

闫昕昤,王小勇,达选芳,等. 甘肃高速公路山区段路面温度特征及其预报模型[J]. 干旱气象,2018,36(5):864-872, [YAN Xinyang, WANG Xiaoyong, DA Xuanfang, et al. Variation Characteristics of Expressway Pavement Temperature and Forecast Model in Mountainous Area of Gansu[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(5):864-872], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-05-0864

## 甘肃高速公路山区段路面温度 特征及其预报模型

闫昕昤<sup>1,3</sup>,王小勇<sup>1</sup>,达选芳<sup>1</sup>,赵福年<sup>2</sup>,牛喜梅<sup>1</sup>

(1. 甘肃省气象服务中心,甘肃 兰州 730020;2. 中国气象局兰州干旱气象研究所,中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室,甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,甘肃 兰州 730020;3. 兰州大学大气科学学院,甘肃 兰州 730000)

**摘要:**利用 G30 连霍高速甘肃段沿线麦积山隧道、乌鞘岭交通气象监测站的路面温度、气温、露点温度、相对湿度、风速、降水等逐时资料,统计分析了两站不同季节、不同海拔高度下路面温度与气温的差异与联系,讨论了路面温度与其他气象因子的相关关系,基于逐步线性回归方法建立路面温度统计模型,并对模型预报效果进行检验。结果表明:各个季节,甘肃山区高速公路路面温度和气温都是日出后快速升高,日落后逐渐下降,且路面温度的升、降幅度均快于气温。较低海拔站点的路面温度高于高海拔站点,但最高值出现时间、两站温差有所差异。其中,秋、冬季两站路面温差夜间大于白天,而春、夏季则昼夜相差不大。最低、最高路面温度统计模型的预报结果与实况变化趋势接近,但最高路面温度个别日期预报值与观测值偏差较大,在实际业务中应考虑各种实时气象条件及地形条件,对模型结果进行适当订正。

**关键词:**高速公路;路面温度;气象要素;逐步线性回归模型

**文章编号:**1006-7639(2018)05-0864-09 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-05-0864

**中图分类号:**P468.0<sup>+</sup>21

**文献标志码:**A

### 引言

近年来,我国公路交通建设飞速发展,特别是高速公路建设成就令人瞩目,公路交通网络系统已成为我国经济发展的重要命脉。公路交通对气象条件具有很高的敏感性,特别是高速公路交通运输体系所追求的快速、高效和安全,在很大程度上受气象条件的影响和制约<sup>[1-5]</sup>。目前,我国的高速公路绝大多数为沥青路面,沥青是一种对温度极其敏感的材料,其强度与刚度随温度升高而显著下降<sup>[6-8]</sup>。在路面高温情况下行车,很容易发生车辆爆胎,据不完全统计,高速公路交通事故的40%以上是由轮胎故障引起,其中爆胎一项就占事故总量的70%<sup>[9-10]</sup>。同时,低温会使沥青路面发生变形,若恰逢降水,路面又会出现道路结冰,据调查,在影响交通安全的恶劣气象条件中,道路结冰排名第一位<sup>[11]</sup>。因此,研

究路面温度与各种气象要素之间的关系,准确预报高速公路路面温度,为交管部门和公众有效预防和减少交通事故具有极其重要作用。

诸多学者针对不同高速公路路面温度的预报方法进行了研究。归纳起来,预报方法大致分为两类:一是基于大气物理学原理,利用能量守恒方程,建立路面温度预报模型<sup>[12-14]</sup>,该方法考虑太阳短波辐射对路面温度的影响,具有较高的预报精度,但遇阴雨天气时,预报效果较差;二是利用高速公路沿线自动气象站的实测资料,应用统计分析方法,建立路面温度预报模型<sup>[15-17]</sup>,该方法相对简单,具有良好的实用价值。甘肃省地处黄土高原、青藏高原、内蒙古高原三大高原交汇处,境内绝大部分高速公路海拔在1000 m以上,部分路段甚至在2000 m以上,如祁连山区乌鞘岭段<sup>[18-19]</sup>,高海拔山区天气敏感多变,路面温度具有独特的变化特征。因此,本文利用 G30

收稿日期:2018-01-25;改回日期:2018-05-07

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41375019)资助

作者简介:闫昕昤(1990—),男,甘肃民勤人,硕士研究生,工程师,主要从事天气预报业务及研究. E-mail:xyx.qx@qq.com.

连霍高速甘肃段沿线麦积山隧道和乌鞘岭交通气象监测站的逐小时监测资料,统计分析不同季节、不同海拔高度下路面温度的变化特征,建立路面温度统计模型,以为甘肃省高速公路路面温度预报服务提供参考。

## 1 资料与方法

目前,甘肃省高速公路交通气象监测设施还不完善,路面温度预报方法的研究也刚起步,全省仅有14套RAWS交通自动气象站,可实时监测路面状况、路面温度、气温、降水量、风、露点温度等气象资

料(表1),其中麦积山隧道站(海拔1463 m)和乌鞘岭站(海拔2693 m)监测数据相对较完整,且地形复杂,道路坡度较大,属于该省高速公路交通事故的易发隐患路段,具有代表性。本文以这两站分别代表海拔1000~2000 m和2000 m以上的高速路段,选取2015年4月至2016年3月露点温度、路面温度、气温等气象要素逐时监测资料,研究不同季节、不同海拔高度下路面温度变化特征,以及最高、最低路面温度与气象要素之间的相关关系,建立最低和最高路面温度的线性回归统计模型,并对模型进行效果检验。这里以1、4、7、10月分别代表冬、春、夏、秋四季。

