

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, [WU Huiqin, MA Cuiping, YANG Rongfang, et al. Variation Characteristics of Road Surface Temperature on Highway of Hebei Province and Its Prediction Model[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(4):665-670], doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-04-0665

# 河北省高速公路路面温度变化特征及预报模型

武辉芹,马翠平,杨荣芳,张金满

(河北省气象服务中心,河北 石家庄 050021)

**摘 要:**利用2010年1月至2011年12月邯长、京秦高速公路涉县、玉田南北2监测站和所在气象站观测资料,统计分析南北2站路面温度与气温的日变化特征及路面最高温度与气象因子的关系,基于多元回归分析方法建立逐月路面温度预报方程,并进行精度检验。结果表明,路面温度的日变化不但与季节、天空状况有关,还与地理位置密切相关。路面最高温度受多种气象因子的影响,与前一日路面最高温度、最高气温、能见度呈显著正相关,与总云量、低云量、相对湿度呈显著负相关,其中与最高气温的相关性最显著;路面最低温度与最低气温呈显著线性相关。基于路面最高温度预报方程的检验精度,玉田站年平均为77.5%,涉县为79.2%,可为今后路面最高温度预报提供参考。

**关键词:**高速路面温度;气温;相关分析;预报模型

**文章编号:**1006-7639(2014)-04-0665-06 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-04-0665

**中图分类号:**P49

**文献标识码:**A

## 引 言

近年来,随着我国经济的迅猛发展,高速公路四通八达。我国所建高速公路中90%以上为半刚性沥青路面结构。沥青是一种典型的温度敏感性材料,由其构成的路面处于自然环境中,往往会受到多种自然环境因素的综合影响,如太阳辐射、天空辐射、外界气温、降水等因素,其中气温对路面的影响最为明显<sup>[1-3]</sup>。太阳辐射与天空辐射的一部分被路表反射,余下的部分被吸收并转为热能,这部分热能与外界气温相叠加,由此产生了可观的路表温度,并通过热传导作用,将热量沿路面厚度向温度较低处传递<sup>[4-5]</sup>。高温会引起沥青路面的车辙,低温会引起沥青路面的开裂,尤其是路面温度低,又恰逢有降水时,路面会出现对交通有严重影响的道路结冰。如2014年1月17日,由于小雪、温度低导致路面结冰,在石家庄子龙大桥路段仅1 h内发生5起车辆追尾事故,造成多辆车严重损伤。路面温度变化充分反映了短期内气温波动对沥青路面温度的影响,同时沥青路面还吸收

从路面底部上传的热量,这部分热量主要反映了长期的周期性气候作用下,地温作用对于沥青路面温度有不可忽视的作用<sup>[6-7]</sup>。因此,仅着眼于从路表进入的能量,而忽视地温的作用,将导致沥青路面温度场预估精度的降低。本文引入前一日路面温度代表地温作用因子,结合其它气象因子,利用多元回归分析建立了沥青路面最高最低温度预报模型,以期提高路面温度的预报精度及高速公路气象服务质量,确保交通运输安全、畅通。

## 1 资料来源

以京秦高速玉田站、邯长高速涉县站分别代表河北省北部、南部高速公路路面温度状况。所用资料为2010年1月至2011年12月涉县和玉田高速监测站的逐小时路面温度、逐日路面最高最低温度、逐日最大最小相对湿度以及涉县和玉田气象站逐日最高最低气温、逐日14时的天空云量等气象资料。当云量<8成时定义为晴到多云,云量在8成以上(包括8成)且无降水出现定义为阴天,出现降水定义为雨天(雪天)。

收稿日期:2013-12-01;改回日期:2014-03-09

基金项目:河北省科技厅项目“灾害性天气条件下高速公路通行管理技术研究”(12275405)资助

作者简介:武辉芹(1973-),女,高级工程师,主要从事专业气象服务。E-mail:1532650350@qq.com

## 2 路面温度变化特征

### 2.1 不同季节路面温度的日变化

气温和太阳辐射强度是影响沥青路面温度场的主要因素<sup>[8]</sup>,浅层地温是随季节变化而波动<sup>[9]</sup>。对涉县和玉田高速监测站 2010 年 1 月至 2011 年 12 月逐时要素资料按月分析发现,不同季节的路面温度日变化有着各自的变化特征。这里分别以 1、4、7、10 月代表冬、春、夏、秋 4 个季节。

