

# 青藏高原多年冻土区铁路路基 阴阳坡表面温差的计算

丑亚玲, 盛煜, 马巍

(中国科学院冻土工程国家重点实验室, 甘肃兰州 730000)

**摘要:** 多年冻土区修筑道路工程后, 由于受坡向的影响, 不同道路走向的路基两边坡热状况不同, 从而导致路基下伏冻土的融化形态不同。鉴于青藏高原独特的自然环境以及实测地温和气象资料获取的困难性, 根据青藏铁路沿线有限的实测地温, 通过统计的方法建立不同道路走向路基阴阳坡浅层(0.5 m)地温差与太阳辐射差的回归方程, 并对该回归方程进行验证。结果表明, 回归方程能较好反映北麓河地区不同走向铁路路基两边坡的年平均温差, 并可为高原多年冻土区道路建设和维护提供可靠的科学依据及保障。

**关键词:** 土力学; 冻土路基; 路基走向; 阴阳坡; 太阳辐射

**中图分类号:** TU 43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)增 2 - 4102 - 06

## CALCULATION OF DIFFERENCE IN TEMPERATURE BETWEEN SUNNY SLOPE AND SHADY SLOPE ALONG RAILWAYS IN PERMAFROST REGIONS IN QINGHAI—TIBET PLATEAU

CHOU Yaling, SHENG Yu, MA Wei

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

**Abstract:** The temperature variations are the hot issues in freeze soil mechanics. After roadbed being built in permafrost regions, there will be dissimilar thermal regime on slopes because of different roadbed orientations, which will lead to distinct thawing morphologies under the embankment. In view of the specific natural environment of Qinghai—Tibet Plateau, field monitored ground temperature and meteorological data are difficult to obtain, therefore a regression equation by statistics method between the temperature difference of shallow ground(0.5m) and solar radiation difference on slopes is adopted, and the equation is validated, which can better disclose the mean annual temperature difference on slopes of railway roadbed along different routes in Beiluhe. The equation may provide the dependable science basis for the road construction and maintenance on permafrost regions of plateau.

**Key words:** soil mechanics; roadbed in permafrost regions; roadbed strikes; sunny slope and shady slope; solar radiation

**收稿日期:** 2006 - 07 - 03; **修回日期:** 2006 - 10 - 15

**基金项目:** 国家自然科学基金重大项目(90102006); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412704); 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1 - S0W - 04)

**作者简介:** 丑亚玲(1976 - ), 女, 1998年毕业于昆明理工大学资源开发与利用系矿物加工工程专业, 现为博士研究生, 主要从事冻土工程方面的研究工作。E-mail: chouyaling@lzb.ac.cn

## 1 引 言

在多年冻土区修筑道路工程后, 由于工程的扰动作用改变了地表与外界的热交换条件, 打破了原有的热平衡状态, 使冻土路基温度场变化十分复杂。其中, 由于受坡向的影响, 路基两侧边坡的太阳辐射、地表湍流等边界条件不同, 形成路基横向热交换的不对称, 从而导致下伏多年冻土融化形态的不对称而引起众多路基病害。盛煜等<sup>[1]</sup>的实测数据表明, 青藏铁路 DK1139+670(线路走向 SW40°)阴阳坡面下 0.5 m 处年平均温差为 3 °C 以上。214 国道 K369+100(线路走向 WS24°)阴阳坡面下 0.3 m 处年平均温差达 4.22 °C<sup>[2]</sup>。事实上, 任意走向的冻土路基两侧表面温度均存在一定差异, 严格意义上的对称路基是不存在的<sup>[3]</sup>。吴紫汪等<sup>[4]</sup>根据风火山实测资料指出, 南北走向的路基东、西坡面之间平均温差达 2.4 °C。我国青藏公路、青康公路均近似呈南北走向, 但这 2 条道路在多年冻土区的路基温度场均是不对称的<sup>[3]</sup>。这种由于路基横向温度场不对称导致的纵向裂缝问题已引起众多科研人员的关注<sup>[5-7]</sup>, 但目前较多的多年冻土区路基温度场数值计算研究并未考虑路基两边坡表面的温差, 而仍以考虑热对称为主, 其主要原因是缺乏相关资料。由于路基越高, 阴阳坡效应越强烈, 因此仍以对称边界条件分析多年冻土融化形态显然是不合理、不安全的。