表1 交通自动气象站部分观测要素信息

Tab.1 The information of observation factors of road automatic weather station

观测要素	型号	测量范围	分辨率	准确度
气温	PT100/DHC3	-50 ~ 80 °C	0.1 °C	±0.2 °C
相对湿度	PT100/DHC3	0% ~ 100%	1%	±0.2% (≤90%); ±0.3% (>90%)
风向	ELI5-1C/2C	0° ~ 360°	2.5°	±0.5°
风速	ELI5-1C/2C	0 ~ 60 m · s <sup>-1</sup>	0.1 m · s <sup>-1</sup>	±(0.3+0.03) m · s <sup>-1</sup>
降水量	SL3-1	0 ~ 4 mm · min <sup>-1</sup>	0.1 mm	±0.4 mm (≤10 mm); ±4% (>10 mm)
路面温度	IRS31-Pro	-40 ~ 80 °C	<0.02 °C (-20 ~ 20 °C); ±0.1 °C (其他温度范围)	±0.1 °C (-20 ~ 20 °C); ±0.2 °C (其他温度范围)

## 2 高速路面温度变化特征

### 2.1 不同季节路面温度的日变化特征

路面温度场分布主要受具有明显季节变化的太阳短波辐射和气温影响<sup>[20]</sup>。由图1可见,麦积山隧道和乌鞘岭交通气象站不同季节路面温度和气温均有明显的日变化特征,各季节的路面温度和气温均在日出后快速升高,日落后逐渐下降,升、降幅度都是路面温度快于气温。究其原因,一方面是路面温度的热源主要是白天占主导地位的太阳短波辐射,气温的热源主要是地面长波辐射和大气逆辐射,日出后地面吸收的太阳短波辐射大于大气吸收的地面长波辐射和大气逆辐射,日落后地面长波辐射对于地面起散热作用,而对大气则起加热作用<sup>[21-22]</sup>;另一方面是沥青路面比热容小于空气比热容,同样条件下前者升温、降温都较后者快<sup>[23]</sup>。此外,白天的路面温度与气温差异较大,1月二者的最大差值达7~8 °C,而4月、7月和10月最大差值均在10 °C以上,尤其是7月(夏季)的最大差值在20 °C以上,远

高于冬季;夜间,路面温度与气温相差不大,约3~4 °C,但麦积山隧道任何时刻的路面温度均高于气温,且二者差值波动不大,而乌鞘岭日出以前二者差值逐渐减少,黎明时分的路面温度与气温近乎相等,在1月(冬季)日出前路面温度甚至低于气温。

### 2.2 不同海拔高度路段路面温度的日变化特征

乌鞘岭站海拔较高,位于高原季风气候区,年平均气温较低,气温垂直分布明显,区域气候复杂多变,常有积雪或道路结冰出现。麦积山隧道站位于温带季风气候区,海拔相对较低,冬冷夏热,气温年较差、日较差大<sup>[24-25]</sup>。为探讨不同海拔高度下高速公路路面温度日变化差异,对麦积山隧道和乌鞘岭站的路面温度日变化趋势进行对比(图2)。可以看出,各季节,麦积山隧道路面温度均高于乌鞘岭,且日出前和日落后时段二者差值为6~9 °C。其中,1月两站路面温度都在13:00(北京时,下同)左右达到最高,这是因为冬季日出较晚、日落较早,昼短夜长所致,两站最高路面温度差在10~12 °C之间;4月、7月和10月乌鞘岭站路面温度都在15:00左右达到最

高,而 10 月麦积山隧道站最高路面温度出现在 16:00 左右,这些季节白昼时间相对较长,路面吸收更多的能量,两站最高路面温差为 13 ~ 17 °C;秋、冬季节,两站温差夜间大于白天,而春、夏季节则昼夜相差不大。一般而言,海拔每升高 100 m,气温下降 0.6 °C<sup>[26]</sup>,而麦积山隧道和乌鞘岭 2 站海拔相差 1000 m 以上,故两站平均气温相差 6 °C 以上,进而路面温差也较大。

将麦积山隧道和乌鞘岭站的气温、气压、相对湿

度、露点温度和风速等气象要素,以及经纬度和海拔高度等地理要素进行对比,发现乌鞘岭属祁连山脉北支,地势较高,地形复杂,更容易形成降水,且年均太阳辐射量更小,所以其气温和气压均低于麦积山隧道,而相对湿度和风速则高于麦积山隧道。由此可见,两站路面温度的差异是其所处的地形条件、气候特征等因素共同影响的结果,在实际业务中,应当综合考虑以上各种因素,并分区、分段进行预报。

