

高原冻土区公路路基病害及工程对策

汪双杰, 金龙, 穆柯, 朱东鹏, 陈冬根, 董元宏

(中交第一公路勘察设计研究院有限公司 国家高寒高海拔地区道路工程安全与健康国家重点实验室, 西安 710075)

摘要: 本文分析了青藏公路 60 多年来的历次改建及病害资料, 以道路病害率为依据将青藏公路分为稳定区、基本稳定区、不稳定区和极不稳定区; 选取了 134 km 典型病害路段, 分析年平均地温、冻土上限退化速率、含冰量与道路病害关系, 确定各因素影响下道路的平均使用年限; 研究热棒、片块石、保温板、通风管路基处治效果, 以及各处治措施实施后引发的新工程病害, 分析新生病害的时间效应, 并介绍了弥散式通风路基、单向导热板路基和路基路面一体化散热结构等适用于大尺度冻土路基的新型稳定技术。研究结果表明: 年平均地温、冻土上限退化速率、含冰量等因素与道路使用寿命均为负相关关系, 在各类处治措施中, 热棒、片块石、保温板、通风管加片块石对病害预防的有效率较高。

关键词: 多年冻土; 时间尺度效应; 路基病害; 现场调查; 大尺度路基; 稳定技术

中图分类号: U416.11 **文献标识码:** A

Distresses and Countermeasures of Highway Subgrade in Plateau Permafrost Regions

Wang Shuangjie, Jin Long, Mu Ke, Zhu Dongpeng, Chen Donggen, Dong Yuanhong

(State Key Laboratory of Road Engineering Safety and Health in Cold and High-Altitude Regions, CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: This study collects the maintenance history, reconstruction material, and disease data of the Qinghai-Tibet Highway (QTH) over the past 60 years. The QTH is then divided into a stable region, a basically stable region, an unstable region, and a highly unstable region according to the road disease rate. Subsequently, 134 km typical disease sections are selected, and the relations between the road diseases and the mean annual ground temperature (MAGT), permafrost degradation rate, and ice content are studied based on the survey data. The average road service life is also determined. Newly developed diseases and their temporal effect are analyzed using the treatment measure. Furthermore, new stabilizing technologies adaptive to large-scale permafrost subgrade (e.g., distributed ventilation subgrade, unidirectional heat conduction board subgrade, and integrated pavement-subgrade heat drainage structure) are introduced. The results show that the MAGT, degradation rate of permafrost tables, and ice content are negatively related to the road service life. In all kinds of treatment measures, thermosyphon, crushed-rock, insulation board, and ventilation duct plus flag and block stone have a higher effective rate in heat prevention compared to other measures.

Keywords: permafrost; temporal effect; subgrade distress; field investigation; large-scale subgrade; stabilizing technology

收稿日期: 2017-11-16; 修回日期: 2017-12-18

通讯作者: 汪双杰, 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 教授级高级工程师, 主要研究方向为寒区道路工程;

E-mail: 158479508@qq.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“进藏高速公路与铁路沿线工程地质灾害环境及减灾研究”(2017-XZ-12); 国家科技支撑计划项目(2014BAG05B01、2014BAG05B03)

本刊网址: www.enginsci.cn

一、前言

青藏公路是中国西部地区重要的物资运输通道,由北至南穿过气候严寒、生态环境恶劣、地质条件复杂的多年冻土区,根据国家交通运输部的数据,多年冻土连续分布区为528.5 km,公路沿线海拔为4000~5231 m;年平均气温为-7~-2℃;年平均太阳总辐射量超过8000 MJ/m²,约为内地辐射量的5倍;每年冻结期达7~8个月。在该地区修筑沥青路面后,受路面吸热影响,路基下多年冻土不断退化为高含水量季节冻土,往复的冻融效应严重削弱了路基的强度。在一定时间内,造成诸如冻胀、翻浆、沉陷等病害,危害道路的行车安全。

