

公路工程  
*Highway Engineering*  
ISSN 1674-0610, CN 43-1481/U

## 《公路工程》网络首发论文

题目: 甘肃嘉峪关沥青路面高温温度场预估模型  
作者: 郭云枫, 慕博博, 李萍, 念腾飞, 陈柯柯  
收稿日期: 2019-07-08  
网络首发日期: 2020-09-22  
引用格式: 郭云枫, 慕博博, 李萍, 念腾飞, 陈柯柯. 甘肃嘉峪关沥青路面高温温度场预估模型. 公路工程.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1481.U.20200922.0908.004.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 甘肃嘉峪关沥青路面高温温度场预估模型

郭云枫<sup>1</sup>，慕博博<sup>2</sup>，李萍<sup>2</sup>，念腾飞<sup>2</sup>，陈柯柯<sup>2</sup>

(1. 甘肃第七建设集团股份有限公司，基础桥梁市政工程公司，甘肃兰州 730000；2. 兰州理工大学，土木工程学院，甘肃兰州 730050)

**【摘要】** 为了建立嘉峪关地区夏季沥青路面高温温度场预估模型，在对夏季高温期沥青路面的温度、太阳辐射强度、风速和相对湿度等数据采集的基础上，分析气温、太阳辐射强度和湿度等影响因素与路面温度的相关性，采用回归分析方法建立了温度、湿度、太阳辐射强度和路面深度为主要参数的沥青路面高温温度场预估模型，以相关系数、均方差和残差平方和等指标作为该温度场预估模型的评价参数。研究表明：在距路面10cm以下，风速与路面结构温度的相关性较气温和湿度偏低，而太阳辐射强度与结构温度的相关性一直处于较低状态；气温和太阳辐射强度的累积时间与深度的关系呈三次多项式，气温与太阳辐射强度的累积时间与深度的关系呈二次多项式；路面0~10cm内的气温累计时间为2~4小时，滞后时间为1~3小时，太阳辐射强度累积时间为6~7小时，滞后时间为5~6小时。研究结果可为嘉峪关地区公路养护和建设提供一定的技术服务。

**【关键词】** 沥青路面；实测数据；相关性；温度场；预估模型**【中图分类号】** U416.217**【文献标识码】** A**【文章编号】** 1674-0610(2021)01-0xx

## High Temperature Field Estimation Model of Jiayuguan Asphalt Pavement in Gansu Province

GUO Yun-feng<sup>1</sup>, MU Bo-bo<sup>2</sup>, LI Ping<sup>2</sup>, NIAN Teng-fei<sup>2</sup>, CHEN Ke-ke<sup>2</sup>

(1. Foundation, Bridge &amp; Municipal Engineering Co., The NO.7 Construction Group Share Limited Company of Gansu Province, Lanzhou Gansu 730000, China 2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China)

**【Abstract】** In order to establish a high temperature field prediction model for summer asphalt pavement in Jiayuguan area, the temperature, solar radiation intensity and humidity were analyzed on the basis of data collection of temperature, solar radiation intensity, wind speed and relative humidity of asphalt pavement in summer high temperature period. Based on the correlation between the influencing factors and the pavement temperature, the regression analysis method was used to establish the high temperature field prediction model of asphalt pavement with temperature, humidity, solar radiation intensity and pavement depth as the main parameters, with correlation coefficient, mean square error and residual square sum. The indicator were used as the evaluation parameter of the temperature field estimation model. The results show that the correlation between wind speed and pavement structure temperature is lower than temperature and humidity below 10cm from the road surface, and the correlation between solar radiation intensity and structural temperature is always low; the cumulative time of temperature and solar radiation intensity is The relationship between the depths is a cubic polynomial, and the relationship between the temperature and the cumulative time and depth of the solar radiation intensity is a quadratic polynomial. According to the fitting formula and fitting curve of the road depth of 10~50cm, the cumulative time of the temperature within 0~10cm of the road surface is 3~5 hours, the lag time is 2~3 hours, the solar radiation intensity accumulation time is 6~7 hours, and the lag time is 4~5 hours. The research results can provide certain technical services for highway maintenance and construction in Jiayuguan area.

