

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0508

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.]

青藏铁路多年冻土区含融化夹层路基的热状态

王宏磊^{1,2}, 孙志忠¹, 刘永智¹, 武贵龙¹

(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: 基于青藏铁路 K1496+750 监测断面含融化夹层路基长达 10 a 的地温监测数据, 分析了在气候转暖及工程活动下天然场地及路基左右路肩下多年冻土热状态年变化过程、融化夹层的年变化过程及其对多年冻土热状态的影响。结果表明: 监测断面天然场地、左右路肩下多年冻土上限逐年下降, 热稳定性逐年降低; 观测期内, 左路肩下发育有融化夹层, 融化夹层厚度在波动中呈增厚趋势, 且其增厚主要是由多年冻土人为上限下降所致, 而天然场地及右路肩下未发育融化夹层; 多年冻土上限附近土体热积累显著, 进而导致多年冻土上限逐年下降及其附近土体温度逐年升高, 弱化了多年冻土的热稳定性; 后期增加的块石护坡和热管两种具有“主动冷却”效能的工程补强措施很好的改善了路基的热稳定性, 右路肩经工程补强措施后, 多年冻土人为上限得到显著抬升, 热稳定性得到显著改善, 而左路肩由于融化夹层的存在, 工程补强措施仅仅维持了当前多年冻土热状态, 融化夹层的存在一定程度上弱化了工程补强措施所产生的冷却效能。

关键词: 青藏铁路; 热状态; 融化夹层; 多年冻土

中图分类号: U212.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)05-0934-09

0 引言

多年冻土是指地表下一定深度范围内地温持续两年以上处于 0℃ 以下的岩土层^[1]。由于冰的存在, 多年冻土对温度变化极为敏感, 其本身物理化学性质, 以及以此作为构筑物载体的工程性质均受到温度的影响^[2]。而聚集于狭长的冻土工程走廊内的青藏铁路、青藏公路、输变电路以及输油气管道等工程构筑物之间相互影响, 以及构筑物和多年冻土的相互作用过程中, 构筑物对下部多年冻土产生强烈的热扰动, 弱化了冻土的稳定性, 使多年冻土的生存环境变得脆弱, 造成冻土的广泛退化, 进而引起一些工程地质问题^[3-7]。同时, 在全球气候转暖的背景下, 秦大河^[8]认为未来 50 a 中国西北地区气温可能上升 1.9~2.3℃, 青藏高原可能上升 2.2~2.6℃。

工程活动和气候变暖将改变多年冻土的热状

态, 多年冻土年平均地温升高, 活动层厚度增大, 地下冰融化, 导致青藏高原多年冻土南北界、岛状多年冻土区及部分高温多年冻土区冻土退化严重^[9-10], 导致多年冻土区不同程度的发育有融区。Everdingen^[11]将融区定义为: 位于季节活动层和多年冻土之间、周围土壤常年冻结、温度为正的一层土壤。Harris 等^[12]在 Everdingen^[11]、Williams^[13]、Washburn^[14]的基础上, 根据多年冻土所处的地理位置不同将融区分为封闭式融区、开放式融区、横向融区、孤立融区、瞬时融区; 根据未冻土形成机理的不同将融区分为热传导作用融区、水热作用融区、水化学作用融区。Singh 等^[15]又在形成未冻土机理不同的基础上增加了地热作用融区和人造融区。青藏铁路部分路段路基下发育有的融化夹层也属融区的一种表现形式。一般将多年冻土区季节冻结最大深度界面与多年冻土人为上限之间形成的隔年或多年不冻的融化土层称之为融化夹层或融化

收稿日期: 2018-01-05; 修订日期: 2018-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571064; 41630636); 冻土工程国家重点实验室自主研究项目(SKLFSE-ZT-09)资助

作者简介: 王宏磊(1990-), 男, 山西大同人, 2015年在兰州交通大学获学士学位, 现为中国科学院西北生态环境资源研究院在读硕士研究生, 从事冻土环境与工程方面的研究. E-mail: hongleiwang@lzb.ac.cn

通信作者: 孙志忠, E-mail: sun@lzb.ac.cn.

核^[16-18]。其中,李述训等^[19]基于二维有相变热传导理论分析了青藏高原沥青路面下融化盘随时间的形成变化过程及最大融化深度;陈冬根等^[20]研究了融化夹层与路基高度、年平均地温的关系;金会军等^[21]通过对冻土勘探钻孔,分析了 60 眼观测深度大于 20 m,观测时间达 5 a 以上的地温数据,指出了青藏公路沿线冻土发生下引式退化时将导致融化夹层出现。吴吉春等^[22]在数值模拟结果的基础上,根据理论推导和对青藏高原多年冻土勘察的认识,指出在多年冻土退化过程中地温剖面曲线出现不衔接阶段时融化夹层即出现。另外一些学者根据年平均地温和气温、路面类型、路基高度、路面宽度的不同分析了其对融化夹层的影响,并做了数值模拟^[23-24]。青藏铁路的修建采用了“主动冷却”路基以保护冻土的设计原则^[25-27]。然而,受前期工程地质勘测及青藏高原复杂的地质条件限制,并非所有的高温高含冰量路段均铺设了上述的新型路基结构,局部地区修筑了普通路基^[28-30]。研究多年冻土区高温高含冰量普通路基下融化夹层在气候转暖 and 工程活动影响下的发展变化过程,对于治理高填方路基阴阳坡效应下融化核偏移导致的路基纵向裂纹、多年冻土上限下降及地下冰融化导致的路面波浪变形等一系列工程地质问题具有很好的指导作用。以上学者的工作多侧重于理论分析和数值模拟,且实地地温监测时间序列相对较短,没有很好地分析发育有融化夹层路基的热状态。为此,本文选取了青藏铁路监测断面含融化夹层路基长达 10 a 之余的地温监测数据,分析了发育有融化夹层路基的热状态及其融化夹层的年变化过程。