对于多年冻土区道路的病害问题,现有研究成果主要集中在病害产生机理、影响因素、冻土本构模型等方面[1~6],部分研究从调节路基高度、主动制冷、被动阻热等角度出发提出了相应的处治措施[7~13]。一些研究确定了多年冻土道路病害的主要影响因素[14~17],并提出了相应的处治措施,其成果大都被青藏公路实体工程所采纳。但对于病害的产生时间、多因素影响下路基平均使用寿命等问题研究较少。多年冻土区的道路病害具有显著的时间效应,即在不同年平均地温、含冰量、冻土上限退化速率等情况下,道路病害的发生、恶化具有一定的周期性,其使用年限与上述几种因素密切相关。笔者从冻土路基病害的时间效应出发,基于青藏公路沿线的长期监测数据,确定年平均地温、

冻土上限退化速率、含冰量对道路使用年限的影响,并对各类特殊路基的病害现状进行现场调查,评价各类特殊路基的适用条件及处治效果。

二、基础数据

以年平均地温、冻土上限退化速率、含冰量等作为参考依据,划分调查路段,其中年平均地温决定多年冻土是否融化以及其对外界气温变化的敏感程度,上限退化速率变化是路基稳定性及其相关路面次生病害发生的重要诱因,路基下伏冻土含冰量的大小,往往决定着上限退化后道路病害的严重程度,年平均地温及上限退化速率与稳定性分区的关系如表1所示,不同冻土含冰量及不同使用年限路段在不同分区的占有率如表2所示。

在表2中将道路从建设完成到下次维修之间的时间定义为病害时间周期(即使用年限),将病害时间周期统一区划为<10年,15年,20年,30年,>40年五类,根据道路养护、维修时间数据,统计各时间段内道路的病害发生率。

三、冻土路基病害发展的影响因素分析

(一) 年平均地温

为了研究冻土地温对路基病害发育过程的影响,沿青藏公路G109线,选取20 km年平均地温为-3~-0.5℃的路段,依据年度病害发展情况,将其分为稳定区、基本稳定区、不稳定区、极不稳定

表1 年平均地温及上限退化速率与稳定性分区的关系

分区	年平均地温 /℃	上限退化速率 /(cm/a)
稳定区	<-3.0	<10
基本稳定区	-3.0~-1.5	10~15
不稳定区	-1.5~-0.5	15~20
极不稳定区	-0.5~0	20~30

表2 不同冻土含冰量及不同使用年限路段在不同分区的占有率

分区	冻土含冰量			使用年限					%
	为0~20%	为20%~60%	>60%	<10年	为15年	为20年	为30年	>40年	
稳定区占有率	49	42	9	0	20	0	0	80	
基本稳定区占有率	34	50	16	15	0	10	40	35	
不稳定区占有率	25	32	43	35	65	0	0	0	
极不稳定区占有率	16	38	46	80	20	0	0	0	

区四大类，如图1和图2所示，其中最大概率使用年限指统计样本中大多数路段的病害时间周期；平均使用年限反映病害发生的平均周期。

由图1、表1、表2可知，随着年平均地温的升高，最大概率路基使用年限呈不断递减趋势，在年平均地温低于-3.0℃的稳定区，80%路段的使用年限已超过40年；当年平均地温提升至-3.0~-1.5℃时，同样使用寿命的路段比率降至35%，大部分调查路段使用寿命缩短10年以上；年平均地温继续提升至-1.5~-0.5℃时，65%的路基在15年内发生病害，剩余35%路基使用寿命不超过10年；年平均地温提升至-0.5~0℃，80%路基使用寿命不超过10年。图2所提出的平均使用年限可由下式计算得出：