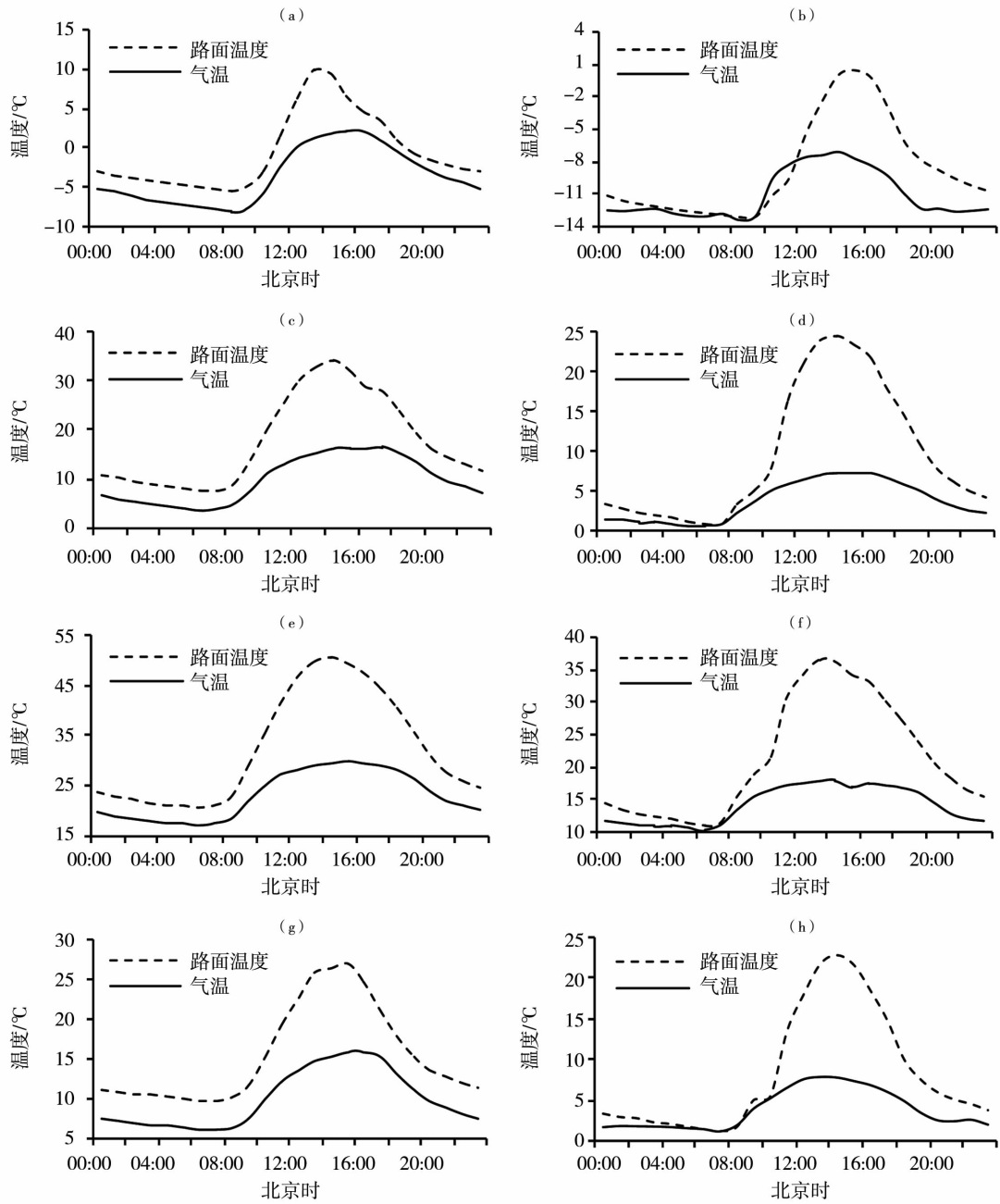


图 1 不同季节麦积山隧道(a,c,e,g)和乌鞘岭(b,d,f,h)站路面温度和气温日变化  
(a,b)冬季,(c,d)春季,(e,f)夏季,(g,h)秋季

Fig. 1 The daily changes of pavement temperature and air temperature in different seasons at Maiji Mountain Tunnel (a, c, e, g) and Wushaoling (b, d, f, h) stations of Gansu Province (a, b) winter, (c, d) spring, (e, f) summer, (g, h) autumn