**【Key words】** asphalt pavement; measured data; correlation; temperature field; prediction model

### 0 引言

沥青混合料是一种敏感的粘弹塑性材料，随着温度的变化材料的性质会发生改变<sup>[1-3]</sup>。在夏季高温期混合料易产生流动性，加上车辆荷载的渠化作用沥青路面极易产生车辙和拥包等病害，从而导致道路路况恶化，服务水平下降，严重时很容易发生交通事故<sup>[4-6]</sup>。因此，通过沥青路面高温期预估模型的研究，对防止路面车辙、拥包的出现以及为今后公路的修建有着极其重要的意义。

综合国内外研究现状，沥青路面温度场的研究有

两种方法：理论分析法和统计分析法<sup>[6-8]</sup>。理论分析法是依据传热学和气候学的基本原理，通过相应的数据分析建立温度预估模型；统计分析法是根据路面结构实测温度和气象资料，采用回归分析方法得到各因素的相关关系，从而建立预估模型。王延海等<sup>[9]</sup>通过长期测试3种典型沥青路面结构的温度数据，引入气温、太阳辐射、风速及湿度参数，建立了夏季高温期沥青路面日最高温度与日平均温度的经验预估模型；李萍等<sup>[10]</sup>用回归分析方法分析了气温、太阳辐射强度和湿度等影响因素与路面温度的相关性，建立了以温度、湿度、太阳辐射强度和路面深度为主要参数的沥青路面高温温度场预估模型；贾璐等<sup>[11]</sup>基于

[收稿日期] 2019-07-08

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(51868047, 51668041)；甘肃省科技支撑项目(1504GKCA031)

[作者简介] 郭云枫(1977—)，女，甘肃兰州人，硕士，工程师，研究方向：道路工程。

热传导的基本理论,建立了以气温、太阳辐射为主要参数的预估模型,并使用有限差分的方式对其求解,结果表明,该模型能够准确的预估沥青路面结构内温度的变化状况;陈嘉琦等<sup>[12]</sup>为预估自然环境下沥青路面温度场,根据传热学的基本原理确定了影响路面温度场分布规律的主要因素,采用量纲分析方法,并对模型中的相关系数进行修正,建立了关于太阳辐射和气温的路面温度场理论-经验预估模型;廖俊华等<sup>[13]</sup>为分析沥青路面的整体温度场进行分析,建立了的沥青路面温度场物理模型进行全时域的分析计算,结果表明:路面的最高温度将出现在路面下-2cm 的区域中。

综上所述,以上模型均通过埋置传感器的方式采集的气温、湿度和太阳辐射强度等为主要因素建立预估模型,但是对路表温度与气温和太阳辐射强度的相关性的分析和研究相对较少。因此,本文在文献<sup>[10]</sup>的基础上引入路表温度和延后气温,研究路表温度与气温和太阳辐射强度的相关性,并建立嘉峪关地区沥青路面高温温度场预估模型。

## 1 数据采集方法

### 1.1 沥青路面路表采集

由文献<sup>[10,14,15]</sup>可知,沥青路面长期暴露在外界环境中,其内部温度主要受当地气候(如环境温度、环境湿度、太阳辐射、降雨、风速等)及水文条件的影响。为了研究嘉峪关夏季高温期路表温度与气温和太阳辐射强度的相关性以及气温随路面结构层深度的变化规律,对嘉峪关服务区的高速公路路面进行现场实测,采用红外温度测试仪对路表温度进行测试,时间为 8:00~20:00 进行,温度记录间隔为半小时<sup>[15]</sup>。图 1 为嘉峪关站点沥青路面路表温度的采集。

### 1.2 沥青路面结构层温度测试

依托连霍高速公路嘉安段,在里程桩号为 XK2425+300 处进行测试方案布置。传感器布置时,首先利用钻芯机对测试点进行钻芯取孔,并依次对 10cm、20cm、30cm、40cm 和 50cm 等深度分别布置温度传感器,然后用沥青补料进行夯实填补,对不同深度数据进行 24 小时无间断采集<sup>[15]</sup>。图 2 为路面传感器的埋设。