$$T = \sum_{i=1}^n \rho \cdot T_i \quad (1)$$

式(1)中， T 为平均使用年限； n 为时间段个数，笔

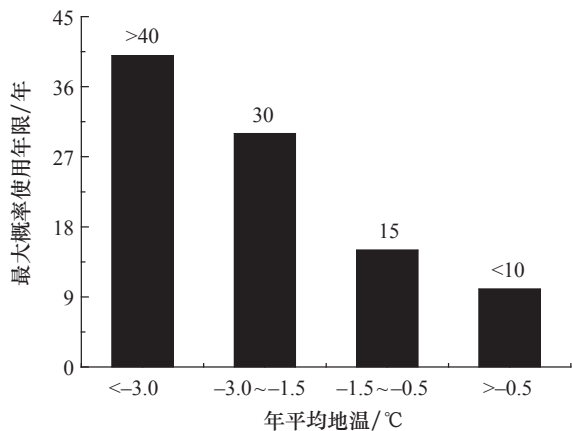


图1 年平均地温与最大概率使用年限关系

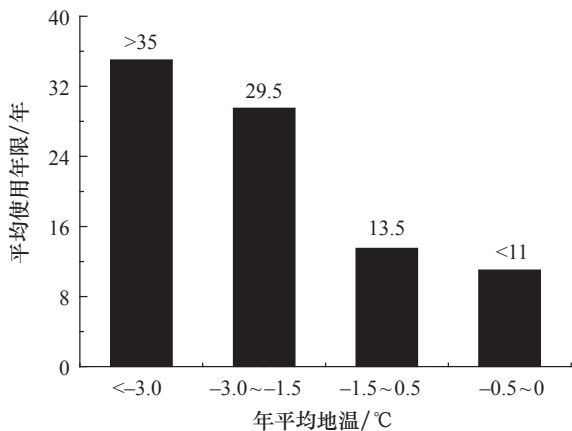


图2 年平均地温与平均使用年限关系

者划分为5个时间段(<10年, 15年, 20年, 30年, >40年); T_i 为每个路段的时间年限; ρ 为每个时间段内路基长度占总调查长度的比率(可直接采用表2中不同冻土稳定分区内,各寿命使用年限对应的路段占有率代替),本次总调查路段为20 km。经计算,年平均地温每提升0.5℃,道路平均使用寿命降低4年以上;从使用年限降低幅值上分析,年平均地温在-1.5℃左右变化时,对路基时间尺度效应影响最为显著。

(二) 上限退化速率

为分析加铺沥青路面对冻土退化速率的影响,并确定退化速率对路基病害发育过程的影响,沿G109线选取69 km典型路段进行调查。首先,确定年平均地温与冻土上限退化速率的关系,如图3所示,之后从概率角度分析上限退化对路基病害发生时间的影响。

由图3可知,年平均地温与冻土上限退化速率呈正相关关系,在年平均地温低于-3℃工况下,多年冻土上限退化速率小于10 cm/a(见表1),之后随着地温的抬升,上限退化速率逐渐加速,但其退化加速趋势呈现先缓后急的趋势,在-3℃至-1.5℃区间内,地温每抬升0.5℃,退化速率仅提高约1.67 cm/a;在-1.5℃至0℃区间内,地温每抬升0.5℃,退化速率迅速加快,提升至5 cm/a;地温与冻土上限退化速率的关系表明,-1.5℃附近是冻土高低温转化的关键节点,当冻土年平均地温高于该值时,上限退化速率将呈不断加速趋势。