地表和路基水平表面温度一直倍受国内外学者<sup>[4, 8-10]</sup>的关注, 但并未进一步研究边坡表面的温度。胡泽勇等<sup>[11]</sup>根据西藏安多实测资料给出了可反演青藏铁路路基表面温度的经验公式。王可丽和程国栋<sup>[12]</sup>建立了热力学数值模式(RSTM), 该模式可用于高海拔青藏铁路全线的任意坡度和走向的路基表面热状况的定量化研究与应用。以上 2 种方法从不同角度给出了地表和路基水平表面及边坡温度的获取方法, 但在实际操作中需要一定的实测气象资料且计算过程比较复杂。王铁行和窦明健<sup>[13]</sup>通过对实测结果的分析指出, 冻土路基中存在着显著的横向热差异问题。实测资料能很好地反映路基实际温度场, 但由于受青藏高原独特的自然地理环境的制约, 野外实测地温资料及实测气象数据的采集非常困难, 尤其是缺乏长周期的观测数据。

影响冻土路基温度场的因素(如云、降水、风等)很复杂, 而太阳辐射是导致地、气温变化最直接的因子<sup>[11]</sup>, 同时也应考虑到青藏高原海拔高、空气稀

薄干洁、太阳辐射通过的大气路程较短、透明系数大、日照时数长、降水量少以及太阳辐射被削弱的少<sup>[5]</sup>等因素; 实测资料<sup>[2]</sup>和相关研究结果<sup>[14]</sup>表明, 阴阳坡温度差异主要是由阴阳坡太阳辐射差所导致。本文所用实测温度均指浅层(0.5 m)地温, 野外观测表明该深度地温对云、风等随机因素变化的影响已很微弱, 其变化主要由太阳辐射决定。因此, 本文只考虑太阳辐射, 利用青藏铁路路段 DK1139+618~DK1139+950(北麓河)处的实测地温数据, 建立该地理坐标下不同道路走向路基两边坡表面浅层地温差的简单计算关系式, 以便为高原多年冻土区的道路建设和维护提供可靠的科学依据及保障。

## 2 观测场地及观测方法

北麓河地理坐标为: 34.85°N, 92.94°E, 海拔高度为 4 637 m。试验路段 DK1139+618~DK1139+950 处孤山山脚的残坡积地带, 地表纵向呈拱形, 横向呈斜坡, 地面高程为 4 635~4 639 m, 路基填土高度为 2.5~4.5 m(中心部位), 路基填料为砾碎石土。试验路段地表植被稀疏, 覆盖率不足 20%。该路段地表为厚约 1 m 的细砂加残破积砂岩片石, 下部至 2.5 m 范围以黄棕色粉质黏土为主, 多年冻土上限为 2.5 m 左右, 上限以下普遍存在 1~4 m 厚的含土冰层, 含土冰层呈悬浮状构造。含土冰层以下以全风化棕红色泥岩为主, 局部夹有灰色强风化砂岩。岩芯裂隙发育, 裂隙中常常被纯冰充填, 在局部形成饱冰、富冰冻土。试验路段多年冻土年平均地温从路段 DK1139+670 的-0.28 °C 逐渐降低至路段 DK1139+940 的-0.69 °C, 属于高温极不稳定和高温不稳定多年冻土区。