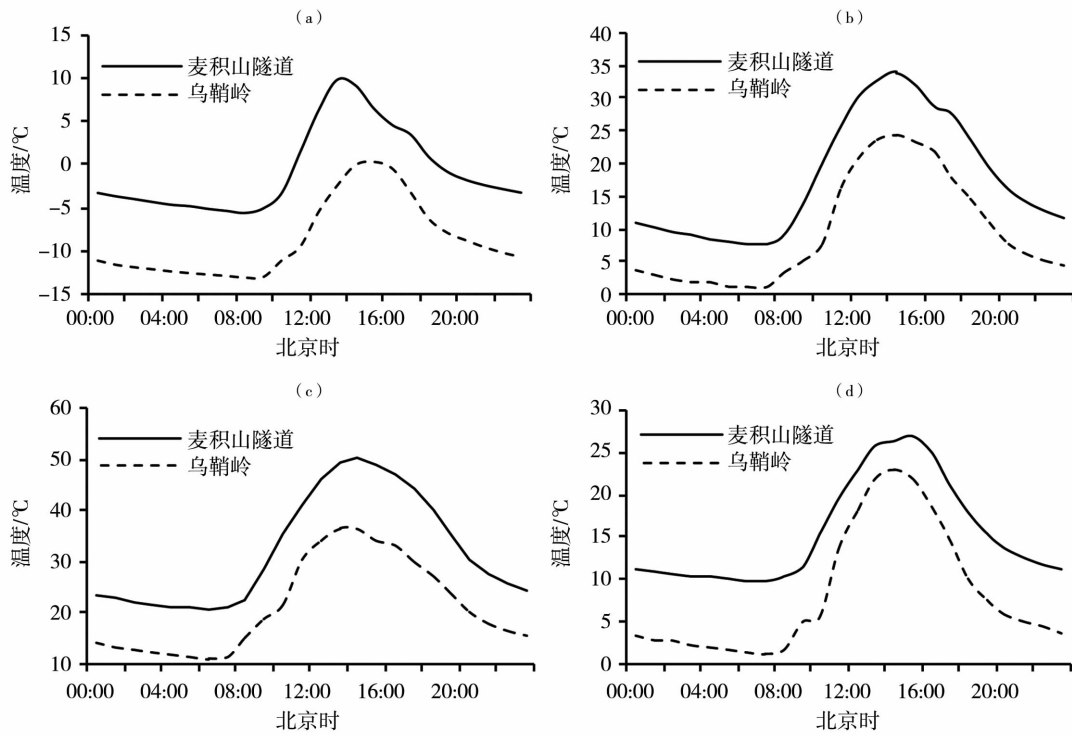


图 2 不同季节麦积山隧道和乌鞘岭站路面温度日变化对比  
(a)冬季,(b)春季,(c)夏季,(d)秋季

Fig. 2 The comparison of daily changes of pavement temperature in different seasons at Maiji Mountain Tunnel and Wushaoling stations of Gansu Province  
(a) winter, (b) spring, (c) summer, (d) autumn

### 3 高速路面温度统计模型及检验

#### 3.1 最低路面温度统计模型及检验

研究表明,路面最低温度受最低气温的影响最为显著<sup>[15-17]</sup>,且较为稳定,在构建路面最低温度模型时仅考虑最低气温这一要素就能取得很好的拟合效果。对 2015 年 4 月至 2016 年 3 月两站逐日路面最低温度与最低气温进行相关分析,得到麦积山隧道站相关系数为 0.953,乌鞘岭站相关系数为 0.951 (图 3),建立最低路面温度线性回归统计模型:

麦积山隧道:

$$T_{P_{\min}} = 4.529 + 1.019 T_{\min}, R^2 = 0.908 \quad (1)$$

乌鞘岭:

$$T_{P_{\min}} = 1.733 + 0.9 T_{\min}, R^2 = 0.903 \quad (2)$$

分别加入相关系数第二高的日最高露点温度因子(与两站最低路面温度相关系数分别为 0.911 和 0.892),建立最低路面温度统计模型:

麦积山隧道:

$$T_{P_{\min}} = 2.155 + 0.852 T_{\min} + 0.276 T_{d_{\max}}, R^2 = 0.912 \quad (3)$$

乌鞘岭:

$$T_{P_{\min}} = -2.275 + 0.686 T_{\min} + 0.58 T_{d_{\max}}, R^2 = 0.92 \quad (4)$$

式中: $T_{P_{\min}}$ 为日最低路面温度, $T_{\min}$ 为日最低气温, $T_{d_{\max}}$ 为日最高露点温度,单位均为 $^{\circ}\text{C}$ 。以上模型均通过 0.05 的显著性检验。

利用 2016 年 4—5 月两站路面最低温度、最低气温、最高露点温度逐日资料,对上述路面最低温度统计模型进行检验(表 2)。从表 2 可以看出,模型(3)、(4)中加入了最高露点温度后,拟合值与实测值的误差均有所减小,拟合效果明显改善,故基于最低气温和最高露点温度的路面最低温度模型的拟合精度较单一要素更高,且低海拔区域较高海拔区域的精度高。

图 4 是两站路面最低温度统计模型(3)和(4)的标准化残差分布,发现两站的路面最低温度统计模型的标准化残差均符合正态分布,标准化残差在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内的频率达 95% 以上,这也表明了方程(3)、(4)是可靠的。从检验结果(图 5)来看,最低路面温度统计模型的预报结果与实况变化趋势接近,平均绝对误差和均方根误差均不超过 $2^{\circ}\text{C}$ ,说明最低路面温度统计模型具有很好的实用价值,可以作为预报参考。

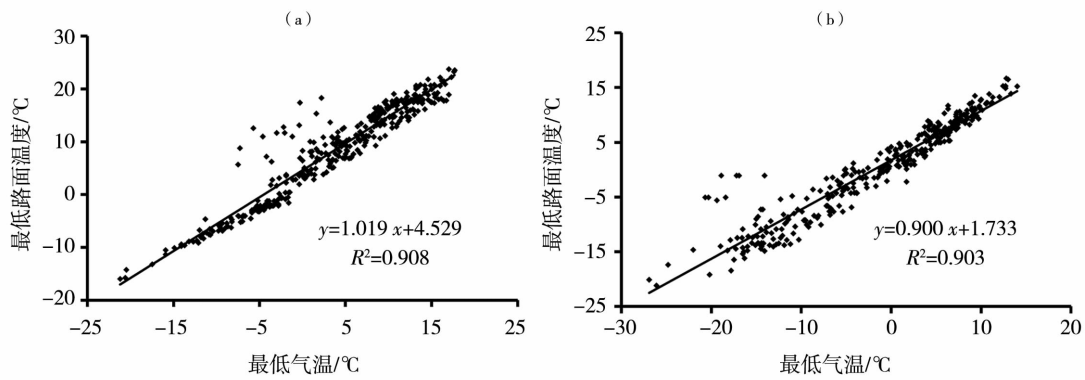


图3 麦积山隧道(a)和乌鞘岭(b)站最低路面温度与最低气温散点图

Fig.3 The scatter diagrams of the minimum pavement temperature and minimum air temperature at Maiji Mountain Tunnel (a) and Wushaoling (b) stations of Gansu Province

表2 麦积山隧道和乌鞘岭站最低路面温度不同统计模型推算结果检验

Tab.2 Test of calculated result of the minimum pavement temperature from different statistical models at Maiji Mountain Tunnel and Wushaoling stations of Gansu Province