(三) 含冰量

在稳定区,含土冰层路段比率仅占9%,而在

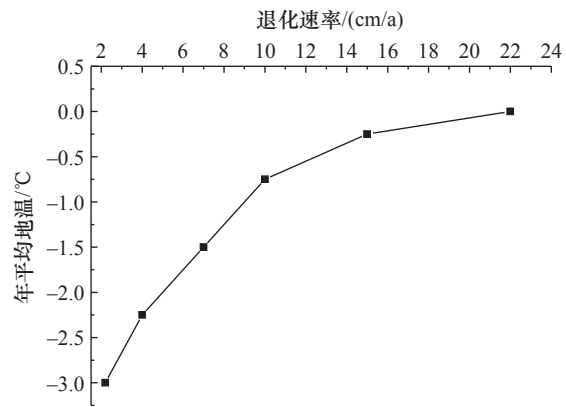


图3 年平均地温与冻土上限退化速率的关系

极不稳定区这一比例上升至46%，如图4所示。高含冰量路段比率越高，道路平均使用寿命越短，尤其在高温、高退化速率冻土区，含土冰层路基大都在路面铺筑2~3年内病害显著，5~10年后便因病害严重而急需整治。

(四) 特殊处治措施

为防治冻土路基病害，提高路基稳定性，在2003年青藏公路的整治改建工程中，在部分病害路段设置了特殊结构措施，主要包括热棒、XPS（挤塑聚苯乙烯泡沫塑料）板、片块石、通风管等，在

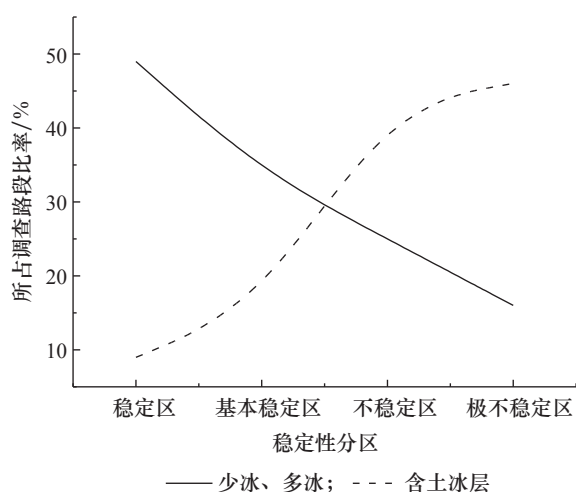


图4 含冰量与道路稳定性分级关系

部分地质条件恶劣的路段采用两种措施。该特殊结构于2003年建设完成，迄今已有13年的地温、变形、病害监测数据，为分析特殊结构对冻土路基病害的影响，收集了这些路段的地温、变形、病害监测数据，分析如表3、表4、图5所示。

由图5可知，在冻土地质条件恶劣的路段，如未采取特殊措施，约80%的路段在2~4年内会产生严重的路基病害，且重建后路基仍不稳定；在热棒、片块石、XPS板、通风管路基等处治措施下，道路病害的有效预防率为60%~80%，且大部分病害将在路建成后2~5年内集中出现，之后病害发生率逐步稳定，说明特殊处治措施路段需要进行二次整治，且整治后路基工作状态逐渐稳定。

1. 热棒路基病害发育过程

在所调查的10处热棒路基样本中，仅有1处地温监测数据显示，热棒未能起到良好的降温效果，该种措施在青藏公路沿线降温、阻热有效率为90%。在热棒正常工作路段，70%的路段病害得到有效缓解，尤其在高路基工况下，热棒效果更为明显，使用时间达到13年；30%的路段在2~4年内表现出严重的纵裂、沉陷等病害，严重影响道路的通行能力。采用热棒处治后的最大问题是部分路段纵裂严重，这些纵裂往往贯通整个处治路段，并且

表3 青藏公路沿线特殊措施路段病害时间效应研究

特殊措施	监测年限/年	降温、隔热有效率/%	预防路基病害有效率/%
热棒	13	95	70
片块石	13	55	80
XPS板	13	90	60
通风管	13	90	70
通风管+片块石	13	75	80

注：降温、隔热有效率指采用特殊处治措施后降温效果显著路段与样本总路段的比值；预防路基病害有效率指采用特殊处治措施后未出现影响道路通行能力的路段与样本总路段的比值。

表4 青藏公路特殊措施路段病害率与路基修筑时间关系

特殊措施	不同修筑时间下路基的病害率			
	2年	4年	6年	8年
热棒	5	30	—	—
片块石	5	10	13	20
XPS板	3	15	25	40
通风管	3	16	25	30
通风管+片块石	3	8	12	20

