**文章编号:**1000-8608(2017)04-0403-08

# 强蒸发地区路基温度分布特性及其预估模型

冉武平1,李玲\*1,张 翛2

(1.新疆大学建筑工程学院,新疆乌鲁木齐 830047;

2. 山西省交通科学研究院 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室,山西太原 030006)

摘要:为准确掌握强蒸发地区受路面覆盖效应影响的砾类土路基温度场的时空分布特性和 规律,通过全天候温度监测,展开该路基温度场分布特性的研究.研究结果表明,不同深度处 的月平均温度总体呈余弦或正弦函数分布,但相位角随路基深度和升降温过程的不同而变 化;受路面覆盖效应影响较无路面覆盖效应影响的路基内低温峰值略低而高温峰值略高,但 其分布规律基本一致;温度梯度在不同的温度条件以及在不同深度处分布也不尽相同,最大 温度梯度在低温季节下的 90~150 cm 深度范围内.在此基础上针对升温过程和降温过程,提 出了温度场预估模型,该模型具有较高的相关性,并为强蒸发地区考虑路面覆盖效应影响的 路基内部水汽迁移和湿度分布特性研究提供基础.

关键词: 砾类土路基;温度分布特性;强蒸发地区;路面覆盖效应;预估模型 中图分类号:TU443 文献标识码:A doi:10.7511/dllgxb201704011

#### 0 引 言

路基作为道路结构的支撑体系,其工作性能 受环境影响显著.尽管湿度是影响路基强度和变 形的关键因素,但路基温度也是影响路基工作性 能的主要因素,表现在季冻区的路基冻融循环、多 年冻土区的水热平衡以及强蒸发地区的温度梯度 引起的路基水汽迁移,就强蒸发地区而言,周期温 差大、蒸发量远大于降水量,从而致使该地区路基 内热量传导和水汽迁移现象非常显著,因而一方 面路基受路面覆盖效应影响显著,路基湿度与温 度分布规律特殊,另一方面路基湿度受季节影响 显著,尤其是砾类土路基,水汽迁移是路基内部湿 度变化的关键因素.水汽迁移受温度梯度和湿度 梯度控制[1],但对强蒸发地区砾类土路基,内部温 度变化的频繁程度和剧烈程度更为显著,砾类土 毛细现象微弱,基质吸力也较小,故温度梯度成为 影响路基湿度的关键所在,因此明确强蒸发地区 路基温度的时空分布特性以及温度预估,对于受 路面覆盖效应影响的强蒸发地区路基湿度的把握 及工作性能评估意义重大.

路基温度场研究主要集中在两方面,其一是 基于融沉和冻胀的季冻区路基温度场的研究<sup>[2-3]</sup>, 其二则是基于水热平衡和冰冻病害的多年冻土区 路基温度场的研究,并针对性地提出各种状况下 的温度场特性以及预估方法<sup>[4-7]</sup>.温度场的研究方 法主要集中于数值分析、理论分析以及现场检测 等手段.长安大学的学者基于多年冻土区的气候 环境和道路结构特点,通过数值模拟对多年冻土 区路基温度场进行研究<sup>[8-11]</sup>;王丽<sup>[12]</sup>、Bosscher 等<sup>[13]</sup>、张文涛等<sup>[14]</sup>采用热敏电阻式、光纤光栅等 传感原理的温度传感器对严寒区和季冻区的道路 温度场进行了全面的监测和分析.自青波等<sup>[15]</sup>利 用附面层原理借助非稳态的热传导微分方程,建 立了路基路面结构的温度场预估模型.

通过上述文献分析可知,路基温度场分析主 要集中于季冻区和多年冻土区,而对于强蒸发地 区受路面覆盖效应影响的砾类土路基温度场研究 较少.同时有研究表明,温度的变化亦能引起基质 吸力变化,从而对水汽迁移产生影响<sup>[16]</sup>.强蒸发

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51368058);黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室和山西省重点实验室开放 课题资助项目(KLTLR-Y14-10).