图 1 数据采集

Figure 1 Data collection



图 2 实测数据的现场布置

Figure 2 Field layout of measured data

### 1.3 气象站的建立

建立 CaipoBase 小型气象站及相关传感器对环境中的温度、风速、太阳辐射强度和相对湿度等进行现场采集,该气象站采用太阳能供电,然后将所监测数据直接上传至 GPRS,再上传至互联网平台,采集数据周期为 1h/次。气象站节点所安装的传感器为湿度和温度传感器,总站组成结构从上到下依次为:超声波风速风向仪、太阳板、无限节点协调器、雨量器等<sup>[15]</sup>,见图 3。

## 2. 实测数据分析

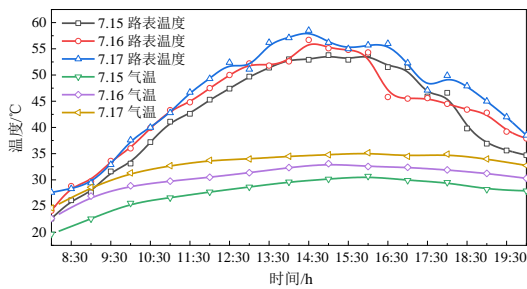
### 2.1 路表温度与太阳辐射强度及气温的变化

本文主要选取 2018 年 7 月 15 日至 7 月 17 日连续三天的路表实测数据,分别与气温和太阳辐射强度的相关性进行分析、对比,见图 4。

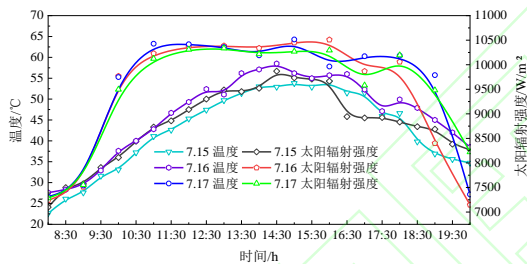


图3 气象站

Figure 3 Weather station



(a) 气温与路表温度变化



(b) 太阳辐射强度与路表温度变化

图4 路表温度与气温及太阳辐射强度

Figure 4 Road surface temperature and temperature and solar radiation intensity

结合图4的气温曲线可知, 7月15日至7月17日连续三天的数据均显示: 图4(a)中路表温度变化曲线近似呈正态函数曲线分布, 在早上8:00路表温度较低但稍偏高于气温, 随着时间的推移太阳辐射强度逐渐增加, 温度快速升高且与气温的温差越来越大, 到下午14:00-15:00路表温度达到最大值, 其温差高达 $20^{\circ}\text{C}$ 左右, 在下午15:00之后, 气温变化幅度较小而太阳辐射强度的减弱温度开始下降; 通过路表温度与气温曲线相比可知, 气温变化较为平缓且幅度较小, 而路表温度变化幅度较大。图4(b)日出之后, 太阳辐射强度较低且辐射强度上升比较迟缓, 在9:00之后上升比较明显, 在11:00左右时太阳辐射强度达到最大值, 到下午18:00左右时太阳辐射强度快速下降; 路表温度与太阳辐射强度的变化近似一致, 当太阳辐射强度达到最大值时路表温度仍在升高, 说明路表温度滞后性的特点。

## 2.2 不同深度的温度随时间的变化规律

为了研究夏季高温期温度随深度的变化规律, 本文主要选取2018年7月11日至7月17日一周的数据进行对比分析。由气象台采集到的气象资料得知这一周天气变化中有降雨、多云和晴天等天气, 其中7月10日和7月14日有降雨, 7月12日多云天气, 其他均为晴天。其温度随深度的变化关系, 见图5。