均在距离热棒 2~3 m 处。

2. 片块石路基病害发育过程

在所调查的片块石路基样本中，仅有 55% 的片块石路基起到了明显的降温效果，与热棒相比，片块石在降温效果上存在不足，但在与对比断面的分析中，80% 的片块石路基起到了缓解病害的作用；剩余的 20% 中，10% 的片块石路基从第 4 年开始出现路面病害，10% 的路基直到第 8 年才出现路面病害。

3. XPS 保温板路基病害发育过程

在所调查的保温板路基样本中，90% 的保温板路基均起到阻止路面吸收热量向冻土路基传递的效果，但所有处治措施中仅 60% 的路段起到了预防病害发生的效果。在保温板路基修筑初期，道路病害发生率较小，仅为 3%~15%，从第 4 年开始，病害发生率迅速提高，第 8 年达到 40% 左右，其中多以沉陷和坑槽为主。保温板作为一种被动阻热措施，可延缓冻土融化造成道路病害的时间，但不能从根本上消除病害，如图 6 所示。

4. 通风管路基病害发育过程

在所调查的通风管路基样本中，90% 的通风管路基可以通过通风效应，引入外界冷风来降低路基温度，尤其是对部分采用了温控开关的试验路段，通风管风门可在暖季关闭，冷季打开，大大提高了降温效能，70% 的通风管路基可有效预防道路病害。且当通风管与片块石联合使用时，可将病害处治有效率提高至 80%。同时应注意，受路面沉陷及风沙

堆积的影响，部分通风管可能会出现堵塞，影响结构的降温效果，如图 7 所示。

四、新型稳定技术的研发

(一) 弥散式通风路基

弥散式通风管路基是利用智能控制模块控制风机，冷季风机启动通过强制对流，迫使冷空气沿管道流动；暖季风机关闭，增大路基热阻，避免热量下传，从而保护多年冻土，如图 8 所示。

(二) 单向导热板路基

单向导热板路基是一种保温板与小型热棒复合的处治措施，一方面利用保温板优良的隔热性能，暖季保障黑色路面吸收热量后不被传导至多年冻土层，保护冻土上限不退化；另一方面，利用热棒的单向导热性能，冷季将外界冷风导入路基，降低路基温度，维持上限不退化。单向导热板设计方案及原理如图 9、图 10 所示。