单位:℃

误差	麦积山隧道		乌鞘岭	
	模型(1)	模型(3)	模型(2)	模型(4)
平均绝对误差	1.224	1.066	1.724	1.372
均方根误差	1.481	1.268	2.268	1.991

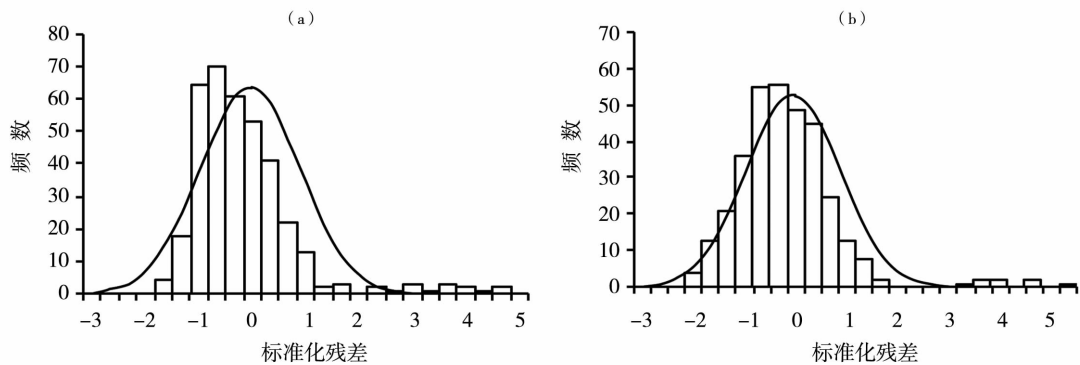


图4 麦积山隧道(a)和乌鞘岭(b)站路面最低温度统计模型的标准残差分布

Fig.4 The distributions of standardized residual of the minimum pavement temperature from statistical model at Maiji Mountain Tunnel (a) and Wushaoling (b) stations of Gansu Province

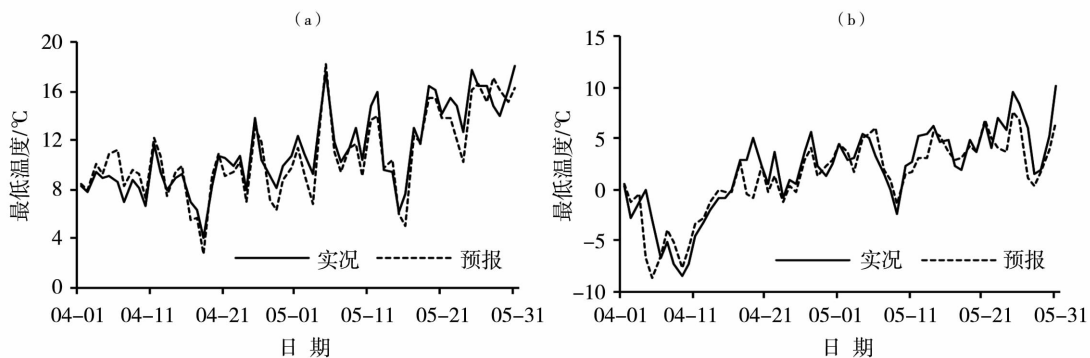


图5 2016年4—5月麦积山隧道(a)和乌鞘岭(b)站路面最低温度实况与预报值对比

Fig.5 The comparison of predicted and observed minimum pavement temperature at Maiji Mountain Tunnel (a) and Wushaoling (b) stations from April to May 2016

### 3.2 最高路面温度与气象要素的关系

统计了麦积山隧道和乌鞘岭站路面最高温度与多种气象要素的相关系数(表3)。由表3可以看出,最高路面温度与气温(日最高、最低、平均气温)、露点温度(日最高、最低、平均露点温度)以及前一日最高路面温度呈显著正相关,与日最小相对湿度和最大风速呈显著负相关,而与24 h降水量的相关性不显著。一般来说,相对湿度越小,空气中水汽含量越少,水汽对太阳辐射的削弱作用越弱,从而使得更多的太阳辐射到达地表,导致路面最高温度越高。

表3 麦积山隧道和乌鞘岭站最高路面温度与气象要素的相关性

Tab.3 The correlation coefficients between maximum pavement temperature and meteorological factors at Maiji Mountain Tunnel and Wushaoling stations

气象要素	麦积山隧道	乌鞘岭
日平均气温( $T_{ave}$ )	0.812 **	0.916 **
日最高气温( $T_{max}$ )	0.919 **	0.929 **
日最低气温( $T_{min}$ )	0.641 **	0.859 **
日平均露点温度( $T_{d,ave}$ )	0.664 **	0.668 **
日最高露点温度( $T_{d,max}$ )	0.724 **	0.688 **
日最低露点温度( $T_{d,min}$ )	0.578 **	0.629 **
日平均相对湿度( $RH_{ave}$ )	-0.048	-0.15
日最大相对湿度( $RH_{max}$ )	0.437 **	0.074
日最小相对湿度( $RH_{min}$ )	-0.363 **	-0.286 **
日平均风速( $V_{ave}$ )	0.197 **	0.051
日最大风速( $V_{max}$ )	-0.166 *	-0.169 *
前一日最高路面温度( $T_{p,max}$ )	0.801 **	0.802 **
24 h 累计降水量( $R_{24}$ )	0.153 *	0.127

