

青藏铁路块石护坡温度场及路基冷却作用机理分析

吴青柏, 于 晖, 蒋观利, 刘永智

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 主要通过非正线实体工程试验段块石护坡层内热量传递过程监测, 对块石护坡结构冷却路基的作用机理进行研究。研究表明, 块石护坡结构具有隔热保温和空气自然对流效应。随着气候条件昼夜温差和季节性温度变化, 块石护坡层内隔热保温和自然对流效应表现出了昼夜、季节性交替组合过程, 这一交替组合过程引起了块石护坡层内热量传递过程变化, 从而影响块石护坡下部多年冻土热状态。路基下部土体热状态分析表明, 块石护坡结构能够有效地降低路基下部土体温度。

关键词: 青藏铁路; 块石护坡; 热量传递过程; 冷却机理

中图分类号: U213 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2008)07-1011-06

作者简介: 吴青柏(1964-), 男, 江苏武进人, 主要从事冻土工程与环境方面的研究。E-mail: qbwu@lzb.ac.cn。

Analysis of temperature features within crushed rock revetment and cooling mechanism of embankments for the Qinghai-Tibet Railway

WU Qing-bai, YU Hui, JIANG Guan-li, LIU Yong-zhi

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The cooling mechanism of crushed rock revetment of embankment was studied by monitoring the heat transfer in crushed rock layers of revetment at the experimental sections. It was shown that the effect of thermal insulation and natural convection could be occurred in crushed rock layers of revetment. With daily variation and seasonal variation of air temperatures, the combining processes of daily and seasonal variation were shown in the effect of thermal insulation and natural convection in crushed rock layers of revetment. As a consequence, the variation of heat transfer processes in crushed rock layers of revetment results in the variation of permafrost thermal regime under embankments. It was shown by the thermal regime of soil under crushed rock revetment of embankments that the crushed rock revetment could effectively reduce the soil temperature under embankments.

Key words: Qinghai-Tibet Railway; crushed rock revetment; heat transfer process; cooling mechanism

0 引 言

大孔隙结构块石介质内热质迁移过程非常复杂, 自然界众多冰缘现象如石海、石冰川等均属于大孔隙块石介质, 其下部冻土温度均要比其周围冻土温度低 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 左右^[1], 这主要是由于斜坡块石介质层内发生了烟囱效应, 引起大气与其下部多年冻土发生强烈的热交换^[2], 块石层存在常导致多年冻土产生奇异分布^[3]。冻土区工程利用这一自然现象来解决工程稳定性问题, 确保多年冻土热稳定性。俄罗斯在多年冻土区修筑铁路时使用这种措施保护路基下部冻土, 取得了良好的工程效果^[4]。青藏铁路多年冻土区也采取了块石结构来保护路基下部的多年冻土, 避免和减弱工程和气候对路基下部多年冻土的影响^[5-6]。

为了研究块石护坡对路基下部冻土的降温作用,

先后在北麓河试验段(铁路正线)开展了块石护坡表面温度、块石护坡结构层通量和路基下部土体温度监测, 监测结果表明块石护坡强化了热交换过程, 对路基下部土体具有明显降温作用^[7-8]。喻文兵等^[9]曾在室内开展了块石护坡结构层对土体降温过程影响的模拟试验, 研究表明块石层在冬季具有空气对流和热传导作用。孙斌祥等^[10]对粒径为 $6\sim 8\text{ cm}$ 碎石护坡在开放和封闭状态下进行了数值模拟研究, 得到了块石、碎石冬季具有自然对流作用的结论。然而, 块石护坡层内热量传输过程和对路基填土的冷却作用机理并未从实际工程上给出解释。本文正是针对这一问题, 在北

基金项目: 国家自然科学基金国家杰出青年科学基金项目(40625004)

收稿日期: 2007-07-20

麓河开展实体工程（非铁路正线）模拟试验研究，监测和分析块石护坡路基下部土体和块石护坡结构层内的热量传递过程。本文基于2 a左右的数据对块石护坡结构层热量传递过程和冷却作用机理进行了综合分析，很好地揭示了块石护坡冷却作用机理和热量传递过程，为块石护坡进一步推广应用提供了科学的依据。