该试验路段纵向走向(拉萨向)为 SW40°, 边坡坡度为 1:1.5, 路基填料为砂砾土, 路基修筑后左右边坡形成较为明显的阴阳坡(左侧为阳面, 右侧为阴面)。路基完成 0.5 a 以后(2002 年 6 月), 在路段 DK1139+670, DK1139+820 和 DK1139+940 沿路基周边 0.5 m 深度布设了测温探头, 测温探头间隔 0.5 m。图 1 为试验断面探头布设示意图。探头采用中国科学院冻土工程国家重点实验室自制组装的热敏电阻观测, 人工观测电阻时采用 0.1 Ω 分辨率的 FlukeIV 多功能万用表测试, 通过实验室标定的参数将电阻值换算为温度, 其精确度达 0.02 °C。测温孔的布设采用人工观测, 观测频率为 1 次/(10 d)。

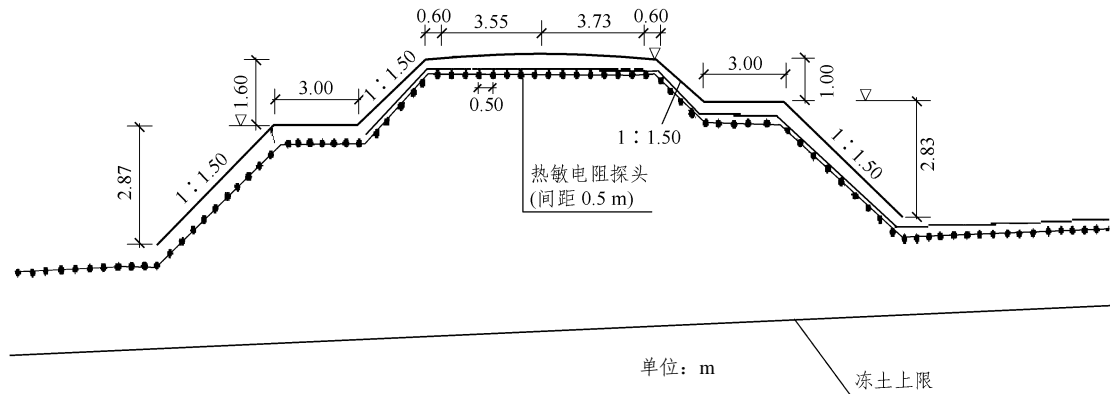


图1 观测断面探头布设示意图

Fig.1 Schematic diagram of distribution of probes of observation section

截至 2004 年 6 月 29 日的观测资料表明, 3 个断面的路基周边温度值及变化过程相差不大, 因此, 本文以路段 DK1139+670 的观测资料为例, 寻求边坡浅层地温差与太阳辐射间的关系。分析数据时将坡面下 0.5 m 处监测的温度值进行平均代表路基阴阳坡面上的浅层地温。

### 3 路基表面太阳辐射

#### 3.1 水平地面的太阳辐射量

在不考虑大气(包括大气光学质量)影响的情况下, 水平地面上吸收的太阳辐射量为

$$R = \int_{t_1}^{t_2} S_0 \sin h dt \quad (1)$$

式中:  $t_1$  为太阳日出时刻;  $t_2$  为太阳日落时刻;  $S_0$  为太阳常数, 在不考虑大气影响条件下,  $S_0 = 1\ 353.3\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $h$  为太阳高度角, 是太阳光线与水平面的夹角。

#### 3.2 斜面上的太阳辐射量

斜面上吸收的太阳辐射能可表示为

$$R_{s/\text{slope}} = R \cos i / \sin h \quad (2)$$

式中:  $R_{s/\text{slope}}$  为坡面每平方米受到的太阳辐射量;  $i$  为太阳光线在斜面上的入射角, 受坡度、坡向、纬度、赤纬和时角的控制;  $\cos i$  和  $\sin h$  可分别表示为

$$\left. \begin{aligned} \cos i &= \cos a \sinh + \sin a \cosh \cos(\beta - \eta) \\ \sin h &= \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $a$  为边坡坡度;  $\eta$  为线路方位角;  $\phi$  为地理纬度;  $\delta$  为赤纬;  $\theta$  为时角;  $\beta$  为太阳方位角, 是太阳光线在水平面上的投影与当地子午线的夹角, 且有