作者简介:冉武平(1977-),男,博士,副教授,E-mail:ranwp@xju.edu.cn;李 玲\*(1977-),女,硕士,讲师,E-mail:lil@xju.edu.cn.

收稿日期: 2016-11-03; 修回日期: 2017-05-24.

地区,地下水位较深,路基内部湿度变迁主要是水 汽迁移所致,而温度分布特性则成为研究湿度特 性的关键所在.鉴于此,本文通过对典型的强蒸发 地区路基在有路面覆盖和无路面覆盖效应下的路 基内不同深度温度的不间断监测,实时采集数据, 并对监测数据进行统计分析,进而明确强蒸发地 区路基温度的时空分布特性.

# 1 路基温度检测试验基本概况

# 1.1 试验段气候特征

新疆维吾尔自治区托克逊县属典型大陆性暖 温带荒漠气候,光照充足、热量丰富,年均气温 15.1℃,降水量5.7 mm,蒸发量3171.4 mm,无 霜期可达219 d.该地区属典型的强蒸发地区.

#### 1.2 试验段道路结构及路基材料

试验段选在 S301 线托克逊县境内,该道路为 沥青路面,等级为二级公路,道路结构如图 1 所 示.路基填料最大干密度为 2.28 g/cm<sup>3</sup>,最佳含 水量为 5.1%,其级配组成如表 1 所示.由现场取 样试验结果可知,路基填料为砾类土,因而填料的 保湿状况较细粒土差.为了提高试验数据的精确 性,以现场土样对湿度传感器重新标定,并对相关 参数进行调整,确保试验过程中数据采集和检测 的精度.





# 1.3 试验段平面布置及传感器埋设

为研究路面覆盖效应对路基温度场的影响, 温度传感器分别布设于道路中心线下与土路肩边 缘部位.在道路中心线处,传感器自路面结构下 30 cm开始布设,每隔 30 cm 布设 1 个监测点,共 布设6个,检测范围为路面结构下 180 cm 深度 内,编号为 F30~F180;在路肩处也自路面结构下

Tab. 1    Subgrade filling gradation composition							
筛孔尺寸/ mm	筛余质量/g	分计筛余 百分比/%	累计通过率/%				
60	0	0	100.00				
40	113	2.26	97.74				
20	453	9.06	88.68				
10	974	19.48	69.20				
5	704	14.08	55.12				
2	530	10.60	44.52				
1	410	8.20	36.32				
0.5	448	8.96	27.36				
0.25	753	15.06	12.30				
0.075	286	5.72	6.58				
<0.075	329	6.58	0				

路基填料级配组成

表 1

30 cm 开始布设, 而后每隔 60 cm 布设 1 个传感器, 共布设 3 个, 编号为 Y30、Y90 和 Y150. 路肩 处的传感器用作有无路面覆盖效应的对比试验. 传感器布设如图 2 所示. 所有数据每小时采集一次 并自动存储. 通过连续近两年的数据采集, 得出路 基内部不同深度处月平均温度分布特性及规律.



# 2 监测数据及分析

监测工作于 2014 年 8 月 1 日开始,采集系统 自动存储数据,定期进行数据提取,数据统计和分 析从 2014 年 8 月 1 日至 2016 年 7 月 31 日.

#### 2.1 年温度变化规律

图 3 是对气象资料统计得到的托克逊地区 2015 年 7 月~2016 年 8 月的日最高温与日最低 温.由图可知,该地区温差较大,温差比例随气温 减小不断增大.该地区在连续监测的 14 个月内, 最高气温为 49 ℃,而最低气温为-16 ℃,气温出 现负温仅为 3 个月左右.其中高温季节为 7 月份, 而低温季节为 1 月份.从峰值温度变化的趋势来 看,总体呈现出正弦或余弦的三角函数分布趋势. 这期间共出现降水天气 14 d,每月平均的降水仅 为 1 d.这足以说明该地区夏季气温高,昼夜温差 大,降雨量小,蒸发量大,气候干燥.