1 实体工程试验设置

2004年在北麓河建设了长约240 m非正线机理试验段，块石护坡结构路基试验段是其中之一。块石护坡试验段长30 m，修筑在含土冰层、年平均地温为 -1.4°C 的多年冻土上。路基高度为3.7 m，路堤基底宽度为18.6 m，采用1:1.5设计坡率，路堤顶面宽为7.6 m，与青藏铁路正线工程一致。块石护坡结构采用粒径约为20~30 cm无级配块石，随意堆砌在路基边坡上，护坡厚度为120 cm，与外界是连通的。

如图1所示，在块石护坡结构层内布设了7层温度监测断面，每隔50 cm一层。在每层温度监测断面中，块石护坡层内温度探头间距为20 cm，路基填土中温度探头间距为50 cm，在块石护坡层内构成一个温度监测网。同时分别在左右路肩和路基中心下部土体中设置了监测孔，左右路肩监测孔深度为10 m，路基中心监测孔深度为20 m，温度探头间距为50 cm。所有监测孔温度传感器为热敏电阻，用澳大利亚生产DT500型数采仪进行数据采集，采集频率为1次/3 h。本试验段2004年9月建成并开始采集数据。

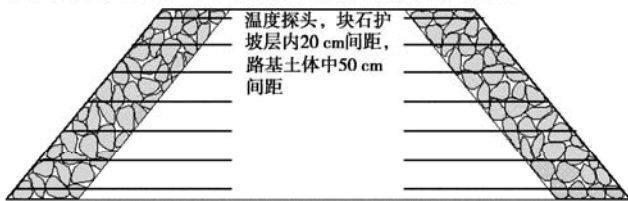


图1 块石护坡层温度探头布设示意图

Fig. 1 Mechanical analysis of high backfill

2 块石护坡层内温度场特征分析

块石护坡层内温度场特征主要是根据Surfer软件所提供的线性内插三角形测量方法对所测量的温度进行处理，获得了温度等值线分布特征，并以此为基础分析块石护坡层内温度场特征，这一方法非常适合于数据资料均匀分布在研究区内的数据内插^[10]。

2.1 块石护坡层隔热保温效应

图2分别给出了春夏秋冬四季中某两天块石护坡层内瞬时温度场分布特征，所显示的温度场分布在整个季节都具有普遍性。从图2可以看出，块石层内温

度等温线基本相互平行于路基边坡面，温度等温线密集，说明在块石护坡层表面与块石层—土体接触面间形成了较大的温度梯度，其温差可达 $6\sim 8^{\circ}\text{C}$ 左右。而路堤土体中温度等温线相对较为稀疏，温度场较为均匀，与块石护坡层内温度场分布形成强烈的温度差异。在夏秋季节，当块石护坡外部温度高于块石护坡层内温度时，块石护坡起到了隔热保温作用，这一过程减弱了块石护坡的吸热过程，减少了进入路基内部的热量。在冬春季节，块石护坡外部温度低于块石护坡层内温度，块石护坡同样存在隔热保温作用，这一过程减弱了块石护坡的放热过程，减少了进入路基内部的“冷量”。

主要原因是块石护坡结构层内存在较大空隙，空隙中的空气具有较好的隔热保温作用，因而大大地削弱了护坡层内的热量交换过程。夏秋季节块石护坡结构层内发生的隔热保温效应有利于减少进入路基填土的热量，而在春冬季节发生的隔热保温现象则明显抑制了路基填土和路基下部冻土体发生放热过程。

2.2 块石护坡层自然对流效应

图3分别给出了与隔热保温效应相对应的春夏秋冬季节中块石护坡某两天自然对流效应的瞬时温度场特征，所显示的温度场分布在整个季节都具有普遍性。从图3可看出，块石层内温度等温线呈现出“涡状环”特点，热流基本垂直于路基的斜坡。块石层温度等温线较为稀疏，说明块石层内热量传递速率较快。路堤填土内温度等温线基本相互平行于路堤边坡，且分布比较均匀，表现出了明显热传导的特征。块石层内发生自然对流的形式主要表现为热流垂直于块石护坡层，属于Rayleigh-Benard (R-B) 对流形式^[12]。

由于受降温时间和驱动对流所需温差的影响，块石护坡的自然对流效应所发生的时段有较大的差异。夏秋季节，一般在块石层表面被冷却时，受块石层内温度梯度引起的空气密度差的影响，驱动了块石层内发生自然对流过程。在冬春季节，在块石层表面被加热时产生自然对流效应。其主要原因是因为块石层表面被加热后，减小了发生自然对流效应的块石层厚度，相对增大了单位厚度上冷热空气的密度差导致了自然对流效应的发生。

