

基于突变级数法的块石结构路基降温效果评价

赵翊婷^{1,2}, 吴青柏¹, 张中琼¹, 侯彦东³

(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; 3. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为综合评价块石结构路基的降温效果, 以青藏铁路北麓河试验段块石护坡加厚路基、封闭块石护坡路基、开放与封闭块石基底路基和 U 型块石路基为研究对象。从冻土内部因素、外部因素 2 个方面出发, 选取 13 个因子作为底层评价指标, 采用突变级数法对块石结构路基的降温效果进行评价, 建立由 4 个层次结构组成的块石结构降温效果评价模型。结果显示, 评价结果与实测结果基本一致, 评价结果能够较为准确地反映块石结构路基降温效果的强弱。在工程设施完成之初, 块石护坡加厚路基易受工程热扰动影响, 表现为弱降温效果; 在地温变化达到相对稳定后, 由于不同块石结构路基降温机制存在差异, U 型块石路基、开放块石基底路基为强降温效果, 封闭块石基底路基降温效果较强, 块石护坡加厚路基、封闭块石护坡路基降温效果一般, 其中 U 型块石路基的评价值大于 0.97, 降温效果最强。

关键词: 路基工程; 块石路基; 降温效果评价; 突变级数法

中图分类号: U 416

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2019)08-1686-10

Assessment of cooling effect of the crushed rock embankment based on catastrophe progression method

ZHAO Hongting^{1,2}, WU Qingbai¹, ZHANG Zhongqiong¹, HOU Yandong³

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: In order to comprehensively assess the cooling effect of the crushed rock embankment on permafrost, different embankments such as the open-system crushed rock thickened revetment, the closed-system crushed rock revetment, the open-system and closed-system crushed rock basement and the U-shaped crushed rock embankments in the Beiluhe test section of the Qinghai-Tibet Railway were investigated. Selecting thirteen factors as the bottom evaluation indices from internal and external factors of permafrost, the cooling effect of the crushed rock embankment was evaluated by catastrophe progression method, and a comprehensive evaluation model which consists of four hierarchical structures was proposed. The results show that the evaluation results are basically line with the measured results and the calculated results can accurately reflect the strength of the cooling effect of the crushed rock embankment. The thickened revetment of the crushed rock slope is susceptible to the

收稿日期: 2018-11-05; **修回日期:** 2018-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41690144, 41861010)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 41690144 and 41861010)

作者简介: 赵翊婷(1992-), 女, 2013 年毕业于西北师范大学地理科学专业, 现为博士研究生, 主要从事寒区工程与环境方面的研究工作。E-mail: zhaohongting@lzb.ac.cn. **通讯作者:** 吴青柏(1964-), 男, 现任研究员、博士生导师。E-mail: qbwu@lzb.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1273

thermal disturbance of the engineering at the initial operation period of the engineering measures and presents a weak cooling effect. When the change of the ground temperature reaches a relatively stable state, the cooling effect shows different due to the different cooling mechanisms of different crushed rock embankments. The U-shaped crushed rock embankment with an evaluation value more than 0.97 has strongest cooling effect, in turn followed by the open-system crushed rock basement embankment, the closed-system crushed rock basement embankment, the crushed rock thickened revetment and the closed-system crushed rock revetment.

Key words : subgrade engineering ; crushed rock embankment ; assessment of cooling effect ; catastrophe progression method

1 引言

青藏铁路在多年冻土区长度约为 632 km, 其中在大片连续多年冻土区的长度约为 550 km^[1]。在青藏铁路的建设和运营过程中, 为应对气候变暖, 保护路基下部多年冻土, 在沿途多采用块石、热棒、通风管等工程措施来降低路基下部多年冻土温度, 其中以块石路基应用最为广泛^[2-4]。

张明义等^[5-8]通过室内、室外试验以及数值模拟, 对块石结构路基的降温机制、降温效果进行了研究, 进而明确块石层的对流传热规律和降温机制, 研究发现块石层内同时具有热传导和对流效应, 开放和封闭结构的块石路基降温机制存在差别。另外, 马巍等^[9-14]基于青藏铁路沿线不同试验段地温监测数据, 从土体热状态、多年冻土上限变化以及阴阳坡效应等方面分析不同块石结构路基的降温效果, 结果发现块石层能够有效降低路基下部多年冻土温度、抬升其上限, 且在路基两侧修筑块石护坡有助于消除阴阳坡效应; 除此之外, 穆彦虎等^[15-17]通过对不同块石结构路基降温效果的比较分析, 发现 U 型块石路基的降温效果优于其他块石结构路基。然而, 以上对块石结构路基降温效果的研究相对比较单一、不够综合, 且对长期降温效果的研究较少。

由于工程稳定性受各种因素的综合影响, 且影响因素多具模糊性, 因此很难直接用数理统计的方法进行具体判断。目前对工程效果进行评价时多采用模糊综合评价法^[18-22], 但该方法需要对各评价指标赋予权重, 存在一定的主观性。突变级数法正好能够有效降低主观性, 除了在灾害评估^[23-25]、工程建设^[26-27]等方面得到广泛运用外, 该方法在冻土研究中也有一定的应用。Y. C. Liu 和 Z. G. Song^[28]为研究多年冻土地块碎石路基的适用性, 采用突变级数法建立由目标层、准则层和指标层 3 个层次结

构体系组成的评价指标体系; 曹伟等^[29]建立由冻土冻融侵蚀敏感性、冻土热稳定性和冻土生态脆弱性 3 个方面组成的冻土环境评价模型, 认为突变级数法对冻土环境的评价更具科学性。

为选取最优块石路基结构, 需要对不同块石结构路基的降温效果进行综合评价, 其目的在于及时有效地为决策者反馈信息, 为工程建设和维护提供依据。因此, 本文通过对北麓河非正线试验段实测数据的分析, 建立采用突变级数法的块石结构路基降温效果评价模型, 明确块石结构路基的长期降温效果, 为冻土地区铁路路基的建设、运营和维护提供依据。