图 1 为玉田各季节逐小时平均路面温度和气温。可以看出,玉田各季节路面温度和气温均具有明显的日变化。无论春夏秋冬,路面温度和气温均在日出后快速升温,日落后路温下降较气温略快,这是因为路面的长波辐射在夜间起主导作用,在其影响下气温逐渐下降<sup>[10-11]</sup>。然而,其路面温度和气温

的变化较复杂,4 月、7 月变化特征相似,气温基本低于路面温度;1 月,在日出前和日落后时段气温低于路面温度,其它时段气温高于路面温度;10 月,只有日出至中午时段气温高于路面温度,其它时段气温低于路面温度。此外,各季气温和路面温度差的绝对值在 0~3℃左右。

涉县各季节路面温度和气温的日变化特征与玉田站的相似(图略)。与玉田站相比,涉县路面温度和气温的逐小时差值变化较大,日出前和日落后时段二者相差较小且变化不大,其中 1 月约 1.5~2.5℃,4 月约 4℃左右,7 月约 10~12℃,10 月约 10℃左右;日出至日落时段二者差异较大,中午差值 1 月相对较小,有 3~4℃,而 4 月、7 月、10 月均在 10℃以上,其中 7 月中午最大差值可达 21.6℃。此外各季节,涉县气温均低于路面温度,这与玉田有所不同。

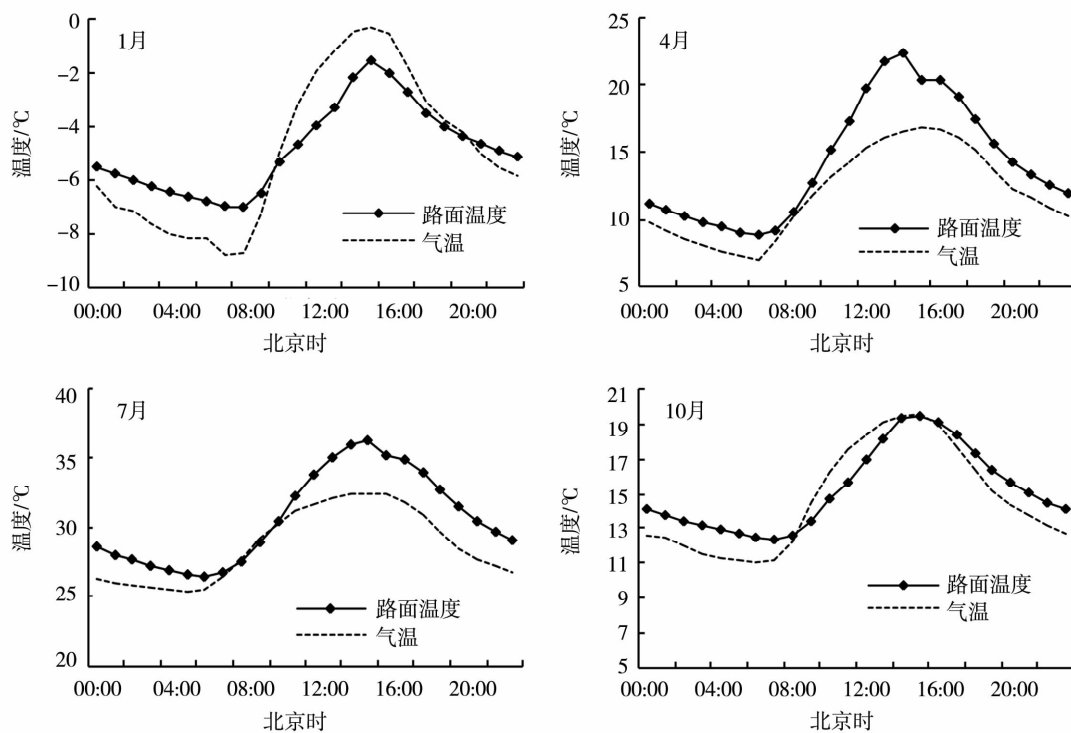


图 1 不同季节玉田路面温度和气温日变化

Fig. 1 The daily change of road surface temperature and air temperature in different seasons at Yutian