由于块石护坡表面温度低于块石层与路基土接触面的温度时，由于冷热空气密度差，密度大的冷空气通过块石层内空隙向块石层内下部流动，密度小的热空气向着块石层上部流动，驱动了块石护坡层内的空气自由对流。

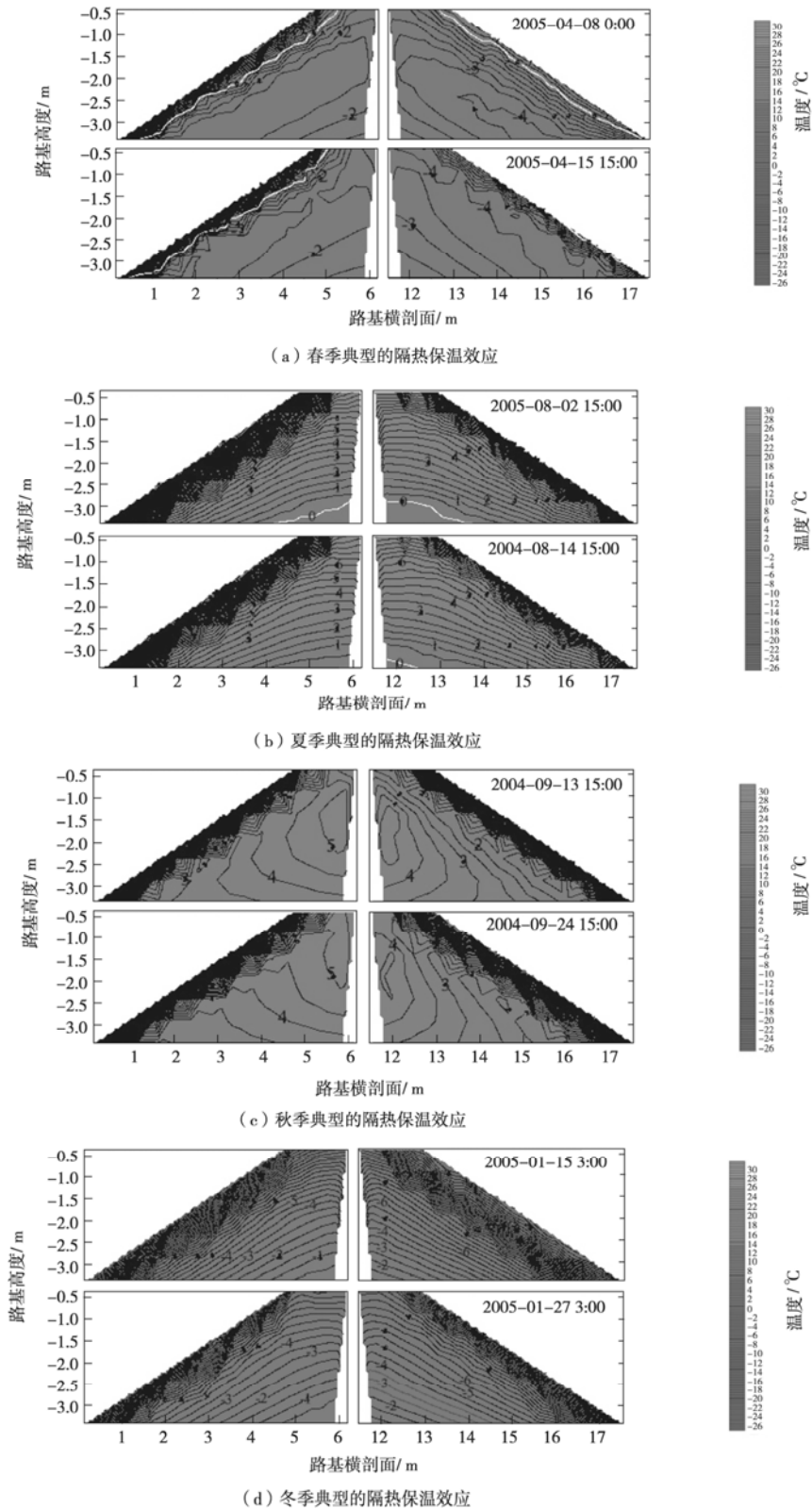


图 2 一年四季块石护坡典型的隔热保温效应

Fig. 2 Typical effect of heat insulation in crushed rock revetment

3 块石护坡对路基下部土体温度影响

图 4 分别给出了块石护坡左右路肩和路基中心下

部原地表下 0.5~1.0 m 深度处土体温度随时间的变化。图 4 可以看出, 施工完成初期, 填土的热扰动作用引起了土体温度升高, 然后随时间变化, 块石护坡