2 突变级数法的基本原理和算法

突变级数法是一种基于突变理论的多因素综合评价方法。突变理论认为各种现象均是由一系列的量变引起跃迁性质变, 即在某一系统的演变过程中, 因某些变量量变导致系统发生质变, 利用该理论建立的评价模型, 可以分析某一系统发生跃迁性变化的规律, 因此突变级数法可以应用于自然界以及社会现象中不连续变化的过程。该方法的基本思想是将评价目标的指标体系进行多层分解, 直到分解出可以计量的指标, 其次利用归一化公式计算出上一层评价指标对应的中间值, 然后根据“非互补”、“互补”原则逐层向上综合, 最后得到的总突变隶属函数值即为研究对象的评价结果^[30-31]。该方法最大的优点在于不用对各评价指标人为赋予其权重, 只需考虑各指标对评价目标的相对重要性, 从而保证了评价结果的客观性。突变级数法的评价步骤如下所示^[32]。

2.1 建立多层次结构模型

根据评价指标体系的内在作用机制, 对评价目标进行逐级矛盾分解, 组成由多级指标构成的倒树枝状多层次评价模型。在同一层次中, 对评价指标进行相对重要性排序, 针对同一个评价目标, 评价

指标不超过 4 个。因此，在某一评价指标体系中，常用的突变模型有 4 类，分别为折迭突变模型、尖点突变模型、燕尾突变模型和蝴蝶突变模型。

2.2 评价指标的无量纲化处理

由于底层评价指标的取值范围以及度量标准各不相同，评价指标之间无法进行比较，因此需要将其原始数据进行无量纲化处理，即将原始数据转化为[0, 1]的无量纲可比较数据。

2.3 归一化公式的推导

由突变理论可以得出，某一评价目标的演化过程可以通过状态变量和控制变量组成的势函数 $f(x)$ 进行数学表达，其中状态变量为评价目标的状态，控制变量为影响评价目标状态的因素。归一化公式推导的主要步骤^[33]如下：首先，对 $f(x)$ 求一阶导数 $f'(x)$ ，使其等于 0，得到平衡曲面方程；对 $f(x)$ 求二阶导数 $f''(x)$ ，使其等于 0，得到奇点集方程。其次，将平衡曲面方程与奇点集方程联立，得到分歧集方程。第三，通过分歧集方程导出 4 种突变模型的归一化公式。对同一个评价目标而言，归一化公式的数量与控制变量数量保持一致，其中折迭突变模型包含 1 个控制变量，尖点突变模型包含 2 个控制变量，燕尾突变模型包含 3 个控制变量，蝴蝶突变模型包含 4 个控制变量。

2.4 突变级数的计算及评价原则

确定控制变量的数目后就可以选择对应的突变模型，利用已选择的突变模型归一化公式对底层评价指标的无量纲数据进行计算，求得突变隶属函数值，然后逐级向上，最后求出总突变隶属函数值作为最终的评价结果。在逐级运算过程中，要注意“互补”和“非互补”原则，所谓“互补”原则是指对同一个评价目标而言，各评价指标之间互相补充、互相联系，取其平均值；“非互补”原则是指各评价指标之间不互相补充、不可互相替代，则取其最小值。

3 北麓河试验段块石路基设置和监测

青藏铁路北麓河非正线试验段位于青藏高原可可西里与风火山之间，北麓河盆地南部，年平均气温为 -3.46℃，年平均降水量为 295.79 mm。该试验段天然冻土上限在天然地表以下 2.2~2.4 m，年平均地温为 -1.4℃ ~ -1.6℃，属于低温多年冻土区。

该试验段设有 8 个监测断面，总长 240 m，坡度均为 1:1.5，其中块石路基修筑长度为 180 m，包括开放块石基底路基、封闭块石基底路基、U 型

块石路基、开放块石护坡路基、封闭块石护坡路基、块石护坡加厚路基，结构如图 1 所示。图 1(a)表示块石基底路基，包括开放和封闭 2 种状态，块石层内采用 20~30 cm 范围的无级配块石和 10% 的粒径为 10, 40 cm 的块石，封闭块石基底路基则是在开放块石路基的基础上，采用 20 cm 厚的填土将路基两侧块石封闭，阻止其与外界产生通风作用；U 型块石路基则是块石基底路基的基础上，在路基两侧边坡修筑了 80 cm 厚的块石护坡，如图 1(b)所示；图 1(c)表示块石护坡路基，护坡厚度为 80 cm，存在开放和封闭 2 种状态；块石护坡加厚则是指在开放块石护坡的基础上，将护坡厚度增加至 120 cm，如图 1(d)所示。

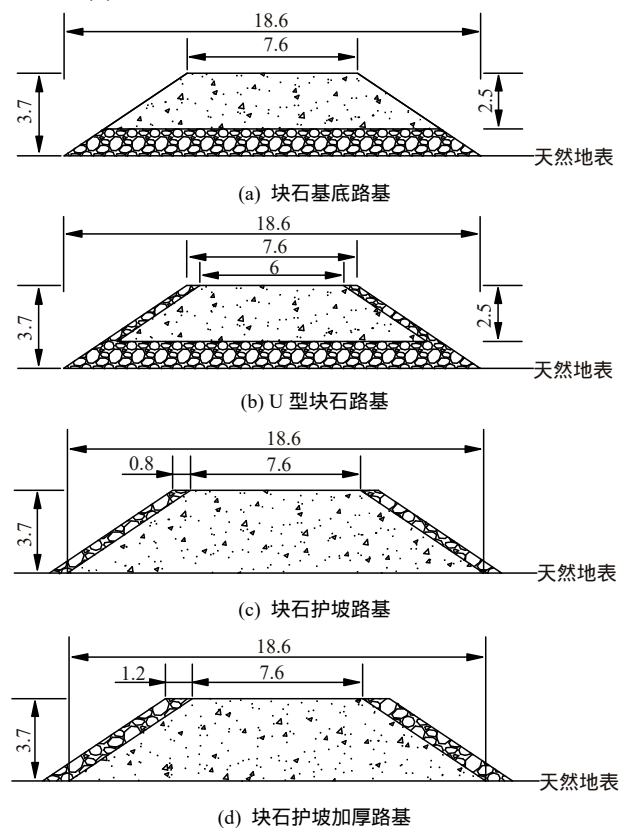


图 1 块石路基示意图(单位：m)