1 数据来源及方法

1.1 监测场地基本信息

地温监测数据来自于青藏铁路 K1496 + 750 监测断面,分别采集了天然孔、左路肩、右路肩下 2005 年 10 月至 2015 年 11 月的地温数据,地温监测数据每天测定一次。该地温监测场地天然孔深为 15 m,左路肩、右路肩孔深为 20 m。自天然地表面或路基表面起算,10 m 深度内每隔 0.5 m 布设一个温度探头,10 m 以下每隔 1.0 m 布设一个温度探头。该监测场地位于唐古拉山山区,多年冻土南界附近,属富冰、饱冰多年冻土,年平均地温为 -0.12 ℃,植被覆盖度 90%;起初为普通路基,左路肩高 3.1 m、右路肩高 2.9 m,线路走向为南偏东 5°,2010 年 5 月增设块石护坡,2012 年 11 月增

插热管。

1.2 数据处理方法

由于土颗粒表面能、土壤的含盐量等因素影响土体的冻结温度低于 0 ℃^[31-32]。本文从工程实践和问题分析简易性的角度出发,以 0 ℃作为土体的冻融分界线,即土体温度低于 0 ℃发生冻结,高于 0 ℃发生融化。同时以 0 ℃等值线能够到达的最深位置确定多年冻土上限。由于发育有融化夹层的多年冻土是非衔接性多年冻土,融化夹层上部土体的冻融过程类似于季节冻土,即融化夹层上部的土体在冷季存在最大的冻结深度。地面温度的周期性波动,导致热量在温度梯度下向下传播,一年中的地温变幅随深度的增加按指数规律衰减且相位滞后^[31]。本文以每年 10 月中旬作为多年冻土融化深度最大时刻,以每年 4 月中旬为其融化夹层上部土体冻结深度最大时刻。在根据地温曲线确定最大冻结深度、最大融化深度时,4 月中旬、10 月中旬地温值取其当日测定值。根据融化夹层厚度的定义,即当年的人为上限值减去次年的季节冻结最大深度值得到次年的融化夹层厚度值。

2 结果分析

2.1 含融化夹层路基热状态

图 1 为 K1496 + 750 监测断面处天然场地、左路肩、右路肩下地温等值线图。由图 1(a)可知,天然场地下多年冻土呈衔接状态,在气候转暖的影响下季节活动层厚度呈现逐年增厚趋势,但观测期内未发育有融化夹层,热状态整体上较为稳定。由图 1(b)、1(c)可知,该监测断面路基下多年冻土厚度较薄,且左路肩在观测期内发育有融化夹层,同时左右路肩下 5 ~ 15 m 深度处多年冻土地温一直处于 -1 ~ 0 ℃的较高温度状态,热状态极不稳定,易受到气候转暖及工程活动等外界的扰动发生变化。

2.2 多年冻土人为上限年变化过程

图 2 为监测断面各监测孔 10 月中旬地温随深度的年变化图。由图可知,观测期内,天然场地下多年冻土上限 2006 年、2008 年、2010 年、2012 年、2014 年分别为 2.29 m、2.35 m、2.44 m、2.52 m、2.76 m,多年冻土上限呈逐年下降趋势,年均下降速率为 0.049 m · a⁻¹;左路肩下多年冻土人为上限 2006 年、2008 年、2010 年、2012 年、2014 年分别为 6.39 m、6.55 m、6.78 m、6.52 m、6.50 m,右路肩下多年冻土人为上限 2006 年、2008 年、2010 年、2012 年、2014 年分别为 5.56 m、5.86 m、5.87 m、