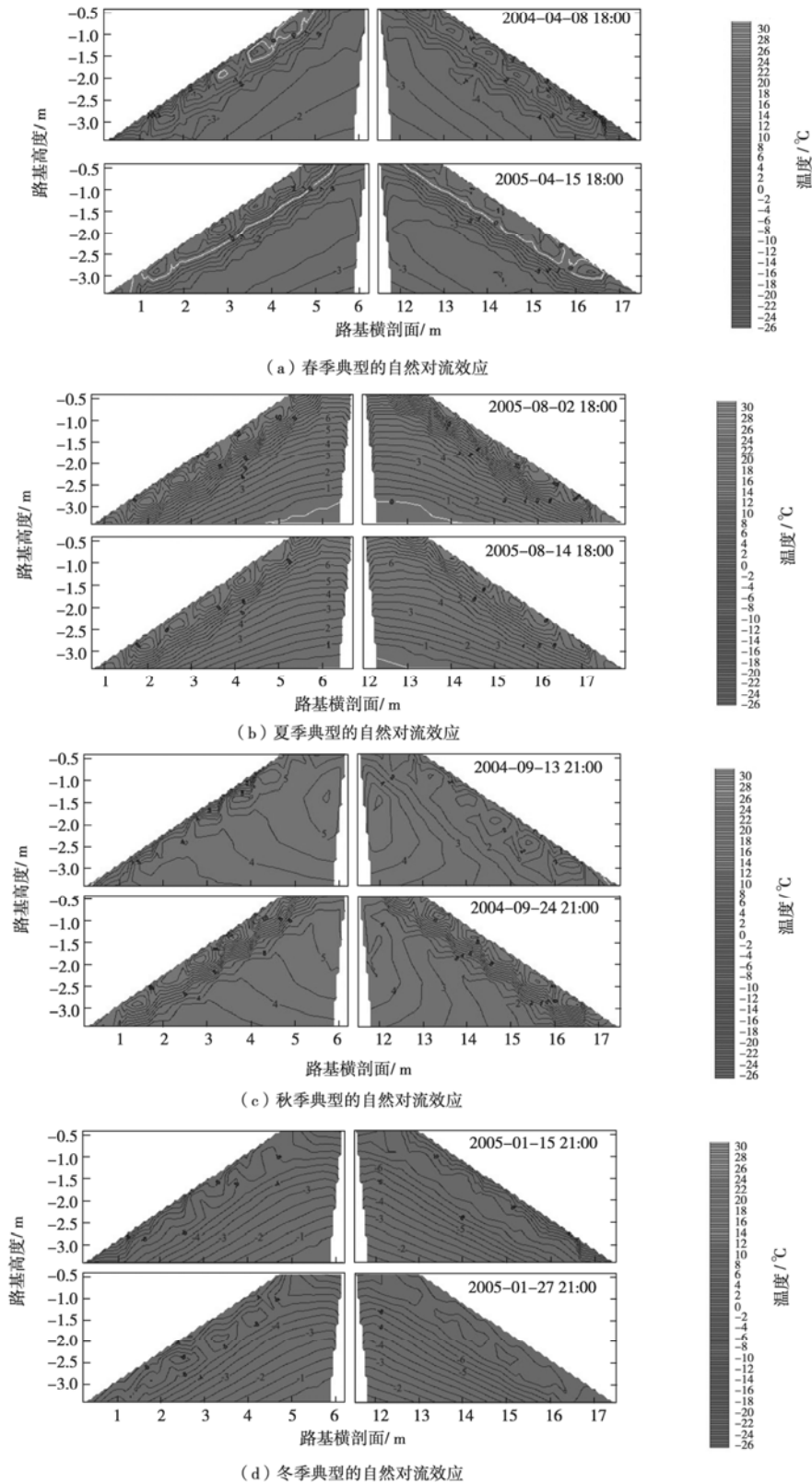


图3 一年四季块石护坡典型的自然对流效应

Fig. 3 Typical natural convection in crushed rock revetment

下部土体温度随时间逐渐降低，块石护坡对路基下部土体的降温作用开始起作用。然而，由于受太阳辐射的影响，左右路肩和路基中心下部土体随时间温度的

变化差异较大。左路肩处于阳坡，温度最高，降温趋势不显著；右路肩处于阴坡，温度最低，且具有明显的降温趋势。路基中心下部受左右护坡影响，降温效

果介于二者之间。然而,有一点值得注意,左右路肩下部土体已基本完全冻结,而路基中心下部仍有部分时段土体处于融化状态。这说明块石护坡能够有效地降低土体温度,抬升多年冻土上限,对于保护路基下部的多年冻土具有较好的降温作用。