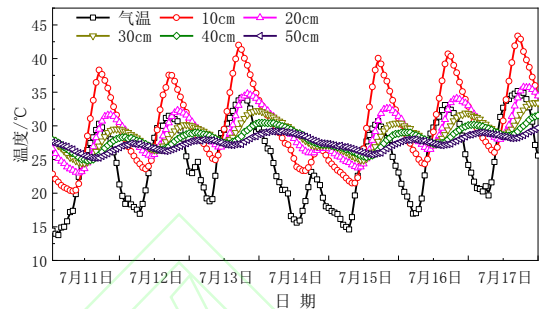


图5 2018年7月11至7月17日温度

Figure 5 Temperature from July 11 to July 17, 2018

从图5中可以看出, 7月11日至7月17日一周的数据均显示: 大气温度一般在凌晨5:00至7:00达到最小值之后开始回升, 在下午15:00至17:00达到最大值, 其最大值达到 $30^{\circ}\text{C}$ ~ $35^{\circ}\text{C}$ 左右。通过温度曲线对比分析可知, 随着时间的变化气温曲线变化幅度较路面结构内部温度曲线更为明显, 一般在早上8:00~10:00气温变化幅度较大, 且路面结构10cm处温度高于气温 $10\sim 15^{\circ}\text{C}$ 。在同一时刻, 通过大气气温峰值与沥青路面10cm、20cm、30cm、40cm和50cm温度曲线峰值对比可知, 气温对沥青路面结构温度的影响有滞后性的特点, 且随着深度的增加滞后时间越长。温度变化规律近似呈正弦曲线变化, 气温与路表以下温度变化趋势基本上一致, 随着深度的增加温度变化越趋于稳定。由于在7月14日有降雨, 故该天的气温及路表以下的温度明显低于其它天气状态下的温度, 且气温全天低于路表以下温度, 因此说明降雨对气温及路表以下的温度有很大的影响。

## 2.3 相对湿度和太阳辐射强度的变化

不同纬度和海拔地区太阳辐射强度有很大的差异, 气温、太阳辐射强度和湿度是影响路面温度场的重要因素。因此, 本文主要针对嘉峪关2018年7月11日至17日一周的太阳辐射强度和相对湿度数据进行对比分析, 见图6。

从图6可以看出, 湿度变化曲线近似呈正弦变化, 而太阳辐射强度的变化主要根据因天气状况而定。2018年7月11日至7月17日一周的数据均显示: 在日出之前太阳辐射强度较低几乎为零, 日出之后太阳辐射强度变化幅度较大, 11:00到18:00太阳辐射强度达到最大值, 之后开始减弱到21:00达到最小值。湿度变化与太阳辐射强度变化近似呈相反变化趋势, 当太阳辐射强度较低时湿度较大, 随着太阳辐射强度的增强湿度逐渐降低; 由于7月10日和7月

14日有降雨，因此在7月11日的早晨、7月14和15日的早晨湿度高达90%左右，其湿度值明显高于其它天气状况的湿度。

### 2.4 温度沿深度的变化

为了进一步分析气温和太阳辐射强度对路面深度的影响，从图5选取2018年7月16日8:00-20:00的高温期数据进行沥青路面结构温度沿路面深度的变化规律研究，其对路表及路表以下10cm、20cm、30cm、40cm和50cm等不同深度的温度变化趋势进行分析，见图7。

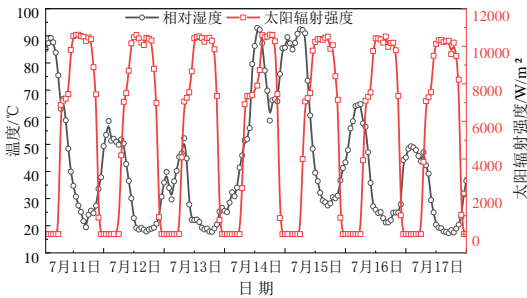


图6 相对湿度和太阳辐射强度

Figure 6 Relative humidity and solar radiation intensity

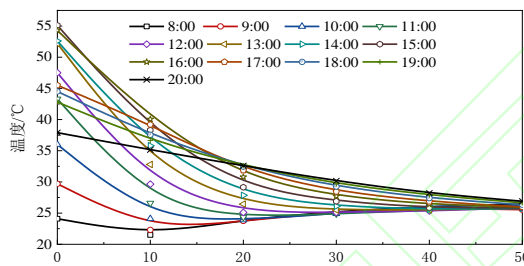


图7 不同时刻温度沿深度的变化

Figure 7 Temperature changes along the depth at different times

由图7可知，在路表处不同时刻温差较大，在早上8:00温度最低为23℃，下午15:00温度最高，最大值为56℃，其温差达到30℃，随着深度的增加温差越来越小，在路表以下50cm处温度基本趋于稳定，其温差小于0.5℃；在早上8:00-10:00时，在路表下10cm以内温度随着深度的增加而逐渐降低，且在10cm处温度达到最小值，而其余时间随此可知，随着深度的加深，沥青路面结构层的敏感性逐渐降低。

