断面的路基走向来看,路基左侧对应阳坡侧,右侧对应阴坡侧(路基左右侧是以格尔木到拉萨的方向定义)。U型块石路基断面,基底为厚度1.0 m、粒径25~30 cm的块石层,左右两侧护坡厚度分别为1.2 m、0.7 m,碎石粒径10~15 cm。块石护坡路基断面,左右两侧护坡厚度分别为1.0 m、0.8 m,碎石粒径10~15 cm。路基边坡坡率为1:1.5,在历年维修中,U型块石路基及块石护坡路基的左右侧补强了宽度2~3 m、粒径25~30 cm的块石护道,具体维修时间不详,由于未发现补强块石护道导致的左、右路肩地温变化规律的异常,故在分析这三个监测断面时,仍按原路基结构分析各孔的地温变化规律。

三个监测断面均布设了天然场地、左路肩和右路肩3个测温孔,其测温孔布设位置如图2所示,其中天然场地测温孔距路基左坡脚的垂直距离为20 m,天然场地测温孔深度为18 m,左、右路肩测温孔深度均为20 m。三个测温孔的温度探头自地表到10 m深度每隔0.5 m布设一个,10 m深度以下每隔1.0 m布设一个,温度探头采用冻土工程国家重点实验室研制的热敏电阻,测量精度为 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度数据的记录采用DT500型自动数据采集仪,测温频率为每日1次。目前已积累了2005年10月—2021年1月总计15年完整周期的长期连续地温监测资料。

2 监测结果与分析

2.1 地温整体变化

图3分别为三个监测断面左右路肩及天然孔的地温等温线图,路基左右路肩地温孔深度自路基表面算起,天然地温孔深度自天然地表算起,以下各

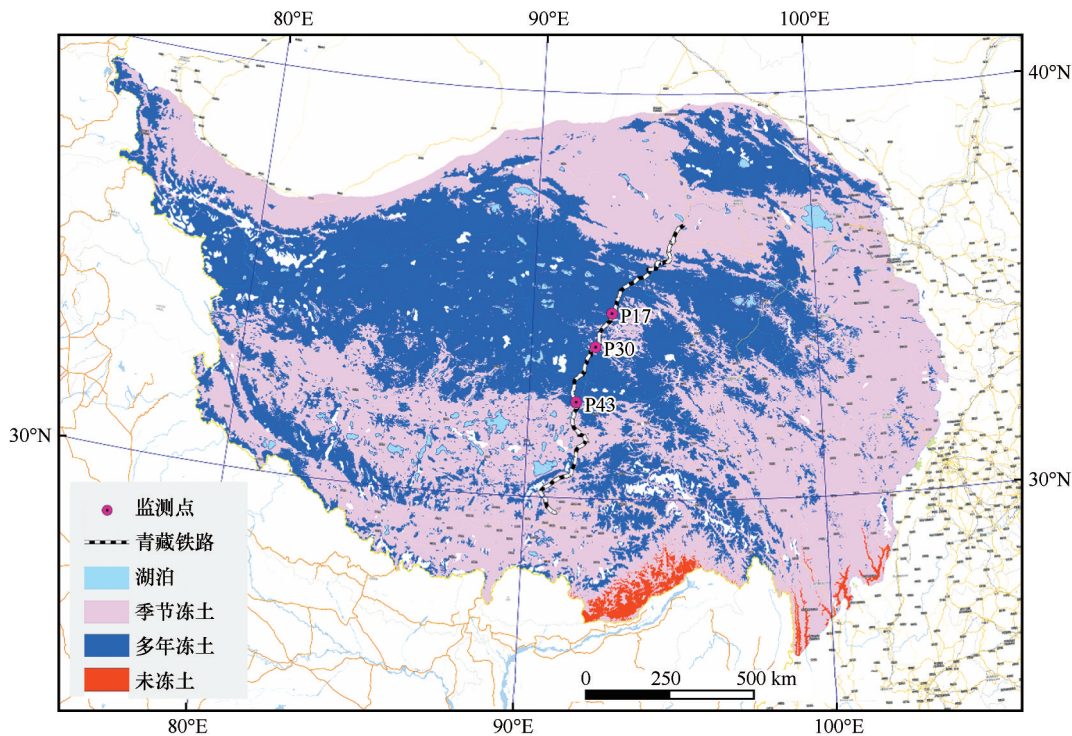


图1 青藏铁路及三个监测断面位置

Fig. 1 Qinghai-Tibet Railway and the selected observation profiles

表1 监测断面信息

Table 1 The information of the observation profiles

编号	里程	经纬度	海拔/m	多年冻土状况		路基特征		
				年平均地温/℃	冻土类型	走向	路基高度/m	路基结构
P17	K1166+585	34°36′ N, 92°47′ E	4 715	-0.65	饱冰	230.8°	0.9	普通路基
P30	K1286+195	33°46′ N, 92°14′ E	4 640	-0.46	饱冰	243.8°	5.7	U型块石路基
P43	K1485+330	32°24′ N, 91°37′ E	4 887	-0.20	富冰	145.8°	7.0	块石护坡路基

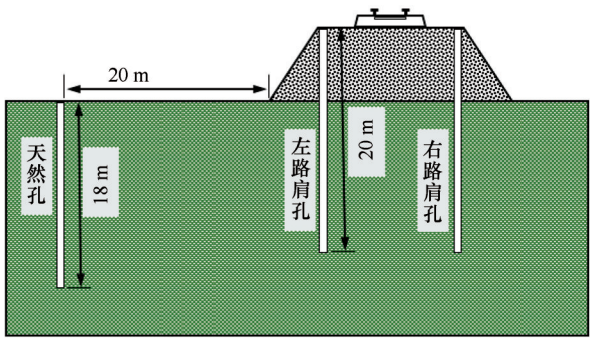


图2 监测断面地温孔布设示意图

Fig. 2 Layout of the ground temperature boreholes at observation profile

图的孔深计算点无特殊说明的均依照此规定。

如图3(a)所示,普通路基左路肩孔的年最大融化深度在2014年之前增速较为缓慢,自4.8 m增加至5.6 m,在2015年后由于年最大冻结深度不能到达年最大融化深度位置,该深度土层出现融化夹