Fig.1 Structural diagrams of crushed rock embankment (unit : m)

试验段中设置了温度监测断面，分别在左右路肩下布设 10 m 深和路基中心下布设 20 m 深的温度监测孔，该深度从 0 m(天然地表)算起，且温度传感器的间距为 50 cm；块石基底路基的块石层内部布设了 5 层温度传感器串，各层间隔为 30 cm，同一层中的温度传感器间距为 50 cm^[34]；块石护坡路基块石层内布设有 7 层温度传感器，各层间隔为 50 cm，同一层中的温度传感器间距为 20 cm，路基填土中

温度探头间距为 50 cm^[11]；U 型块石路基块石层内布设了 4 层温度传感器，各层间隔为 40 cm，同一层中的温度传感器间距为 50 cm，如图 2 所示。温度监测使用的传感器均为同一类型热敏电阻，由冻土工程国家重点实验室制作并标定，精度为 ± 0.05 。数据采集采用澳大利亚生产的 DT500 型数采仪，自 2004 年 9 月起设定每 3 h 采集一次数据。

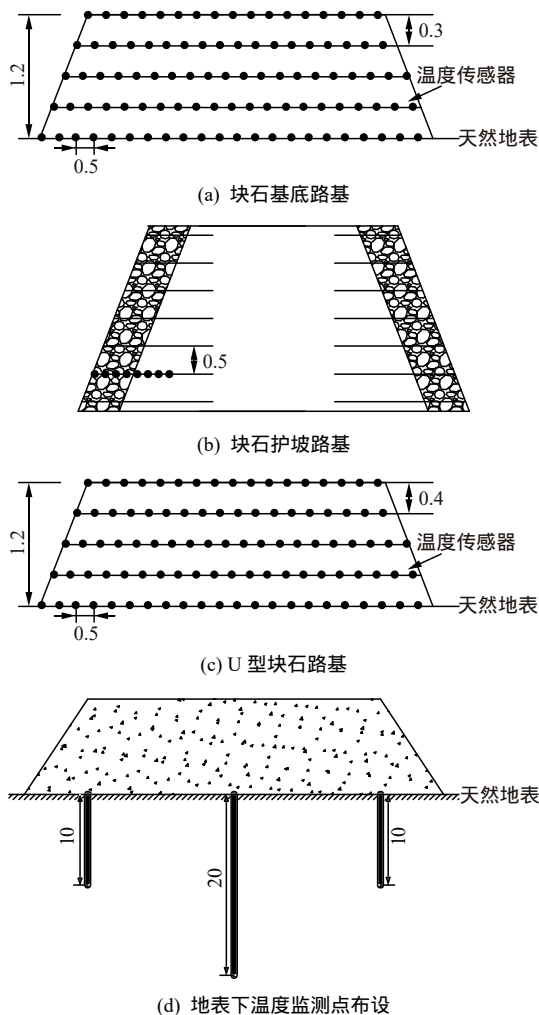


图 2 块石层内温度传感器的布设示意图(单位：m)

Fig.2 Structural diagrams of temperature sensors within the crushed rock layer(unit : m)

4 综合评价模型构建和评价

块石结构路基的降温过程是一个动态演化的过程，影响因素众多，且各因素之间并不都互相独立。一般来说，块石结构路基冷却作用发挥一段时间后，其降温效果达到相对稳定，但当气候变异或人为破坏等外部因素干扰到一定程度后，降温效果会发生突然变化，因此，可以利用突变级数法对其降温效果进行分析评价。

4.1 评价指标的选取

块石路基降温效果的影响因素众多，为体现评价指标的全面性、代表性和实用性，本文从冻土内部、外部因素两方面出发，兼顾评价指标的易于量化，从地温、多年冻土上限、阴阳坡差异、块石层特征以及环境因素中选取 13 个影响因素作为块石结构路基降温效果的评价指标，各评价指标的选取依据如下。

(1) 地温变化

地温是衡量多年冻土是否发育的一个重要指标，因此不同深度的地温变化也就成为评价块石结构路基降温效果的重要因素，故选取与普通路基相比，块石结构路基在原多年冻土上限处的地温变化幅度、5 m 深度处的地温变化幅度、10 m 深度处的地温变化幅度以及年平均地温变化幅度为评价指标，其中年平均地温可以显示多年冻土本身的热稳定性，年平均地温若处于降温状态，则有利于路基的稳定性；原多年冻土上限温度能够反映块石结构路基下部浅层土体温度的变化；5 m 深度处地温的变化能够反映块石路基下部中层土体温度的变化；10 m 深度处则反映深层土体的温度变化。

(2) 多年冻土上限变化

多年冻土上限是评价路基下部多年冻土状态变化的重要指标，能够反映路基结构对其下部多年冻土的影响。路基修筑后，多年冻土上限发生显著变化，其抬升幅度可用于表示路基对多年冻土保护作用的强弱。

(3) 阴阳坡差异

由于路基两侧边坡接受太阳日照时长的不同，导致路基下部多年冻土温度场出现不对称分布，即阴阳坡效应，就多年冻土区工程而言，阴阳坡效应会引起路基的差异性沉降，进而影响块石结构路基的降温效果。故选取阴阳坡间多年冻土上限差、0.5 m 深度、5 m 深度以及 10 m 深度阴阳坡间温差作为评价指标，来反映各种块石结构路基在不同深度的阴阳坡差异。

(4) 外部因素

外部因素分为环境因素与块石层特征两类。块石层特征包括块石层孔隙大小和数量、块石层厚度以及块石层铺设位置等。块石层中的热量交换是一个极其复杂的过程，主要取决于块石层特征，这些特征均会对其热量交换过程产生作用，进而对路基的降温效果产生影响^[35]。由于均采用块石作为路基铺设材料，故选取块石层孔隙数量、块石层厚度以