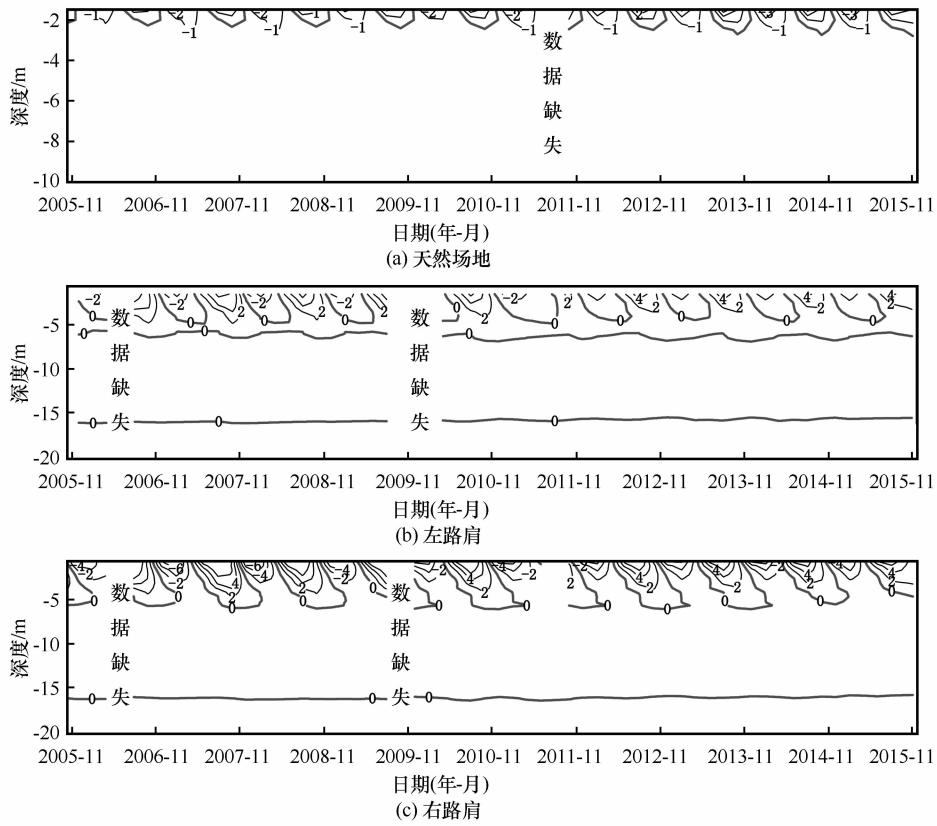


图 1 青藏铁路 K1496 + 750 监测断面地温等值线图

Fig. 1 Contour maps of ground temperature under original ground (a) , left shoulder (b) and right shoulder (c) in K1496 + 750 of the Qinghai-Tibet Railway

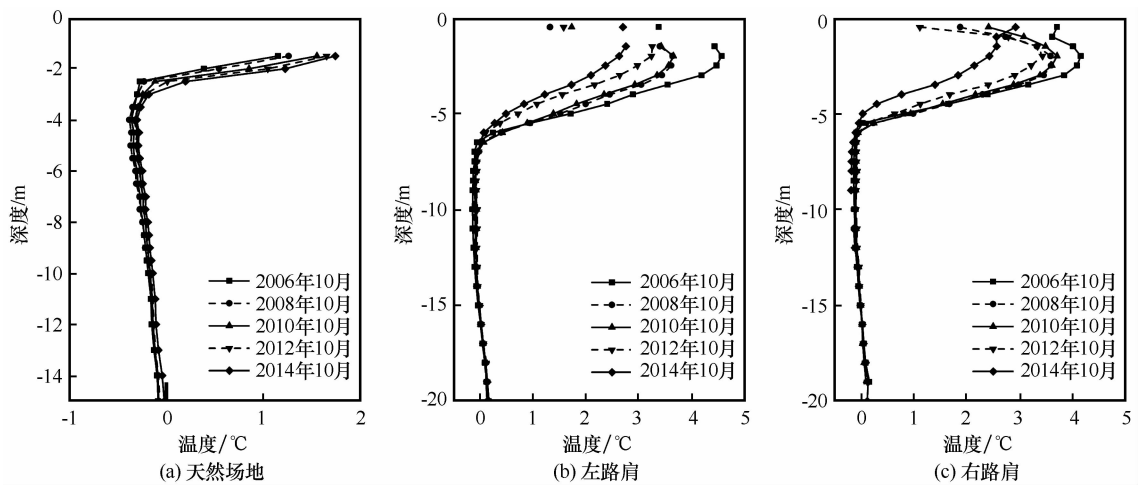


图 2 青藏铁路 K1496 + 750 监测断面各监测孔 10 月中旬地温

Fig. 2 Ground temperature profiles of original ground (a) , left shoulder (b) and right shoulder (c) at K1496 + 750 of the Qinghai-Tibet Railway in mid-October

5.79 m、5.0 m，左右路肩下多年冻土人为上限在未采取工程补强措施前均呈逐年下降趋势，经工程补强措施后，左路肩下多年冻土人为上限稳定在 6.50 m 左右，右路肩下多年冻土人为上限呈向上抬升趋势，表明 2010 年 5 月、2012 年 11 月对该监

测断面路基分别进行的增补块石护坡、增插热管两种工程补强措施有效地抑制了路基下多年冻土人为上限的下降，增强了路基的热稳定性。由于该监测场地线路走向为南偏东 5°，加之路基高度较高，该监测断面路基“阴阳坡”效应显著，导致左路肩下多

年冻土人为上限埋藏深度较右路肩深。

2.3 季节冻结最大深度

图3为监测断面各监测孔4月中旬地温随深度的年变化图。由图可知，观测期内，监测断面天然场地、右路肩下多年冻土在冷季均能够完全回冻，多年冻土呈衔接状态，但右路肩下5 m深度处多年冻土地温处于临界状态，易受到扰动发生变化；左路肩下多年冻土在冷季不能够完全回冻，多年冻土呈不衔接状态，存在季节冻结最大深度，其值2007年、2009年、2011年、2013年、2015年分别为