层^[39-42],随着融化夹层出现,导致其下的多年冻土加速退化,截至2020年,6年时间内最大融化深度自5.6 m增加至6.8 m。右路肩孔的年最大融化深度在2014年之前变化与左路肩基本一致,自4.4 m增加至5.6 m,在2014年之后融化速率增大,至2020年,6年时间内最大融化深度自5.6 m增加至6.4 m,增大速率略低于左路肩孔。天然孔的年最大融化深度在2016年前基本保持在4.0 m深,在2016年之后逐渐增加,至2020年约4.8 m深,同时4.0~6.0 m深度的地温相对之前的年份有升高的趋势。分析认为2014年之后左右路肩孔融化速率增大的原因与融化夹层出现有关。考虑到该路基断面高度仅为0.9 m,这表明由于路基工程及运营的热扰动影响,普通路基断面下的多年冻土人为上限已略低于原天然冻土上限,这不利于路基的长期热稳定。值得注意的是,左路肩的融化深度始终大

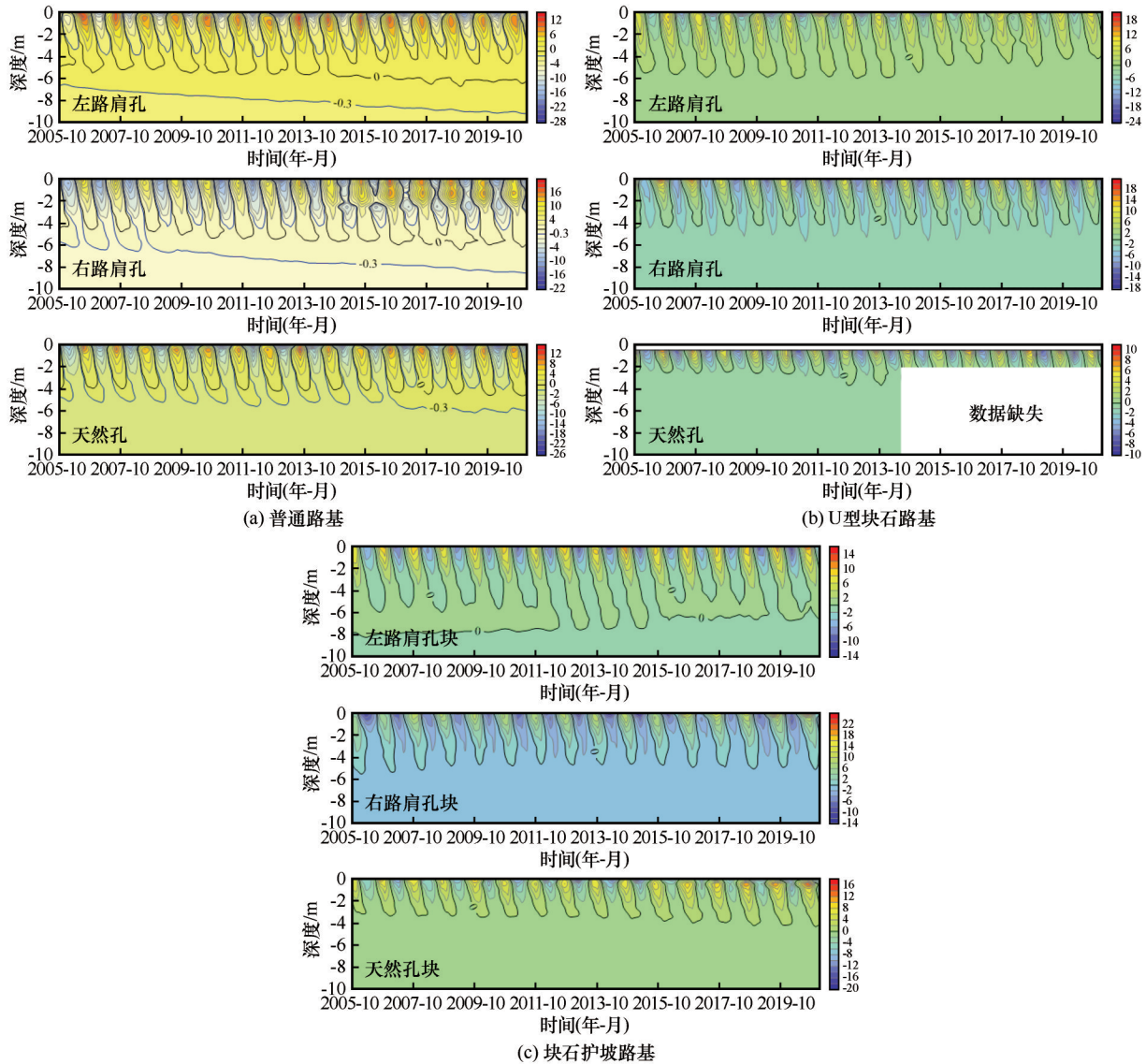


图3 三个监测断面的等温线图

Fig. 3 Isotherms of the three observation profiles: traditional embankment (a), U-shaped crushed rock embankment (b), crushed rock revetment embankment (c)

于右路肩的融化深度,其差值除了铁路运营第一年(2006年)达到1.0 m以外,其他年份均小于0.5 m,阴阳坡效应^[43-47]对左右路肩融深差异的影响不显著。

如图3(b)所示,对于U型块石路基,左路肩在2015年之前其最大融化深度基本保持在5.6~6.0 m之间,2015年之后最大融化深度略微减小,保持在4.4~5.5 m之间。右路肩各年份的最大融化深度基本保持在约4.2~4.5 m之间,相同年份下右路肩的最大融化深度始终小于左路肩。天然孔2006—2013年的最大融化深度保持在2.4~4.0 m之间,2012年后融化速度变快,2014年后的数据缺失。考虑到该断面路基高度为5.7 m,这表明U型块石路

基对多年冻土温度场的主动降温效果明显,人为多年冻土上限已提升至路基本体内,但是阴阳坡效应使得左右路肩下部地温出现较为明显的差值。

如图3(c)所示,块石护坡路基左路肩在2005—2012年以及2015—2018年两个连续时间段出现了融化夹层,最大融化深度在7.2~8.2 m,最大冻结深度始终在多年冻土上限之上,且保持了1.0~2.0 m的深度差距。由于块石护坡以及后期维修增加的块石护道的存在,导致左路肩下多年冻土的融化速度没有因为融化夹层的出现而变快,这与普通路基略有区别。而右路肩的最大融化深度保持在4.7~5.3 m之间,且没有出现融化夹层。天然孔的最大融化深度有逐年增加的趋势,且这种趋势在2016年