$$\cos \beta = \cos \delta \sin \theta / \cosh \quad (4)$$

#### 3.3 赤纬和时角

赤纬  $\delta$  是在赤道坐标系中, 从天赤道起沿太阳的赤经圈到太阳的角距离, 太阳在天赤道以北为正, 以南为负, 变化范围为  $-23.44 \sim +23.44$ , 其计算公式为

$$\delta = 23.45 \sin[360^\circ(284+N)]/365 \quad (5)$$

式中:  $N$  为日序, 即 1 月 1 日为 1, 12 月 31 日为 365。

时角描述太阳在 24 h 内的运动情况, 以当地真太阳时正午为  $0^\circ$ , 下午为正, 上午为负, 每小时为  $15^\circ$ , 即

$$\theta = 15(t-12) \quad (6)$$

日出和日落之间的时间间隔为日长, 在日出和日落时刻太阳高度角为  $0$ 。即

$$\left. \begin{aligned} \sin h = 0 &= \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \theta_r \\ \theta_r &= \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \\ \theta_s &= -\theta_r \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中:  $\theta_r$ ,  $\theta_s$  分别为日出和日落时刻。

#### 3.4 路基阴阳坡上的太阳辐射量

根据以上公式及胡泽勇等<sup>[11]</sup>的研究结果, 路基阴阳坡上接受的太阳辐射量为

$$\begin{aligned} R_{r/\text{slope}} &= R \cos i_r / \sin h \\ R_{l/\text{slope}} &= R \cos i_l / \sin h \end{aligned}$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} \cos i_r &= \cos a_r \sinh + \sin a_r \cosh \cos(\beta - \eta_r) \\ \cos i_l &= \cos a_l \sinh + \sin a_l \cosh \cos(\beta - \eta_l) \\ \eta_r &= \eta_l + \pi \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中:  $i_t$  为太阳光线在阴坡面上的入射角;  $a_r$  为阴坡面边坡坡度;  $i_l$  为太阳光线在阳坡面上的入射角;  $a_l$  为阳坡面边坡坡度;  $\eta_l$  为路基纵向与正东方向的夹角, 偏北为正, 对 EW 向路基, 取  $\eta_l = 0^\circ$ , 对南北走向路基, 取  $\eta_l = 90^\circ$ 。

### 4 路基边坡表面浅层地温与太阳辐射的关系

#### 4.1 阴阳坡表面温差与太阳辐射差关系的建立

图 2 给出了 2002 年 6 月 30 日~2004 年 6 月 29 日路基实测阴阳坡表面温差与太阳辐射差随时间变化关系。从图 2 中可以看出, 温差大的季节阴阳坡表面辐射差也大, 而且温差与太阳辐射差大的季节均在冬季。这一点与实测结果是一致的, 更进一步说明了太阳辐射差异是导致两边坡温度差异的主要原因。因此, 可以把阴阳坡表面温差与太阳辐射差用函数形式表示为

$$\Delta T = f(\Delta Q) \tag{9}$$

式中:  $\Delta T$  为实测阴阳坡表面温差( $^\circ\text{C}$ ),  $\Delta Q$  为阴阳坡太阳辐射差( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )。

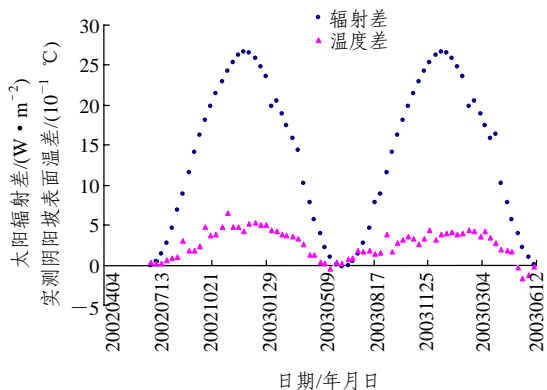


图 2 实测阴阳坡表面温差与太阳辐射差随时间变化关系  
Fig.2 Temperature difference and solar radiation difference on slopes changing with time