及块石层铺设位置为块石层特征的评价指标。在环境因素中，气温是众多环境因素中最重要的因素，它不仅能够影响冻土的发展趋势，而且能够直接影响多年冻土的存在状态，另外风速对块石路基降温效果的影响也不可忽视，两者共同作用，影响块石层边界与大气间的对流换热强度。因此，选取气温与块石层内温差作为评价指标，以此来表示影响块石层与大气之间的热交换效率。

4.2 块石路基降温效果评价的突变模型

根据上述选取的评价指标以及对其进行相对重要性排序，结合突变级数法的评价体系要求，块石路基降温效果评价模型如图 3 所示。各评价指标采用的突变模型分别为： $A_{111}, A_{112}, A_{113}, A_{114}$ 与 A_{11} 构成“互补”的蝴蝶突变模型； $A_{131}, A_{132}, A_{133}, A_{134}$ 与 A_{13} 同样构成“互补”的蝴蝶突变模型； A_{11}, A_{12}, A_{13} 与 A_1 构成“互补”的燕尾突变模型； $A_{211}, A_{212}, A_{213}$ 与 A_{21} 构成“非互补”的燕尾突变模型； A_{221} 与 A_{22} 构成折迭突变模型； A_{21}, A_{22} 与 A_2 构成“互补”的尖点突变模型； A_1, A_2 与 A 构成“互补”的尖点突变模型。

为了明确降温效果的强弱，对块石结构路基降温效果进行初步的等级划分。对冻土内部因素和外部因素直接赋予 0~1 范围的值，平均划分为 5 个等级，值越低，说明越不利于块石结构路基降温。然后将其带入到块石结构路基降温效果评价的尖点突变模型中进行归一化计算，最终得到等级划分标准，如表 1 所示。

4.3 突变级数的计算与评价结果

(1) 评价指标的无量纲化

对冻土内部因素的 9 个评价指标以及块石层特征的 A_{211}, A_{212} 采用极差标准化方法，将其数据转化成[0, 1]之间的无量纲数值，正向指标与负向指

标的标准化公式存在差异，正向指标的标准化公式和负向指标的标准化公式分别为

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min(j)}}{x_{\max(j)} - x_{\min(j)}} \tag{1}$$

$$y_{ij} = \frac{x_{\max(j)} - x_{ij}}{x_{\max(j)} - x_{\min(j)}} \tag{2}$$

式中： x_{ij} 为原始数据， i 表示年份， j 表示指标； $x_{\max(j)}$ 为指标 j 的最大值； $x_{\min(j)}$ 为指标 j 的最小值； y_{ij} 为极差变换后的数据。

对环境因素的 A_{221} 采用以下公式进行标准化：

$$y_{ij} = \frac{x_{\max(j)} - x_{ij}}{x_{\max(j)} - x_r} \quad (x_{ij} > x_r) \tag{3}$$

式中： x_r 为参考值，设置为 0。

对块石层特征的 A_{213} 直接赋 0~1 范围的值，由于块石层位置不同对路基下部多年冻土的降温效果存在差异，其在边坡位置时降温效果明显低于在基底位置，故当块石层位于边坡位置时赋值为 0，在基底位置时赋值为 0.5，在边坡和基底位置均铺设块石层时赋值为 1。对 13 个底层评价指标采用以上方法进行无量纲处理，结果见表 2。第一冻融周期表示 2004 年 9 月~2005 年 8 月，第 7 冻融周期为 2010 年 9 月~2011 年 8 月，以此类推。

(2) 计算突变隶属函数值

根据突变模型的归一化公式，计算出底层评价指标的突变级数值，然后逐级向上综合，最终得到总突变隶属函数值，即为最终的评价结果，如表 3 所示。除第 1 个冻融周期外，其余周期块石结构路基的降温效果由强到弱依次为 U 型块石路基、开放块石基底路基、封闭块石基底路基、块石护坡加厚路基、封闭块石护坡路基。

4.4 结果分析

由图 4 可知，块石结构路基降温效果评价与实

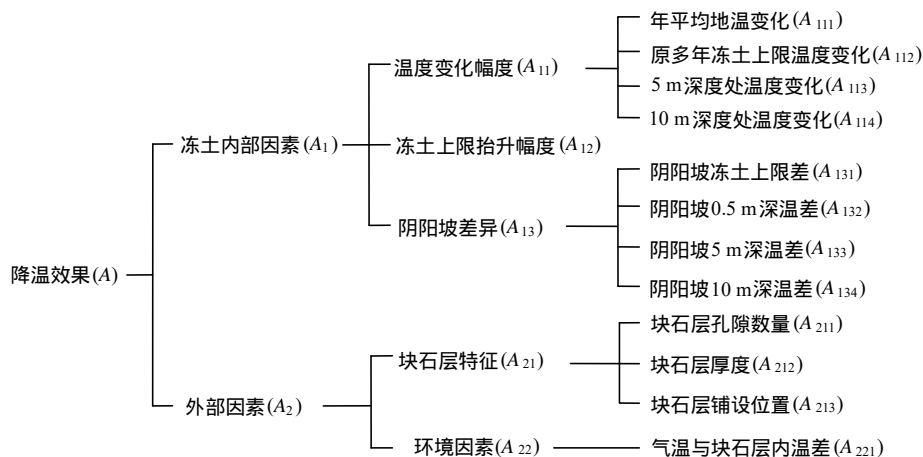


图 3 块石路基降温效果评价指标体系

Fig.3 Assessment indicator system for the cooling effect of crushed rock embankment