之后较为明显,最大融化深度维持在 3.2~4.6 m。考虑到该断面路基高度为 7.0 m,这表明块石护坡路基下的人为多年冻土上限有一定程度提升,右路肩下的人为多年冻土上限已提升至路基基本体内。综合对比左右路肩和天然孔的地温等温线表明,块石护

坡路基对控制多年冻土上限的退化具有一定作用,但是阴阳坡效应降低了块石护坡路基的降温效果。

2.2 年平均地层温度变化

图 4 分别为 15 年间三个监测断面左右路肩及天然孔不同深度的年平均地层温度曲线,整体可以

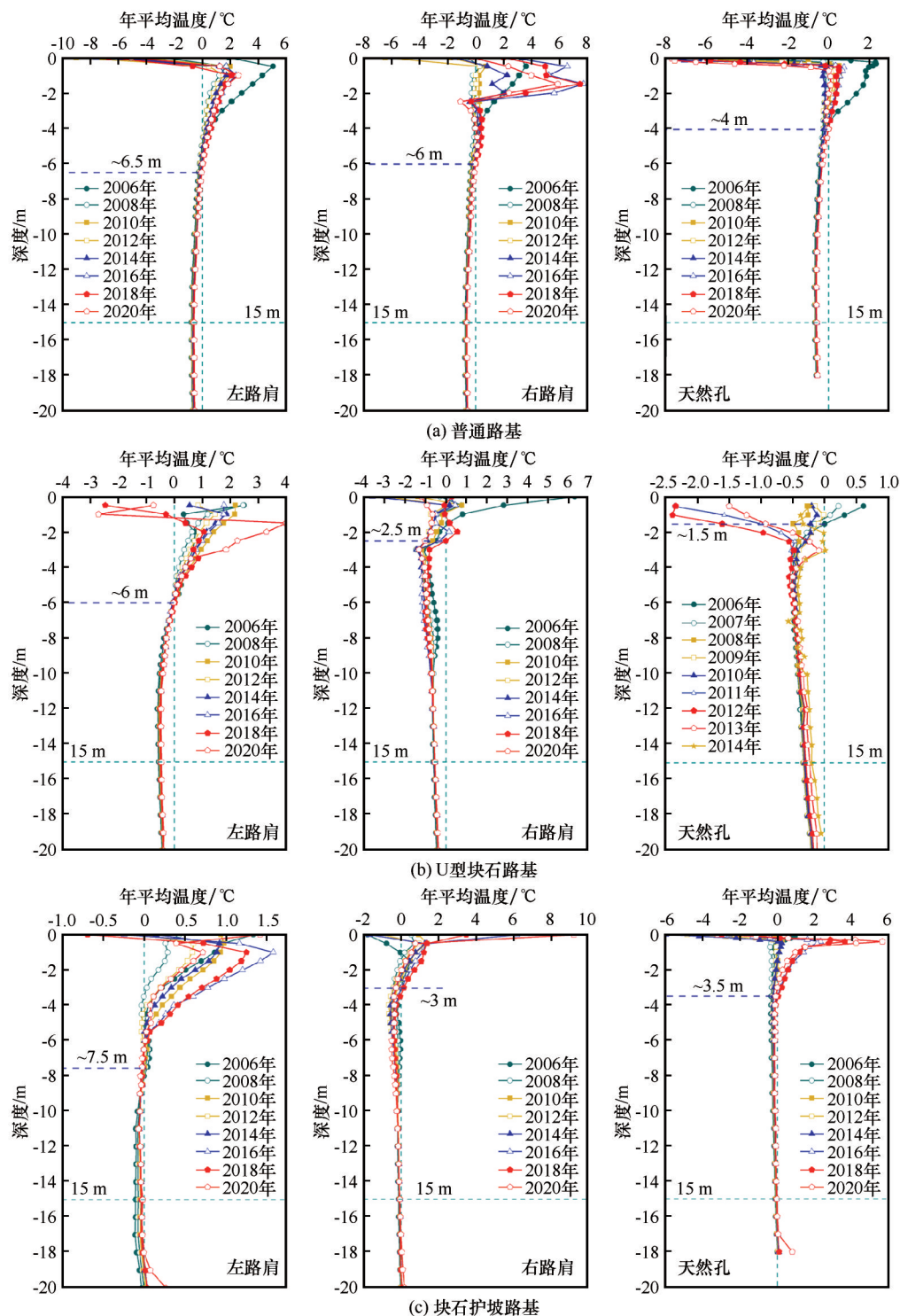


图 4 三个监测断面年平均地层温度

Fig. 4 Mean annual ground temperature of the three observation profiles: traditional embankment (a), U-shaped crushed rock embankment (b), crushed rock revetment embankment (c)

看出,浅部地层年平均温度变化幅度较大,这里我们重点关注 0°C 年平均地层温度在地层中的位置及不同地温孔浅部地层的地温状态。

如图4(a)所示,普通路基断面左右路肩和天然孔的 0°C 年平均地层温度分别在6.5 m、6.0 m和4.0 m处,且三处 0°C 年平均地层温度所对应的地层深度在15年中基本没有变化。左路肩和天然孔的年平均地层温度最大值出现在0~1.5 m深的近地表,该深度地层的年平均温度在2006年时最高,在2006—2008年下降迅速,2008年之后基本稳定。右路肩近地表的年平均温度在2006—2008年下降迅速,在2008—2012年趋于稳定,2012年后出现波动上升,由于普通路基断面高度仅0.9 m,右路肩年平均地层温度最大值对应的地层深度约为1.0~1.5 m,再结合此路基的工程实际,右路肩近地表的年平均温度的异常波动可能与该侧的侧向水热扰动有关,未来可通过获取现场调查数据等方式进一步开展相关研究。对比来看,排除近地表3 m内年平均地层温度异常的情况,3 m以下年平均地层温度变化速率随深度增加而减小,以3 m深地层的年平均温度为例,左路肩和天然孔年平均地层温度差值最高不超过 0.93°C ,经历了一个先减小后增大的过程,说明普通路基下的土层经历了长时间的温度调整后,并不能保持地温的稳定性。左右路肩年平均地层温度差值最高不超过 0.8°C ,经历了一个先增加后稳定的过程,说明路基边坡热效应导致的阴、阳坡路肩浅层地温差异不明显,这或与该截面较低的路基高度有关。

