

# 既有东北铁路多年冻土区路基病害整治效果研究

马立峰<sup>1</sup>, 刘建坤<sup>1</sup>, 李庆武<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学土木工程学院, 北京 100044; 2. 哈尔滨铁路局齐齐哈尔科学技术研究所, 黑龙江 齐齐哈尔 161002)

**摘 要:** 既有东北铁路牙林线、嫩林线多年冻土区路基病害严重, 借鉴青藏铁路建设的成功经验, 利用热棒、保温板及保温护道等综合防治措施进行了路基病害整治。针对牙林线北段试验工程, 利用观测断面实测地温资料对试验段综合防治措施效果进行分析。分析表明: 防治措施效果明显, 有效控制了路基下伏多年冻土地温, 冻土上限明显抬升, 对保证铁路正常运营发挥了积极作用。

**关键词:** 多年冻土; 路基病害; 防治措施; 热棒; 保温板

**中图分类号:** TU445 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2009)03-0475-05

**作者简介:** 马立峰(1982-), 男, 宁夏回族自治区人, 博士研究生。E-mail: 06115248@bjtu.edu.cn。

## Measures for roadbed problems of railways in permafrost regions of Northeast China

MA Li-feng<sup>1</sup>, LIU Jian-kun<sup>1</sup>, LI Qing-wu<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Qiqihaer Science and Technology Research Institute, Qiqihaer 161002, China)

**Abstract:** The roadbed problems of railways are very serious in the permafrost regions of Northeast China. Manifold measures are applied in the experimental project to solve the roadbed problems based on the successful experience of Qinghai-Tibet Railway. There are two sections (274K500 m~275K000 m, 275K460~276K000 m) in the experimental project in the north region of Yaling Railway. Some active measures such as insulated materials (XPS, EPS) and two-phase closed thermosyphons are applied in these two sections. The ground temperature data of long-term monitoring of the experimental project indicate that the measures can effectively reduce the ground temperature of the permafrost under the roadbed and the thickness of the active layer. And the analytic results indicate that the measures are helpful to the stability of railways.

**Key words:** permafrost; roadbed problem; measure; thermosyphon; insulated material

## 0 前 言

在多年冻土地区进行道路工程建设, 改变了原天然地表与大气之间的热量平衡条件, 打破了原多年冻土的水热平衡状态, 使路基下天然季节融化层的深度发生变化并引发各种不良冻土现象, 影响了道路的正常运营。大量工程实践表明, 多年冻土区路基病害主要是由于路基下多年冻土发生热融下沉、冻胀及不均匀冻胀引起的。

根据 1994 年和 1996 年俄罗斯分别对贝阿铁路和后贝加尔铁路冻害调查、1999 年我国青藏公路冻害调查和近期的东北铁路调查统计, 道路的病害率为 30%~40%。东北多年冻土区铁路为十九世纪五十年代建成, 经历了五十年的运营以及沿线城镇建设, 铁路沿线多年冻土生存环境发生了巨大的变化, 使多年冻土产生较明显的退化, 以致多年冻土区的路基病害持续发生。研究表明<sup>[1-3]</sup>, 热棒在季节冻结期能够积极有效

的降低土体温度、增加土体冷量存贮; 保温板的隔热作用在季节融化期能够有效阻止路基土体吸热; 保温护道的作用是加强对路基边坡、坡脚处冻土的保护厚度, 减少气温对多年冻土的影响程度和范围, 同时也起到防止路基坡脚积存水体和渗入的作用。这 3 种措施在青藏铁路建设中得到了成功运用, 为保证既有东北铁路牙林线和嫩林线的正常运营, 借鉴青藏铁路修筑的成功经验, 采用热棒、保温板以及保温护道等综合防治措施对沿线多年冻土区路基病害进行了整治。

本文针对牙林线北段试验工程, 利用 3 a 观测资料, 分析了综合防治措施的效果。

**基金项目:** 教育部新世纪优秀人才计划项目 (NCET-05-0092); 国家自然科学基金项目 (50678020); 铁道部科技研究开发计划项目 (2003G033)

**收稿日期:** 2008-02-22

表1 牙林线北段试验工程防治措施布置表

Table 1 Measures for experimental project in north section of Yaling Railway

试验段	措施							
	XPS保温板	热棒	保温护道	EPS保温板	SPRE档水板	排水沟式渗沟	挡水埝	人工梯形土沟
274K500~275K000	道床下 全长	双侧 全长	双侧 全长	双侧 全长	双侧 全长	右侧 全长	右侧 全长	右侧 全长
275K460~276K000	道床下 全长	双侧 全长	双侧 全长	双侧 全长	双侧 全长	右侧 全长	右侧 全长	右侧 全长

## 1 研究场地概述

### 1.1 研究场地介绍

东北大小兴安岭地区的多年冻土区,地处欧亚大陆的多年冻土区的南缘地带,面积约39万km<sup>2</sup>,介于北纬46°30′与53°30′之间,海拔约几百米至1000 m上下,属于我国最寒冷的寒温带和中温带的北部,降水量从沿海向内陆减小。牙林线北段试验工程含274K500 m~275K000 m, 275K460~276K000 m两个路基试验段,位于潮查至潮中间,东经121°30′,北纬50°30′~51°00′。该段大兴安岭海拔小于1000 m,相对高差约150 m,地形坡度小于30°,属低山丘陵区。植被发育,次生林较茂密。局部山顶基岩裸露,风化严重,山坡残积物复盖较薄。第四系沟谷发育,谷宽1000 m左右,谷内生长塔头草。根据钻探勘察揭露,该处地层土体主要为第四纪泥炭、粉质黏土、角砾土、砾砂土、圆砾土、碎石土、花岗岩等,既有路堤为人工填筑角砾土。该区发育大片连续多年冻土,多年冻土年平均地温 $T_{CP}$ 约为-0.49~-0.62℃(12 m深),基本属高温极不稳定的多年冻土亚区。

牙林线北段试验工程综合运用了热棒、保温板、土质保温护道、挡水板及挡水埝等措施(如图1和表1)。其中,热棒选用 $\phi 108$ 型号,全长13 m,蒸发段长度为4.3 m,安设于路基两侧各4 m的路肩处,以75°向外倾斜插入路基内部,埋深设计均为9 m,分布间距3~3.5 m;EPS保温板则平铺在保温护道的中部0.5 m处,上下不设垫层;XPS保温板铺设于道床下,保温板上下均需铺设10 cm的垫层。防治措施工程与2004年年底完工。

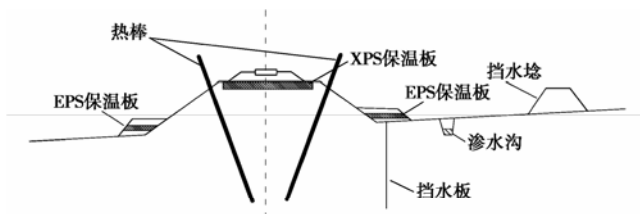


图1 牙林线北段试验工程防治措施示意图

Fig. 1 Measures of experimental project in north section of Yaling Railway

### 1.2 观测断面布设

274K500 m~275K000 m, 275K460 m~276K000 m两个路基试验段各设置两个观测断面,分别为274K580、274K740、275K760和275K900;两路基试验段共用一个对比断面,布设在275K400 m处。各观测断面布置9个地温观测孔,右侧5个、左侧4个,从右至左各孔编号分别为DK1~DK9,孔深5~13 m不等;对比断面两侧各布设两个地温观测孔,从右至左各孔编号分别为DBK1~DBK4,孔深6~8 m;274K740及275K900两个断面分别增加布设了天然地温观测孔,274K740断面天然孔布设在左侧25 m处,孔深11.5 m,275K900断面天然孔布设在右侧25 m处的土沟外,孔深12 m。观测断面各地温孔具体布设位置如表2所示。另外,分别在路基试验段274K740及275K900两个观测断面处距离热棒0.1, 0.5, 1.0, 1.75 m的间距沿路肩纵向设置了4个热棒测温孔,各孔编号依次为RK1~RK4,孔深9~10 m。温度监测采用热敏电阻探头(室内标定精度达0.02℃),测线探头间距为0.5 m,测线由钢管套保护,钢管底端及顶端密封,利用北京理工大学新开发的便携式铂电阻自动采集显示仪进行数据采集,每月观测3次。

表2 各观测断面地温孔布设表

Table 2 Distribution of thermometer holes

断面 里程	地温孔距路基中心线距离/m	
	左侧	右侧
274K580	3.6, 5.5, 9.0, 15.0	3.5, 4.5, 7.0, 11.1, 12.7
274K740	3.7, 5.5, 8.5, 16.0	3.5, 4.5, 7.5, 11.4, 13.2
275K760	3.5, 5.0, 7.0, 10.0	3.5, 5.0, 7.0, 9.0, 12.7
275K900	3.5, 5.0, 8.0, 11.0	3.5, 5.0, 8.0, 11.0, 13.2
275K400	3.5, 8.0	3.5, 7.0

## 2 观测数据分析

本文分析的实测资料期限为2004年9月~2007年3月。

### 2.1 路基下多年冻土上限变化分析

图2为牙林线北段试验工程各观测断面距路基中心不同距离地温观测孔2006年最大融化深度分布图,

由图2可以得出:路基下多年冻土上限较天然状态下多年冻土上限明显抬升,路基中心抬升幅度最大,最大抬升幅度超过2 m,路基中心向两侧方向冻土上限逐渐降低。说明通过防治措施的治理,路基下多年冻土地温得到有效控制,冻土上限抬升明显,有利于路基的稳定。

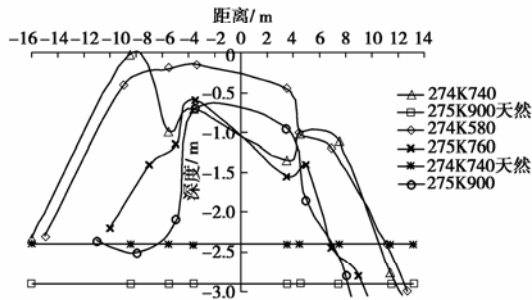


图2 距各断面路基中心不同距离冻土上限变化分布图

Fig. 2 The permafrost table regime of monitoring sections

### 2.2 路肩及护道下多年冻土地温变化分析

图3, 4分别为274K740断面左(DK6)、右(DK5)路肩孔不同深度地温随时间变化分布图; 图5为275K400对比断面左路肩孔不同深度地温随时间变化分布图。

274K740 左路肩路基高度为 2.5 m, 右路肩路基高度为 1.9 m。如图 3 所示: 距路基表面 4~8 m 深度范围内土体在全年均处于冻结状态, 且 2006 年整体地温较 2005 年有所下降, 2005 年距路基表面 4~8 m 范围内土体平均温度为 $-2.19^{\circ}\text{C}$ , 而 2006 年其平均温度为 $-4.39^{\circ}\text{C}$ ; 根据 3.5 m 深度处地温变化曲线可以明显的看出, 2005 年该深度处土体在融化季节处于融化状态, 而在 2006 年该深度处土体处于冻结状态, 说明左路肩下多年冻土整体地温逐年降低而人为上限逐年抬升。如图 4 所示: 2005, 2006 年距路基表面 3.5~8 m 深度范围内土体全年均处于冻结状态, 且 2006 年整体地温较 2005 年有所下降, 2005 年距路基表面 3.5~8 m 范围内土体平均温度为 $-2.27^{\circ}\text{C}$ , 而 2006 年其平均温度为 $-4.10^{\circ}\text{C}$ ; 根据 3.5 m 深度处地温变化曲线可以看出, 2004 年该深度处土体在融化季节处于融化状态, 而在 2005, 2006 年该深度处土体处于冻结状态, 且 2006 年地温较 2005 年更低, 说明右路肩下多年冻土整体地温逐年降低而人为上限逐年抬升。如图 5 所示: 275K400 对比断面左路肩处下伏土体地温变化趋势基本稳定, 距路基表面 3~6 m 范围内土体全年均处于融化状态, 距路基表面 2.5 m 深度处土体在季节融化期处于融化状态而在季节冻结期处于冻结状态, 这样的地温状况严重的影响了路基的稳定性。对比图 3, 4 和图 5 得出: 274K740 观测断面左、右路肩下土体地

温状况较 275K400 断面左路肩下土体地温发生了根本性的变化, 使得一定深度以下土体在全年均处于冻结状态, 其地温状况的改变充分说明了各种防治措施的主动降温效果, 并且呈现整体地温逐年下降、人为上限逐年抬升的趋势。