表 1 块石路基降温效果等级划分

Table 1 Classification of the cooling effect of crushed rock embankment

弱	较弱	一般	较强	强
0.00 ~ 0.52	0.52 ~ 0.68	0.68 ~ 0.81	0.81 ~ 0.91	0.91 ~ 1.00

表 2 评价指标的无量纲化

Table 2 Dimensionless evaluation indicators

冻融周期	路基类型	A ₁₁₁	A ₁₁₂	A ₁₁₃	A ₁₁₄	A ₁₂	A ₁₃₁	A ₁₃₂	A ₁₃₃	A ₁₃₄	A ₂₁₁	A ₂₁₂	A ₂₁₃	A ₂₂₁
1	块石护坡加厚路基	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.11	0.00	1.00	0.15	0.33	0.00	0.00
	封闭块石护坡路基	0.08	0.00	0.07	0.10	0.25	0.15	0.02	1.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.17
	U 型块石路基	0.00	0.55	0.25	0.03	0.76	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.96
	开放块石基底路基	0.00	0.50	0.25	0.06	0.91	0.08	0.00	0.00	0.00	0.80	0.33	0.50	0.81
	封闭块石基底路基	0.00	0.19	0.12	0.07	1.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.80	0.33	0.50	0.14
7	块石护坡加厚路基	0.00	0.09	0.15	0.15	0.18	0.90	0.70	0.00	0.00	0.15	0.33	0.00	0.23
	封闭块石护坡路基	0.16	0.03	0.08	0.12	0.26	0.38	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13
	U 型块石路基	0.85	0.95	0.96	0.91	0.72	0.80	0.66	0.25	0.00	1.00	1.00	1.00	0.93
	开放块石基底路基	0.86	0.86	0.85	0.84	0.63	0.75	0.44	0.00	0.00	0.80	0.33	0.50	0.79
	封闭块石基底路基	0.45	0.44	0.44	0.42	0.68	0.83	0.00	0.00	0.00	0.80	0.33	0.50	0.35
8	块石护坡加厚路基	0.03	0.10	0.16	0.16	0.24	0.95	0.38	0.00	0.00	0.15	0.33	0.00	0.30
	封闭块石护坡路基	0.20	0.05	0.09	0.13	0.20	0.92	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20
	U 型块石路基	0.93	1.00	1.00	0.96	0.61	0.90	0.41	0.50	0.00	1.00	1.00	1.00	0.93
	开放块石基底路基	0.94	0.88	0.87	0.86	0.59	0.96	0.05	0.00	0.00	0.80	0.33	0.50	0.73
	封闭块石基底路基	0.49	0.41	0.42	0.43	0.59	0.84	0.00	0.00	0.00	0.80	0.33	0.50	0.35
9	块石护坡加厚路基	0.05	0.12	0.17	0.17	0.27	0.92	0.48	0.00	0.00	0.15	0.33	0.00	0.28
	封闭块石护坡路基	0.24	0.08	0.12	0.14	0.36	0.68	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19
	U 型块石路基	1.00	0.94	0.99	1.00	0.70	0.77	0.39	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.95
	开放块石基底路基	0.99	0.83	0.85	0.87	0.65	0.93	0.48	0.00	0.00	0.80	0.33	0.50	0.76
	封闭块石基底路基	0.52	0.37	0.40	0.42	0.61	0.67	0.00	0.00	0.00	0.80	0.33	0.50	0.35

表 3 块石路基降温效果评价值

Table 3 Calculated results of the cooling effect of crushed rock embankment

冻融周期	块石护坡加厚路基	封闭块石护坡路基	U 型块石路基	开放块石基底路基	封闭块石基底路基
1	0.261	0.749	0.867	0.908	0.866
7	0.750	0.731	0.978	0.947	0.910
8	0.768	0.745	0.975	0.940	0.906
9	0.771	0.757	0.971	0.949	0.905

测地温曲线基本一致，对照表 1 块石结构路基降温效果等级划分标准，在工程设施完成初期，块石护坡加厚路基降温效果较差，其评价值为 0.261，表现为弱降温效果，在原多年冻土上限、5 m 深度处的

地温均表现出高于普通路基的情况，这是由于在工程完成之初，路基填土的热扰动作用导致土体温度短暂升高，而 U 型块石路基、块石基底路基能够消除路基填土的热扰动，从而在初期可以快速降低土体温度，因此其评价结果均在 0.86 以上，表现出较强的降温效果，随着工程设施降温作用的显现，路基下部土体温度持续降低，路基的降温效果不断强化，在第 6 ~ 7 个冻融周期地温变化基本达到相对稳定状态。

当地温达到稳定状态后，块石护坡加厚路基的评价结果为 0.75 ~ 0.77，降温效果表现一般，封闭块石护坡路基的评价值为 0.73 ~ 0.76，略低于块石护坡加厚路基，这是受到块石层厚度以及块石层边界状态的影响；封闭块石基底路基的评价结果为