如图4(b)所示,在2006年初,U型块石路基断面左右路肩及天然孔的 0°C 年平均地层温度分别在6.0 m、2.5 m和1.5 m处,15年间各孔 0°C 年平均地层温度变化差异较大。左路肩 0°C 年平均地层温度所对应的地层深度,近15年以来没有明显变化,基本保持在6 m深度。左路肩年平均地层温度大于 0°C 的深度范围内,除2018年和2020年数据变化波动较大,其他年份6 m深度范围内的年平均地层温度变化波动较小,均在 $0.5\sim 2.5^{\circ}\text{C}$ 范围内变化。对于右路肩 0°C 年平均地层温度,对应的深度在0~2.5 m之内,值得注意的是2006年地表层年平均温度在 6.3°C ,而其他年份的地表层平均温度均在 $0\sim -4^{\circ}\text{C}$ 范围内,这是由于青藏铁路运营前的工程施工热扰动对路基地表层的影响还较为显著所致。对于天然孔,由于2014年之后的数据缺失,图中只

给出了2006—2014年的年平均地层温度数据。2006年的 0°C 年平均地层温度对应深度为1.5 m,除了2007年、2009年和2014年出现某一深度地层年平均温度超过 0°C 以上,其他年份所有深度的年平均地层温度均小于 0°C 。对比来看,尽管不同年份4 m以上深度年平均地层温度数据规律性不强,但是在4 m以下深度的年平均地层温度数据变化较有规律。对于4~8 m深度土层,同等深度的年平均地层温度,左路肩高于天然孔,天然孔高于右路肩,温差随深度增加而减小。考虑该断面的路基高度为5.7 m,以6 m深度为例,左路肩和天然孔年平均地层温度差值自2006年的 0.50°C 逐渐降低至2014年的 0.34°C ,左右路肩年平均地层温度差值自2006年的 0.60°C 逐渐增加至2020年的 0.91°C ,这表明U型块石路基结构对路基下的浅部土层主动降温效果明显,但对路基阴、阳坡路肩下的土体温差调节效果较差,这可能与两侧块碎石护坡的碎石粒径及铺设厚度等有关。

如图4(c)所示,在2006年初,块石护坡路基断面左右路肩及天然孔的 0°C 年平均地层温度分别在7.5 m、3.0 m和1.5 m处,15年间左路肩7.5 m以上深度的年平均地层温度在 $-0.75\sim 1.6^{\circ}\text{C}$ 之间波动,而7.5 m以下深度的年平均地层温度均在 $-0.75\sim 0^{\circ}\text{C}$ 小范围波动。右路肩在近地表1 m深度范围内不同年份的年平均地层温度波动较大,特别是地表层从2006年的 -2.0°C 升温至2020年的 9.2°C 。天然孔3.5 m深度以下所有年份的年平均地层温度均在 0°C 以下,而在3.5 m深度以上2016—2020年之间的年平均地层温度明显高于其他年份的年平均地层温度,且在同一深度(约0.5 m)出现年平均地层温度峰值,结合文献[48]中的气象数据,这或与近年来的气候变暖有关。考虑该断面的路基高度为7.0 m,以7.0 m深度地层的年平均温度为例,左路肩和天然孔年平均地层温度差值自2006年的 0.36°C 逐渐降低至2020年的 0.11°C ,左右路肩年平均地层温度差值自2006年的 0.12°C 逐渐增加至2020年的 0.46°C ,这表明块石护坡路基结构对路基下浅部土层具有一定的降温效果,但对阴阳坡效应造成的浅部土层温差增大的情况同样不能有效控制。

为进一步对比和分析三个监测断面深部土层年平均地层温度的发展变化趋势,图5给出了三个监测断面左右路肩以及天然孔15 m深度的年平均地温变化曲线。如图5(a)所示,普通路基左路肩年

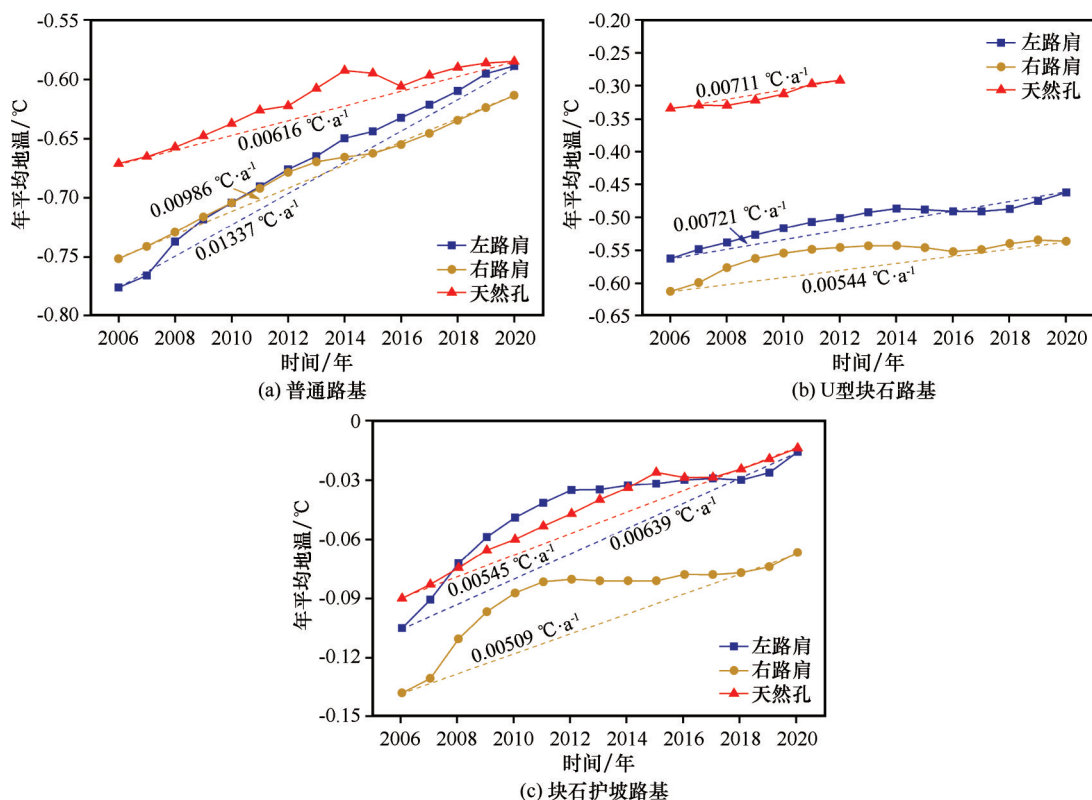


图5 三个监测断面年平均地温变化

Fig. 5 The variations of mean annual ground temperature in the three observation profiles: traditional embankment (a), U-shaped crushed rock embankment (b), crushed rock revetment embankment (c)