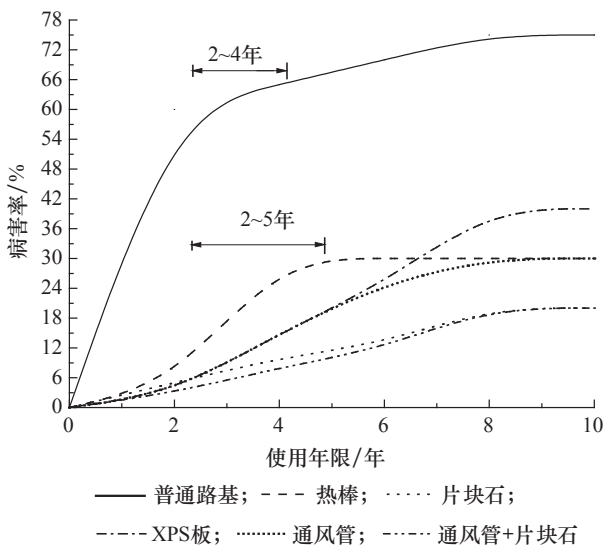


图 5 不同处治措施路基使用年限分析



图 6 保温板路基局部坑槽



图 7 通风管路基总体情况

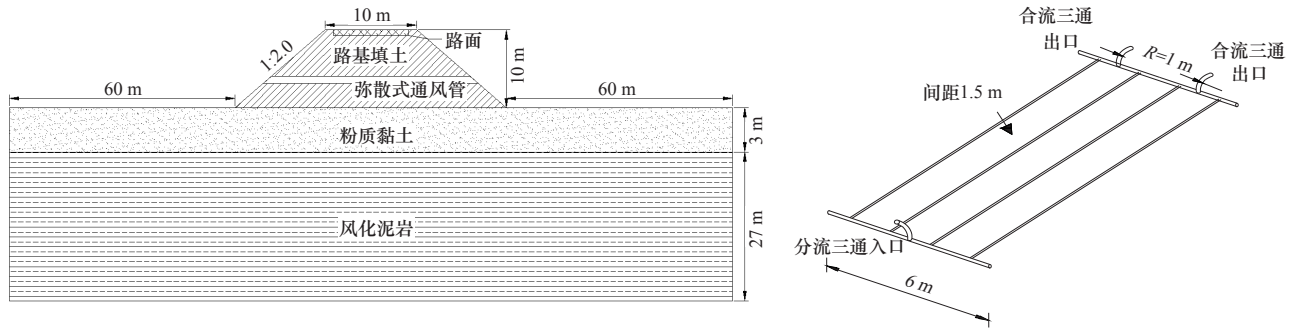


图8 弥散式通风管路基结构示意图

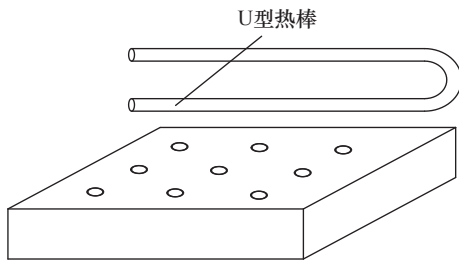


图9 单向导热板设计示意图

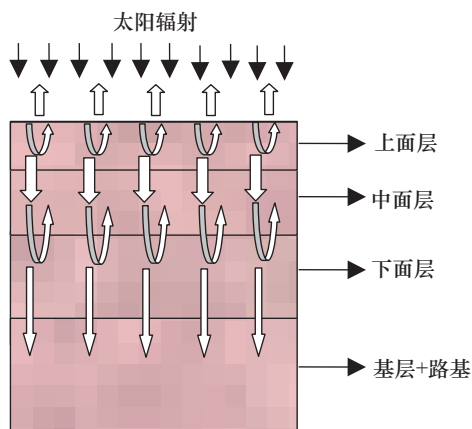


图10 高取向热诱导结构设计原理图

(三) 路基路面一体化散热结构

通过设置梯度导热结构来调控路面内的热量传输,设计原理如图10所示,改变上面层的热导率,尽可能地阻止热量进入路面内部;在中下面层设置上大下小的低导热梯度结构,抑制热量在中下面层的传导,减少结构层内的积热。

五、结语

(1) 多年冻土区道路病害与年平均地温、冻土上限退化速率、含冰量等因素密切相关。传统研究

仅从病害发生机理、影响因素角度出发制定病害处治措施,而缺乏长期时间尺度上的综合评价,使研究者对现有处治措施效果的预期普遍过于乐观。

(2) 年平均地温从 -3°C 提升至 -0.5°C ,道路病害从出现至严重影响道路通行能力的时间周期从40年缩短至不足10年;冻土上限退化速率超过 20 cm/a 的路基基本在10年内需要重新维护;在年均地温较高、冻土上限退化速率较快的路段,高含冰量路基往往在工程结束2~3年后病害显著,5~10年内便急需整治或改建。

(3) 热棒、片块石、保温板、通风管等路基调控措施的降温有效率分别为:95%、55%、90%、90%,其中热棒降温效果最好,保温板与通风管次之,片块石路基最差。但由于片块石路基除能依靠通风、对流调控路基温度外,其自身强度较高,透水性好,能极大的增强路基的稳定性,预防道路病害的能力反而高达80%,尤其是在片块石与通风管路基复合使用的情况下效果更佳。