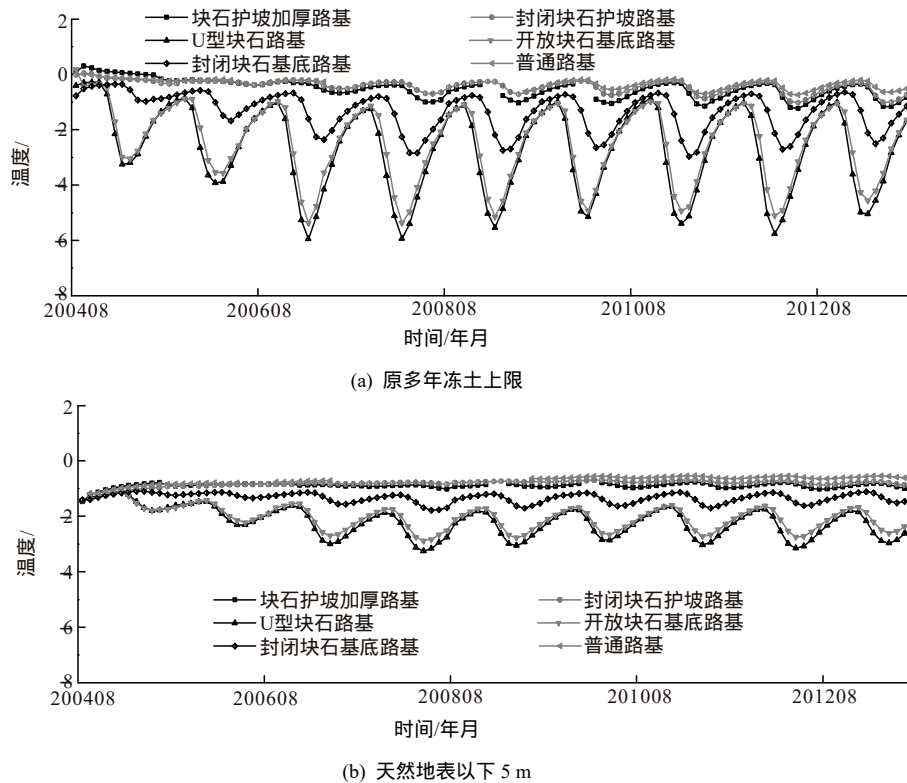


图 4 不同块石结构路基下部土体温度变化

Fig.4 Ground temperature variation for different crushed rock embankments

0.90 ~ 0.91, 降温效果较强, 开放块石基底路基的降温效果评价值为 0.94 ~ 0.95, 表现为强降温效果。由此可见, 在工程措施降温效果达到相对稳定状态后, 块石基底路基的降温效果明显强于块石护坡路基。这与块石结构路基的降温机制有关, 开放块石基底路基在冬季主要以通风作用产生的强迫对流来对路基下部土体进行降温, 降温速度较快、降温幅度较大; 而块石护坡路基虽有利于消除阴阳坡效应, 但块石护坡主要以自然对流和隔热保温两者组合的方式来对其下部土体进行降温, 降温速度慢、降温幅度小, 且冬半年的隔热保温减少了进入路基内部的“冷量”, 明显抑制路基填土以及下部土体的散热过程。在封闭块石基底路基中, 封闭的边界状态虽然削弱了强迫对流效应, 但依靠块石层内的热传导过程以及块石层孔隙的隔热保温作用, 其降温效果依然明显强于块石护坡路基。U型块石路基在降温作用达到相对稳定后, 其评价值大于 0.97, 表现为强降温效果, 在 5 种块石结构路基中降温效果最强, 这是由于 U 型块石路基是块石基底路基与块石护坡路基的复合路基, 其基底位置的块石层通过强迫对流可以强化外部环境与下部多年冻土的对流换热, 保护下部多年冻土; 边坡位置的块石层加强了外界与路基内部的自然对流、缓解了阴阳坡效应, 增加

进入到路基内部的“冷量”, 使其降温深度、降温幅度以及多年冻土上限抬升幅度在 5 种块石路基中均为最大。

将该试验段的实测数据进行整理, 从而对其评价结果进行验证。为了方便对两者进行对比分析, 本文选择原多年冻土上限处温度变化率、多年冻土上限抬升率、阴阳坡温差变化率, 与评价结果的对比结果如图 5 所示。就原多年冻土上限处温度变化率而言, 评价结果与其变化趋势基本一致, 评价结果越大, 原多年冻土上限处温度的降温速率越大, 说明其降温效果越强。就多年冻土上限抬升率而言, 评价结果与路基下部多年冻土上限抬升速率基本一致, 评价结果越大, 路基下部多年冻土上限抬升速率越大, 路基对下部多年冻土的保护作用越强, 其降温效果越强。在阴阳坡温差变化率方面, 除封闭块石基底路基外, 评价结果与阴阳坡温差的变化趋势基本一致, 当变化率大于 0 时, 评价结果越小, 阴阳坡温差变化率越大, 阴阳坡效应越明显, 其降温效果越差; 反之, 当变化率小于 0 时, 评价结果越大, 阴阳坡温差变化率越小, 说明阴阳坡间的温差在缩小, 其降温效果越强。综合上述, 通过实测结果的验证, 由突变级数法计算出的评价结果能够

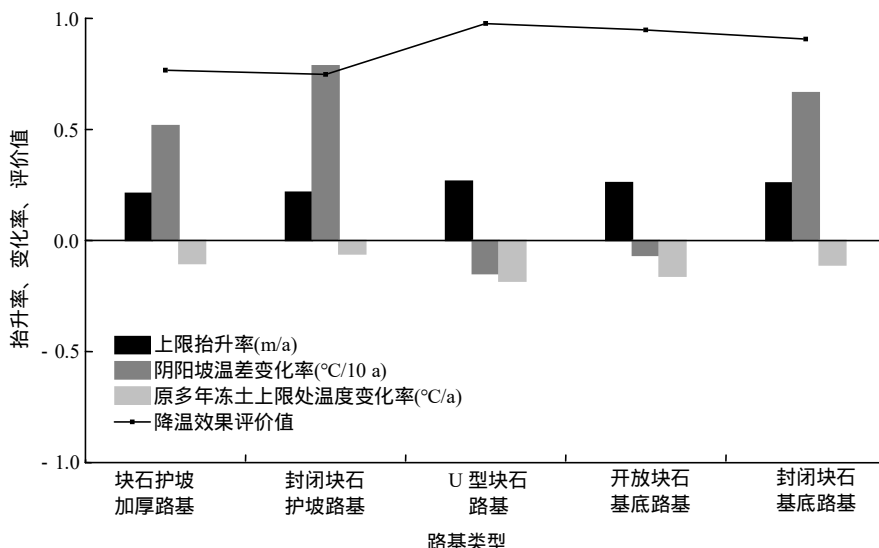


图 5 实测结果与评价结果的对比

Fig.5 Comparison between measured and calculated results

较为准确地反映块石结构路基降温效果强弱。

5 结 论

(1) 从冻土内部因素、外部因素两方面出发，建立块石结构路基降温效果评价模型，该模型包括 13 个底层评价指标，涉及地温变化幅度、多年冻土上限抬升幅度、阴阳坡差异、块石层特征以及环境因素。

(2) 运用突变级数法对块石结构路基降温效果进行评价，在一定程度上可以避免主观判断的干扰。结果表明，在地温变化达到稳定状态后，降温效果由强到弱依次为 U 型块石路基、开放块石基底路基、封闭块石基底路基、块石护坡加厚路基、封闭块石护坡路基。