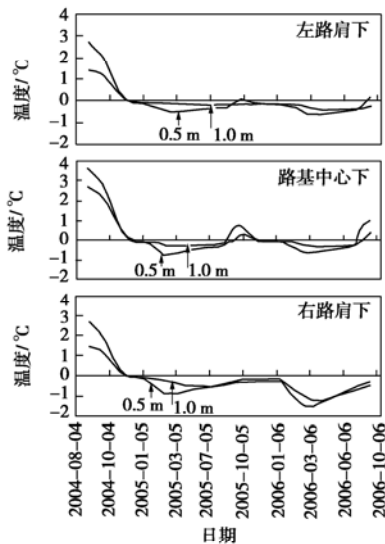


图4 路基下部地表下土体温度随时间变化

Fig. 4 Variation of soil temperature with time under original ground surface

4 块石护坡结构冷却路基的作用机理

从块石护坡层内温度场来看,块石层具有明显隔热保温效应和自然对流效应。块石护坡隔热保温效应在每个季节所发生的时段不一致。夏季、秋季一般发生在中午 9:00~18:00,冬季发生在午夜 00:00~6:00,春季因为频繁气温变化发生时段不太确定。从隔热保温效应发生的时间来看,夏季和秋季发生隔热保温效应主要在气温最高的时段,对保护路基下部的多年冻土是有利的。冬季发生隔热保温作用主要是在气温最低的时段,这不利于块石护坡发挥冷却降温作用。

当块石护坡层外部降温时,块石层外部形成了明显 R-B 对流效应。从自然对流效应表现特征来看,自然对流效应每个季节所发生的时段不一致。夏季和秋季发生的时段一般是在气温降低的 18:00~24:00 左右,此时白天大气对块石护坡层的加热作用使得块石护坡层内外产生较大的温差,从而驱动了空气对流效应而产生烟囱效应。冬季的自然对流效应是首先在表面升温过程中产生空气对流,由于升温过程中减小了块石层内发生空气对流的块石层厚度,因此使得发生自然对流效应块石护坡层温差增大而驱动自然对流。至夜晚降温时,块石护坡层内外温差达到最大产生自然对流效应,这是与其他季节自然对流效应不同

的之处。

从块石护坡层内热量传输过程说明了块石护坡在每个季节内昼夜发生着隔热保温效应和自然对流效应,但每个季节发生的时间有差异。因此,块石护坡的冷却机理主要为自然对流效应和隔热保温效应的组合作用过程,这一组合作用过程表现为隔热保温效应和自然对流效应的昼夜、季节性的交替变化过程。

对于本文的块石护坡来说,块石护坡的降温作用还应受风速和风向的影响,但从块石护坡的温度场分布特征来看,风速风向对隔热保温效应和自然对流效应有一定的影响。从近期研究风速风向对块石护坡的监测研究结果^[13],影响结果可能会增强块石护坡的隔热保温效应和自然对流效应,目前这一问题仍在研究中。

5 结 论

(1) 由于块石护坡结构层存在大空隙空间,一年四季块石护坡层内将发生空气自然对流和隔热保温效应。块石护坡的冷却机理主要为自然对流效应隔热保温效应的组合作用过程,这一组合作用过程表现为隔热保温效应和自然对流效应的昼夜、季节性的交替变化过程。

(2) 块石护坡层内热量传递过程较为复杂,与气温的季节变化和块石护坡层与路基边坡土体接触面上的温度变化有密切的关系。夏秋季节,一般块石层表面被加热时发生隔热保温效应,当表面被冷却时发生自然对流效应。但是在冬春季隔热保温效应和自然对流效应将会发生逆转,即表面被加热时发生自然对流效应,当块石层内表面温度达到最低时自然对流效应达到最大,随后又产生隔热保温效应。到了冬春季气温频繁波动时,这两种热效应又发生逆转。冬季的隔热保温效应大大地抑制了路堤填土和路基下部的放热过程,减弱了块石护坡的冷却作用。