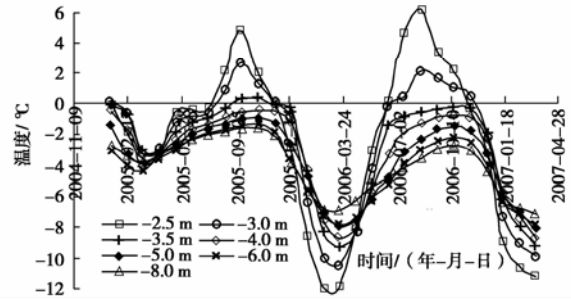


图3 DK6 测温孔不同深度地温随时间变化分布图

Fig. 3 Ground temperature regime of DK6

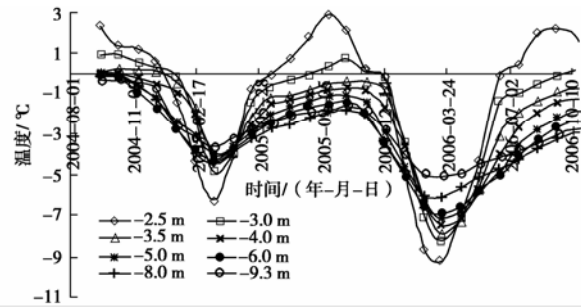


图4 DK5 测温孔不同深度地温随时间变化分布图

Fig. 4 Ground temperature regime of DK5

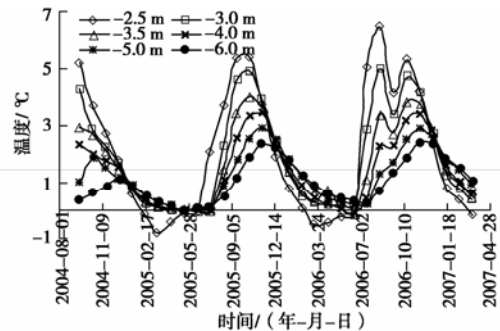


图5 DBK3 测温孔不同深度地温随时间变化分布图

Fig. 5 Ground temperature regime of DBK3

为了更好的对比观测断面与对比断面路基下土体的地温差异, 绘制 274K740 断面左路肩孔 DK6、右路肩孔 DK5 以及 275K400 断面左路肩孔 DBK3 在路基表面下 4.0 m 和 5.0 m 深度处地温随时间变化分布图 (图 6)。

如图 6 所示: DK5 在 4.0 m 深度处 2005, 2006 年的平均地温分别为 $-1.75^{\circ}\text{C}$ ,  $-3.79^{\circ}\text{C}$ , 在 5.0 m 深度处 2005, 2006 年的平均地温分别为 $-2.13^{\circ}\text{C}$ ,  $-4.31^{\circ}\text{C}$ ; DK6 在 4.0 m 深度处 2005, 2006 年的平均地温分别为 $-1.43^{\circ}\text{C}$ ,  $-3.79^{\circ}\text{C}$ , 在 5.0 m 深度处 2005, 2006 年的

平均地温分别为 $-2.09^{\circ}\text{C}$ 、 $-4.31^{\circ}\text{C}$ ；DBK3在4.0 m深度处2005, 2006年的平均地温分别为 $1.18^{\circ}\text{C}$ 、 $1.45^{\circ}\text{C}$ ，而在5.0 m深度处2005, 2006年的平均地温分别为 $1.05^{\circ}\text{C}$ 、 $1.32^{\circ}\text{C}$ 。DK5在2004, 2005和2006年4.0 m深度处最高地温分别为 $0^{\circ}\text{C}$ 、 $-0.69^{\circ}\text{C}$ 和 $-1.26^{\circ}\text{C}$ ，2005, 2006和2007年最低地温分别为 $-3.97^{\circ}\text{C}$ 、 $-7.50^{\circ}\text{C}$ 和 $-7.63^{\circ}\text{C}$ ；DK5在2004, 2005和2006年5.0 m深度处最高地温分别为 $-0.01^{\circ}\text{C}$ 、 $-1.08^{\circ}\text{C}$ 和 $-1.89^{\circ}\text{C}$ ，2005、2006和2007年最低地温分别为 $-4.04^{\circ}\text{C}$ 、 $-7.13^{\circ}\text{C}$ 和 $-7.31^{\circ}\text{C}$ 。从平均地温和极端地温的变化都可以看出，DK5、DK6测温孔在同一深度处地温有明显的逐年降低趋势；而DBK3测温孔同一深度处地温变化趋势基本稳定，并且2006年较2005年地温略有升高；对比三个测温孔的地温变化曲线，同一深度处DBK3地温明显高于DK5、DK6，平均地温高 $4^{\circ}\text{C}$ 左右，最大温差达到 $9.1^{\circ}\text{C}$ 。