4.73 m、4.72 m、4.49 m、4.45 m、4.44 m。

2.4 融化夹层厚度变化趋势

图4为监测断面左路肩下融化夹层厚度年变化过程图。由图可知，融化夹层厚度在观测期内呈现波动中增厚趋势，其中2011年之前的融化夹层增厚速率较2011之后的大。由图3(b)知左路肩下季节冻结最大深度年变化幅值不大，结合图2(b)知左路肩下多年冻土人为上限的下降与其图4所示融化夹层厚度增厚具有很好的一致性，所以融化夹层的增厚主要是由多年冻土人为上限下降所致。

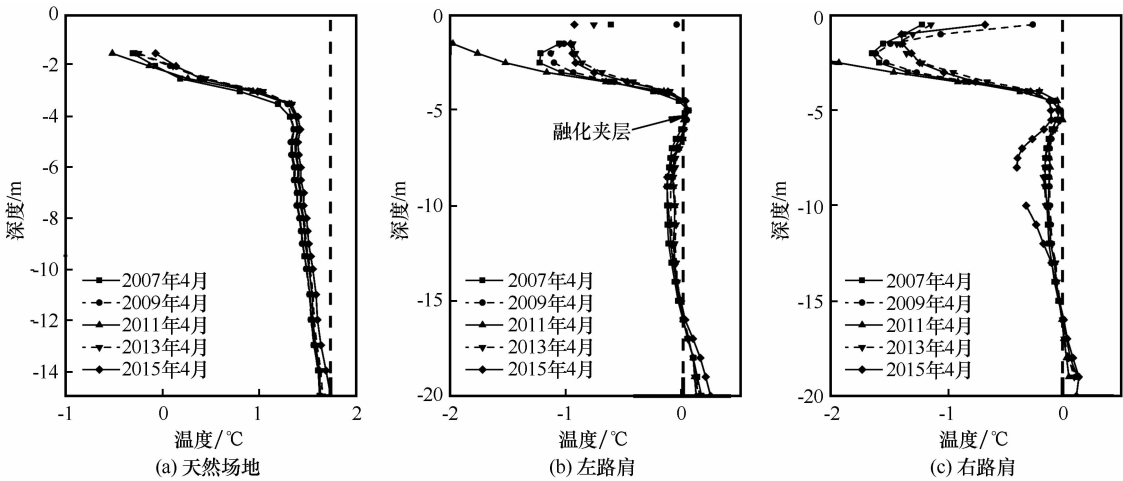


图3 青藏铁路 K1496 + 750 监测断面各监测孔 4 月中旬地温
Fig.3 Ground temperature profiles of original ground (a) , left shoulder (b) and right shoulder (c) at K1496 + 750 of the Qinghai-Tibet Railway in mid-April

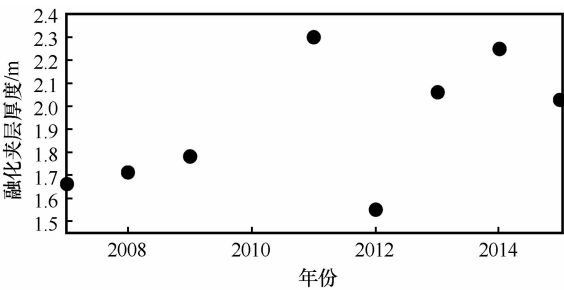


图4 K1496 + 750 监测断面左路肩下融化夹层厚度年变化过程
Fig.4 Annual variation of the thickness of thawed interlayer under left shoulder at K1496 + 750

2.5 融化夹层对多年冻土热状态的影响

2.5.1 多年冻土上限附近热流量年变化过程

多年冻土上限附近热流量的年变化能够很好的反映多年冻土的热状态。为此，忽略相变潜热等产生的影响，通过傅里叶定律计算厚度为 0.5 m 土体的热流量值。热流量 q 可以近似表示为

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \approx -\lambda \frac{T_2 - T_1}{\Delta z} \tag{1}$$

式中： λ 为导热系数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)； T 为温度； T_1 和 T_2 为 0.5 m 厚土体界面处的温度； Δz 值为 0.5 m。计算中土体的导热系数根据土质、干容重等选取，根据天然场地、左路肩、右路肩下多年冻土上限位置选取温度测点，具体取值见表1。

图5为根据式(1)计算所得的多年冻土上限附近热流量的年变化过程图。其中正值代表吸热，负值代表放热。由图可知，天然场地、左路肩、右路肩下多年冻土上限附近土体在观测期内均表现为吸热，但其吸热过程随时间变化又有所不同；其中天然场地下多年冻土上限附近土体在冷季表现为放热，暖季表现为吸热，一年中的吸热期长于放热期，且吸热过程中的热流量相对平缓，放热过程中的热流量较为剧烈，吸热过程中的峰值与放热过程中的峰值大致相等并随时间呈逐年增大的趋势，总体上热量处于积累状态，这也与天然场地下多年冻土上限逐年下降有较好的一致性；而左右路肩下多年冻土人为上限附近土体在观测期内一直保持为吸热状态，暖季热流量值迅速增大，在工程

表 1 温度测点深度和土体导热系数
Table 1 The monitored temperature depth and thermal conductivity of soil at K1496 + 750