图 4 为道路中心线下受路面覆盖效应影响的 路基 30~180 cm 的温度分布特性.由图可知:路 基不同深度处的年温度变化趋势总体仍呈现显著 的正弦或余弦的三角函数分布特性.但不同深度 处的温度峰值大小和出现的时刻却不同.在路基 内部 0~60 cm 范围内,年最低温出现在 1 月上 旬,最高温出现在 7 月中旬.而之后的深度范围 内,路基低温峰值不断滞后至1月下旬,而高温峰 值则出现在7月初.造成该现象主要是由于两方 面原因:其一是由于随着深度增加,热量在传导过 程中伴随能量衰减;其二是由于路基内部温度的 不断增加,水汽迁移加剧.由于路面覆盖效应的影 响,水汽积聚在路基40~80 cm 范围内<sup>[17]</sup>,故而 造成这部分路基的热容不断增加吸收更多的热 量,而传导的热量减小,这是主要原因.随后由于 气温下降,路基内部整体温度也在下降,因而出现 随着路基深度不断增加,内部高温峰值出现略微 的提前而并非滞后.



Fig. 3 The temperature distribution of Toksun area



Fig. 4 The temperature distribution of different depth subgrade

#### 2.2 沿路基深度的温度分布特性

受气温升降影响,路基内部不同深度处的温度分布状况如图 5 和 6 所示.其中图 5 为 2015 年 7 月~2016 年 2 月逐渐降温过程,而图 6 则为 2016 年 1~7 月的升温过程.

由图可知在监测范围内:(1)无论是升温过程

还是降温过程,30~60 cm 范围内路基内部全年 温度梯度最小.主要是该范围内受路面覆盖效应 影响路基湿度最大,这也说明影响路基温度场分 布的不仅是热传导过程而且还与路基湿度场特性 密切相关.(2)从曲线分布特性来看,从每年的4~ 8月路基内部温度沿路基深度逐渐减小,气温越



falling process





高温度沿深度分布曲线斜率越大.(3)从9月到次 年的3月路基内部温度沿深度分布出现波动,且 随着逐渐进入到冬季,温度沿深度波动逐渐加剧. 9月份的路基内部最高温度位于90 cm 深度处, 随后几个月均在120 cm 深度处.造成该温度分布 特性主要是路基内部湿度分布和路基填料的性质 所致.根据文献[17]可知,受路面覆盖效应影响, 水汽迁移后主要集聚在40~80 cm,因而该段范 围内热容不断增大,而其下范围内则随着水汽迁 移,热容不断减小.当外界气温不断降低时,0~90 cm 范围内路基热量也不断衰减,此时下部路基结 构内的热量又开始向上部路基补充.由于该部分 热容低,当热量损失时,温度下降较快;但鉴于砂 砾性土热传导性能较低,故而仅在有限范围进行 热量传递,因而出现温度沿深度波动分布特性.

### 2.3 路基温度梯度

由图 7 可知,路基内温度梯度总体可大致分为 3 部分:首先是升降温过渡段,路基内部的温度 梯度最小;其次是低温季节,温度梯度最大;而高 温季节温度梯度介于二者之间.从路基不同深度 来看,30~60 cm 范围内温度梯度最小,而 90~ 150 cm 范围内温度梯度最大,60~90 cm 范围内 温度梯度介于二者之间,故而具有相对较大的热 容和热传导性;而在 90~150 cm 湿度梯度最大, 这是湿度的极度不均衡引起热容和热传导差异性 较大,从而出现较大的温度梯度.尤其是在低温季 节,由于 30~60 cm 范围内逐渐出现冻结现象,根 据热量平衡原理,90~150 cm 范围内的热量向上 层传导,从而造成最大和最小温度梯度均出现在 该时段.