### 2.2 不同天气状况下路面温度和气温日变化

路面温度与气温差异的日变化不仅与季节有关,还与天气状况密切相关。不同的天气状况会造成路面温度不同。为此,根据天空云量将天气状况分为晴到多云、阴、雨天(雪天)3种。此外,还将降雪后路面有结冰的情况也列为一类,共 4 类。图 2 为玉田站 1 月不同天空状况下路面温度和气温的日

变化曲线。由此看出,冬季 1 月,晴到多云和阴天路面温度和气温日变化明显,夜间路面温度高于气温,白天气温高于路面温度,二者的变化特征类似。降雪或路面有积雪或结冰时,路面温度和气温的日变化较小,路面温度高于气温,并且在降雪过程中路面温度略有上升,气温略有下降,而在降雪结束后路面有积雪或结冰的情况下,路面温度基本保持不变,气

温明显降低,且有明显的日变化。这是因为路面的积雪或结冰像一层“棉被”阻挡了冷空气对地面的影响。夏季7月,晴到多云和阴天的天气状况下路

面温度和气温的日变化更加显著,雨天时路面温度和气温日变化较小<sup>[12]</sup>,且雨天时路面温度突然降低的时刻和降水开始的时刻相对应。

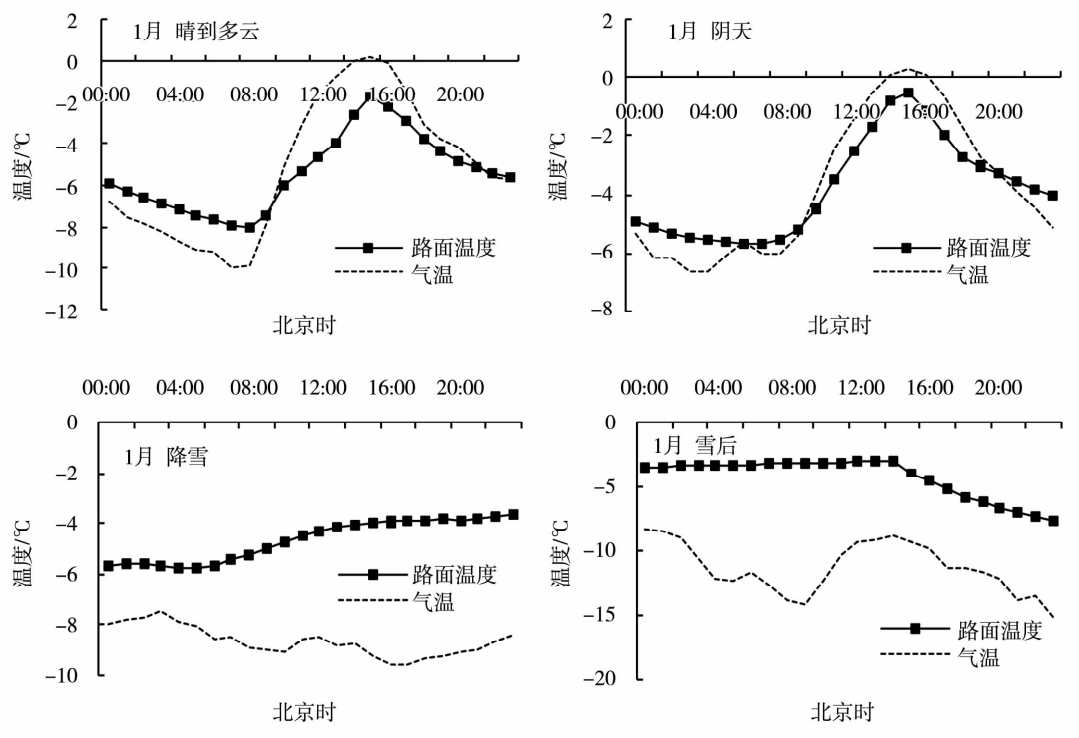


图2 玉田站不同天气状况下路面温度和气温的日变化

Fig. 2 The daily change of road surface temperature and air temperature under different weather conditions in January at Yutian