监测场地	选取的温度测点深度/m			多年冻土导热系数/(W·m ⁻¹ ·a ⁻¹)			
	天然场地	左路肩	右路肩	天然场地		左/右路肩	
				冻土	融土	冻土	融土
K1496 + 750	2.0/2.5	6.0/6.5	5.5/6.0	1.351	1.125	1.824	1.474

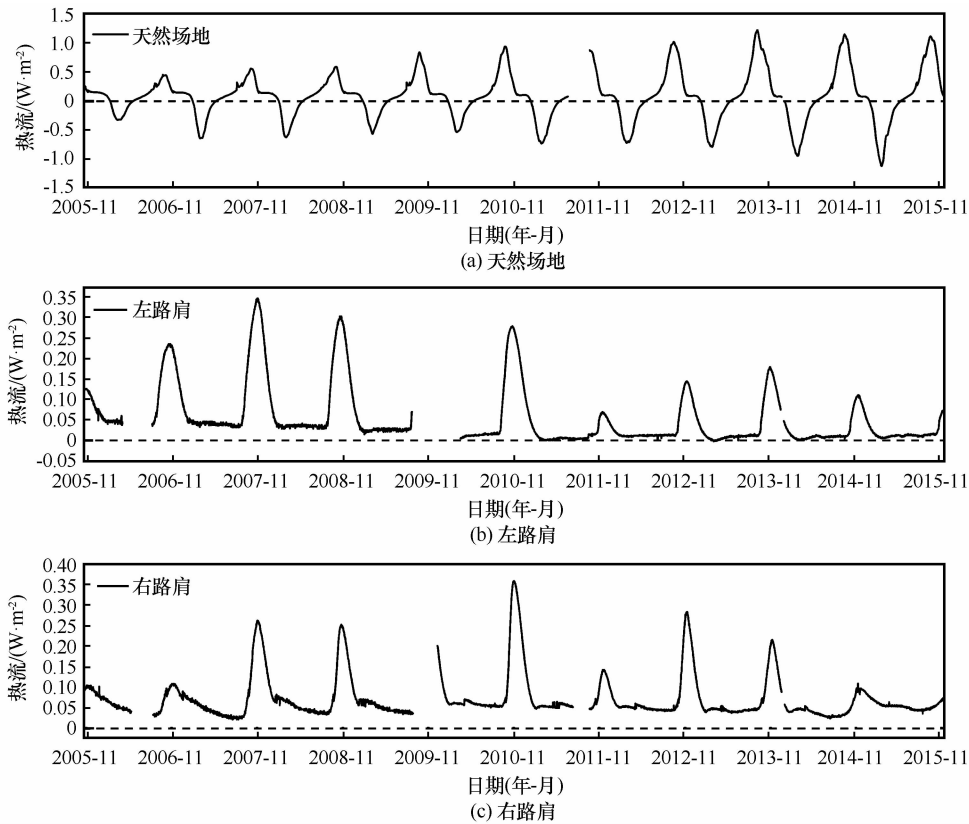


图 5 多年冻土上限附近热流通量的年变化过程
Fig. 5 Annual variations of the heat flux nearby the permafrost table in original ground (a), left shoulder (b) and right shoulder (c)

补强措施前，热积累显著，其后每年的热积累在波动变化中呈减少的趋势，这也与左右路肩下多年冻土人为上限变化趋势有很好的一致性。

2.5.2 多年冻土上限附近地温年变化过程

图 6 为多年冻土上限附近地温年变化过程图。由图可知，在气候转暖的影响下，天然场地下多年冻土上限附近 2.5 m 处地温暖季时的峰值呈逐年增大趋势，而 3.0 m 处地温冷季时的峰值呈微弱的减小趋势，以上现象表明天然场地下多年冻土上限附近地温总体上处于升温趋势；左右路肩下多年冻土人为上限附近地温 2010 年之前均表现为明显的升温趋势，2010 年之后左路肩下多年冻土上限附近地温年际间的变化趋势趋于稳定、右路肩下多年冻土上限附近地温在经过 3 a 的稳定变化后表现出了明

显的降温趋势。左右路肩下多年冻土人为上限附近地温经工程补强措施后表现出不同的变化趋势与融化夹层的存在有很大的关系。发育有融化夹层的左路肩一定程度上限制了工程补强措施所产生的“主动冷却”效能，多年冻土上限附近地温未能得到明显的降低，融化夹层的存在降低了多年冻土的热稳定性，而未发育有融化夹层的右路肩对工程补强措施产生的“主动冷却”效能则表现出了明显的响应关系，多年冻土的热稳定性增强。