## 3 沥青温度场高温温度场影响因素相关性分析

### 3.1 不同深度处的温度与各因素的相关性分析

通过以上数据分析，根据参考文献<sup>[10]</sup>建立了夏季高温期沥青路面温度预估模型，以气温( $T_a$ )、相对湿度( $R_H$ )、太阳辐射强度( $Q$ )和风速( $F$ )

与相同时刻的10cm、20cm、30cm、40cm和50cm的温度(下文用 $T_{10}$ 、 $T_{20}$ 、 $T_{30}$ 、 $T_{40}$ 和 $T_{50}$ )进行相关性分析，见表1。

表1  $T_H$ 各因素的相关性分析

Table 1 Correlation analysis of various factors

站点	影响因素	$T_a$	$R_H$	$Q$	$F$
嘉峪关	$T_{10}$	0.84 7	-0.79 6	0.286	0.36 9
	$T_{20}$	0.58 4	-0.60 7	-0.10 5	0.23 5
	$T_{30}$	0.35 7	-0.41 9	-0.27 7	0.14 8
	$T_{40}$	0.19 9	-0.26 7	-0.30 0	0.10 3
	$T_{50}$	0.10 1	-0.14 0	-0.21 7	0.09 4

从上表1可以看出，通过对比分析可知，气温对路面结构层影响较大，在10cm内相关性为0.847，由此可知气温是路面结构层温度最主要的影响因素；随着路面深度的增加，气温、相对湿度、太阳辐射强度和风速相关性均减弱，且相对湿度在30cm以下相关性较小；在距离路面深度30cm以下，风速对路面结构层的相关性偏低，在沥青路面高温温度场建模时将不再考虑；太阳辐射强度与路面结构温度在10cm以内呈正相关，在10cm以下呈负相关且相关性一直维持在±0.2左右，故太阳辐射对路面结构层温度不可忽略。因此，需对太阳辐射强度的滞后性和累积性做进一步分析。

### 3.2 太阳辐射强度的滞后性和累积性分析

通过上面的数据分析可知，气温对路面结构温度的影响具有滞后性和累积性<sup>[15]</sup>。以嘉峪关高速服务区为例，对气温对路面结构温度的影响具有滞后性和累积性进行分析，分别用不同深度温度( $T_H$ )与前n小时的温度平均值( $T_{nh}$ )和气温延后值( $T_{dh}$ )太阳辐射强度平均值( $Q_{nh}$ )、和太阳辐射强度延后值( $Q_{dh}$ )与进行相关性分析<sup>[10]</sup>(如 $T_{8h}$ 表示前8小时温度平均值、 $T_{d8}$ 表示气温延后8小时平均值、 $Q_{6h}$ 表示前6小时辐射强度平均值和 $Q_{d6}$ 表示太阳辐射延后6小时平均值)，见表2和表3。

表2  $T_H$ 与 $T_{nh}$ 和 $T_{dh}$ 之间的相关性指数R

Table 2 Correlation index between  $T_H$  and  $T_{nh}$  and  $T_{dh}$ 

影响因素	$T_{3h}$	$T_{8h}$	$T_{12h}$	$T_{17h}$	$T_{22h}$	$T_{d3}$	$T_{d8}$	$T_{d12}$	$T_{d17}$	$T_{d22}$
$T_{10}$	0.935	0.801	0.602	0.438	0.494	0.903	0.284	-0.14 9	-0.04 9	0.532
$T_{20}$	0.790	0.913	0.886	0.790	0.754	0.841	0.697	0.287	0.042	0.333
$T_{30}$	0.605	0.806	0.887	0.895	0.861	0.667	0.771	0.527	0.221	0.282
$T_{40}$	0.474	0.671	0.804	0.894	0.895	0.522	0.716	0.626	0.377	0.308
$T_{50}$	0.390	0.537	0.677	0.824	0.877	0.412	0.588	0.620	0.497	0.384

表 3  $T_H$  与  $Q_{nh}$  和  $Q_{dh}$  之间的相关性指数 RTable 3 Correlation index R between  $T_H$  and  $Q_{nh}$  and  $Q_{dh}$ 