不同天气状况下涉县路面温度和气温的日变化特征与玉田相同,只是涉县路面温度始终高于气温(图略)。

### 2.3 不同地区路面温度日变化

为了探讨不同地区高速公路路面温度的日变化差异,将玉田和涉县2站的路面温度进行对比(图略)。无论哪个季节,涉县的路面温度均高于玉田的路面温度,其中1月和4月2站路面温度变化类似,2站路面温度在日出前和日落后时段相差约1~2℃,中午时段相差5~8℃;7月和10月的路面温度变化类似,2站路面温差均较1月和4月的大,在日出前和日落后时段相差约5~6℃,中午时段相差14~16℃。同时,对比了玉田和涉县2站的气温、相对湿度、能见度和风速等气象条件的日变化,发现涉县站因地理位置偏南、靠近山区,故其气温高于玉田站,相对湿度小于玉田站,2站能见度和风速情况类似。2站路面温度的日变化差异,可能是2个公路观测点的海拔高度、气象条件、地形和周边环境共同作用的结果。实际路面温度预报服务中,应加以

考虑并分区进行预报服务。

## 3 路面温度与气象因子的关系

高速公路处于完全暴露的自然环境中,白天路面吸收大气的短波辐射并向大气释放长波辐射,夜间由于路面温度高于气温,主要是向大气释放长波辐射,所以白天影响路面温度的因子有太阳辐射、气温、湿度、能见度、云量、前一日的路面温度等,夜间路面温度主要受气温、云量影响。太阳辐射不仅与云量、空气的清澈度有关,还与站点的经纬度、太阳高度角密切相关<sup>[13]</sup>,而太阳高度角又与季节相关,因此本文按月分析玉田、涉县2站点路面温度与气象因子的关系。

### 3.1 最高路面温度与气象因子的关系

表1是涉县、玉田2站各月路面最高温度与气象因子的相关性。可以看出,路面最高温度与前一日路面最高温度、当日最高气温呈显著正相关,与总云量、低云量、相对湿度、能见度呈显著负相关,而与风速的相关性不显著。在太阳辐射强度和其它气象

条件相同的情况下,如果前一日路面最高温度高,则以此为基础温度,当日的路面最高温度也将较高,如果前一日路面最高温度低,则当日的路面最高温度也将较低;当气温高、能见度好的情况下,大气清洁度高、通透性好,太阳辐射到达地面的能量强,从而导致路面最高温度高;通常当天空有云时,云层阻挡了太阳的辐射,从而使到达地面的太阳辐射强度减弱,且云量越多,到达地面的太阳辐射越弱;空气湿度较大,空气中的水汽、水滴、冰晶对太阳辐射有较强的吸收和散射作用,进而消弱了太阳到达地面的辐射强度<sup>[13]</sup>。同时还发现,相关性显著的6个因子

中只有前一日路面最高温度的相关性有一定的季节性,5~7月的相关性比其它月份稍差。

玉田路面最高温度与气象因子的关系比较复杂(表1)。上述7个气象因子中的最高气温与路面最高温度的相关性最好,各月均通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验;其次是前一日的路面最高温度,除了5月、6月外,其余月份二者的相关性均通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验;路面最高气温与云量、相对湿度在冬季的相关性不显著;路面最高温度与能见度在夏季呈正相关,冬季呈负相关;风速只在7月、9月通过了显著性检验。

表1 涉县和玉田各月路面最高温度与气象因子的相关性

Tab. 1 The correlations between the monthly maximum temperature of road surface and meteorological factors at Shexian and Yutian