(3) 在工程建设完成初期，块石护坡加厚路基易受路基填土的热扰动，表现为弱降温效果；在地温达到相对稳定状态后，U 型块石路基、开放块石基底路基为强降温效果，封闭块石基底路基表现出较好的降温效果，块石护坡加厚路基、封闭块石护坡路基降温效果一般，其中以 U 型块石路基表现最为突出，其降温效果的评价值大于 0.97。

(4) 将评价结果与实测的原多年冻土上限处温度变化率、上限抬升率以及阴阳坡温差变化率进行对比，认为评价结果能够较为准确地反映块石结构路基降温效果的强弱。

参考文献(References)：

[1] 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.(MA Wei, CHENG Guodong, WU Qingbai. Thoughts on solving frozen soil engineering problems in the construction of Qinghai—Tibet Railroad[J]. Science Technology and Review, 2005, 23(1) : 23 – 28.(in Chinese))

[2] 马立峰,刘建坤,牛富俊. 基于可靠度的多年冻土区路基稳定性评价及应用分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4) : 522 – 527.(MA Lifeng, LIU Jiankun, NIU Fujun. Reliability based AHP-Fuzzy synthetic evaluation system for stability of roadbeds in permafrost regions[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(4) : 522 – 527.(in Chinese))

[3] CHENG G D. A roadbed cooling approach for the construction of Qinghai–Tibet Railway[J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, 42(2) : 169 – 176.

[4] MA W, FENG G L, WU Q B, 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.

[5] 张明义,赖远明,喻文兵,等. 封闭与开放抛石路堤降温效果及机制对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15) : 2 671 – 2 677.(ZHANG Mingyi, LAI Yuanming, YU Wenbing, et al. Contrast experimental study on cooling effect and mechanism between closed and open riprapped-embankments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15) : 2 671 – 2 677.(in Chinese))

[6] LAI Y M, MA W D, ZHANG M Y, 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.

[7] 俞祁浩,钱 进,游艳辉,等. 块石路基对流特性实验研究[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2) : 411 – 417.(YU Qihao, QIAN Jin, YOU Yanhui, et al. Experimental study of convective characteristics of block-stone

- embankment[J]. Journal of Glaciology and Geocryology ,2012 ,34(2) : 411 – 417.(in Chinese)
- [8] PEI W S , ZHANG M Y , LI S Y , et al. Enhancement of convective cooling of the porous crushed-rock layer in cold regions based on experimental investigations[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer , 2017 , 87 : 14 – 21.
- [9] 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.(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.(in Chinese))
- [10] WU Q B , LU Z J , ZHANG T J , et al. Analysis of cooling effect of crushed rock-based embankment of the Qinghai—Xizang Railway[J]. Cold Regions Science and Technology , 2008 , 53(3) : 271 – 282.
- [11] 吴青柏,于 晖,蒋观利,等. 青藏铁路块石护坡温度场及路基冷却作用机制分析[J]. 岩土工程学报,2008 ,30(7) : 1 011 – 1 016.(WU Qingbai, YU Hui, JIANG Guanli, et al. Analysis of temperature features within crushed rock revetment and cooling mechanism of embankments for the Qinghai—Tibet Railway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2008 , 30(7) : 1 011 – 1 016.(in Chinese))
- [12] 孙志忠,马 巍,李东庆. 青藏铁路北麓河试验段块石路基与普通路基的地温特征[J]. 岩土工程学报,2008 ,30(2) : 303 – 308.(SUN Zhizhong ,MA Wei ,LI Dongqing .Ground temperature characteristics of block stone embankment and traditional embankment at Beiluhe along Qinghai—Tibet Railway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2008 , 30(2) : 303 – 308.(in Chinese))
- [13] LUO J , NIU F J , LIU M H , et al. Field experimental study on long-term cooling and deformation characteristics of crushed-rock revetment embankment at the Qinghai—Tibet Railway[J]. Applied Thermal Engineering , 2018 , 139 : 256 – 263.
- [14] 刘争平. 青藏铁路碎石护坡路基长期效果分析[J]. 铁道建筑 , 2014 ,(10) : 69 – 72.(LIU Zhengping. Analysis on long-term effects of rubble slope embankment on Qinghai—Tibet Railway[J]. Railway Engineering , 2014 , (10) : 69 – 72.(in Chinese))
- [15] 穆彦虎,马 巍,孙志忠,等. 青藏铁路块石路基冷却降温效果对比分析[J]. 岩土力学,2010 ,31(增 1) : 284 – 292.(MU Yanhu ,MA Wei ,SUN Zhizhong , et al. Comparative analysis of cooling effect of crushed rock embankment along the Qinghai—Tibet Railway[J]. Rock and Soil Mechanics , 2010 , 31(Supp.1) : 284 – 292.(in Chinese))
- [16] NIU F J , LIU M H , CHENG G D , et al. Long-term thermal regimes of the Qinghai—Tibet Railway embankments in plateau permafrost regions[J]. Science China Earth Sciences ,2015 ,58(9) : 1 669 – 1 676.
- [17] 刘明浩,牛富俊,林战举,等. 高温冻土区 U 型块石路基长期降温效果及变形特征研究[J]. 岩土力学 ,2017 ,38(11) : 3 305 – 3 310. (LIU Minghao , NIU Fujun , LIN Zhanju , et al. Long-term cooling effect and deformation characteristics of a U-shaped crushed rock embankment in warm permafrost regions[J]. Rock and Soil Mechanics , 2017 , 38(11) : 3 305 – 3 310.(in Chinese))
- [18] 郑明新,殷宗泽,吴继敏,等. 滑坡防治工程效果的模糊综合评价研究[J]. 岩土工程学报,2006 ,28(10) : 1 224 – 1 229.(ZHENG Mingxin , YIN Zongze , WU Jimin , et al. Post-fuzzy comprehensive evaluation of effectiveness of landslide control[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2006 , 28(10) : 1 224 – 1 229.(in Chinese))
- [19] 曹 伟,陈 继,张 波,等. 青海柴木铁路多年冻土区片石路基工程措施效果的模糊评价[J]. 冰川冻土 ,2015 ,37(6) : 1 555 – 1 562. (CAO Wei , CHEN Ji , ZHANG Bo , et al. Fuzzy evaluation of the effect of rubble roadbed engineering in permafrost regions along the Chaidar-Muli Rail-way in Qinghai Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology , 2015 , 37(6) : 1 555 – 1 562.(in Chinese))
- [20] 赵志明. 工程治理后岩质边坡稳定性评价标准及方法研究——以元磨高速公路为例[博士学位论文][D]. 成都:西南交通大学,2013.(ZHAO Zhiming. Research on stability evaluation criterion and method for engineering treatment rock slope—Based on Yuan-Mo expressway[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu : Southwest Jiaotong University , 2013.(in Chinese))
- [21] 水强强. 安康郑家湾滑坡治理工程效果评价[硕士学位论文][D]. 西安:长安大学,2017.(SHUI Qiangqiang. Effect evaluation of Zhengjiawan landslide treatment project in Ankang County[M. S. Thesis][D]. Xi'an : Chang'an University , 2017.(in Chinese))
- [22] 罗博宇. 四川省崩塌灾害特征及防治工程效果评价[硕士学位论文][D]. 成都:成都理工大学,2017.(LUO Boyu. The characteristic of collapse and effectiveness evaluation of its prevention and control projects in Sichuan Province[M. S. Thesis][D]. Chengdu : Chengdu University of Technology , 2017.(in Chinese))
- [23] ZHANG W W , XU X H , CHEN X H. Social vulnerability assessment of earthquake disaster based on the catastrophe progression method : A Sichuan Province case study[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction , 2017 , 24 : 361 – 372.
- [24] 马 冰,王翊虹,丁桂伶,等. 基于突变理论的杏园村泥石流危险性评价[J]. 路基工程 ,2017 ,(4) : 226 – 232.(MA Bing ,WANG Yihong , DING Guiling , et al. Assessment on debris flow hazard of Xingyuan village based on catastrophe theory[J]. Subgrade Engineering , 2017 , (4) : 226 – 232.(in Chinese))
- [25] 文畅平,肖宏彬,曾娟娟. 基于突变级数法的滑坡稳定性评价[J]. 自然灾害学报,2015 ,24(2) : 68 – 73.(WEN Changping , XIAO Hongbin , ZENG Juanjuan. Evaluation of landslide stability based on catastrophe progression method[J]. Journal of Natural Disasters ,