图 3 给出了青藏铁路路段 DK1139+670 实测阴阳坡表面温差与太阳辐射差相关性分布图。从图 3 中数据的分布可以看出, 阴阳坡温差与太阳辐射差之间呈较好的线性关系  $R^2 = 0.79377$ , 拟合的回归方程为

$$\Delta T = 0.01428\Delta Q + 0.34756 \tag{10}$$

式(10)能否较好地反映阴阳坡温差与太阳辐射差之间的关系, 还需用实际观测数据来验证。考虑

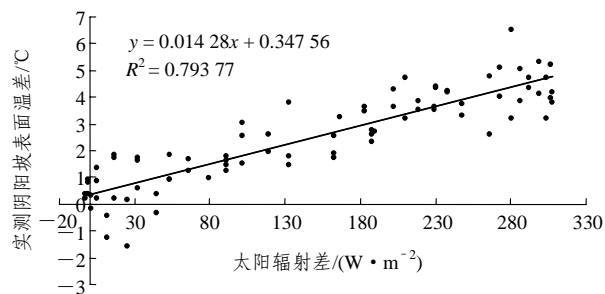


图 3 实测阴阳坡表面温差与太阳辐射差相关性分布图  
Fig.3 Correlation distribution between temperature difference and solar radiation difference

到计算值与实测值间有一定偏差, 故对式(10)加一修正项, 于是阴阳坡温差可表示为

$$\Delta T = 0.01428\Delta Q + 0.34756 + \Delta E \tag{11}$$

式中:  $\Delta E$  为修正项, 该项为由式(10)的计算值与实测值的偏差按相同月份求的平均值。

表 1 给出了阴阳坡温差计算值的月平均偏差。其中,  $E_{r1}$  为用回归方程式(10)求出的阴阳坡温差对实测值的绝对偏差;  $E_{r2}$  为用修正过的回归方程式(11)求出的阴阳坡温差对实测值的绝对偏差;  $P_{er1}$  为回归方程式(10)计算结果的相对偏差,  $P_{er2}$  为回归方程式(11)计算结果的相对偏差。

表 1 阴阳坡温差计算值的月平均偏差

Table 1 Monthly averaged deviation of the calculated values

月份	$E_{r1}/(^\circ\text{C})$	$E_{r2}/(^\circ\text{C})$	$\Delta E$	$P_{er1}/\%$	$P_{er2}/\%$
1	0.52	0.56	0.23	12	10
2	0.51	0.18	0.52	12	4
3	0.58	0.32	0.29	12	9
4	0.27	0.33	0.38	19	22
5	0.14	0.18	-0.15	33	18
6	0.24	0.03	0.14	37	11
7	0.10	0.17	0.11	37	16
8	0.38	0.19	-0.38	41	21
9	0.93	0.40	-0.93	26	20
10	0.15	0.28	-0.15	9	8
11	0.44	0.38	0.39	9	8
12	0.61	0.58	-0.61	16	15

用式(10)计算的阴阳坡温差与实测阴阳坡温差绝对偏差最大为  $0.93^\circ\text{C}$ , 最小为  $0.10^\circ\text{C}$ , 相对偏差最大为 41%, 最小为 9%; 用式(11)计算的阴阳坡

温差与实测阴阳坡温差绝对偏差最大为 0.58 °C，最小为 0.03 °C，相对偏差最大为 22%，最小为 4%；绝对偏差在冷季较大，暖季较小；相对偏差在暖季较大，冷季较小。这是由于暖季太阳高度角较高，阴阳坡实际温差小的缘故。图 4 给出了实测温差、回归温差及修正后温差的比较图，修正后的拟合式相对比回归方程计算的值更接近实测值。