站点	月份	样本数	前一日最高路温	当日最高气温	总云量	低云量	相对湿度	能见度	风速
涉县	1	31	0.5686 **	0.7611 **	-0.6815 **	-0.5016 **	-0.8496 **	0.7134 **	0.4844 **
	2	28	0.4524 *	0.8587 **	-0.5154 **	-0.6561 **	-0.5525 **	0.1482	0.1328
	3	31	0.7780 **	0.7872 **	-0.6289 **	-0.5483 **	-0.6613 **	0.3523 *	0.1330
	4	30	0.5901 **	0.8096 **	-0.4735 **	-0.5910 **	-0.4260 *	0.6623 **	0.0708
	5	29	0.2329	0.8032 **	-0.6264 **	-0.5590 **	-0.7504 **	0.6982 **	0.3117
	6	57	0.3217 *	0.7515 **	-0.5860 **	-0.5611 **	-0.7358 **	0.4448 **	0.1128
	7	58	0.0237	0.8115 **	-0.5736 **	-0.5794 **	-0.7804 **	0.4506 **	0.2344
	8	60	0.4106 **	0.8712 **	-0.7205 **	-0.6535 **	-0.7689 **	0.2804 *	0.3272 **
	9	60	0.4630 **	0.8621 **	-0.7194 **	-0.7140 **	-0.6854 **	0.4979 **	0.1942
	10	62	0.5937 **	0.8889 **	-0.6719 **	-0.6159 **	-0.6571 **	0.5291 **	0.2337
	11	60	0.6557 **	0.8758 **	-0.5478 **	-0.5677 **	-0.7132 **	0.7765 **	0.3857 **
	12	56	0.7214 **	0.9131 **	-0.5071 **	-0.4708 **	-0.5189 **	0.5701 **	0.0238
玉田	1	61	0.8900 **	0.8430 **	-0.0388	0	-0.2217	-0.0484	0.2149
	2	57	0.5983 **	0.7016 **	0.0593	-0.1898	-0.1921	-0.0192	-0.2056
	3	61	0.7439 **	0.7793 **	-0.3272 **	-0.3240 *	-0.5314 **	0.1181	0.0936
	4	51	0.3168 *	0.7458 **	-0.5571 **	-0.4734 **	-0.5678 **	0.2493	0.0799
	5	35	0.2305	0.6649 **	-0.1508	-0.5522 **	-0.2338	0.2634	0.0368
	6	58	0.2520	0.7795 **	-0.3041 *	-0.6842 **	-0.8200 **	0.4674 **	0.1006
	7	59	0.5156 **	0.8505 **	-0.7082 **	-0.5330 **	-0.5801 **	0.5818 **	0.4372 **
	8	62	0.3964 **	0.7493 **	-0.4962 **	-0.5808 **	-0.3366 **	0.3725 **	-0.0301
	9	56	0.5087 **	0.8778 **	-0.5164 **	-0.5410 **	-0.5119 **	0.0089	0.2734 *
	10	31	0.8748 **	0.8752 **	-0.4804 **	0.4001 *	-0.6205 **	0.4401 *	0.0163
	11	45	0.9231 **	0.9144 **	0.1931	0.3030 *	-0.0647	0.0701	-0.2371
	12	31	0.7867 **	0.7947 **	0.1261	-0.0987	0.3256	-0.414 *	-0.2192

注: \*、\*、\* 分别为通过 $\alpha=0.05$ 、 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验

### 3.2 路面最低温度与气象因子的关系

经统计发现,路面最低温度与最低气温有很好的相关性(表略)。其中,涉县站二者的逐月相关系数在 0.869578~0.971584 之间;玉田站逐月相关系数离散性明显,6~8 月的相关性较小,相关系数在 0.489255~0.661718 之间,其它月份相关系数在 0.733162~0.933306 之间,相关性明显。

## 4 路面温度统计模型的建立

### 4.1 路面最高温度统计模型

根据气象因子与路面最高温度的相关关系,考虑到太阳高度角的季节更替,本文按照不同月份利用多元回归分析方法建立路面最高温度预报模型,其中  $x_1$  为前一日路面最高温度(单位:℃)、 $x_2$  为当日最高气温(单位:℃)、 $x_3$  为总云量、 $x_4$  为低云量、

$x_5$  为相对湿度(单位:%)、 $x_6$  为能见度(单位:km)、 $y$  为路面最高温度(单位:℃)。表 2 是涉县路面最高温度月预报方程(不显著相关的因子未引入方程),复相关系数在 0.8204~0.9598 之间。同样方法得到玉田站路面最高温度的预报方程(表略)。