- 2015, 24(2) : 68 – 73.(in Chinese))
- [26] 王明慧,张 桥,凌飞翔,等. 基于突变级数法的绿色高速铁路施工评价研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(2) : 76 – 80.(WANG Minghui ,ZHANG Qiao ,LING Feixiang ,et al. Research on the green construction evaluation of high-speed railway based on catastrophe progression method[J]. Journal of Railway Engineering Society , 2017 , 34(2) : 76 – 80.(in Chinese))
- [27] 潘海泽,贺 建,陈梦捷,等. 基于突变级数法的地铁车站基坑施工风险研究[J]. 地下空间与工程学报,2017,13(3) :840 – 845.(PAN Haize , HE Jian , CHEN Mengjie , et al. Research about construction risk of foundation pit of subway station based on catastrophe progression method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering , 2017 , 13(3) : 840 – 845.(in Chinese))
- [28] LIU Y C , SONG Z G. Study on the adaptability of block-rock embankment in permafrost regions[J]. Sciences in Cold and Arid Regions , 2017 , 9(4) : 412 – 419.
- [29] 曹 伟,盛 煜,齐吉林. 基于突变级数法的青海木里矿区冻土环境评价[J]. 煤炭学报, 2008 , 33(8) : 881 – 886.(CAO Wei , SHENG Yu , QI Jilin. Assessment of the permafrost environment in the Mulimining area in Qinghai Province based on catastrophe progression method[J]. Journal of China Coal Society , 2008 , 33(8) : 881 – 886.(in Chinese))
- [30] 李彩惠,霍海鹰,李雅洁,等. 基于突变级数模型的城市低碳竞争力评价及障碍因子诊断分析[J]. 资源科学 ,2015 ,37(7) :1 474 – 1 481. (LI Caihui , HUO Haiying , LI Yajie , et al. Evaluation of low-carbon city competitiveness and its obstacle indicators analysis in Shandong Province[J]. Resources Science , 2015 , 37(7) : 1 474 – 1 481.(in Chinese))
- [31] 梁桂兰,徐卫亚,何育智,等. 突变级数法在边坡稳定综合评判中的应用[J]. 岩土力学, 2008 , 29(7) : 1 895 – 1 899.(LIANG Guilan , XU Weiya , HE Yuzhi , et al. Application of catastrophe progression method to comprehensive evaluation of slope stability[J]. Rock and Soil Mechanics , 2008 , 29(7) : 1 895 – 1 899.(in Chinese))
- [32] 宋志刚. 多年冻土地区块碎石路基适用性评价研究[硕士学位论文][D]. 北京 : 北京交通大学, 2012.(SONG Zhigang. Study on the adaptability of block-rock-embankment in permafrost regions[M. S. Thesis][D]. Beijing : Beijing Jiaotong University , 2012.(in Chinese))
- [33] 武珊珊. 基于修正突变级数法的天然气管道环境风险评价研究[硕士学位论文][D]. 合肥 : 合肥工业大学, 2017.(WU Shanshan. Environmental risk assessment of natural gas pipelines by using modified catastrophe progression method[M. S. Thesis][D]. Hefei : Hefei University of Technology , 2017.(in Chinese))
- [34] 吴青柏,董献付,蒋观利. 开放和封闭条件下块石结构路基下部土体降温效果差异[J]. 岩石力学与工程学报, 2006 , 25(12) : 2 566 – 2 571.(WU Qingbai , DONG Xianfu , JIANG Guanli. Cooling effect differences of soil beneath open and closed block-stone embankments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2006 , 25(12) : 2 566 – 2 571.(in Chinese))
- [35] WU Q B ,GE L ,LIU Y ,Z et al. Thermal performance of embankment within crushed rock layer along Qinghai — Tibet Railway[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering ,2010 ,20(3) : 210 – 217.