影响因素	$Q_{3h}$	$Q_{6h}$	$Q_{12h}$	$Q_{18h}$	$Q_{24h}$	$Q_{d3}$	$Q_{d6}$	$Q_{d12}$	$Q_{d18}$	$Q_{d24}$
$T_{10}$	0.617	0.744	0.693	0.405	0.346	0.689	0.625	-0.107	-0.486	0.275
$T_{20}$	0.145	0.349	0.579	0.553	0.366	0.273	0.515	0.224	-0.293	-0.085
$T_{30}$	-0.087	0.069	0.345	0.458	0.321	0.012	0.283	0.310	-0.093	-0.169
$T_{40}$	-0.165	-0.077	0.145	0.310	0.255	-0.107	0.094	0.278	0.043	-0.142
$T_{50}$	-0.145	-0.125	-0.01	0.135	0.165	-0.129	-0.039	0.167	0.115	-0.057

从表 2 可以看出, 前 12h 温度的平均值在路表深度 10cm 至 30cm 以内有较好的相关性, 在 30cm 处前 3h 的平均值相关性减弱最明显, 在 50cm 处相关指数为 0.390; 通过对比可以发现, 前 n 小时温度平均值较延后 n 小时气温平均值具有更好的相关性。从表 3 可知, 在路面结构 10cm 以内  $Q_{3h}$ 、 $Q_{6h}$ 、 $Q_{12h}$ 、 $Q_{d3}$  和  $Q_{d6}$  均有较好的相关性, 在 10cm 以外  $Q_{nh}$  和  $Q_{dh}$  的相关性均较小。因此, 在建立温度场预估模型中通过引入太阳辐射强度累积值来提高该模型的精度。

### 3.3 气温和太阳辐射强度对路面温度场的累积与滞后时间的确定

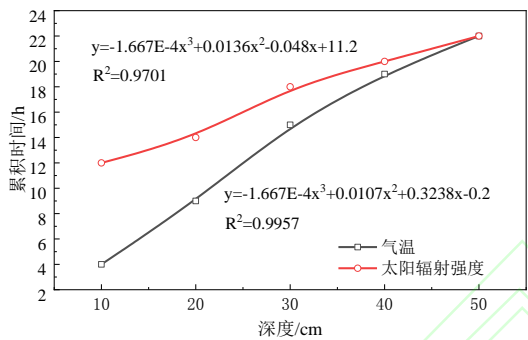
为了进一步确定气温和太阳辐射强度对沥青路面不同深度层的累积时间和滞后时间, 本文在分析嘉峪关站点为例, 对前 n 小时的气温和太阳辐射强度与路面结构温度最强相关性所对应的时间及滞后的气温和太阳辐射强度与路面结构温度最强相关性所对应的时间进行汇总, 见表 4。

表 4 气温和辐射对路面结构层的滞后时间和累积时间  
Table 4 Latency and cumulative time of temperature and radiation on the pavement structure

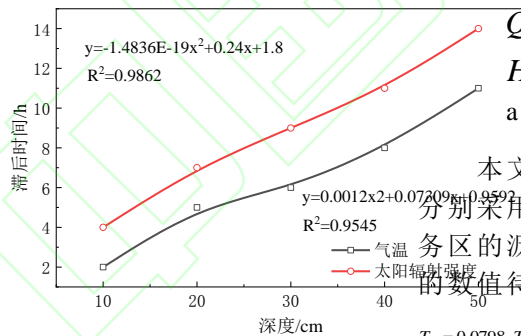
站点	深度	$T_{nh}$	$Q_{nh}$	$T_{dh}$	$Q_{dh}$
	10	3	12	2	4

	20	9	14	5	7
嘉峪关	30	15	18	6	9
	40	20	20	8	11
	50	22	22	11	14

从表 4 可以得出,在同一深度处,沥青路面结构温度与气温和太阳辐射强度的累积时间、滞后时间较为接近。为了更好地分析累积时间和滞后时间随路面深度的分布规律,本文对嘉峪关站点 10~50cm 处的气温和太阳辐射强度累积时间、滞后时间进行拟合,通过得到的拟合公式和拟合曲线对 10cm 以内的累积时间与滞后时间进行分析,从而将高温期沥青路面温度场的累积时间和滞后时间统计出来,见图 8。