参考文献

- [1] Jin L, Wang S J, Chen J B, et al. Study on the height effect of highway embankments in permafrost regions [J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 83-84(7): 122-130.
- [2] 汪双杰, 霍明, 周文锦. 青藏公路多年冻土路基病害 [J]. 公路, 2004(5): 22-26.
Wang S J, Huo M, Zhou W J, et al. Subgrade failure of Qinghai-Tibet highway in permafrost area [J]. Highway, 2004(5): 22-26.
- [3] Peng H, Ma W, Mu Y H, et al. Degradation characteristics of permafrost under the effect of climate warming and engineering disturbance along the Qinghai-Tibet highway [J]. Natural Hazards, 2015, 75(3): 2589-2605.
- [4] Cheng G. A roadbed cooling approach for the construction of Qinghai-Tibet railway [J]. Cold Regions Science and Technology, 2005(42): 169-176.
- [5] Cheng G, Wu T. Responses of permafrost to climate change and

- their environmental significance, Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(F2): 93–104.
- [6] Bray M T. Secondary creep approximations of ice-rich soils and ice using transient relaxation tests [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, 88(2): 17–36.
- [7] Collis P M, Morgenstern N R. Influence of ground ice variability on settlement in thawing permafrost [J]. *Arquivos Brasileiros De Cardiologia*, 2010, 81(4): 349–354.
- [8] Luetsch M, Lehning M, Haeberli W. A sensitivity study of factors influencing warm/thin permafrost in the Swiss Alps [J]. *Journal of Glaciology*, 2008, 54(187): 696–704.
- [9] Wen Z, Sheng Y, Ma W, et al. Evaluation of EPS application to embankment of Qinghai–Tibetan railway [J]. *Cold Regions Science & Technology*, 2005, 41(3): 235–247.
- [10] Wen Z, Sheng Y, Ma W, et al. Analysis on effect of permafrost protection by two-phase closed thermosyphon and insulation jointly in permafrost regions [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2005, 43(3): 150–163.
- [11] Wu D, Jin L, Peng J, et al. The thermal budget evaluation of the two-phase closed thermosyphon embankment of the Qinghai–Tibet highway in permafrost regions [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 10(3): 115–122.
- [12] 汪双杰, 陈建兵, 黄晓明. 热棒路基降温效应的数值模拟 [J]. *交通运输工程学报*, 2005(3): 41–46.
Wang S J, Chen J B, Huang X M. Numerical simulation of cooling effect for heat pipe subgrade [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2005(3): 41–46.
- [13] Dong Y H, Lai Y M, Zhang M Y, et al. Laboratory test on the combined cooling effect of L-shaped thermosyphons and thermal insulation on high-grade roadway construction in permafrost regions [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2009, 1(4): 307–315.
- [14] Dong Y, Lai Y, Li J, et al. Laboratory investigation on the cooling effect of crushed-rock interlayer embankment with ventilated ducts in permafrost regions [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 61(2): 136–142.
- [15] Lai Y, Ma W, Zhang M, et al. Experimental investigation on influence of boundary conditions on cooling effect and mechanism of crushed-rock layers [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2006, 45(2): 114–121.
- [16] 汪双杰, 孙斌祥, 徐学祖, 等. 路堤块石自然对流机理的室内模拟试验研究 [J]. *中国公路学报*, 2004, 17(2): 19–24.
Wang S J, Sun B X, Xu X Z, et al. Research on laboratory experiment of natural convection mechanism of embankment ballast [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2004, 17(2): 19–24.
- [17] 汪双杰, 刘戈, 叶莉, 等. 多年冻土区宽幅路基热效应防治对策研究 [J]. *中国公路学报*, 2015, 28(12): 26–32.
Wang S J, Liu G, Ye L, et al. Research on control countermeasures of thermal effect of wide embankment in permafrost regions [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(12): 26–32.