Fig. 7 Subgrade temperature gradient distribution

#### 2.4 路面覆盖效应对路基温度分布的影响

由图 8 可知,受路面覆盖和无覆盖的路基内 部相同深度处的年温度变化规律总体一致.但由



Fig. 8 Subgrade temperature distribution by the pavement blanketing and without blanketing

于上层覆盖层的不同,仍存在差异性.首先高低温 的峰值大小不同,覆盖层下的路基温度显著高于 无覆盖层,而且随着深度增加,温差不断变大;其 次峰值出现的时刻不同,无覆盖层路基较有覆盖 层路基年温度峰值出现时刻滞后,且随着路基深 度增加,滞后越来越显著.这主要是由于该地区强 烈的热辐射,使得作为覆盖层路面吸收大量热量, 路面表面的温度往往高于大气温度,加之覆盖层 的保温功能,覆盖层下方路基高温温度峰值高于 无覆盖层;在低温季节由于覆盖层下方路基湿度 大于无覆盖层路基湿度,且二者分布存在显著的 差别<sup>[17]</sup>,因此出现低温季节覆盖层路基温度低于 无覆盖层路基温度.

## 3 基于统计法的温度预估模型

基于统计法的温度预估模型尽管存在地域的 局限性,但是借助测温元件的不间断监测数据以 及相应的气象资料,采用回归分析建立相应的预 估模型,尤其是针对考虑特殊条件影响因素时,其 方法简单、适用性强、计算精度高的优势将更为明 显.因此本文采用该方法,展开对强蒸发地区受路 面覆盖效应影响显著的路基温度预估模型研究.

#### 3.1 预估模型选择

影响路基温度分布的首要因素是气候条件, 亦即气温的年变化特性;其次就是路基填料的热 物理性质以及路基湿度分布特性.由前述的路面 覆盖效应影响下的路基温度场分布特性可知存在 3个特点:(1)温度场总体呈余弦或正弦函数分 布;(2)随着深度增加温度曲线幅值也即相位角不 断变化,而且在升温阶段和降温阶段相位角随深 度变化趋势不同;(3)沿路基深度的增加,温度曲 线的幅值在逐渐衰减.根据对升温和降温过程的 温度分布曲线分析,在一个完整的数据监测周期 内,曲线并非完全对称.鉴于上述分析,将升温过 程和降温过程采用不同的三角函数,从而可得出 温度预估模型.

升温过程:

$$t_H = \bar{t} + f(H) \times \sin\left(\frac{2\pi s}{365} + \alpha \times H\right) + \beta \quad (1)$$

降温过程:

$$t_H = \bar{t} + f(H) \times \cos\left(\frac{2\pi s}{365} - \alpha \times H\right) + \beta$$
 (2)

式中:t<sub>H</sub>为路基深度 H 处的温度,℃; ī 为年平均

气温,℃; H 为计算点距路面结构底深度, m; *f*(H)为温度沿深度的分布函数; α、β 为回归系 数; s 为时间, d.

函数 *f*(*H*)表征的是基于年气温振幅条件下的同一时刻温度沿深度的分布特性,该函数主要 是考虑了温度振幅变化、路面覆盖效应影响下的 路基湿度分布不均衡对温度场的影响.同时考虑 到计算公式的应用便利性,函数 *f*(*H*)采用多项 式表达.路基温度与深度相关性分析如表 2 所示.

表 2 路基温度与深度相关性分析

Tab. 2 Subgrade temperature and depth correlation analysis

月份 -		R				
	Н	$H^2$	$H^3$	首任		
3	0.8437	0.928 0	0.989 1			
4	0.822 3	0.914 5	0.978 1			
5	0.812 5	0.919 3	0.982 1	化泪水矾		
6	0.815 4	0.921 0	0.988 7	开温阴段		
7	0.814 8	0.918 9	0.9807			
8	0.804 8	0.900 7	0.978 9			
9	0.7017	0.8798	0.950 8			
10	0.756 6	0.819 2	0.931 6			
11	0.706 1	0.882 5	0.960 9	欧泪阶码		
12	0.753 1	0.893 8	0.952 4	產価別权		
1	0.791 5	0.912 0	0.962 3			
2	0.7837	0.913 6	0.975 9			