平均地温在2006年略低于右路肩 0.025°C ,随运营时间的增加,左路肩年平均地温增长速率高于右路肩,至2020年左路肩年平均地温略高于右路肩 0.027°C 。值得注意的是,到了2020年左右路肩以及天然孔的年平均地温值基本接近吻合,最大差值为 0.028°C 。一般而言,地温梯度在冻土层上部为负,下部为正(规定地温随地层深度增加时为正,反之为负)^[49],即冻土地温在某一深度的年平均地层温度最小,在此深度以下的年平均地层温度随深度增加而增加,这里选取的路基左右路肩孔 15.0 m 深度(深度起算点为路基表面)对应天然孔 14.1 m 深度(天然孔深度起算点为天然地表,路基高度 0.9 m),因此,在2006年初期,天然孔 15.0 m 深度的年平均地温要高于路基左右路肩孔 15.0 m 深度的年平均地温。铁路的施工及运营给路基下的冻土带来了新增热扰动,随运营时间的增加,这种热扰动由路基浅部土层传递到深层冻土,表现为路基左右路肩孔 15.0 m 深度年平均地温的增长速率高于天然孔的增长速率,且左路肩增长速率高于右路肩。

如图5(b)所示,U型块石路基左右路肩的年平均地温均保持在 $-0.43\sim-0.67^{\circ}\text{C}$ 之间,而天然孔的年

平均地温始终保持较高水平,从2006年的 -0.33°C 到2012年的 -0.29°C 。左路肩年平均地温增速与天然孔的年平均地温增速基本持平,而右路肩年平均地温增速略小于左路肩,这表明地表阴阳坡效应对路基温度场的影响在 15 m 深处仍然有体现。尽管此断面2012年之后的天然孔年平均地温数据缺失,但是对比图中三个地温孔的年平均地温数据,仍然可以看出U型块石路基对于路基下多年冻土温度场的控温效果明显,在青藏铁路运营达15年后,U型块石路基对路基下土层的降温效果依然有效。

如图5(c)所示,块石护坡路基在运营的15年中,左右路肩的年平均地温差始终保持在 0.03°C 以上,其阴阳坡效应较为明显。值得注意的是,从2007年到2016年,左右路肩年平均地温均出现了先增大(2007—2011年)后减小(2011—2016年)的特征,两阶段左右路肩的年平均地温差值规律基本与此保持相同趋势,这表明深部土层受阴阳坡效应等外部环境的影响也是同步的。此外天然孔年平均地温始终与左路肩的年平均地温大体一致,表明在铁路施工和运营的初期,块石护坡路基就对冻土起到了保温作用,且随着运营时间的增加,块石护坡

路基与天然场地 15 m 深度处地层的年平均地温始终保持着大体一致,对路基下的多年冻土具有一定的保温效果。

2.3 多年冻土上限变化

图 6 分别为三个监测断面各地温孔 15 年来的

年最高地层温度曲线图,选取地层每一深度每年出现的年最高温度,作为反映多年冻土上限变化的参考。如图 6(a)所示,普通路基人为多年冻土上限变化变化情况为,左路肩从 2006 年的 5.7 m 下降到 2020 年的 6.5 m;右路肩从 2006 年的 4.7 m 下降到