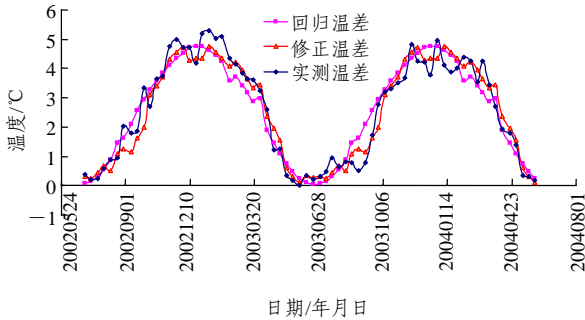


图 4 计算值与实测值的比较

Fig.4 Comparison between the calculated and observed values

当计算年平均温差时， $\Delta E$  所起作用相对微弱可以忽略不计。所以，当阴阳坡坡度相等时，可以将式(10)进行推广用来计算阴阳坡年平均温差，得出不同走向路基阴阳坡表面浅层地温差与太阳辐射差的关系为

$$\Delta T = f(\Delta Q) = 2a R \cosh s \sin \alpha_r / \cos(\beta - \eta_r) + b \quad (12)$$

式中： $a$ ， $b$  均为常数，可分别取为  $a = 0.014 28$  和  $b = 0.347 56$ 。

### 4.2 验证

根据式(12)计算出不同路基走向两边坡表面的年平均温差，然后通过程国栋等<sup>[6]</sup>根据王可丽和程国栋<sup>[12]</sup>建立的数值模式(RSTM)计算结果来验证。表 2 给出了用式(12)计算的北麓河不同路基走向的

表 2 不同路基走向的阴阳坡表面 0.5 m 深度处的年平均温差

Table 2 Temperature difference of shallow ground(0.5 m) of slopes along different embankment strikes

路基走向/(°)	年平均温差/°C
0	3.70
15	3.47
30	3.14
45	2.61
60	1.95
75	1.16
90	0.36

阴阳坡表面 0.5 m 深度处的年平均温差(0°指 EW 走向，90°指 SN 走向)。利用傅立叶第一定律<sup>[15]</sup>计算出不同路基走向的阴阳坡表面年平均温差如表 3 所示，式(12)计算温差与数值模式计算温差对比情况如图 5 所示，由图可知，二者吻合较好。

表 3 不同路基走向的阴阳坡表面年平均温差

Table 3 Temperature difference of surfaces of the slopes along different embankment strikes

路基走向/(°)	年平均温差/°C
0	4.09
15	3.83
30	3.47
45	2.88
60	2.15
75	1.28
90	0.40

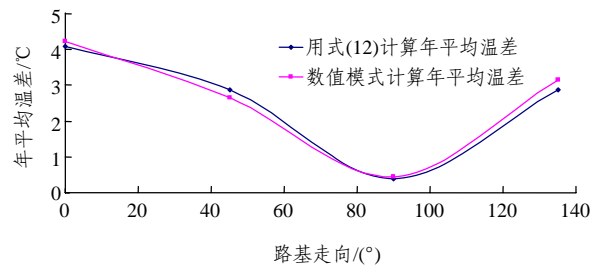


图 5 式(12)计算年平均温差与数值模式计算年平均温差对比

Fig.5 Comparison between the calculated values by Eq.(12) and RSTM values

## 5 结论

本文通过利用北麓河试验路段实测地温数据和太阳辐射值，建立了不同走向路基阴阳坡表面浅层(0.5 m 深度处)地温差与太阳辐射差的简单近似函数关系(阴阳坡坡度均为 1 : 1.5):  $\Delta T = f(\Delta Q) = 2aR \cosh s \sin \alpha_r / \cos(\beta - \eta_r) + b$ ，并通过程力栋等<sup>[6]</sup>建立的数值模式(RSTM)计算结果验证了其可行性为高原多年冻土区道路建设和维护提供了可靠的科学依据及保障。

### 参考文献(References):

[1] 盛煜, 马巍, 温智, 等. 多年冻土区铁路路基阴阳坡面热状况差异分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3 197 - 3 201.