通过相关性分析可知,无论是升温阶段还是降温阶段,三次多项式的相关性显著高于一次和 二次多项式相关性.因此函数 *f*(*H*)选择三次多 项式.综上所述,观测的温度预估模型如下:

升温阶段(毎年的 3~8 月):  $t_H = \bar{t} + t_{\theta} (a \times H^3 + b \times H^2 + c \times H + d) \times$  $\sin\left(\frac{2\pi s}{365} + e \times H + f\right) + g$ (3)

降温阶段(每年的9月~次年2月):

$$t_{H} = \bar{t} + t_{\theta} (a \times H^{3} + b \times H^{2} + c \times H + d) \times \cos\left(\frac{2\pi s}{365} + e \times H + f\right) + g$$
(4)

式中: $t_{\theta}$ 为气温年振幅值,C; $a \sim g$ 为待定回归系数;s为时间,d,从3月1日计起为1,到次年的2月28日为365;其他字母含义同上式.

#### 3.2 预估模型系数的确定

根据实测数据,以 2015 年 3 月~2016 年 2 月的实测数据进行回归,以确定回归系数.通过数

据统 计 分 析, 该 时 间 段 内 的 年 平 均 气 温 为 15.4 ℃, 气温年振幅值为 41.7 ℃; 对路基温度实 测数据和相关数据进行回归分析, 即可得到路基 温度场预估模型的待定回归系数.回归分析结果 见表 3. 预估模型的判定系数 R<sup>2</sup> 达到了相当高 的水平.

ſał	o <b>.</b> 3	R	legression	coefficients	of	prediction	model
-----	--------------	---	------------	--------------	----	------------	-------

阶段	а	b	С	d	е	f	g	$R^2$
升温	0.030 208	-0.137960	0.048 334	0.427 913	-0.454800	-0.617 480	5.911 278	0.968 300
降温	$-0.134\ 180$	0.402 000	-0.202290	-0.449 820	41.544 360	0.719 488	4.380 465	0.962 882

#### 3.3 预估模型评价与验证

针对上述预估模型,采用该地区 2014 年 8 月 1 日~2015 年 2 月 28 日的数据验证降温阶段的 预估模型;采用 2016 年 3 月 1 日~2016 年 7 月 31 日的数据验证升温阶段的预估模型,如图 9 和 10 所示.其中降温过程曲线中 0~184 代表 1.8 m 深度的温度曲线,以此类推,184~368、368~552、 552~736、736~920、920~1 104 分别代表 1.5、 1.2、0.9、0.6 和 0.3 m 的预估和实测的温度曲 线.而升温过程曲线中 0~153、153~306、306~ 459、459~612、612~765、765~918 分别代表 1.8、1.5、1.2、0.9、0.6 和 0.3 m 的预估和实测的 温度曲线.由图可知,预估值与实测值的曲线除了 在高低温峰值存在一些偏差,总体拟合度较高,足



图 9 降温阶段路基温度实测值与预估值对比 Fig. 9 Comparison of measured value and predicted value of subgrade temperature in the falling process



图 10 升温阶段路基温度实测值与预估值对比 Fig. 10 Comparison of measured value and predicted value of subgrade temperature in the rising process

以说明该预估模型满足该地区温度场预估的工程 需要.

# 4 结 论

报

(1)强蒸发地区的砾类土路基温度分布总体 仍呈现正弦或余弦函数分布规律,但峰值温度的 出现时刻随深度不同.路基内部 0~60 cm 范围 内,年最低温出现在 1 月中旬,最高温出现在 7 月 中旬.而之后深度范围内,路基低温峰值不断滞后 至 1 月下旬,而高温峰值则提前至 7 月初.建议对 强蒸发地区路基温度场划分为降温阶段和升温阶 段进行分析研究.

(2)从温度沿深度分布特性来看,每年的4~ 8月路基内部温度沿路基深度逐渐减小,气温越高温度沿深度分布曲线斜率越大,而从9月到次年的3月路基内部温度沿深度分布出现波动,且随着逐渐进入到冬季温度沿深度波动逐渐加剧.