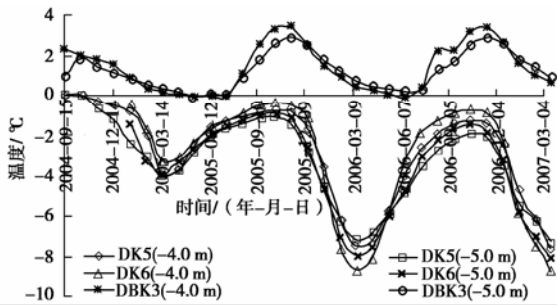


图6 测温孔(DK5、DK6、DBK3)4.0, 5.0 m深度处地温随时间变化分布图  
Fig. 6 Ground temperature regime of DK5, DK6 and DBK3 at depth of -4.0, -5.0 m

图7, 8分别为断面274K740、275K400左护道孔不同深度地温随时间变化分布图。

如图7所示：距护道表面1.5~6 m深度范围内土体在2005, 2006年均处于冻结状态，且2006年整体地温较2005年有所下降，2005年距护道表面1.5~6 m范围内土体平均温度为 $-0.33^{\circ}\text{C}$ ，而2006年其平均温度为 $-1.11^{\circ}\text{C}$ ；根据1.5 m深度处地温变化曲线可以明显的看出，2004年该深度处土体在融化季节处于融化状态，而在2005, 2006年该深度处土体处于冻结状态，且2006年地温较2005年更低。如图8所示：275K400对比断面左护道处下伏土体地温变化趋势基本稳定，距护道表面3~6 m范围内土体全年均处于融化状态，距护道表面2.0 m深度处土体在季节融化期处于融化状态而在季节冻结期处于冻结状态，而距护道表面2.5 m深度处土体在季节冻结期的最低温度接近 $0^{\circ}\text{C}$ 。对比图7和图8：274K740观测断面左护道下土体地温状况较275K400断面左护道下土体地温发生了根本性的变化，使得一定深度以下土体在全年都处于冻结状

态，并且整体地温有逐年下降、人为上限逐年抬升的趋势。

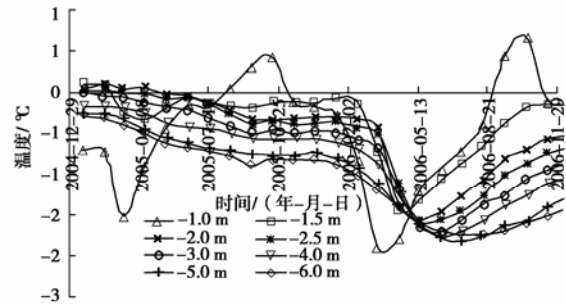


图7 DK8测温孔不同深度地温随时间变化分布图  
Fig. 7 Ground temperature regime of DK8

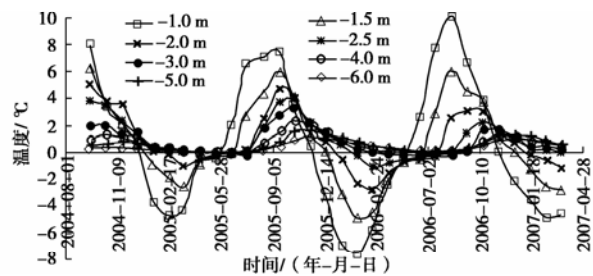


图8 DBK4测温孔不同深度地温随时间变化分布图  
Fig. 8 Ground temperature regime of DBK4

### 2.3 热棒附近多年冻土地温变化分析

图9为2007年气温最低时(2月15日)274K740断面距热棒不同距离地温孔温度沿深度变化图，其中RK1、RK2、RK3、RK4距离热棒分别为0.1, 0.5, 1.0, 1.75 m，DBK2为对比断面275K400右路肩孔。图9表明：同一深度处，从RK4到RK1地温逐渐降低，且均低于DBK2，说明距离热棒越近降温效果越好；RK1~RK4在7 m深度处地温变化明显，地温明显低于上下邻接土层，而热棒蒸发段中心位置处于7 m深度处，说明热棒蒸发段中心位置处降温效果最好；对比RK1和DBK2，同一深度最大降温幅度达到 $14^{\circ}\text{C}$ 。

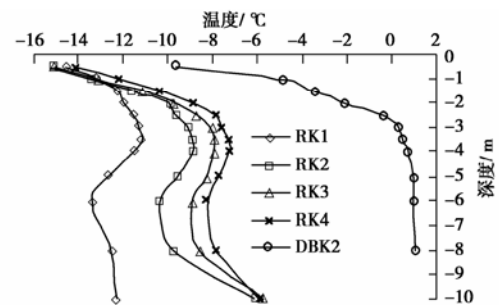


图9 2007年2月15日不同测温孔地温沿深度变化分布图  
Fig. 9 Ground temperature regime of different depths