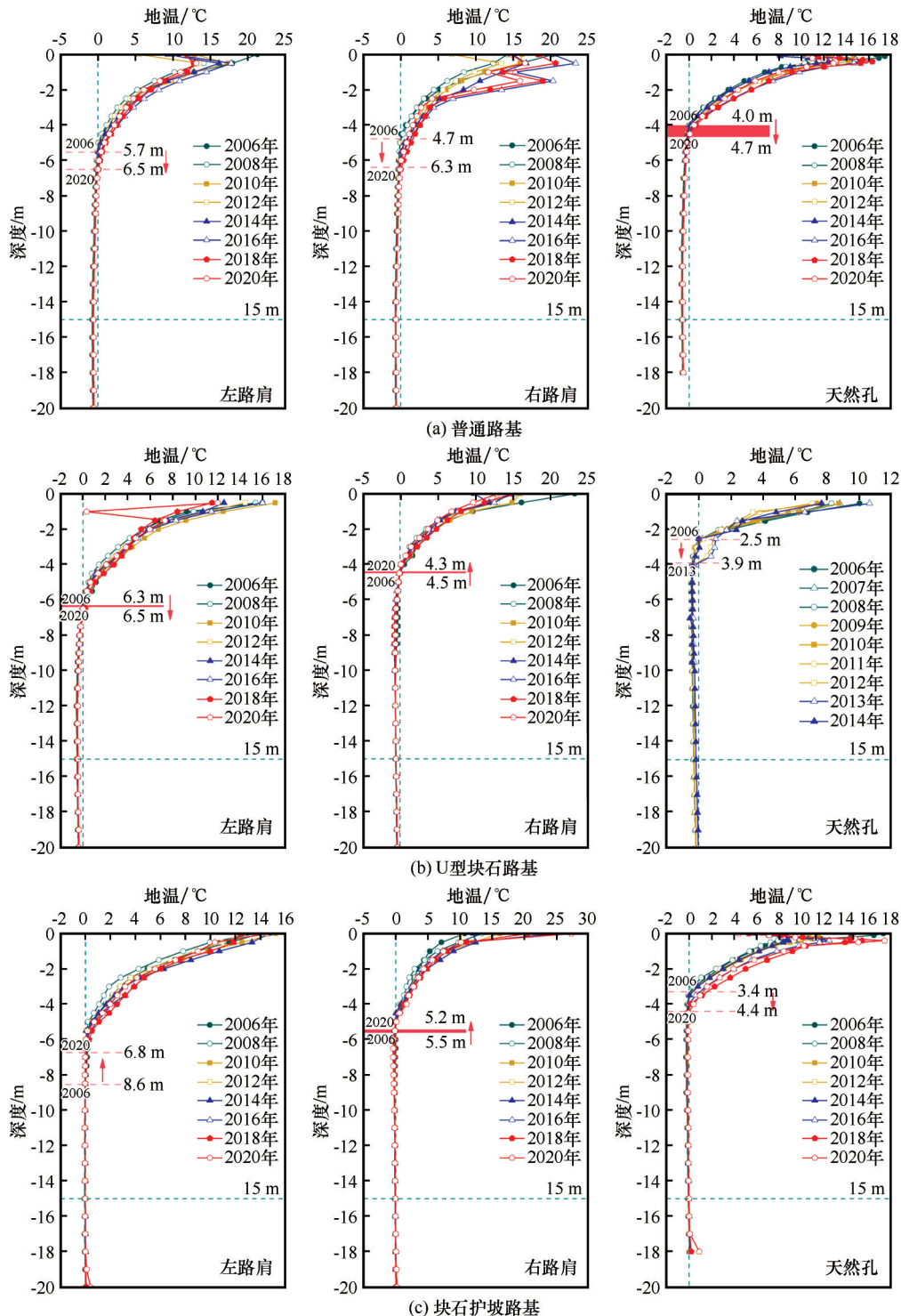


图 6 三个监测断面年最高地层温度

Fig. 6 Maximum ground temperature of the three observation profiles: traditional embankment (a), U-shaped crushed rock embankment (b), crushed rock revetment embankment (c)

2020年的6.3 m。与左路肩相比,尽管青藏铁路运营的第一年(2006年)人为多年冻土上限深度有1.0 m的差距,但是在运营15年以后人为多年冻土上限深度只有0.2 m的差值。对于天然孔,在2006—2020年之间,天然多年冻土上限由4.0 m下降到4.7 m。对比来看,该断面的左右路肩人为多年冻土上限深度已低于原天然上限0.7~0.9 m(路基高度0.9 m),且左路肩人为多年冻土上限以下土层的年最高地层温度持续高于天然场地相同深度土层的年最高地层温度,这再一次说明高温多年冻土区内的普通路基不能保持路基下多年冻土的热稳定性。

如图6(b)所示,U型块石路基人为多年冻土上限深度变化情况为,左路肩由2006年的6.3 m下降到2020年的6.5 m,15年间仅下降了0.2 m;右路肩由2006年的4.5 m抬升至2020年的4.3 m,15年间上限保持稳定,甚至抬升了0.2 m,右路肩的人为多年冻土上限深度高于左路肩约2 m。天然孔多年冻土上限深度由2006年的2.5 m下降到2011年的2.8 m,下降速度较为缓慢,但可以发现,2012—2013年这两年时间内,多年冻土上限由2.8 m下降到3.9 m,结合文献[48]中的气象数据,这或与部分年份的外界气温偏高有关。对比来看,高温多年冻土区内U型块石路基断面对路基下多年冻土的主动降温效果明显,但左右路肩下的人为多年冻土上限差异过大的问题不容忽视。

如图6(c)所示,块石护坡路基人为多年冻土上限深度变化情况为,左路肩由2006年的8.6 m抬升至2020年的6.8 m,这表明块石护坡路基对多年冻土上限的抬升起到了积极作用;右路肩2006年为5.5 m,2020年抬升至5.2 m,值得注意的是该侧地表年最高地层温度从2006年的10.5℃增长到2020年的27.5℃,但这17℃的温度增加对该侧人为多年冻土上限深度的影响并不大,同样说明了块石护坡路基对保护多年冻土的有效性。天然孔2006年的多年冻土上限深度为3.4 m,至2020年下降到4.4 m,这与左右路肩人为多年冻土上限深度的上升成相反的变化趋势。对比来看,15年间块石护坡路基左路肩的人为多年冻土上限抬升显著,右路肩略有上升,但天然孔却有明显下降,同时左右路肩的人为多年冻土上限深度差值减小。以上分析表明,块石护坡路基对路基下冻土层起到了一定的主动控温作用,且缩小了路基左右侧人为多年冻土上限差值。

3 结论

本文对2006—2020年青藏铁路运营15年中,高温多年冻土区内的三种典型路基结构(普通路基结构、U型块石路基结构、块石护坡路基结构)的温度场数据进行分析和讨论,得到以下主要结论:

(1)随着运营年份的增加,普通路基的人为多年冻土上限略低于原天然冻土上限,左右路肩的融深差值不明显。U型块石路基和块石护坡路基左右路肩的人为多年冻土上限均已抬升至路基基本体内,左右路肩的融深差值在1.0~1.5 m。

(2)综合三个监测断面年平均地层温度的长期变化情况可以看出,高温多年冻土区内的普通路基左右路肩下冻土层的年平均地层温度增长速率高于天然场地同深度冻土层的增长速率,普通路基下的多年冻土不能保持长期热稳定性;U型块石路基对其下的多年冻土主动降温效果明显,但左右路肩下的地温差异不可忽视;块石护坡路基对其下的多年冻土具有一定的主动降温效果,左右路肩下的地温差异要小于U型块石路基。

(3)整体来看,在全球气候变暖的背景下,青藏高原高温多年冻土区内的天然场地经历了多年冻土上限下降和不同深度地层温度上升的冻土退化过程,叠加可能出现的路基侧向水热扰动,高温多年冻土区内的青藏铁路普通路基需要采取增设块石护坡等补强措施,才能保持路基下多年冻土的热稳定性。同时,U型块石路基及块石护坡路基虽然具有主动降温效果,但其左右路肩下的地温差异仍需引起重视,可在路基左右两侧增设不对称的热棒,以消除路基下地温场左右不均匀分布的问题。

参考文献(References):

- [1] Cheng Guodong, He Ping. Linearity engineering in permafrost areas [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(3): 213-217. [程国栋, 何平. 多年冻土地区线性工程建设[J]. 冰川冻土, 2001, 23(3): 213-217.]
- [2] Ran Li. Design and research of the railway on Qinghai-Tibet Plateau [C]//China Association for Science and Technology. Compilation of invited presentations at the sessions of the 2001 annual academic conference of the Chinese Association for Science and Technology. Changchun: China Association for Science and Technology, Chinese Society for Soil and Water Conservation, 2001: 572-582. [冉理. 青藏高原铁路的设计与研究[C]//中国科学技术协会. 中国科协2001年学术年会分会场特邀报告汇编. 长春: 中国科学技术协会, 中国水土保持学会, 2001: 572-582.]
- [3] Wu Qingbai, Liu Yongzhi, Zhang Jianming, et al. A review of recent frozen soil engineering in permafrost regions along Qinghai-Tibet Highway, China [J]. Permafrost and Periglacial Pro-