注:\*、\*\*分别表示通过0.05、0.01的显著性检验。

由前面分析可知,麦积山隧道和乌鞘岭站路面温度受各自地形及气象条件影响,其日变化特征不同。麦积山隧道站最高路面温度与最大相对湿度 $RH_{max}$ 的相关系数为0.437(通过0.01显著性检验),而乌鞘岭站最高路面温度与 $RH_{max}$ 的相关系数仅0.074,因此该因子不具有普适性,可以剔除。对于气温因子,考虑到日极端高、低温对最高路面温度有显著影响,故保留 $T_{max}$ 和 $T_{min}$ ,剔除 $T_{ave}$ 。  $T_{d,ave}$ 、 $T_{d,max}$ 、 $T_{d,min}$ 的相关分析发现,3个因子之间的相关关系较好,故保留与最高路面温度相关性最显著的 $T_{d,max}$ 因子。甘肃省地处我国内陆腹地,气候干旱,蒸发量较大,年均降水量约318 mm,降水量主要集中在夏季,冬季极少<sup>[27-28]</sup>,且降水分布地域性差异很

大,乌鞘岭站最高路面温度与24 h累计降水量的相关系数未通过显著性检验,同时考虑到降水作用一定程度上隐含在湿度因子中,故剔除 $R_{24}$ 降水因子。因此,保留了日最高气温、日最低气温、日最高露点温度以及前一日最高路面温度4个因子作为最高路面温度预报的可选因子。尽管两站最高路面温度与最小相对湿度的相关性均通过0.01的显著性检验,但相关系数相对较小, $RH_{min}$ 是否保留,还需进一步分析。

### 3.3 最高路面温度统计模型及检验

利用2015年4月至2016年3月路面最高温度和最低气温、最高气温、最高露点温度、最小相对湿度及前一日最高路面温度等逐日资料,采用多元线性回归方法,建立两站路面最高温度统计模型:

麦积山隧道:

$$T_{p,max} = -4.056 + 1.812 T_{max} - 0.501 T_{min} + 0.07 T_{d,max} + 0.194 T_{p,max}, R^2 = 0.874 \quad (5)$$

乌鞘岭:

$$T_{p,max} = 10.81 + 1.558 T_{max} - 0.056 T_{min} - 0.4 T_{d,max} + 0.091 T_{p,max}, R^2 = 0.868 \quad (6)$$

分别将最小相对湿度因子引入模型(5)、(6),则路面最高温度统计模型变为:

麦积山隧道:

$$T_{p,max} = 11.639 + 0.973 T_{max} - 0.047 T_{min} + 0.81 T_{d,max} - 0.253 RH_{min} + 0.189 T_{p,max}, R^2 = 0.889 \quad (7)$$

乌鞘岭:

$$T_{p,max} = 12.356 + 1.433 T_{max} + 0.003 T_{min} - 0.204 T_{d,max} - 0.039 RH_{min} + 0.09 T_{p,max}, R^2 = 0.869 \quad (8)$$

式中: $T_{p,max}$ 为日最高路面温度, $T_{p,max}$ 为前一日最高路面温度, $T_{max}$ 为日最高气温, $T_{min}$ 为日最低气温, $T_{d,max}$ 为日最高露点温度,单位均为 $^{\circ}C$ ;  $RH_{min}$ 为日最小相对湿度(%).以上模型均通过0.05的显著性检验。

利用2016年4—5月路面最高温度、最高气温、最低气温、最高露点温度、最小相对湿度及前一日路面最高温度等逐日资料,对上述路面最高温度统计模型进行检验。从表4中可见,模型(7)、(8)中加入了最小相对湿度因子后,拟合值与实测值的误差均有所减小,拟合效果有所改善,且低海拔区域的模型拟合精度较高海拔区域高。因此,保留 $RH_{min}$ 因子,最终得到两站路面最高温度统计模型(7)、(8)。

表 4 麦积山隧道和乌鞘岭站最高路面温度模型推算结果检验

Tab.4 Test of calculated results of the maximum pavement temperature from different statistical models at Maiji Mountain Tunnel and Wushaoling stations of Gansu Province

单位:℃

误差	麦积山隧道		乌鞘岭	
	模型(5)	模型(7)	模型(6)	模型(8)
平均绝对误差	3.948	3.469	4.833	4.224
均方根误差	3.301	3.252	4.074	4.043

图 6 是麦积山隧道和乌鞘岭站最高路面温度统计模型的标准化残差分布。可以看出,两站最高路面温度模型的标准化残差均符合正态分布,标准化残差在  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内的频率达 93% 以上,这表明模型(7)、(8)合理可靠。另外,从检验结果来看(图 7),最高路面温度统计模型预报值与实况较接近,但也有个别日期存在较大的偏差,这可能是由于甘肃省

多山区地形,天气较敏感,夏季午后多雷暴大风和阵性降水,这对路面最高温度有显著影响,同时路面温度的变化也受山谷风、焚风等典型山区天气影响;在海拔较高的路段,如乌鞘岭段,冬季气温时常在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下,极易出现积雪和道路结冰,有效阻碍了路面和空气之间的热量传递,使得路面温度趋于平稳。