(a) 累积曲线



(b) 滞后曲线

图 8 气温和太阳辐射强度累积与滞后时间

Figure 8 Temperature and solar radiation intensity accumulation and lag time

由图 5 可以看出,随着路面深度的增加,气温和太阳辐射强度的累积时间和滞后时间也逐渐增加。其中,气温和太阳辐射强度的累积时间与深度之间的表达式关系呈三次多项式;气温和太阳辐射强度的滞后时间与深度之间的表达式关系呈二次多项式。通过路面深度 10~50cm 的拟合公式和拟合曲线的趋势分析,路面 0~10cm 内的气温累积时间为 3~5 小时,滞后时间为 2~3 小时;太阳辐射强度累积时间为 6~7 小时,滞后时间为 4~5 小时。为了便于建立高温温度场预估模型的建立,针对 0~10cm 范围内的气

温累积时间取 3h,滞后时间取 2h;太阳辐射强度累积时间取 6h,滞后时间取 4h。

## 4 预估模型的建立及验证

### 4.1 预估模型的建立

通过上述各影响因素对路面温度场的滞后性和累积性的影响分析,在文献<sup>[10]</sup>建立的模型基础上通过引入  $T_{nh}$ 、 $Q_{nh}$ 、 $T_{dh}$  和  $Q_{dh}$  等参数进行修正。由图 8 曲线可知路面温度拟合曲线在深度方向上呈三次多项式分布,因此本文主要针对嘉峪关地区沥青路面高温温度场预估模型可定义为:路面结构内部温度 ( $T_H$ ) 可以表示为温度 ( $T_a$ )、太阳辐射强度 ( $Q$ )、相对湿度 ( $R_H$ ) 和路面深度 ( $H$ ) 的函数  $T_H = f(T_a, Q, R_H, H)$  的函数,其公式表示为:

$$T_H = a_1 \cdot T_{dh} + a_2 \cdot T_a + a_3 \cdot T_{nh} + a_4 \cdot Q_{nh} + a_5 \cdot R_H + a_6 \cdot H + a_7 \cdot H^2 + a_8 \cdot H^3 + (a_9 \cdot T_{nh} + a_{10} \cdot Q_{nh}) \cdot H + a_{11} \cdot D + a_{12} \cdot Q_{dh} + a_{13} \quad (1)$$

式中:  $T_H$ ——沥青路面某一深度处的温度, °C

$T_a$ ——当前气温, °C

$T_{dh}$ ——滞后气温, °C

$R_H$ ——相对湿度, %

$T_{nh}$ ——此前 n 小时平均气温, °C

$Q_{nh}$ ——此前 n 小时平均太阳辐射强度, W/m<sup>2</sup>

$H$ ——路面深度, cm

$a_1$ —— $a_{13}$  各参量回归系数

本文沥青路面温度场预估模型采用 T 检验法时,分别采用 95% 和 98% 的保证率,对比得到嘉峪关服务区的沥青路面温度场预估模型公式回归系数  $a_1 \sim a_{13}$  的数值待入式 (2-1) 其表达式如下:

$$T_H = 0.0798 \cdot T_{dn} + 0.2884 \cdot T_a + 0.815 \cdot T_{nh} + 0.0149 \cdot Q_{nh} + 0.0619 \cdot R_H + 0.1100 \cdot H + 2.1200 \cdot H^2 - (0.004 \cdot T_{nh} + 0.0003 \cdot Q_{nh}) \cdot H + 0.0195 \cdot D + 0.001 \cdot Q_{dn} + 1.9128 \quad (2)$$

### 4.2 对预估模型的检验

为了检验本次建立的嘉峪关高温预估模型的准确性,本文采用 2018 年 7 月至 9 月份的数据代入本模型中,其实测值和预估值模拟效果,见图 9。通过统计分析法得到引入滞后太阳辐射强度因素较未引入前相关性系数 R 为 0.9483、均方差 MSE 为 1.0795 和残差平方和 RSS 为 8251。从相关系数、均方差和残差平方和等数据可以看出,本文建立的模型能够较好的模拟现场实际值,故能够运用于嘉峪关高温温度场的模拟。