3 讨论

在气候转暖与工程活动的双重影响下，原天然地表的能量平衡体系被打破，路基下的多年冻土年吸收的热量较之前有所增加，多年冻土上限下降，

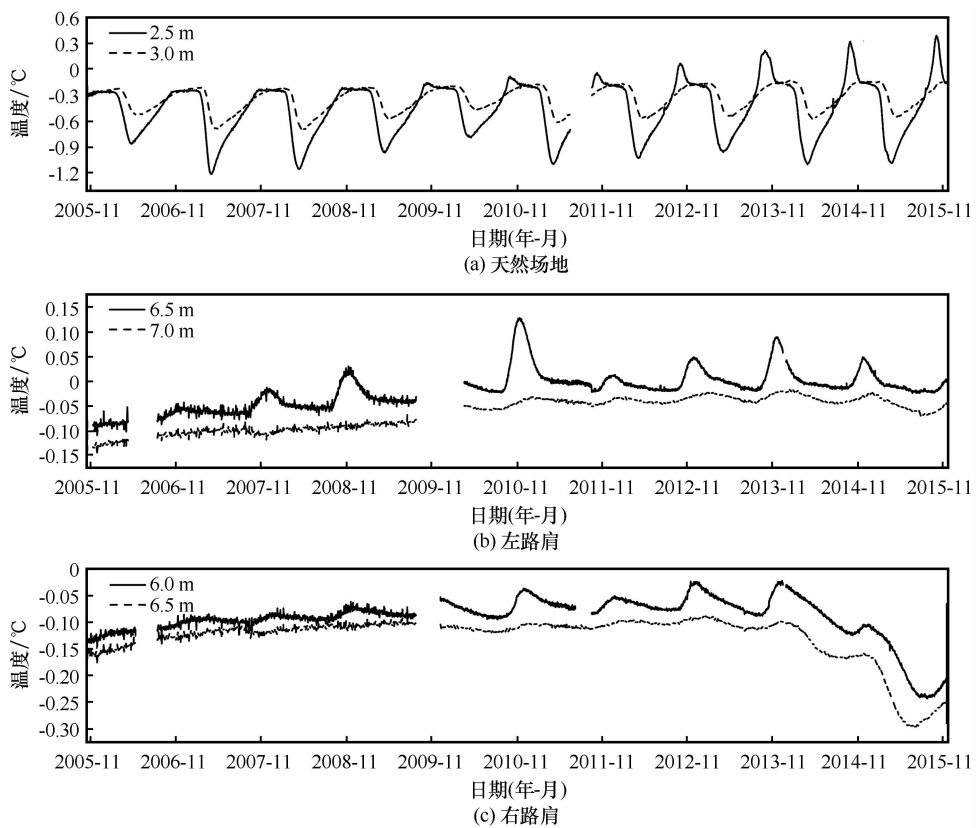


图 6 多年冻土上限附近地温年变化过程

Fig. 6 Variations of the ground temperature nearby permafrost table of original ground (a), left shoulder (b) and right shoulder (c)

进而导致多年冻土区活动层厚度增加^[33-36]。当冷季的回冻深度不能和多年冻土上限衔接时，就会在季节冻结最大深度界面和多年冻土上限之间形成一层隔年或多年不冻的融化土层，即融化夹层^[16-18]。路基下融化夹层又有对称状和不对称状之分，当由于路基的走向而产生“阴阳坡”效应时，路基下的融化夹层就会向阳坡侧偏移，导致融化夹层往往呈不对称状。一旦融化夹层形成以后，在冷季，融化夹层上部地温梯度为正，正常散热，融化夹层下部地温梯度为负，而融化夹层内部的地温梯度存在一个正负梯度过渡的零梯度带，阻滞了融化夹层下部多年冻土热量的散失；在暖季，融化夹层上部、融化夹层、融化夹层下部形成负梯度，从而热量进入路基并使其地温升高。所以融化夹层的存在阻滞冷季冷量的向下传递，而暖季热量又可以不断向下输入，导致多年冻土人为上限下降显著。多年冻土上限的下降导致上限附近产生大量的水分，而融化夹层又具有很强的聚水特性，水又具有很大的比热容，储热能力强，进而导致多年冻土上限的进一步下降，这也是融化夹层厚度不断增厚主要原因之

一。融化夹层作为软弱层，承载能力有限，在车辆荷载及土体自重作用下，当发育融化夹层较厚一侧的路肩产生的沉降变形较大时，则左右路肩有可能产生差异沉降，进而沿线路走向产生纵向裂缝，影响行车安全。本文中所选取的监测断面路基在经过工程补强措施后下伏多年冻土的热稳定性得到提升，表明了“主动冷却”的工程补强措施在增强路基热稳定性方面存在显著作用。但未能有效地消除左路肩下的融化夹层，路基下的融化夹层仍呈不对称状，所以仍需科研工作者提出更加有效的工程措施消除路基下的融化夹层。同时，铁路工务部门人员需加强对该监测断面地温及路基变形的监测，以保证行车安全。

4 结论

通过对青藏铁路沿线 K1496 + 750 监测断面发育有融化夹层路基长达 10 a 的地温监测，分析了在气候转暖及工程活动影响下天然场地及左右路肩下部土体的热状态变化过程，并得到如下结论：

(1) 天然场地下多年冻土在气候转暖的影响

下,多年冻土虽呈衔接状,但季节活动层逐年增厚,多年冻土上限逐年下降,年均下降率为 $0.049 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。多年冻土上限的下降与其附近土体显著的逐年热积累有很大的关系。

(2) 左右路肩下多年冻土在气候转暖及工程活动的影响下,左路肩下发育有融化夹层,多年冻土呈不衔接状,且其融化夹层厚度观测期内呈波动中增厚趋势,融化夹层的增厚主要是由多年冻土人为上限下降所致,而其多年冻土人为上限的下降与其附近土体热积累有关,同时多年冻土上限附近地温的升高也是其附近土体热积累所致;右路肩下多年冻土呈衔接状,未发育有融化夹层,其多年冻土人为上限也呈逐年下降趋势,下降原因与左路肩相同。由于该监测断面路基“阴阳坡”效应显著,导致左路肩下多年冻土人为上限埋藏深度较右路肩深。