### 4.2 路面最低温度统计模型

利用 2010 年 1 月至 2011 年 12 月逐日路面最低温度与最低气温资料,分析路面最低温度和最低气温的线性相关关系,其中涉县站二者的相关系数为 0.994,玉田站为 0.992,建立的最低路面温度预报模型如下:

$$\text{涉县: } Y = 1.0679x + 6.8567$$

$$\text{玉田: } Y = 0.9641x + 2.8194$$

其中, $Y$  为路面日最低温度(单位:℃); $x$  为日最低气温(单位:℃)。方程均通过  $\alpha=0.05$  的显著性检验。

表 2 涉县逐月路面最高温度预报方程

Tab. 2 The monthly forecast equations of the maximum road surface temperature at Shexian

月份	路面最高温度预报方程
1	$Y = 7.20874 + 0.19458x_1 + 0.362688x_2 - 0.264511x_3 - 0.0367149x_4 - 10.3225x_5 + 0.0796871x_6$
2	$Y = 9.85235 + 0.153965x_1 + 0.518752x_2 - 0.112759x_3 - 0.284427x_4 + 0.82495x_5$
3	$Y = 26.4099 + 0.273221x_1 + 0.42692x_2 - 0.961512x_3 - 0.105058x_4 - 22.622x_5 - 0.234243x_6$
4	$Y = 13.352 + 0.110121x_1 + 0.63935x_2 - 0.354968x_3 - 0.248945x_4 + 16.2889x_5 + 0.368074x_6$
5	$Y = 30.7469 + 0.709628x_2 - 0.737347x_3 + 0.136678x_4 - 11.706x_5 + 0.0845863x_6$
6	$Y = 39.9956 - 0.0638669x_1 + 0.726273x_2 - 0.59009x_3 - 0.0693254x_4 - 14.2194x_5 - 0.0124876x_6$
7	$Y = 24.3917 + 1.05952x_2 - 0.11414x_3 - 0.533578x_4 - 11.336x_5 + 0.0625309x_6$
8	$Y = 18.1628 + 0.0378672x_1 + 1.19675x_2 - 0.85959x_3 - 0.116925x_4 - 7.8454x_5 + 0.0742635x_6$
9	$Y = 17.121 + 0.0548136x_1 + 1.18225x_2 - 0.907891x_3 + 0.0556069x_4 - 6.70998x_5 + 0.0476372x_6$
10	$Y = 6.65292 + 0.0542847x_1 + 1.0313x_2 - 0.0379424x_3 - 0.136151x_4 - 0.828918x_5 + 0.211058x_6$
11	$Y = 4.40386 + 0.146638x_1 + 0.621003x_2 + 0.0499877x_3 - 0.131636x_4 + 3.24303x_5 + 0.246396x_6$
12	$Y = 1.56591 + 0.292803x_1 + 0.529957x_2 - 0.100693x_3 - 0.274124x_4 + 5.78485x_5 + 0.162852x_6$

注:以上方程均通过了  $\alpha=0.01$  的检验

## 5 路面最高温度模型检验

利用涉县和玉田 2 站前一日路面最高温度、最高气温、总云量、低云量、湿度、能见度等实况资料,通过逐月路面最高温度预报方程计算路面最高温度。由于路面不但通过辐射与大气进行能量交换,还通过热传导与土壤深层进行能量传递,因此规定路面最高温度实况与方程计算值相差在  $\pm 3^\circ\text{C}$  之间,则认为预报准确,否则为错误。分析发现涉县 2012 年年预报准确率为 79.2%,其中 1 月、12 月路面最高温度的预报准确率最高,为 93.3%,其次是

10 月和 11 月准确率为 90%,2 月、3 月的准确率为 83.3%,其它月份准确率在 53.3%~80% 之间(图 3);玉田站,2012 年年预报准确率为 77.5%,其中 1 月、2 月、12 月预报准确率最高,为 90%,其次是 10 月、11 月准确率在 80%~86.7% 之间,5 月最差,预报准确率只有 53.3%(图略)。总体说来,冬季路面最高温度的预报准确率较高,5 月份最差,这可能是 5 月多雷雨天气,天气变化快,且经常出现在午后,而路面最高温度通常也是出现在午后,降雨对路面温度的影响极大;冬季,天气相对稳定,路面温度变化也相对平稳,从而预报精度较高。