图10为RK2、RK3测温孔不同时刻地温沿深度变化图，图10表明：不论RK1还是RK3，同一深度处2006，

2007年2月地温明显低于2005年2月, 最大温差达到2.4℃, 而2006, 2007年地温变化则不大。说明热棒工作正常并趋于稳定, 发挥了明显的作用, 有效降低了土体温度。

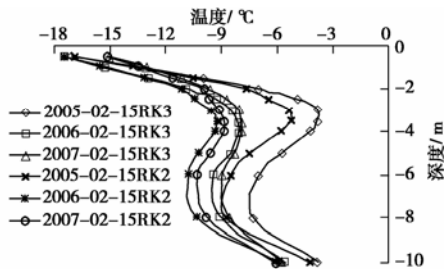


图 10 RK2、RK3 测温孔不同时刻沿深度地温变化分布  
Fig. 10 Ground temperature regime of RK2 and RK3 at different depths

图11为RK1~RK4以及DBK2测温孔距路基表面6m深度处地温随时间变化图, 由图11可以得出: 季节冻结期, 同一时刻RK1~RK4地温依次升高, 而在季节融化期RK1~RK4地温基本一致; 同一时刻RK1~RK4地温均明显低于DBK2; RK4地温变化趋势线表明距热棒1.75 m处地温逐年减小, 说明热棒有效半径大于1.75 m。

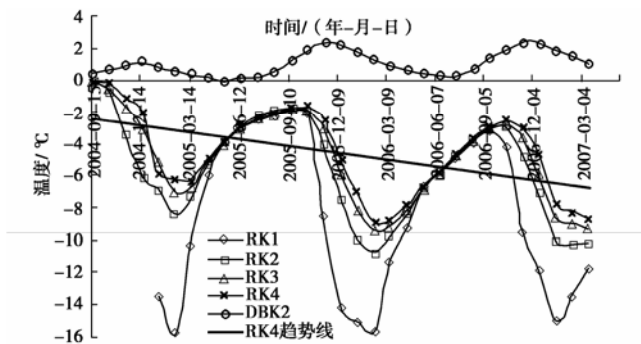


图 11 不同测温孔距路基表面 6 m 深度处地温随时间变化分布  
Fig. 11 Ground temperature envelope curves at depth of -6.0 m

### 3 结 论

(1) 试验段路基病害防治措施布置合理、效果明

显, 能够有效改善路基下多年冻土热平衡; 热棒、保温板及保温护道发挥了积极有效的作用, 路基下多年冻土上限抬升明显, 最大抬升位置超过天然状态下多年冻土上限2 m; 土体地温得到了有效控制, 路肩及护道下伏多年冻土整体地温明显降低并且逐年下降, 路肩下4.0, 5.0 m深度处平均地温下降4℃±, 这样的地温条件非常有利于维持路基稳定性。

(2) 热棒初始降温效果明显, 随着时间推移3~5 a后将逐步趋于稳定; 对比观测显示热棒有效降低了周围土体温度, 而且距离热棒越近路基降温效果越好, 热棒蒸发段中心位置处降温效果最好, 最大降温幅度达到14℃; 热棒有效半径大于1.75 m, 说明试验段热棒布置合理。

### 参考文献:

[1] 马 巍, 程国栋, 吴青柏. 多年冻土地区主动冷却地基方法研究[J]. 冰川冻土, 2002(5): 579 - 587. (MA Wei, CHENG Guo-dong, WU Qing-bai. Preliminary study on technology of cooling foundation in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002(5): 579 - 587. (in Chinese))

[2] 盛 煜, 张鲁新, 等. 保温处理措施在多年冻土区道路工程中的应用[J]. 冰川冻土, 2002(5): 618 - 622. (SHENG Yu, ZHANG Lu-xin, et al. Application of thermal-insulation treatment to roadway engineering in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002(5): 618 - 622. (in Chinese))

[3] 盛 煜, 温 智, 等. 青藏铁路多年冻土区热棒路基温度场三维非线性分析[J]. 铁道学报, 2006(1): 125 - 130. (SHENG Yu, WEN Zhi, et al. Three-dimensional nonlinear analysis of thermal regime of the two-phase closed thermosyphon embankment of Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2006(1): 125 - 130. (in Chinese))