(3) 该监测断面于 2010 年 5 月增设块石护坡及 2012 年 11 月增插热管的两种“主动冷却”路基的工程补强措施有效提高了路基的热稳定性。经过工程补强措施后,左路肩下多年冻土人为上限稳定在 6.50 m 左右,而右路肩下多年冻土上限则表现出显著的向上抬升趋势。

参考文献 (References):

- [1] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. Geocryology in China [M]. Beijing: Science Press, 2000. [周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [2] Tsytoich H. The mechanics of frozen ground [M]. Zhang Changqing, Zhu Yuanlin. translation. Beijing: Science Press, 1985. [Tsytoich H. 冻土力学[M]. 张长庆, 朱元林. 译. 北京: 科学出版社, 1985.]
- [3] Andersland O, Ladanyi B. Frozen ground engineering [M]. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc. Hoboken, 2004.
- [4] Ma Wei, Niu Fujun, Mu Yanhu. Basic research on the major permafrost projects in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(11): 1185–1191. [马巍, 牛富俊, 穆彦虎. 青藏高原重大冻土工程的基础研究[J]. 地球科学进展, 2012, 27(11): 1185–1191.]
- [5] Wang Shaoling, Zhao Xiufeng. The permafrost environment changes in the south section of Qinghai-Tibet Highway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, 19(3): 41–49. [王绍令, 赵秀峰. 青藏公路南段岛状冻土区内冻土环境变化[J]. 冰川冻土, 1997, 19(3): 41–49.]
- [6] Wu Qingbai, Zhu Yuanlin, Liu Yongzhi. Evaluation model of permafrost environment change under human engineering activities [J]. Science in China: Series D Earth Science, 2002, 32(2): 141–148. [吴青柏, 朱元林, 刘永智. 人类工程活动下冻土环境变化评价模型[J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 2002, 32(2): 141–148.]
- [7] French H. The periglacial environment [M]. Third edition. Hoboken, New Jersey, America: John Wiley and Sons, 2007.
- [8] Qin Dahe. Assessment of environmental evolution in the western China [M]. Beijing: Science Press, 2002. [秦大河. 中国西部环境演变评估[M]. 北京: 科学出版社, 2002.]
- [9] Wu Qingbai, Niu Fujun. Permafrost changes and engineering stability of Qinghai-Tibet 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.]
- [10] Wu Tonghua, Li Shuxun, Cheng Guodong, et al. Using ground-penetrating radar to detect permafrost degradation in the northern limit of permafrost on the Tibetan Plateau [J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, 41(3): 211–219.
- [11] Everdingen R. Geocryological terminology [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1976, 13(6): 862–867.
- [12] Harris S, French H, Heginbottom J, et al. Glossary of permafrost and related ground-ice terms [M]. Ottawa, Ontario, Canada: National Research Council of Canada, 1988.
- [13] Williams J. Ground water in permafrost regions-an annotated bibliography [M]. Washington: United States Government Printing office, 1965.
- [14] Washburn A. Periglacial processes and environments [M]. New York: St. Martin's Press, 1973.
- [15] Singh V, Singh P, Haritashya U. Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers [M]. Berlin, Germany: Springer Netherlands, 2011.
- [16] Wang Shuangjie, Li Zhulong, Zhang Jinzhao, et al. Highway construction technology on permafrost regions [M]. Beijing: China Communication Press, 2008. [汪双杰, 李祝龙, 章金钊, 等. 多年冻土地区公路修筑技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.]
- [17] Sun Zhizhong, Ma Wei, Liu Yongzhi, et al. Changes of thawed interlayer beneath embankment of the Qinghai-Tibet Highway in permafrost regions and its effect on embankment settlement deformation [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2015, 15(6): 14–18. [孙志忠, 马巍, 刘永智, 等. 青藏公路路基下融化夹层的变化及对路基沉降的影响[J]. 中外公路, 2015, 15(6): 14–18.]
- [18] Wu Qingbai, Liu Yongzhi, Zhu Yuanlin. Thermal state of active layer under asphalt pavement of Qinghai-Tibet Highway [J]. Journal of Xi'an Highway University, 2001, 21(1): 23–25. [吴青柏, 刘永智, 朱元林. 青藏公路沥青路面下活动层的热状态分析[J]. 西安公路交通大学学报, 2001, 21(1): 23–25.]
- [19] Li Shuxun, Wu Ziwang. The change of thaw bulb under asphalt pavement in the region of permafrost on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, 19(1): 23–25. [李述训, 吴紫汪. 青藏高原多年冻土区沥青路面下融化盘形成变化特征[J]. 冰川冻土, 1997, 19(1): 23–25.]
- [20] 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.]
- [21] Jin Huijun, Zhao Lin, Wang Shaoling, et al. Degradation modes and ground temperature of permafrost along Qinghai-Tibet Highway [J]. Science in China: Series D Earth Science, 2006, 36(11): 1009–1019. [金会军, 赵林, 王绍令, 等. 青藏公路沿线冻土的地温特征及退化方式[J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 2006, 36(11): 1009–1019.]
- [22] Wu Jichun, Sheng Yu, Wu Qingbai, et al. Processes and modes of permafrost degradation on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Sci-