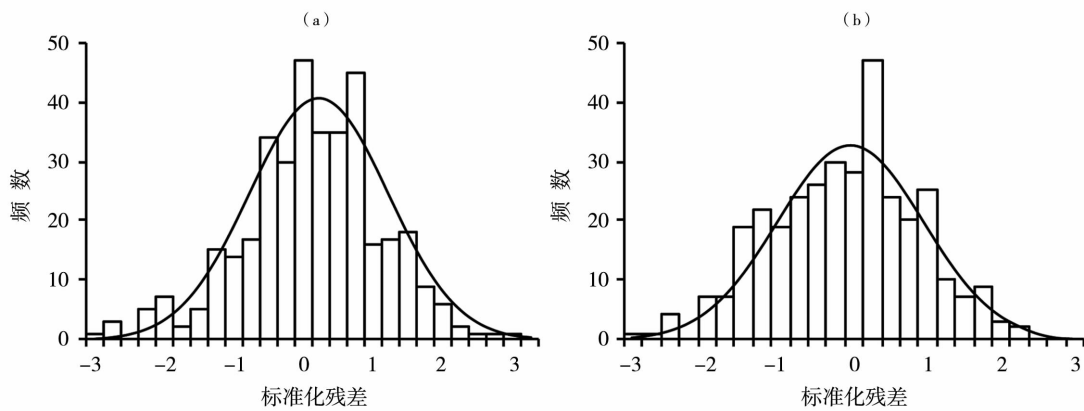


图 6 麦积山隧道(a)和乌鞘岭(b)站最高路面温度统计模型标准化残差分布

Fig.6 The distribution of standardized residual of the maximum pavement temperature from statistical model at Maiji Mountain Tunnel (a) and Wushaoling (b) stations of Gansu Province

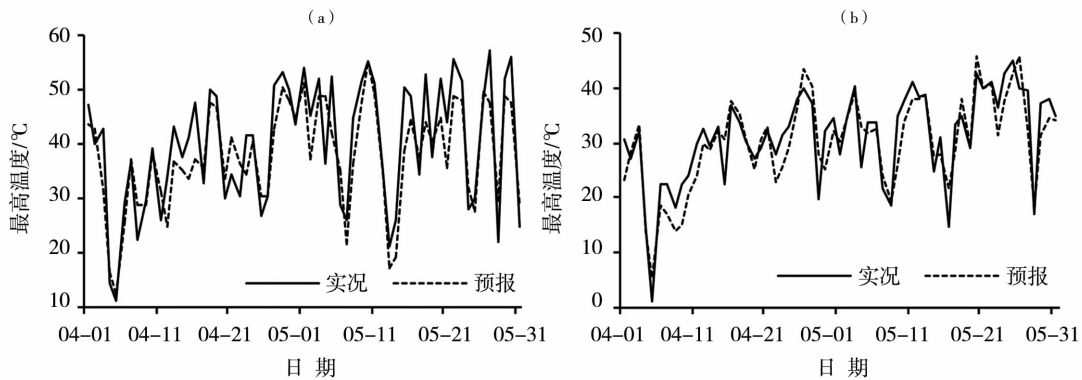


图 7 2016 年 4—5 月麦积山隧道(a)和乌鞘岭(b)站最高路面温度实况与预报值对比

Fig.7 The comparison of predicted and observed maximum pavement temperature at Maiji Mountain Tunnel (a) and Wushaoling (b) stations from April to May 2016

## 4 结论与讨论

(1)路面温度场分布主要受太阳辐射和大气辐射的影响,不论春夏秋冬,高速公路路面温度和气温具有明显的日变化特征,均是在日出后快速升高,日落后逐渐下降,且路面温度的升、降幅度均快于气温。路面温度与气温的白天差值夏季最大,冬季最小,而夜间差值季节变化不明显。

(2)不同季节下,较低海拔地区的路面温度均高于高海拔地区,但最高值出现时间、高低海拔区域的温差有所差异。其中,秋、冬季节两站温差夜间大于白天,而春、夏季节则昼夜相差不大。在实际工作中,应综合考虑地形特征、气象条件等因素分段进行预报服务。

(3)最低路面温度统计模型的预报值与实况变化趋势接近,其平均绝对误差和均方根误差均不超过 $2^{\circ}\text{C}$ ,说明最低路面温度统计模型具有很好的实用价值,能够对冬季高速公路道路结冰预报服务提供有效支持。

(4)最高路面温度统计模型的预报值与实况的变化趋势较接近,但个别日期预报值与实况偏差较大。当天气状况(晴或多云)较稳定时,模型预报结果较准确;当有阵性降水或灾害性天气(沙尘暴、霜冻等)时,模型预报结果有一定偏差。因此,在实际业务中,应用上述模型时,应考虑各种实时气象条件(太阳辐射、极端天气等)及地形条件(山坡、山谷、海拔高度等),对模型预报结果进行适当订正。

山区天气比较敏感,夏季午后多阵性降水,同时路面温度也可能受山谷风、焚风等典型山区天气影响,这是山区高速公路路面温度预报的难点。由于资料有限,在路面温度日变化特征分析及统计模型构建时,没有考虑不同天气状况对路面温度的影响,同时也未涉及太阳辐射和路面通过感热和潜热与大气和土壤之间的能量交换等因素,这将是模型进一步完善所关注的问题。另外,随着2017年甘肃省20套交通气象监测站的投入使用,高速公路气象监测资料的不断积累,上述模型将得以有效改进。