(3)季节不同温度梯度不同,气温升降温过渡 段温度梯度最小;冬季温度梯度最大;而高温季节 路基内部的温度梯度则介于二者之间.从路基不 同深度来看,30~60 cm 范围的温度梯度最小, 90~150 cm 范围的温度梯度最大,而 60~90 cm 范围的温度梯度则介于二者之间.建议将温度梯 度分为3部分进行分析.

(4) 在相同深度处, 受路面覆盖效应影响的路 基高温峰值高于无覆盖路基, 而低温峰值则低于 无覆盖路基, 且随着深度增加, 相同深度处的峰值 温差不断变大.

(5)可根据本文提出的路基温度场预估模型, 进一步准确分析路基湿度特性,从而实现对路基 工作性能的全面把控.

## 参考文献:

[1] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil Mechanics

for Unsaturated Soils [M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.

 [2] 谭忆秋,徐慧宁,周纯秀,等.季节性冰冻地区路基温度场分布规律[J].哈尔滨工业大学学报,2011, 43(8):98-102.

> TAN Yiqiu, XU Huining, ZHOU Chunxiu, *et al*. Temperature distribution characteristic of subgrade in seasonally frozen regions [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(8):98-102. (in Chinese)

 [3] 侯 芸,田 波, 那文山.季节性冰冻地区路基内温度场、湿度场耦合计算[J].同济大学学报,2002, 30(3):296-301.

HOU Yun, TIAN Bo, BING Wenshan. Numerical simulation of coupling field of temperature and humidity on subgrade in frost zone [J]. Journal of Tongji University, 2002, 30 (3): 296-301. (in Chinese)

[4] 张明礼,温 智,薛 珂,等. 青藏铁路多年冻土区 润湿地段斜坡路基温度与变形分析[J]. 岩石力学 与工程学报, 2016, 35(8):1677-1687.

ZHANG Mingli, WEN Zhi, XUE Ke, *et al.* Temperature and deformation analysis on slope subgrade with rich moisture of Qinghai-Tibet railway in permafrost regions [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, **35**(8): 1677-1687. (in Chinese)

- [5] DENG Ronggui, DENG Lin, LU Yan, et al. The effect of permafrost preservation of different highth subgrade in permafrost regions [C] // International Conference on Transportation Engineering 2009 (ICTE 2009). New York: American Society of Civil Engineers, 2009:1123-1127.
- [6] 马勤国,赖远明,吴道勇.多年冻土区高等级公路路基温度场研究[J].中南大学学报(自然科学版), 2016,47(7):2415-2423.

MA Qinguo, LAI Yuanming, WU Daoyong. Analysis of temperature field of high grade highway embankment in permafrost regions [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(7):2415-2423. (in Chinese)

 [7] 刘 戈,陈建兵,金 龙,等. 高原多年冻土区宽幅路基水热传输规律研究[J]. 中外公路, 2014, 34(2):58-63.

> LIU Ge, CHEN Jianbing, JIN Long, *et al.* Study on the regularity of moisture and heat transport of large-width embankment in permafrost regions of

the Qing-Tibetan plateau [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2014, **34**(2):58-63. (in Chinese)

[8] 毛雪松,王秉纲,胡长顺,等.路基冻结过程中温度 场对变形场的影响[J].长安大学学报(自然科学版),2005,25(5):11-14.

MAO Xuesong, WANG Binggang, HU Changshun, et al. Effect of temperature field on deformation field during freezing process of subgrade [J].
Journal of Chang' an University (Natural Science Edition), 2005, 25(5):11-14. (in Chinese)

[9] 汪海年,窦明健. 青藏高原多年冻土区路基温度场数值模拟[J]. 长安大学学报(自然科学版),2006, 26(4):11-15.