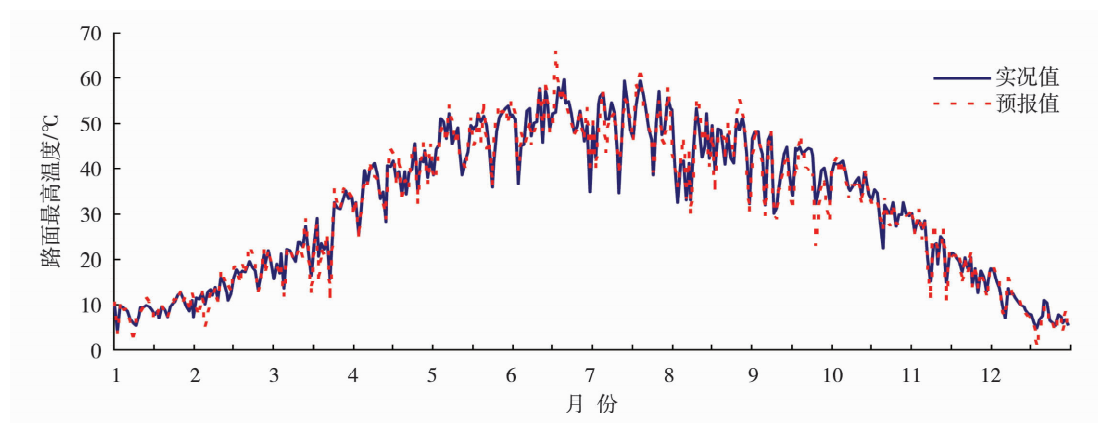


图3 2012年1~12月涉县路面最高温度实况值和预报值对比

Fig.3 The comparison of the maximum road surface temperature between the observed and predicted value by model from January to December 2012 at Shexian

## 6 小 结

(1)高速公路路面温度的日变化与气温类似,不仅与季节、天空状况有关,还与所处地理位置及自然环境密切相关。

(2)晴到多云和阴天,路面温度和气温日变化明显;降雪或降雨时,路面温度和气温日变化不明显,尤其是冬季降雪或路面有积雪或结冰时,路面温度高于气温,二者日变化较小,在降雪过程中路面温度略有上升,气温略有下降,在降雪结束后路面有积雪或结冰的情况下,路面温度基本保持不变,气温明显降低。

(3)路面最高温度受多种气象因子的影响,与前一日路面最高温度、最高气温、能见度呈显著正相关,与总云量、低云量、相对湿度呈显著负相关,其中与最高气温的相关性最显著;路面最低温度与最低气温呈显著线性相关。

(4)冬季路面最高温度的预报准确率高于夏季。这可能是夏季天气变化快,尤其是当有雷阵雨出现时,对路面温度的影响极大;冬季天气相对稳定,路面温度变化平稳。路面温度预报模型可应用于实际业务工作中。

## 参考文献:

- [1] 孙立军,秦健. 沥青路面温度场的预估模型[J]. 同济大学学报, 2006,34(4):480-483.
- [2] 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,2007,35(11):1476-1480.
- [3] 贾璐,孙立军,黄立葵,等. 沥青路面温度场数值预估模型[J]. 同济大学学报,2007,35(8):480-483.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 张翠华,张文煜,卞韬,等. 河北省石家庄地面温度变化特征[J]. 干旱气象,2012,30(1):27-33.
- [7] 张翠华,张文煜,齐晓华. 石家庄地温的垂直变化特征[J]. 气象海洋水文仪器,2013,30(2):41-44.
- [8] 秦建,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.
- [9] 张翠华,张文煜,郭立平. 河北石家庄浅层地温变化特征[J]. 干旱气象,2013,31(1):78-81.
- [10] 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.
- [11] 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,2009,20(6):737-744.
- [12] 张翠华,车少静,卞韬,等. 石家庄草面温度变化特征[J]. 干旱气象,2011,29(1):17-22.
- [13] 武辉芹. 石家庄市紫外线与气象因子的相关性分析及等级预报方程的建立[J]. 干旱气象,2010,28(4):483-488.

(下转至第 676 页)

**Key words:** road surface temperature on highway; air temperature; correlation analysis; prediction model