- cesses, 2002, 13(3): 199-205.
- [4] Jin Huijun, Wei Zhi, Wang Shaoling, et al. Assessment of frozen-ground conditions for engineering geology along the Qinghai-Tibet highway and railway, China[J]. *Engineering Geology*, 2008, 101(3/4): 96-109.
 - [5] Cheng Guodong. Construction of Qinghai-Tibet railway with cooled roadbed[J]. *China Railway Science*, 2003, 24(3): 1-4. [程国栋. 用冷却路基的方法修建青藏铁路[J]. *中国铁道科学*, 2003, 24(3): 1-4.]
 - [6] Ma Wei, Cheng Guodong, Wu Qingbai. Study and application of idea of dynamic design in Qinghai-Tibet Railway construction[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(4): 537-540. [马巍, 程国栋, 吴青柏. 青藏铁路建设中动态设计思路及其应用研究[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(4): 537-540.]
 - [7] Qi Jilin, Yao Xiaoliang, Yu Fan, et al. Study on thaw consolidation of permafrost under roadway embankment[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 81: 48-54.
 - [8] Doré G, Niu Fujun, Brooks H. Adaptation methods for transportation infrastructure built on degrading permafrost[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2016, 27(4): 352-364.
 - [9] Tai Bowen, Liu Jiankun, Wang Tengfei, et al. Thermal characteristics and declining permafrost table beneath three cooling embankments in warm permafrost regions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 123: 435-447.
 - [10] Cheng Guodong, Wu Qingbai, Ma Wei. Innovative designs of permafrost roadbed for the Qinghai-Tibet Railway[J]. *Science in 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.]
 - [11] Ma Wei, Cheng Guodong, Wu Qingbai. Construction on permafrost foundations: lessons learned from the Qinghai-Tibet railroad[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 59(1): 3-11.
 - [12] Yu Qihao, Niu Fujun, Pan Xicai, et al. Investigation of embankment with temperature-controlled ventilation along the Qinghai-Tibet Railway[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 53(2): 193-199.
 - [13] Zhang Mingyi, Lai Yuanming, Dong Yuanhong, et al. Laboratory investigation of the heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, 95: 67-73.
 - [14] Luo Jing, Niu Fujun, Wu Libo, et al. Field experimental study on long-term cooling performance of Sun-shaded embankments at the Qinghai-Tibet Railway, China[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 145: 14-20.
 - [15] Wu Qingbai, Zhao Shiyun, Ma Wei, et al. Monitoring and analysis of cooling effect of block-stone embankment for Qinghai-Tibet Railway[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(12): 1386-1390. [吴青柏, 赵世运, 马巍, 等. 青藏铁路块石路基结构的冷却效果监测分析[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(12): 1386-1390.]
 - [16] 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.
 - [17] Mu Yanhu, Ma Wei, Wu Qingbai, et al. Cooling processes and effects of crushed rock embankment along the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 78: 107-114.
 - [18] French H M. The periglacial environment[M]. 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2007: 161.
 - [19] Cheng Guodong, Lai Yuanming, Sun Zhizhong, et al. The 'thermal semi-conductor' effect of crushed rocks[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2007, 18(2): 151-160.
 - [20] Ma Wei, Feng Guangli, Wu Qingbai, et al. Analyses of temperature fields under the embankment with crushed-rock structures along the Qinghai-Tibet Railway[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 53(3): 259-270.
 - [21] Ma Wei, Mu Yanhu, Li Guoyu, et al. Responses of embankment thermal regime to engineering activities and climate change along the Qinghai-Tibet Railway[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2013, 43(3): 478-489. [马巍, 穆彦虎, 李国玉, 等. 多年冻土区铁路路基热状况对工程扰动及气候变化的响应[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(3): 478-489.]
 - [22] Mu Yanhu, Ma Wei, Niu Fujun, et al. Long-term thermal effects of air convection embankments in permafrost zones: case study of the Qinghai-Tibet Railway, China[J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2018, 32(4): 05018004.
 - [23] Wu Qingbai, Zhao Hongting, Zhang Zhongqiong, et al. Long-term role of cooling the underlying permafrost of the crushed rock structure embankment along the Qinghai-Xizang Railway[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2020, 31(1): 172-183.
 - [24] Harris C, Arenson L U, Christiansen H H, et al. Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses[J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 92(3/4): 117-171.
 - [25] Smith S L, Riseborough D W. Modelling the thermal response of permafrost terrain to right-of-way disturbance and climate warming[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 60(1): 92-103.
 - [26] Wu Qingbai, Zhang Zhongqiong, Gao Siru, et al. Thermal impacts of engineering activities and vegetation layer on permafrost in different alpine ecosystems of the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *The Cryosphere*, 2016, 10(4): 1695-1706.
 - [27] Li Ren, Wu Qingbai, Li Xin, et al. Characteristic, changes and impacts of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2783-2795.
 - [28] Wu Qingbai, Zhang Zhongqiong, Liu Ge. Relationships between climate warming and engineering stability of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(2): 342-352. [吴青柏, 张中琼, 刘戈. 青藏高原气候转暖与冻土工程的关系[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(2): 342-352.]
 - [29] Wu Qingbai, Liu Yongzhi, Yu Hui. Analysis of the variations of permafrost under ordinary embankment along the Qinghai-Tibet Railway[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(6): 960-969. [吴青柏, 刘永智, 于晖. 青藏铁路普通路基下部冻土变化分析[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(6): 960-968.]
 - [30] Mu Yanhu, Ma Wei, Wu Qingbai, et al. Thermal regime of conventional embankments along the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 70: 123-131.
 - [31] 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.]
 - [32] Ma Wei, Wen Zhi, Sheng Yu, et al. Remedying embankment thaw settlement in a warm permafrost region with thermosyph-