WANG Hainian, DOU Mingjian. Numerical simulation of thermal field in permafrost embankments of Qinghai-Tibet highway [J].
Journal of Chang' an University (Natural Science Edition), 2006, 26(4):11-15. (in Chinese)

 [10] 王铁行,胡长顺,王秉纲,等.考虑多种因素的冻土路基温度场有限元方法[J].中国公路学报,2000, 13(4):8-11.

WANG Tiexing, HU Changshun, WANG Binggang, *et al.* A finite element method for thermal field analysis of frozen soil subgrade on the consideration of all field-factors [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(4):8-11. (in Chinese)

[11] 汪海年,窦明健,吴敏慧. 青藏高原冻土区路面类型 对路基温度场影响的非线性分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(2):169-175.

WANG Hainian, DOU Mingjian, WU Minhui. Nonlinear analysis of the influence of pavement types on embankment thermal regime in permafrost regions on the Tibetan plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(2):169-175. (in Chinese)

- [12] 王 丽. 道路结构温度场实测研究[J]. 公路, 2003(8):30-35.
  WANG Li. A study on actual measurement of temperature field of road structure [J]. Highway, 2003(8):30-35. (in Chinese)
- [13] BOSSCHER P J, BAHIA H U, THOMAS S, et al. Relationship between pavement temperature and weather data: Wisconsin field study to verify superpave algorithm [J]. Transportation Research Record, 1998(1609):1-11.

[14] 张文涛,孙宝臣,杜彦良. 基于光纤光栅的青藏铁路

冻土路基地温监测试验研究[J]. 石家庄铁道学院 学报,2005,18(4):49-51.

ZHANG Wentao, SUN Baochen, DU Yanliang. Experiment study on Qinghai-Tibet railroad subgrade temperature monitoring based on FBG sensors [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2005, 18(4):49-51. (in Chinese)

[15] 白青波,李 旭,田亚护.路基温度场长期模拟中的 地表热边界条件研究[J]. 岩土工程学报,2015, 37(6):1142-1149.

BAI Qingbo, LI Xu, TIAN Yahu. Upper boundary conditions in long-term thermal simulation of subgrade [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6):1142-1149. (in Chinese) [16] 王铁行,胡长顺. 多年冻土地区路基温度场和水分 迁移场耦合问题研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(12):93-97.

WANG Tiehang, HU Changshun. Study on the problem of coupled temperature field and moisture migration field of subgrade in permafrost region [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(12):93-97. (in Chinese)

[17] 冉武平,李 玲.考虑路面覆盖效应的路基平衡湿度分布及预估[J].重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(6):58-62.
RAN Wuping, LI Ling. Distribution and prediction of equilibrium moisture of subgrade considering pavement blanketing effect [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2015, 34(6):58-62. (in Chinese)

# Temperature distribution characteristics and prediction model of subgrade in strong evaporation area

RAN Wuping<sup>1</sup>, LI Ling<sup>\*1</sup>, ZHANG Xiao<sup>2</sup>

(1. School of Architectural and Civil Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Loess Region, Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, China )

**Abstract:** In order to accurately grasp the temporal-spatial distribution characteristics and law of the temperature field of the gravel subgrade affected by pavement blanketing effect in the strong evaporation area, the temperature field distribution characteristics of the subgrade are studied by all-weather temperature monitoring. The results show that the monthly mean temperature at different depths is general cosine or sine function distribution, but the phase angle varies with the depth of the subgrade and the temperature rising and falling process. The low-temperature peak value of the subgrade affected by pavement blanketing effect is slightly lower than that of the subgrade without pavement blanketing effect, and the high-temperature peak value is slightly higher, but the distribution law is basically the same. The temperature gradient distributions are not the same along the different temperature conditions and subgrade depths, the maximum temperature field prediction model is proposed for the heating process and the cooling process. The model has a high correlation and can provide the basis for moisture transfer and moisture distribution characteristics study of the subgrade in the strong evaporation area considering the influence of pavement blanketing effect.

Key words: gravel subgrade; temperature distribution characteristics; strong evaporation region; pavement blanketing effect; prediction model