- ence in China: Series D Earth Science, 2009 (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(11): 1570 – 1578.]
- [23] Ma Qinguo, Lai Yuanming, Wu Daoyong. Analysis of temperature field of high grade highway embankment in permafrost regions[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(7): 2415 – 2423. [马勤国, 赖远明, 吴道勇. 多年冻土区高等级公路路基温度场研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(7): 2415 – 2423.]
- [24] Wang Xiaojun, Jiang Ke, Wei Yongliang, et al. Numerical simulation analyses of artificial upper table and residual thawed layer for embankment of Qinghai-Tibet Railway in the permafrost region[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2010, 37(5): 50 – 56. [王小军, 姜珂, 魏永梁, 等. 青藏铁路多年冻土区路堤人为上限与融化夹层的数值模拟分析[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(5): 50 – 56.]
- [25] Pan Weidong, Yu Shaoshui, Jia Haifeng, et al. Variation of the ground temperature field in permafrost regions along the Qinghai-Tibetan Railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(6): 774 – 779. [潘卫东, 余绍水, 贾海峰, 等. 青藏铁路沿线多年冻土区地温场变化规律[J]. 冰川冻土, 2002, 24(6): 774 – 779.]
- [26] Cheng Guodong. Construction of Qinghai-Tibet Railway by cooling the railroad[J]. Science and Technology Review, 2005, 23(1): 4 – 8. [程国栋. 用冷却路基的原则修建青藏铁路[J]. 科技导报, 2005, 23(1): 4 – 8.]
- [27] Ma Wei, Cheng Guodong, Wu Qingbai. Thoughts on solving frozen soil Engineering problems in the construction of Qinghai-Tibet Railroad[J]. Science and Technology Review, 2005, 23(1): 23 – 28. [马巍, 程国栋, 吴青柏. 解决青藏铁路建设中冻土工程问题的思路与思考[J]. 科技导报, 2005, 23(1): 23 – 28.]
- [28] Yu Hui, Wu Qingbai, Zhang Jianming. Dynamics assessment of permafrost under ordinary embankment of Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(1): 97 – 99. [于晖, 吴青柏, 张建明. 青藏铁路普通路基下冻土过程动态评价[J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 97 – 99.]
- [29] Sun Zhizhong, Ma Wei, Wen Zhi, et al. Experimental and numerical analyses on traditional embankment of Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of The China Railway Society, 2010, 32(3): 71 – 76. [孙志忠, 马巍, 温智, 等. 青藏铁路多年冻土区普通路基地温监测及其预测分析[J]. 铁道学报, 2010, 32(3): 71 – 76.]
- [30] 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.]
- [31] Xu Xiaozu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin. Physics of frozen soils [M]. Beijing: Science Press, 2010: 39 – 62. [徐敦祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 39 – 62.]
- [32] USSR Academy of Sciences. Siberian Branch. Permafrost Institute. General geocryology [M]. Guo Dongxin, Liu Tielang, Zhang Weixin, et al. translation. Beijing: Science Press, 1988. [苏联科学院西伯利亚分院冻土研究所. 普通冻土学[M]. 郭东信, 刘铁良, 张维信, 等. 译. 北京: 科学出版社, 1988.]
- [33] Cheng Guodong, Wu Tonghua. Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112: F02S03.
- [34] Wu Qingbai, Zhang Tingjun. Changes in active layer thickness over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1995 to 2007[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010, 115: D09107.
- [35] Wu Qingbai, Zhang Tingjun, Liu Yong. Thermal state of the active layer and permafrost along the Qinghai-Xizang (Tibet) Railway from 2006 to 2010[J]. Cryosphere, 2012, 6(3): 2465 – 81.
- [36] 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. [徐小明, 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.]

Thermal state of embankment with thawed interlayer in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Railway

WANG Honglei^{1,2}, SUN Zhizhong¹, LIU Yongzhi¹, WU Guilong¹

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

Abstract: A ground temperature section with thawed interlayer within an embankment along the Qinghai-Tibet Railway had been monitored from 2005 to 2015. Thus the annual variation of thermal state under original state and within embankment, variation of thawed interlayer and its effect on thermal state of permafrost are analyzed in the background of climate warming and engineering activity. The results show that: 1) permafrost table under original state and within embankment and its thermal stability had descended annually; 2) thawed interlayer had existed under left shoulder and its thickness had increased undulately, due to the artificial permafrost table going down; meantime, thawed interlayer had not found under original state and right shoulder; 3) thermal accumulation nearby permafrost table had been remarkable, resulting in decline of permafrost table and increase of temperature nearby permafrost table; moreover, thermal stability of permafrost had been weakened; 4) reinforcement of embankment with active-cooling had successfully improved thermal stability of the embankment; artificial permafrost table had lifted upwards within right shoulder after reinforcement of embankment and its thermal stability had enhanced; whereas, left shoulder had only maintained original thermal stability by the same engineering operation due to the existence of thawed interlayer, then the efficiency of active-cooling had performed poorly under left shoulder to a certain extent.

Key words: Qinghai-Tibet Railway; thermal state; thawed interlayer; permafrost

(本文编辑: 庞瑜, 周成林)