### 参考文献:

- [1] 康延臻,王式功,杨旭,等. 高速公路交通气象监测预报服务研究进展[J]. 干旱气象,2016,34(4):591-603.
- [2] 白永清,何明琼,刘静,等. 高速公路交通事故与气象条件的关系研究[J]. 气象与环境科学,2015,38(2):66-71.
- [3] 魏璐. 河南省2011年高速公路气象服务效益评估[J]. 气象与环境科学,2013,36(2):47-51.
- [4] 吴彦,陈春艳,路光辉. 沿天山高速公路冰雪灾害分析及其对交通安全的影响[J]. 沙漠与绿洲气象,2013,7(5):66-70.
- [5] 王平德,牟银杰. 川(主寺)黄(龙)公路雪山梁路段气象灾害影响分析[J]. 高原山地气象研究,2011,31(4):78-81.
- [6] 鲁正兰,孙立军. 沥青路面车辙预估方法的研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2007,35(11):1476-1480.
- [7] 宁贵财,康彩燕,陈东辉,等. 2005—2014年我国不利天气条件下交通事故特征分析[J]. 干旱气象,2016,34(5):753-762.
- [8] 秦健,孙立军. 国外沥青路面温度预估方法综述[J]. 中外公路,2005,25(6):19-23.
- [9] 隋东,梁红,安昕,等. 沈阳爆胎气象条件指数预报方法研究[J]. 干旱气象,2017,35(5):893-898.
- [10] 马筛艳,马金仁,孙卫武,等. 银川市路面温度预报与爆胎指数预报方法研究[J]. 干旱气象,2013,31(4):825-830.
- [11] 赵琳娜,马清云,杨贵名,等. 2008年初我国低温雨雪冰冻对重点行业的影响及致灾成因分析[J]. 气候与环境研究,2008,13(4):556-566.
- [12] SHAO J, LISTER P J. An automated nowcasting model of road surface temperature and state for winter road maintenance[J]. Journal of Applied Meteorology, 1996,35(8):1352-1361.
- [13] 朱承瑛,谢志清,严明良,等. 高速公路路面温度极值预报模型研究[J]. 气象科学,2009,29(5):645-650.
- [14] 刘熙明,喻迎春,雷桂莲,等. 应用辐射平衡原理计算夏季水泥路面温度[J]. 应用气象学报,2004,15(5):623-628.
- [15] 田华,吴昊,赵琳娜,等. 沪宁高速公路路面温度变化特征及统计模型[J]. 应用气象学报,2009,20(6):737-744.
- [16] 曲晓黎,武辉芹,张彦恒,等. 京石高速路面温度特征及预报模型[J]. 干旱气象,2010,28(3):352-357.
- [17] 武辉芹,马翠平,杨荣芳,等. 河北省高速公路路面温度变化特征及预报模型[J]. 干旱气象,2014,32(4):665-670.
- [18] 何越. 甘肃省高速公路绿化策略研究[D]. 西安:长安大学,2016.
- [19] 钱莉,安颖颖,赵德强. 乌鞘岭高速公路路段多发交通事故的气象条件分析[J]. 干旱气象,2014,32(2):286-291.
- [20] 秦健,孙立军. 沥青路面温度场的分布规律[J]. 公路交通科技,2006,23(8):18-21.
- [21] 孙照渤,陈海山,谭桂容,等. 短期气候预测基础[M]. 北京:气象出版社,2010.
- [22] 吴晟,吴兑,邓雪娇,等. 南岭山地高速公路路面温度变化特征分析[J]. 气象科技,2006,34(6):783-787.
- [23] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社,2003:5.
- [24] 张强,张良,黄菁,等. 我国黄土高原地区陆面能量的空间分布规律及其与气候环境的关系[J]. 中国科学:地球科学,2014,44(9):2062-2076.
- [25] 杨森,孙国钧,何文莹,等. 西北旱寒区地理、地形因素与降雨量及平均温度的相关性——以甘肃省为例[J]. 生态学报,2011,31(9):2414-2420.
- [26] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社,2000:10.
- [27] 王燕,王润元,王毅荣,等. 近37年甘肃省降水特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(4):94-99.
- [28] 张强,姚玉璧,李耀辉,等. 中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望[J]. 地球科学进展,2015,30(2):196-213.



## Variation Characteristics of Expressway Pavement Temperature and Forecast Model in Mountainous Area of Gansu

YAN Xinyang<sup>1,3</sup>, WANG Xiaoyong<sup>1</sup>, DA Xuanfang<sup>1</sup>,

ZHAO Funian<sup>2</sup>, NIU Ximei<sup>1</sup>

(1. *Meteorological Service Center of Gansu Province, Lanzhou 730020, China;*

2. *Institute of Arid Meteorology, CMA, Key Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of CMA, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020, China;*

3. *College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)*

**Abstract:** Based on the hourly meteorological observation data from Maiji Mountain Tunnel and Wushaoling road automatic weather stations in Gansu section of Lian – Huo expressway, including pavement temperature, relative humidity, air temperature, dew – point temperature, wind speed and rainfall from April 2015 to March 2016, the difference and relation between pavement temperature and air temperature in different seasons and altitudes were analyzed statistically, and the correlations between pavement temperature and other meteorological factors were discussed. And on this basis the statistical models of pavement temperature were established by using stepwise linear regression method, the forecasted effects of models were tested. The results show that the expressway pavement temperature and air temperature at Maiji Mountain Tunnel and Wushaoling stations with different altitudes had obvious diurnal change characteristics, they rose rapidly after sunrise and dropped gradually after sunset in different seasons, and the change rate of pavement temperature was faster than that of air temperature. However, the pavement temperature in low altitude was higher than that in high altitude, and the time of maximum pavement temperature and their differences with different altitudes were obviously different in four seasons. Their pavement temperature differences in the nighttime of autumn and winter were greater than those in the daytime, while those in the nighttime and daytime of spring and summer were approximate. The forecasted pavement temperature by models was close to the observation, but the deviations between forecasted and observed values of maximum pavement temperature in a few days were great. Therefore, the forecasted results by models should be appropriately revised with consideration of real – time meteorological conditions and topography in actual forecast business.

**Key words:** expressway; pavement temperature; meteorological factors; stepwise linear regression model