- (SHENG Yu, MA Wei, WEN Zhi, et al. Analysis of difference in thermal state between south faced slope and north faced slope of railway embankment in permafrost region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3 197 - 3 201.(in Chinese))
- [2] 丑亚玲, 盛煜, 李金平. 多年冻土区公路高路基横向热状况不对称性分析[J]. 路基工程, 2007, (2): 4 - 6.(CHOU Yaling, SHENG Yu, LI Jinping. Analysis of transverse thermal asymmetry of highway high embankment in permafrost region[J]. Roadbed Engineering, 2007, (2): 4 - 6.(in Chinese))
- [3] 臧恩穆, 吴紫汪. 多年冻土退化与道路工程[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1999: 73 - 74.(ZANG Enmu, WU Ziwang. Degradation of permafrost and roadway engineering[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1999, 73 - 74.(in Chinese))
- [4] 吴紫汪, 程国栋, 朱林楠, 等. 冻土路基工程[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1988: 43 - 48.(WU Ziwang, CHENG Guodong, ZHU Linnan, et al. Roadbed engineering in permafrost region[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1988: 43 - 48.(in Chinese))
- [5] 孙永福. 青藏铁路多年冻土区工程的研究与实践[J]. 冰川冻土, 2005, 27(2): 153 - 162.(SUN Yongfu. Permafrost engineering in the Qinghai - Tibet railway: research and practice[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(2): 153 - 162.(in Chinese))
- [6] 程国栋, 江灏, 王可丽, 等. 冻土路基表面的融化指数与冻结指数[J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 603 - 607.(CHENG Guodong, JIANG Hao, WANG Keli, et al. Thawing index and freezing index on the embankment surface in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(6): 603 - 607.(in Chinese))
- [7] WU Q B, LIU Y Z, ZHANG J M, et al. A review of recent frozen soil engineering in permafrost along Qinghai-Tibet highway, China[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2002, 13(3): 199 - 205.
- [8] 李祝龙, 章金钊, 武愨民. 冻土路基热学计算研究[J]. 公路, 2000, (2): 9 - 12.(LI Zhulong, ZHANG Jinzhao, WU Jinming. Study on thermal calculation of frozen soil embankment[J]. Highway, 2000, (2): 9 - 12. (in Chinese))
- [9] GOERING D J, KUMAR P. Winter-time convection in open-graded embankments[J]. Cold Regions Science and Technology, 1996, 24: 57 - 74.
- [10] LING F, ZHANG T J. A numerical model for surface energy balance and thermal regime of the active layer and permafrost containing unfrozen water[J]. Cold Region Sciences and Technology, 2002, 30: 1 - 15.
- [11] 胡泽勇, 钱泽雨, 程国栋, 等. 太阳辐射对青藏铁路路基表面热状况的影响[J]. 冰川冻土, 2002, 24(2): 121 - 128.(HU Zeyong, QIAN Zeyu, CHENG Guodong, et al. Influence of solar radiation on embankment surface thermal regime of the Qinghai-Tibet railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(2): 121 - 128.(in Chinese))
- [12] 王可丽, 程国栋. 青藏铁路沿线地表和路基表面热力学模式(I)物理过程与实验方案[J]. 冰川冻土, 2002, 24(6): 759 - 764.(WANG Keli, CHENG Guodong. Thermodynamic model of the ground and roadbed surface along the Qinghai-Tibet Railway (I): physical process and experimental scheme[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(6): 759 - 764.(in Chinese))
- [13] 王铁行, 窦明键. 多年冻土地区路堤热差异分析[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(1): 45 - 47.(WANG Tiehang, DOU Mingjian. Analysis of transverse thermal difference of embankment in permafrost region[J]. Coal Geology and Exploration, 2004, 32(1): 45 - 47.(in Chinese))
- [14] 孙增奎, 王连俊, 白明洲, 等. 青藏铁路多年冻土路堤温度场的有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3 454 - 3 459. (SUN Zengkui, WANG Lianjun, BAI Mingzhou, et al. Finite element analysis on temperature field of Qinghai-Tibet Railway embankment on permafrost[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3 454 - 3 459.(in Chinese))
- [15] 徐敦祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 105 - 106.(XU Xiaozu, WANG Jiacheng, ZHANG Lixin. Physics of frozen ground[M]. Beijing: Science Press, 2001: 105 - 106.(in Chinese))