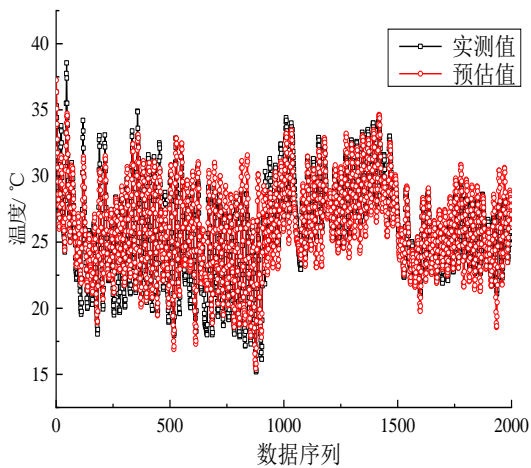


图9 实测值与预估值对比分析

Figure 9 comparative analysis of measured value and estimated value

## 5 结论

(1) 在距路面深度 10cm 以下, 风速与路面结构温度的相关性相对气温和湿度偏低, 在后期沥青路面高温温度场建模时可不予考虑; 太阳辐射强度与路面结构温度的相关性一直处于较低状态。

(2) 随着路面深度的增加, 气温和太阳辐射强度的累积时间和滞后时间也逐渐增加; 其中, 气温和太阳辐射强度的累积时间与深度的关系呈三次多项式关系; 气温和太阳辐射强度的滞后时间与深度的关系呈二次多项式。路面 0-10cm 内的气温累积时间为 2-4 小时, 滞后时间为 1-3 小时; 太阳辐射强度累积时间为 6-7 小时, 滞后时间为 5-6 小时。

(3) 本文在课题组的基础上, 建立了以温度、湿度、太阳辐射强度和路面深度为主要参数的沥青路面高温温度场预估模型, 该模型能够较好的模拟高海拔地区的温度场, 为嘉峪关地区高速公路的修建、养护能够提供一定的技术支持。

## 参考文献

- [1] 单景松,郭忠印.沥青路面温度场的预估方法[J].江苏大学学报(自然科学版),2013,34(5):594-598+604.
- [2] 宋小金,樊亮.沥青路面结构温度随深度变化规律研究[J].土木工程学报,2017,50(9):110-117.
- [3] 单景松,杜贝贝.沥青路面温度场分析及全时域受力特性[J].公路工程,2014,39(1):73-77.
- [4] 韦璐.德国沥青路面温度场的预估模型及应用[J].中

- 外公路,2011,31(6):118-121.
- [5] 阮鹿鸣,邹晓翎,柴明明,王蓝英.高温地区沥青路面结构抗车辙性能分析[J].武汉理工大学学报,2015,37(11):43-47.
- [6] 吕悦晶,应保胜,邹丽琼,周兴林,汤文,刘万康.随机荷载作用下沥青路面应力应变分析[J].公路工程,2018,43(1):94-101.
- [7] 秦健,孙立军.国外沥青路面温度预估方法综述[J].中外公路,2005(6):19-23.
- [8] 李浩天,贾渝,白琦峰.柔性基层沥青路面温度场的预估模型[J].武汉理工大学学报,2010,32(24):84-89.
- [9] 王延海,曹海利,纪小平,甘新立.沥青路面高温温度场的经验预估模型[J].郑州大学学报(工学版),2015,36(5):84-87.
- [10] 李萍,陈柯柯,念腾飞,刘洋.甘肃陇南沥青路面高温温度场预估模型研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2018,46(11):105-110.
- [11] 贾璐,孙立军,黄立葵,秦健.沥青路面温度场数值预估模型[J].同济大学学报(自然科学版),2007(8):1039-1043.
- [12] 陈嘉祺,罗苏平,李亮,但汉成,赵炼恒.沥青路面温度场分布规律与理论经验预估模型[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(4):1647-1656.
- [13] 廖俊华,蒋伟勤,张璇.沥青路面温度场与全时域受力特性研究[J].公路工程,2017,42(6):227-231.
- [14] 谭志远,李强,肖标丁.气象因素对沥青路面内部温度的影响及定量分析[J].公路工程,2016,41(4):180-183+211.
- [15] 李萍,念腾飞,刘洋,张国宏,张影会.甘肃渭源地区实测冬季沥青路面温度场预估模型研究[J/OL].应用基础与工程科学学报:1-12[2019-03-29].