- ons and crushed rock revetment [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(9): 1005-1014.
- [33] Hou Yandong, Wu Qingbai, Sun Zhizhong, et al. The coupled reinforcing effect of crushed rock slope protection and thermosyphons in Qinghai-Tibet Railway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 118-125. [侯彦东, 吴青柏, 孙志忠, 等. 青藏铁路碎石护坡—热管复合措施的补强效果研究 [J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 118-125.]
- [34] Mei Qihang, Chen Ji, Wang Jinchang, et al. Strengthening effect of crushed rock revetment and thermosyphons in a traditional embankment in permafrost regions under warming climate [J]. Advances in Climate Change Research, 2021, 12(1): 66-75.
- [35] Yu Wenbing, Liu Weibo, Chen Lin, et al. Evaluation of cooling effects of crushed rock under sand-filling and climate warming scenarios on the Tibet Plateau [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 92: 130-136.
- [36] Chen Lin, Yu Wenbing, Yi Xin, et al. Numerical simulation of heat transfer of the crushed-rock interlayer embankment of Qinghai-Tibet Railway affected by aeolian sand clogging and climate change [J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 155: 1-10.
- [37] Zhao Xiangqing, Cheng Jia, Han Longwu, et al. Monitoring and analysis of cooling effect of sand hazard riprap slope protection in permafrost regions along Qinghai-Tibet Railway [J]. Railway Standard Design, 2019, 63(11): 8-13. [赵相卿, 程佳, 韩龙武, 等. 青藏铁路多年冻土区片石护坡积沙段降温效果监测与分析 [J]. 铁道标准设计, 2019, 63(11): 8-13.]
- [38] Niu Fujun, Zhang Jianming, Zhang Zhao. Engineering geological characteristics and evaluations of permafrost in beiluhe testing field of Qinghai-Tibetan Railway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 264-269. [牛富俊, 张建明, 张钊. 青藏铁路北麓河试验段冻土工程地质特征及评价 [J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 264-269.]
- [39] Chen Donggen, Wang Shuangjie, Chen Jianbing, et al. Study of the factors influencing the thickness of residual thawed interlayers and cooling effect of block-stone embankment [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 854-861. [陈冬根, 汪双杰, 陈建兵, 等. 融化夹层厚度影响因素分析与片块石路基降温效果研究 [J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 854-861.]
- [40] Xu Xiaoming, Wu Qingbai, Zhang Zhongqiong. Responses of active layer thickness on the Qinghai-Tibet Plateau to climate change [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 1-8. [徐晓明, 吴青柏, 张中琼. 青藏高原多年冻土活动层厚度对气候变化的响应 [J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 1-8.]
- [41] 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.]
- [42] Wang Honglei, Sun Zhizhong, Zhang Jianming, et al. Formation and evolution of suprapermfrost taliks beneath earth-filled embankments along the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions [J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 188: 103300.
- [43] 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, 张明义. 多年冻土区铁路路基阴阳坡面热状况差异分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3197-3201.]
- [44] Chou Yaling, Sheng Yu, Wei Zhenming. Temperature and deformation differences between southern and northern slopes of highway embankment on permafrost [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1896-1903. [丑亚玲, 盛煜, 韦振明. 多年冻土区公路路基阴阳坡温度及变形差异分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1896-1903.]
- [45] Tai Bowen, Liu Jiankun, Chang Dan. Experimental and numerical investigation on the sunny-shady slopes effect of three cooling embankments along an expressway in warm permafrost region, China [J]. Engineering Geology, 2020, 269: 105545.
- [46] Luo Xiaoxiao, Yu Qihao, Ma Qinguo, et al. Study on the heat and deformation characteristics of an expressway embankment with shady and sunny slopes in warm and ice-rich permafrost regions [J]. Transportation Geotechnics, 2020, 24: 100390.
- [47] Song Yi, Jin Long, Peng Hui, et al. Development of thermal and deformation stability of Qinghai-Tibet Highway under sunny-shady slope effect in southern Tanglha region in recent decade [J]. Soils and Foundations, 2020, 60(2): 342-355.
- [48] Yang Yaoxian, Hu Zeyong, Lu Fuquan, et al. Progress of recent 60 years' climate change and its environmental impacts on the Qinghai-Xizang plateau [J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(1): 1-10. [杨耀先, 胡泽勇, 路富全, 等. 青藏高原近60年来气候变化及其环境影响研究进展 [J]. 高原气象, 2022, 41(1): 1-10.]
- [49] Wu Jichun, Sheng Yu, Wu Qingbai, et al. Processes and modes of permafrost degradation on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Science in 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.]

Long-term thermal stability study of the typical embankment along the Qinghai-Tibet Railway in warm permafrost regions

XU Yuezhen^{1,2}, SHEN Mingde^{1,2}, ZHOU Zhiwei^{1,2}, MA Wei^{1,2}, LI Guoyu^{1,2}

(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: Using the long-term ground temperature monitoring data of the permafrost zone along the Qinghai-Tibet Railway from 2006 to 2020, three types of typical roadbed structures were analyzed. Traditional embankment (TE), U-shaped crushed rock embankment (UCRE) and crushed rock revetment embankment (CRRE) were included the three types of typical roadbed, which were selected to the long-term monitoring sections within the warm permafrost zones. The evolution of ground temperature field, mean annual ground temperature (MAGT) and annual maximum ground temperature (AMGT) in the depth range of 20 m under the embankment were analyzed and studied since 15 years of operation. The monitoring and analysis results show that: the growth rate of MAGT under the left and right shoulders of the TE is always higher than that of the same depth in the natural site. The MAGT under the UCRE is always lower than the natural site and always maintains a certain difference, whereas, the difference in ground temperature under the left and right shoulders is also not negligible. The MAGT of the left shoulder in the CRRE is not much different from that of the natural hole, while the MAGT of the right shoulder is always lower than that of the natural hole, and the differ in ground temperature between the left and right shoulders is smaller than that of the UCRE. The artificial permafrost table (APT) under the TE is always lower than that of in the natural site. Both the UCRE and CRRE, the APT in the left and right shoulders of them has been elevated into the embankment, and the differ of APT between the left and right shoulders is about 1.0~1.5 m. the differ of APT between the left and right shoulders in the CRRE is slightly lower than that of UCRE. Overall, because of the influence of thermal disturbance about engineering and climate warming, the TE in the warm permafrost zones cannot keep the thermal stability of permafrost under the embankment. Some active-cooling and reinforcement measures need to be taken. Both of the UCRE and CRRE, have a certain active-cooling effect on the permafrost under embankment, but the differ in ground temperature between the left and right shoulders still needs to be taken seriously.

Key words: Qinghai-Tibet Railway; warm permafrost zones; crushed rock embankment; permafrost table; ground temperature field; long-term operation and maintenance

(责任编辑: 温智)