(3) 块石护坡层对路基下部多年冻土的降温作用存在一定的差异,右路肩下(阴坡)土体降温趋势显著,原地表土体全部冻结。左路肩下(阳坡)土体降温趋势比右路肩要差,原地表土体仍有一个月左右时间处于融化状态。路基中心下部较护坡结构层下部土体要差,原地表下 1.0 m 范围内土体并未完全冻结,仍存在 3 个月左右的融化期。

参考文献:

- [1] GOBRUNOV S P, SERVERSKY E V. Influence of coarsely fragmental deposit on permafrost formation[C]// Extended Abstract, International Symposium on Mountain and Arid

- Land Permafrost. Ulaanbaatar: Uralah Erdem Publishing, 2001: 24 - 25.
- [2] HARRIS S H, PEDERSEN D V. Thermal regimes beneath coarse blocky materials[J]. Permafrost and Periglacial Process, 1998, **9**: 107 - 120.
- [3] 程国栋. 局地因素对多年冻土分布的影响及其对青藏铁路设计的启示[J]. 中国科学(D 辑), 2003, **33**(6): 602 - 607. (CHENG Guo-dong. The effect of local factors on spatial distribution of permafrost and its revealing to Qinghai-Tibet railway design[J]. Science in China, Series D, 2003, **33**(6): 602 - 607. (in Chinese))
- [4] 童伯良. 复杂的冻土条件下铁路基的设计和建设[R]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所. 2001. (TONG Bo-liang. Design and construction of railway roadbed for complicated conditions of frozen soil[R]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, 2001. (in Chinese))
- [5] 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, **24**(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, **24**(5): 579 - 587. (in Chinese))
- [6] WU Qing-bai, CHENG Guo-dong, MA Wei, et al. Technical approaches on ensuring permafrost thermal stability for Qinghai-Xizang Railroad construction[J]. Geomechanics and Geoengineering, 2006, **1**(2): 119 - 128.
- [7] 胡泽勇, 程国栋, 钱泽雨, 等. 青藏铁路抛石护坡冷却路基效果的估计[J]. 中国科学(D 辑), 2003, **33**(增刊): 153 - 159. (HU Ze-yong, CHENG Guo-dong, QIAN Ze-yu, et al. Cooling effect of ballast revetment on the roadbed of Qinghai-Tibetan railway[J]. Science in China, Ser. D, 2003, **33**(S): 161 - 167. (in Chinese))
- [8] 孙志忠, 马 巍, 李东庆. 多年冻土区块、碎石护坡冷却作用的对比研究[J]. 冰川冻土, 2004, **26**(4): 435 - 439. (SUN Zhi-zhong, MA Wei, LI Dong-qing. Experimental study on cooling effect of air convection embankment with crushed rock slope protection in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, **26**(4): 435 - 439. (in Chinese))
- [9] 喻文兵, 赖远明, 张学富, 等. 多年冻土区抛石护坡路基室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(10): 1233 - 1236. (YU Wen-bing, LAI Yuan-ming, ZHANG Xue-fu, et al. Experimental study on ripped-rock revetment embankment in permafrost regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(10) 1233 - 1236. (in Chinese))
- [10] 孙斌祥, 徐学祖, 赖远明, 等. 碎石粒径对寒区路堤自然对流降温效应的影响[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(6): 809 - 814. (SUN Bin-xiang, XU Xue-zu, LAI Yuan-ming, et al. Impact of ballast grain sizes on natural convection cooling effect of embankment in permafrost regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(6): 809 - 814. (in Chinese))
- [11] LEE D T, SCHACHTER B J. Two algorithms for constructing a delaunay triangulation[J]. International Journal of Computer and Information Sciences, 1980, **9**(3): 219 - 242.
- [12] CHENG Guo-dong, LAI Yuan-ming, SUN Zhi-zhong, JIANG Fan. The 'thermal semi-conductor' effect of crushed rocks[J]. Permafrost and Periglacial Process, 2007, **18**: 151 - 160.
- [13] 卞晓玲. 青藏铁路抛石路基对流降温机理的试验研究[D]. 兰州: 中国科学院旱区旱区环境与工程研究所, 2007. (BIAN Xiao-lin. Study on the cooled theory of riprap slope in Qinghai-Tibet railway[D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese))