

沪宁高速公路路面温度变化特征及统计模型^{* 1}

田 华 吴 昊 赵琳娜 陈 辉 李坤玉 杨晓丹

(国家气象中心,北京 100081)

摘 要

使用 2006 年 7 月—2007 年 6 月沪宁高速公路沿线梅村和仙人山站附近的逐分钟路面温度、气温、湿度、风向、风速、降水气象资料,分析了梅村和仙人山不同季节和不同天气状况下路面温度的日变化特征。结果表明:不同季节路面温度和气温具有明显的日变化;日出至日落时段,路面温度与气温有较大差异。在此基础上,应用逐步回归方法建立了梅村和仙人山最高和最低路面温度统计模型,得出最低路面温度模型模拟结果与实况的变化趋势接近,误差绝对值不超过 2℃,具有很好的实际应用价值;而最高路面温度模型在一定程度上模拟结果偏差较大,实际应用中需进行适当修订。

关键词:路面温度;气象要素;逐步回归

引 言

交通是现代生活的命脉,但交通事故的频繁发生也严重影响人们的生命财产安全。气象环境对高速公路的行车安全、正常运行起着举足轻重的作用,近年来引起许多学者的关注和重视,开展了灾害性天气对公路交通的影响^[1-2]以及交通事故与气象条件关系^[3-5]等方面的研究工作。还有一些学者利用公路交通事故资料和气象要素资料,采用 logistic 回归方法建立了公路气象预警模型^[6-7]。但是道路交通事故受很多因素影响,不同研究区域和研究方法均表明气象要素对公路气象交通有不同的影响作用。夏季汽车在高温条件下行驶时,由于热胀冷缩的作用,使得轮胎容易发生变形,抗拉力会下降,再加上轮胎在行驶过程中不断地发热,而散热却相对较慢,于是轮胎内气压随之增高,从而造成胎体过薄发生爆胎。据不完全统计,高速公路交通事故的 46% 是由于轮胎发生故障引起的,而其中爆胎一项就占事故总量的 70%^[8]。因而如何预防爆胎就成了夏季行车安全的关键所在。同时,高温也易使司机疲劳、注意力不集中甚至中暑,从而引发交通事故。此外,路面温度状况对路面结构的承载强度和使用效果有重要的影响,如高温导致沥青路面层产

生车辙,低温导致路面缩裂等。因此,研究路面温度与气象条件的关系,开展路面温度预报服务,对有效预防和减少交通事故的发生具有积极作用。

国外在路面温度预报方法研究方面起步较早,加拿大、丹麦、德国等国家现在已经具备较完善的路面监测系统和路面温度预报模式系统。1992—1993 年,德国开始将路面状况及路面温度预报列为德国公路天气信息系统(SWIS)的一部分,并且沿高速公路安装了公路天气监测系统,为路面温度预报提供了资料来源^[9]。一些研究人员应用能量守恒方法进行路面温度预报,如 Jacobs 等^[9]应用能量守恒方法,分别对不同条件下的路面温度进行了预报计算,得到其平均误差一般为 1~2 K。Shao 等^[10]也应用能量守恒方法研制了自动实时的路面温度和路面状况预报模型,可为冬季路面维护部门提供 3 h 的路面温度和路面状况(干、湿、霜、冰)预报。1999 年,加拿大研制了路面状况预报模式(METRO),该模式由路面能量平衡模块、路面材料热传导模块和路面水、雪、冰积聚模块组成,可提供每日 2 次的 24 h 路面温度预报,预报误差约在 ±2 K 左右^[11]。

目前,我国北京、江苏和广东等省、市已经开展了公路沿线路面温度的监测,有关路面温度变化特征和预报技术方法也相继展开。吴晟等^[12]利用京珠高速公路粤境北段自动气象站的逐分钟路面温

* 中国气象局基建项目(2007)(JJ2006-0601)和国家气象中心预报员团队课题共同资助。
2008-12-30 收到,2009-07-28 收到再改稿。

度、地温和气温等气象资料,分析研究了南岭山地高速公路路面温度特征及其与天气状况、气温、风速等气象条件的关系,同时讨论了地形对南岭山地高速公路路面温度的影响。刘熙明等^[13]依据辐射平衡原理,考虑太阳短波辐射、大气和地面的长波辐射(辐散)潜热、感热传输等能量之间的平衡,并考虑水汽、气溶胶、浮尘以及云等对太阳短波辐射的吸收和散射,建立了一种较实用的路面温度预报模型。秦健等^[14]对国外路面温度的研究进行了回顾,详细阐述了国外利用统计方法研究路面温度的发展情况,为建立统计方法的路面温度预报模型提供了参考。秦健等^[15]通过对我国多个地区路面温度实测数据和气象资料进行回归分析,建立了以气温、太阳辐射强度和路面深度为主要输入参数的沥青路面温度场预估模型。凌良新等^[16]在分析了混凝土表面温度与百叶箱气温变化特征的基础上,利用回归拟合方法建立了混凝土表面温度的预报模型,以上研究为本文提供了良好的预报方法和思路。

1 资料和方法

沪宁高速公路江苏段全长 248.2 km,包括镇江支线约 258 km,途经南京、镇江、常州、无锡、苏州等市,是人口稠密、经济发达地区。该路段路面采用了

密级配中粒式沥青混凝土上层路面,这种路面具有良好的高温稳定性和水稳定性^[17]。沪宁高速公路沿线共布有 26 个气象要素自动监测站和 2 个路面温度监测站。路面温度观测仪器安装在沪宁高速公路南京—无锡路段的距南京 49 km 处仙人山服务区(海拔 40 m)和距南京 169 km 的梅村服务区附近(海拔 9 m),观测的物理量为路面温度、气温、湿度、风向、风速、能见度、降水等。

本文应用 2006 年 7 月—2007 年 6 月沪宁高速公路沿线的 2 套自动站监测的逐分钟路面温度、气温、湿度、风向、风速、降水气象要素资料,研究了路面温度的变化特征,并利用统计回归方法,研究路面温度与气温、气压、相对湿度等气象要素的关系,建立了最高和最低路面温度统计模型。

2 路面温度变化特征

2.1 不同季节路面温度的日变化特征

秦健等^[15]研究沥青路面温度场的分布规律时发现,气温和太阳辐射强度是影响沥青路面温度场的主要因素。所以,利用 2006 年 7 月—2007 年 6 月逐时要素资料,通过分析发现不同季节的物理量日变化有着各自的变化特征。以 1,4,7,10 月为代表月,图1(梅村)和图2(仙人山)为各季的平均路面温

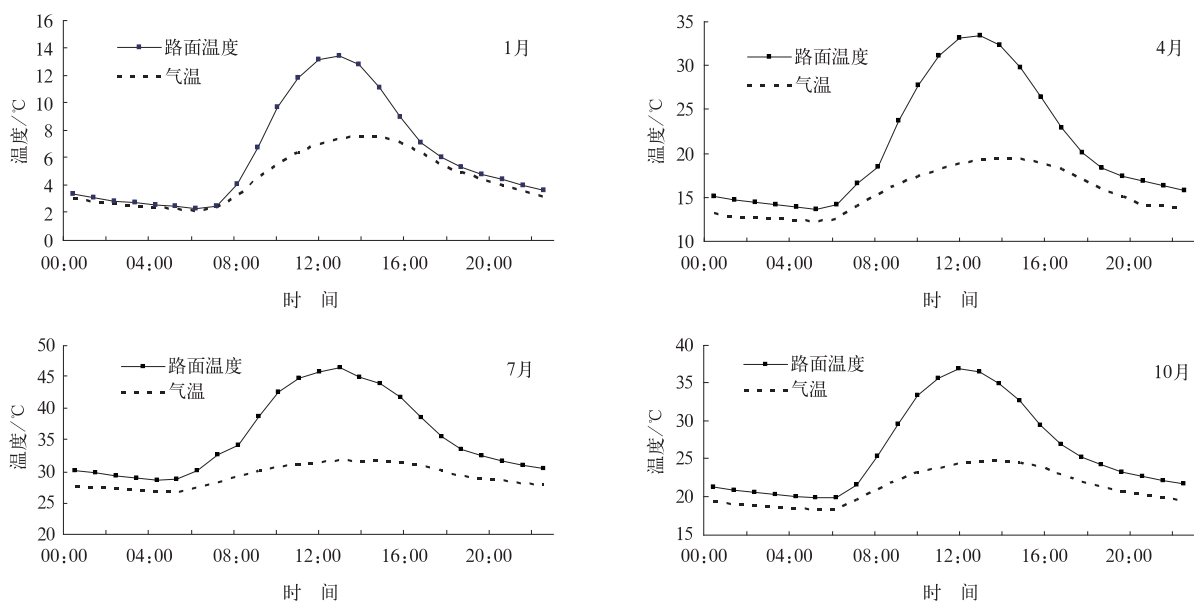


图 1 梅村路面温度和气温日变化图

Fig. 1 The temporal evolution of daily road surface temperature and air temperature at Meicun

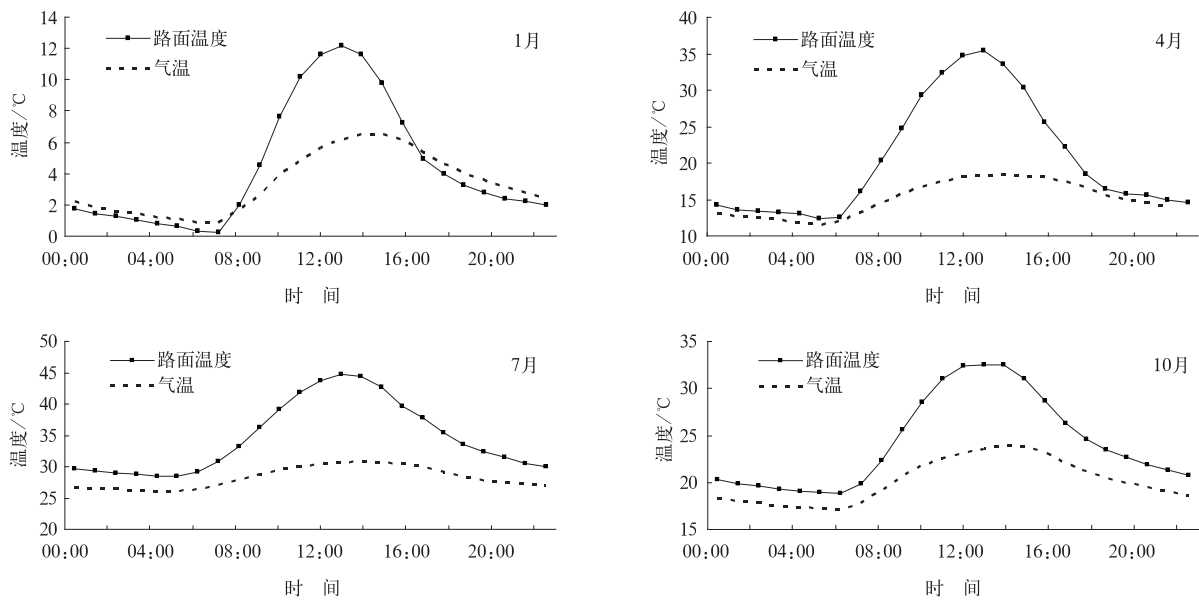


图 2 仙人山路面温度和气温日变化

Fig. 2 The temporal evolution of daily road surface temperature and air temperature at Xianrenshan

度和气温的日变化曲线(图中时间均为北京时,下同)。由图 1 和图 2 可见,路面温度和气温具有明显的日变化。无论春夏秋冬,路面温度均在日出后升温较快,位相较气温超前,这是由于气温的加热主要来源于下垫面的长波辐射,而地温的加热则来源于太阳短波辐射,因而路面温度的增加先于气温。日落后路面温度下降较气温略快,这是因为路面的长波辐射降温在夜间起主导作用,在其影响下,气温逐渐下降^[12]。同时,在日出至日落时段,路面温度与气温有较大差异,1 月中午有 5~6 °C 的差值,4 月、7 月、10 月中午差值均在 10 °C 以上。而日出前和日落后时段,路面温度与气温相差较小,约 1~3 °C 左

右。此外,1 月仙人山站在日出前和日落后时段,路面温度均低于气温,这与梅村站有所不同。

2.2 不同天空状况路面温度变化差异

路面温度与气温差异的日变化不仅与季节有关,还与天气条件有密切关系。不同天空状况会使路面升温有所不同。为此,计算了不同天气状况下的月平均路面温度和气温的日变化曲线。这里使用日照时数来区分天空状况,将天空状况分为晴到多云、阴天两种,定义日照时数大于等于 3 h 为晴到多云,日照时数小于 3 h 为阴天,并参考定时观测的云量、云状和天气现象资料,同时将降水天气也列为一类,共分 3 类天空状况。图 3 为梅村站 1 月和 7 月

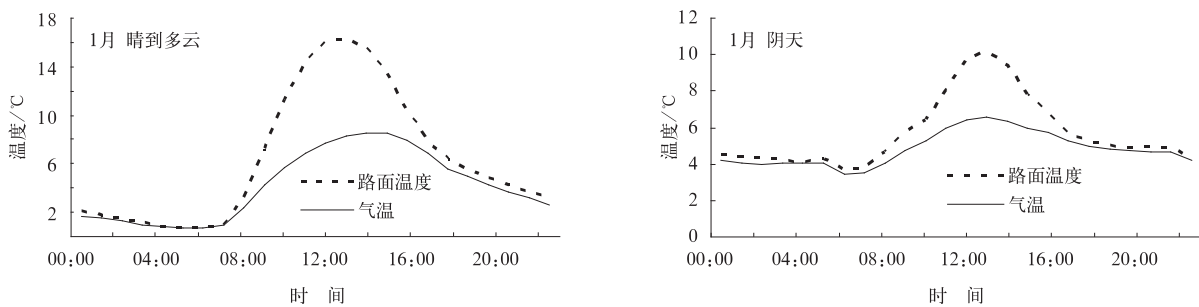
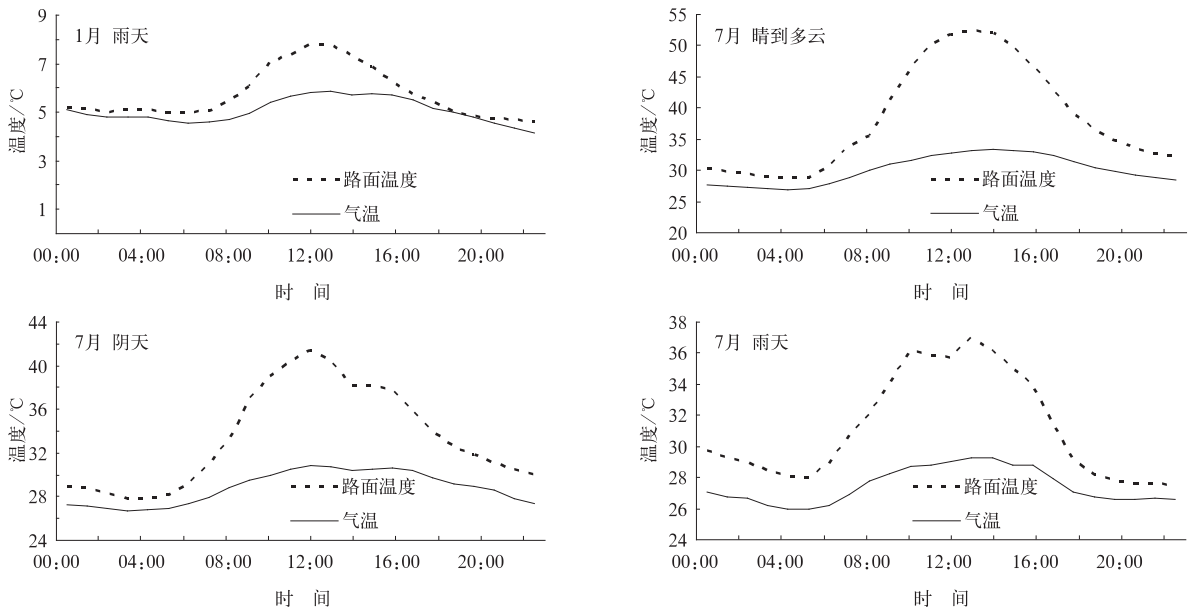


图 3 梅村站 1 月和 7 月不同天空状况下路面温度和气温日变化

Fig. 3 The temporal evolution of daily road surface temperature and air temperature at Meicun for different weather condition in January and July



续图 3

不同天空状况的路面温度和气温的日变化曲线。

由图 3 可以发现,晴到多云天气和阴天路面温度和气温日变化明显,尤其在晴到多云天气,日出后路面温度升温较快,位相超前气温。雨天路面温度和气温的日变化则较小,中午路面温度与气温差的变化幅度也较小。7月不同天空状况下路面温度和气温的日变化更加显著。另外,1月仙人山站(图略)不同天气状况下,路面温度和气温的日变化特征与梅村站相同,但是在晴到多云天气和阴天时,特别

是日出前和日落后时段,有气温较路面温度偏高的现象出现。通过分析仙人山站风速和湿度等条件,发现上述时段仙人山站近地面层风速较小,湿度较高,大气层结稳定,有利于逆温的出现,为此易造成上述时段路面温度低于气温的现象出现。

2.3 不同路段路面温度特征分析

为了探讨公路沿线路面温度的变化差异,将梅村和仙人山站的路面温度进行对比。图 4 是梅村和仙人山 1月、4月、7月和 10月月平均路面温度日变

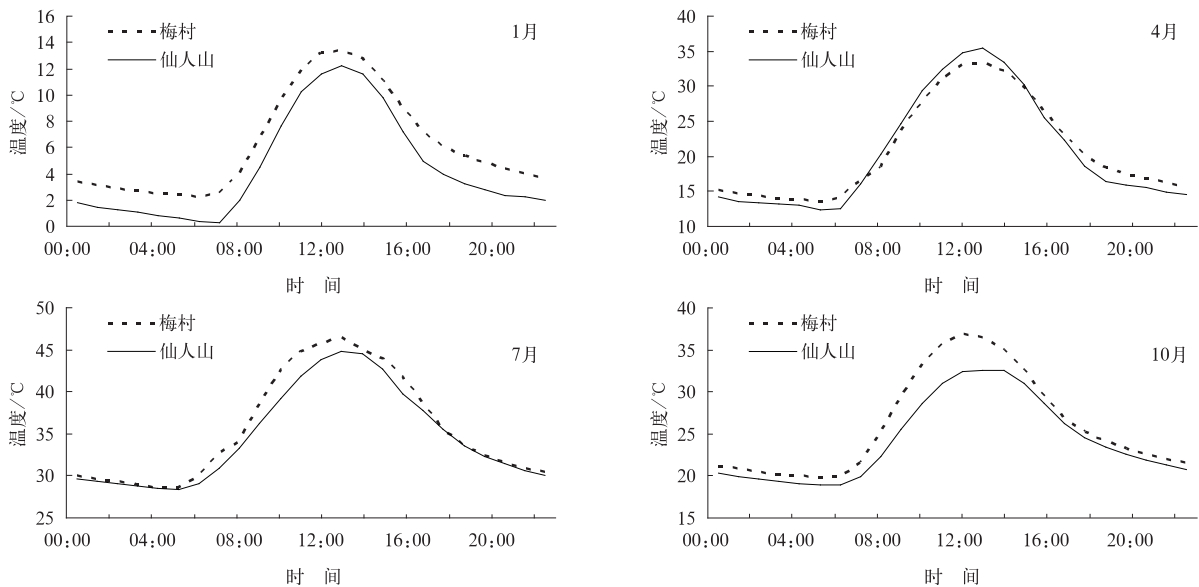
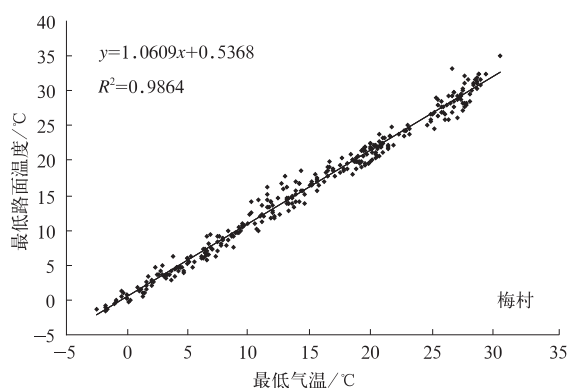


图 4 梅村和仙人山路面温度日变化差异

Fig. 4 The daily evolution of road surface temperature at Meicun and Xianrenshan

化对比曲线。从图中可以看出,两站路面温度有较大差异。1月、7月和10月,不论何时仙人山路面温度均较梅村低;4月,日出到14:00时段,仙人山路面温度高于梅村。两站路面温度在7月的日出前和日落后时段最为接近。4个月的中午时段两站最高路面温差均在 2°C 左右。同时,对梅村和仙人山两站的气温、相对湿度、气压和风速等气象条件的日变化差异也进行了比较。发现仙人山站因地势较高,依山傍水,所以其气温和气压均低于梅村站,而相对湿度和风速则略高于梅村。两站路面温度的变化差



异,可能是两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,应加以考虑并分段进行预报服务。

3 路面温度统计模型的建立

3.1 最低路面温度统计模型

利用2006年7月—2007年6月逐日最低路面温度与最低气温数据,计算了最低路面温度与最低气温的相关关系,图5是梅村站和仙人山站最低路

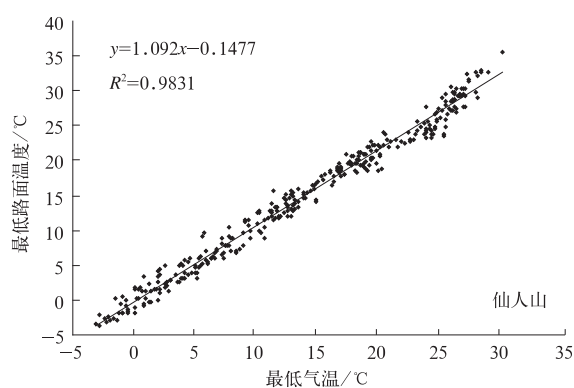


图5 最低路面温度与最低气温点聚图

Fig. 5 The scatter diagram of minimal air temperature against minimal road surface temperature

面温度与最低气温相关关系图,图中显示日最低气温与最低路面温度具有很好的线性相关关系,梅村站相关系数达到为0.993,仙人山站相关系数达到为0.992。为此,建立最低路面温度方程:

$$\text{梅村: } y = 1.0609x + 0.5368; \quad (1)$$

$$\text{仙人山: } y = 1.092x - 0.1477. \quad (2)$$

其中, y 为日最低路面温度,单位: $^{\circ}\text{C}$; x 为日最低气温,单位: $^{\circ}\text{C}$ 。方程均通过0.05的显著性检验。

3.2 最高路面温度与各气象要素的关系

表1为梅村和仙人山两站最高路面温度与多种气象要素的相关关系统计表。从表1可以看出:梅村最高路面温度与气温、相对湿度、气压3类要素的日最高、日最低、日平均值和累积降水量的关系密切,都通过了0.05的显著性检验。而由2.2节的分析可知,仙人山的路面温度和梅村的变化规律不同。分析发现仙人山最高路面温度与气温、相对湿度、气压、风速4类要素的日最高、日最低以及日平均值以及累积降水量的关系密切,也都通过了0.05的显著性检验。为此,以上要素可以作为统计最高路面温度的可选因子。

表1 最高路面温度与气象要素的相关统计

Table 1 The correlation between maximal road surface temperature and meteorological factors

气象要素	最高路面温度	
	梅村	仙人山
平均气温	0.851**	0.829**
最高气温	0.907**	0.886**
最低气温	0.76**	0.742**
平均相对湿度	-0.311**	-0.158**
最高相对湿度	-0.132*	0.036
最低相对湿度	-0.345**	-0.248**
平均风速	-0.18	-0.236**
最高风速	-0.12	-0.205**
最低风速	-0.16	-0.201**
平均气压	-0.7**	-0.696**
最高气压	-0.715**	-0.710**
最低气压	-0.685**	-0.685**
累积降水量	-0.127*	-0.123*

注:*表示通过0.05的显著性检验,**表示通过0.01的显著性检验。

3.3 最高路面温度统计模型

分析气温、相对湿度、气压和降水量之间相互独立性发现,气温与气压间存在较好的相关关系(图略),因此,剔除气压因子,只选用气温 X_{1j} ($j=1,2$,

3 分别表示日最高气温、日最低气温、日平均气温)、相对湿度 X_{2j} ($j=1,2,3$ 分别表示日最高相对湿度、日最低相对湿度、日平均相对湿度)、日累积降水量 X_3 共 7 个因子,同时也考虑因子的非线性关系,把以上 7 个因子的平方和立方项(X_{ij}^2, X_{ij}^3 ($i=1,2; j=1,2$), X_3^2, X_3^3)作为预报因子,另外考虑因子间的非线性交互影响,增添 $X_{ij} \cdot X_3$ ($i=1,2; j=1,2,3$)和 $X_{1j} \cdot X_{2j}$ ($j=1,2,3$),最终得到 36 个因子。

同样对于仙人山剔除因子间相关性高的因子,选用气温 X_{1j} ($j=1,2,3$ 分别表示日最高气温、日最低气温、日平均气温)、相对湿度 X_{2j} ($j=1,2,3$ 分别表示日最高相对湿度、日最低相对湿度、日平均相对湿度)、风速 X_{3j} ($j=1,2,3$ 分别表示日最高风速、日最低风速、日平均风速)、日累积降水量 X_4 共 10 个因子,同时也考虑因子的非线性关系,把以上 10 个因子的平方和立方项(X_{ij}^2, X_{ij}^3 ($i=1,2,3; j=1,2,3$), X_4^2, X_4^3)作为预报因子,另外考虑因子间的非线性交互影响,增添 $X_{ij} \cdot X_4$ ($i=1,2,3; j=1,2,3$)和 $X_{ij} \cdot X_{kj}$ ($i=1,2; k=i+1,3; j=1,2,3$),最终得到 66 个因子。

利用 2006 年 7 月—2007 年 6 月逐日的气温、相对湿度、气压、风速等资料对以上两站利用逐步回归方法,最终得到以下方程:

梅村: $Y=9.619+1.409 \times X_{11}-0.002 \times X_{22} \times X_{22}$, 相关系数为 0.953; (3)

仙人山: $Y=15.868+0.722 \times X_{11}-0.002 \times X_{22} \times X_{22}+0.018 \times X_{11} \times X_{11}$, 相关系数为 0.947。 (4)

其中, Y 为日最高路面温度(单位: $^{\circ}\text{C}$), X_{11} 为日最高气温(单位: $^{\circ}\text{C}$), X_{22} 为日最低相对湿度(单位: %), 以上方程通过了 0.05 的显著性检验。

上述方程中最高路面温度都与最低相对湿度的平方成反比,也就是说两者间存在非线性负相关关系,即相对湿度越小,最高路面温度越高。由 3.2 节相关关系分析可知,最高路面温度与最低相对湿度相关关系较好,通过了 0.01 的显著性检验。一般而言,路面温度升高,相对湿度会逐渐减小。这可能是由于路面温度与太阳辐射有关,同时还要受到天空状况、湿度、风速等气象要素的影响。路面温度升温主要取决于太阳辐射,而水汽对太阳辐射具有一

定的削弱作用。所以,最高路面温度与最低相对湿度呈负相关关系。

4 路面温度模型推算效果检验

用 2007 年 7 月 15 日—8 月 15 日逐日最高和最低路面温度、气温、相对湿度资料,对模型(1)~(4)进行推算和检验,资料样本长为 32 d。

利用 2007 年 7 月 15 日—8 月 15 日的实况最低气温、最高气温以及最低相对湿度资料,对建立的最低和最高路面温度模型效果进行检验,结果见表 2。从表 2 可以看到,最低路面温度线性回归模型的准确率都比较高,平均绝对误差小于 1°C ,均方根误差和平均绝对误差之间的差值都在 0.5°C 左右。而最高路面温度的逐步非线性回归模型的准确率略差,平均绝对误差在 3°C 左右,均方根误差在 4°C 左右。

表 2 最低和最高路面温度模型推算效果检验 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Table 2 The validation for the model of minimal and maximal road surface temperature (unit: $^{\circ}\text{C}$)

误差	梅村		仙人山	
	最低路面温度	最高路面温度	最低路面温度	最高路面温度
平均绝对误差	0.88	2.56	0.92	3.39
均方根误差	1.06	3.27	0.96	4.13

在图 6 中,由梅村和仙人山最低路面温度实况与模型推算效果对比结果来看,最低路面温度模型推算结果与实况变化趋势接近,误差绝对值均不超过 2°C ,说明最低路面温度的线性模型推算效果很好,可以作为预报参考,具有很好的应用价值。而由梅村和仙人山最高路面温度实况与模型推算结果对比来看,虽然,最高路面温度预报模型推算结果与实况的变化趋势也很接近,但是,有个别日最高路面温度推算结果与实况还存有较大偏差的情况。因此,实际业务工作中,对上述模型进行应用时,预报员要在获取相关预报要素值(如日最高气温、日最低相对湿度等)的基础上进行最高路面温度和最低路面温度预报,同时,还需考虑影响路面变化的太阳辐射等气象因素,对模型推算结果进行适当的订正。

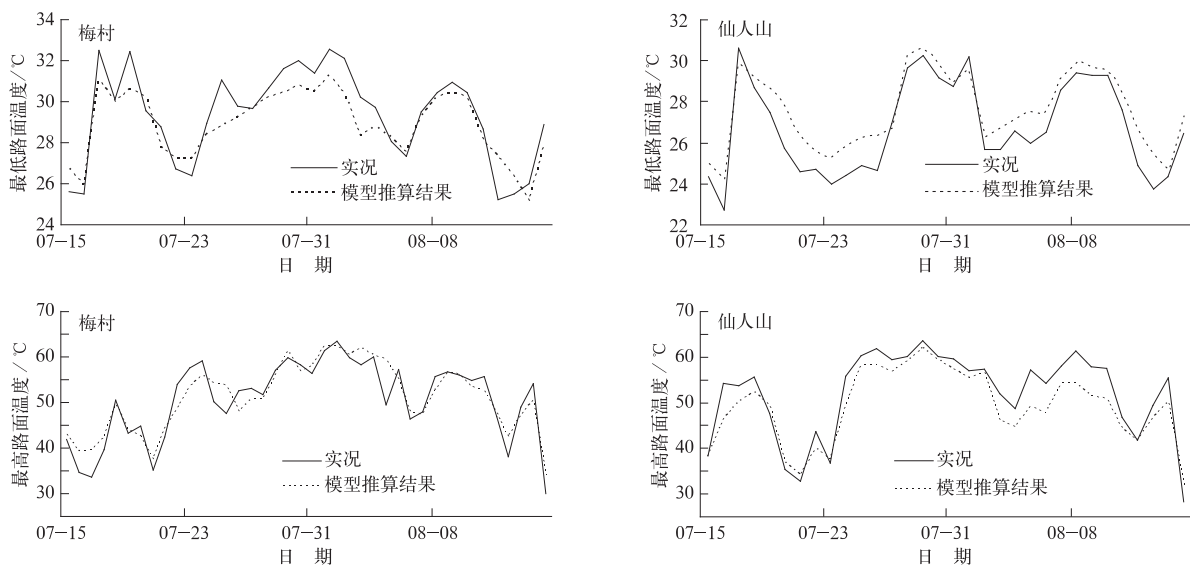


图6 2007年7月15日—8月15日梅村和仙人山站最低和最高路面温度实况与模型推算结果对比

Fig. 6 The temporal evolution of the minimal and maximal road surface temperature from 15 July to 15 August 2007 at Meicun and Xianrenshan

5 结论与讨论

本文在分析沪宁高速公路沿线梅村和仙人山站不同季节以及不同天气状况条件下路面温度变化特征的基础上,利用统计分析方法建立最低和最高路面温度模型并对模型推算效果进行检验,得到以下结论:

1) 不同季节下路面温度和气温具有明显日变化。同时,梅村和仙人山两站的路面温度变化也有明显差异。

2) 1月晴到多云天气和阴天路面温度和气温日变化明显,尤其晴到多云天气日出后路面温度升温较快,位相超前气温。雨天路面温度和气温的日变化则较小,中午路面温度与气温差的变化幅度也较小。7月不同天空状况下路面温度和气温的日变化更加显著。

3) 最低路面温度预报模型推算结果与实况的变化趋势接近,误差在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内,该模型可以作为预报参考,具有很好的应用价值。

4) 最高路面温度模型,由于资料有限,没有考虑太阳辐射的影响,因此,一定程度上造成路面最高温度模型推算结果偏差较大,在实际的业务工作中需进行适当修订。

本文通过统计分析方法建立了路面温度统计相关模型,但统计分析法的基础是路面温度场与各影

响因素的统计学关系,该方法仅能从现象上反映二者的表面联系。通过该方法建立的预估模型也存在地区适应性问题,这是本方法的不足之处。但是,统计分析法建立的模型形式和求解过程都比较简单,输入参数少且易于获得,预测精度基本满足业务需要,还是值得使用的。同时,本文在分析路面温度变化特征和建立路面温度模型时,没有考虑天气状况和太阳辐射的影响,如对其进行细致分析和研究,模型推算结果会得到进一步改进。由于资料有限,本文建立了全年统一的路面最高温度和路面最低温度模型方程,考虑到不同季节和不同天气条件下路面温度与气象要素的关系会有所区别,日后工作中在获取更多资料的前提下,将对不同季节或不同天气条件下路面温度模型展开深入研究。

致 谢: 本文所用资料由江苏省气象科学研究所提供,特此致谢!

参 考 文 献

- [1] 王喆. 高速公路灾害性天气研究. 交通标准化, 2007, 1: 105-108.
- [2] 蒋燕. 高速公路气象灾害分析与对策研究. 上海公路, 2003, (增刊 1): 206-211.
- [3] 潘娅英, 陈武. 引发公路交通事故的气象条件分析. 气象科技, 2006, 34(6): 778-782.
- [4] 贺芳芳, 房国良, 吴建平. 上海地区不良天气条件与交通事故之关系研究. 应用气象学报, 2004, 15(1): 126-129.
- [5] 许秀红, 闫敏慧, 于震宇, 等. 道路交通事故气象条件分析及安全等级标准——以黑龙江省为例. 自然灾害学报, 2008, 17

- (4); 53-58.
- [6] 罗慧, 李良序, 胡胜, 等. 公路交通事故与气象条件关系及其气象预警模型. *应用气象学报*, 2007, 18(3): 350-357.
- [7] 凌良新, 潘燕莲, 叶化军, 等. 潮州市交通事故气象预警模型. *广东气象*, 2008, 30(4): 45-47.
- [8] 王振宇. 高速公路汽车爆胎的原因与预防. *汽车维护与修理*, 2003, 3: 16-17.
- [9] Jacobs W, Raatz W E. Forecasting road-surface temperatures for different site characteristics. *Meteorol Appl*, 1996, 3(3): 243-256.
- [10] Shao J, Lister P J. An automated nowcasting model of road surface temperature and state for winter road maintenance. *J Appl Meteor*, 1996, 135: 1352-1361.
- [11] Crevier L P, Delage Y. METRo: A new model for road-condition forecasting in Canada. *J Appl Meteor*, 2001, 40: 2026-2037.
- [12] 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. *气象科技*, 2006, 34(6): 783-787.
- [13] 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. *应用气象学报*, 2004, 15(5): 623-628.
- [14] 秦健, 孙立军. 国外沥青路面温度预估方法综述. *中外公路*, 2005, 25(6): 19-23.
- [15] 秦健, 孙立军. 沥青路面温度场的分布规律. *公路交通科技*, 2006, 23(8): 18-21.
- [16] 凌良新, 潘燕莲, 叶化军, 等. 清远市混凝土表面温度变化特征及预报. *广东气象*, 2008, 30(4): 45-47.
- [17] 许道化, 邓学钧, 柯弘生. 沪宁高速公路江苏段路面结构研究 // 沪宁高速公路江苏段建设文集. 2006. <http://www.321jz.com/transportation/transportroad/200609/305.html>.

Characteristics and Statistical Model of Road Surface Temperature on Huning Expressway

Tian Hua Wu Hao Zhao Linna Chen Hui Li Kunyu Yang Xiaodan

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

The relationship between road surface temperature and weather conditions is a key problem for road surface temperature prediction which can prevent and reduce traffic accidents effectively. Many countries such as Canada, Denmark, and Germany have established road weather information systems and road surface temperature numerical forecast models while China is somewhat behind.

From July 2006 to June 2007, observations are carried out at Meicun and Xianrenshan stations along the Huning Expressway when road surface temperature, air temperature, humidity, wind direction, wind speed, and rainfall are recorded minutely. These data are analyzed to study the daily characteristics of expressway surface temperature for different seasons and weather conditions. On the basis of that, statistical models of minimal and maximal road surface temperature are established by stepwise regression for Meicun and Xianrenshan. It shows that daily variation characteristics of road surface temperature and air temperature are obviously different. The road surface temperature increases rapidly after sunrise and goes beyond air temperature when it is sunny or cloudy. While the discrepancy between road surface temperature and air temperature is smaller in raining days or at noon. In July, the discrepancy is extremely obvious. The simulated minimal road surface temperature is close to observations and errors are within ± 2 °C, so the model is applicable in practice. The errors for maximal road surface models are relatively large because of data limitation and not considering solar radiation impacts.

The models established using statistical methods are local and need modifying when used in other regions. If more data are obtained, further research will be carried out to distinguish different seasons or weather conditions and the impact of solar radiation should be considered.

Key words: road surface temperature; weather factors; stepwise regression