

李蕊,牛生杰,汪玲玲,等. 三种下垫面温度对比观测及结冰气象条件分析[J]. 气象,2011,37(3):325-333.

## 三种下垫面温度对比观测及结冰气象条件分析<sup>\*1</sup>

李蕊<sup>1</sup> 牛生杰<sup>1</sup> 汪玲玲<sup>1</sup> 吕晶晶<sup>1</sup> 王燕<sup>1</sup>  
谢真珍<sup>1</sup> 柯怡明<sup>2</sup> 杨志彪<sup>2</sup> 熊守权<sup>3</sup>

1 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044

2 湖北省气象局, 武汉 430074

3 湖北省恩施州气象局, 恩施 445000

**提 要:** 利用湖北省恩施和金沙两地 2009 年冬季 1、2 月土壤、水泥、沥青三种不同下垫面温度和自动气象站的常规气象要素观测, 研究冬季三种不同下垫面温度与气温等气象要素之间的关系, 建立相应的多元回归拟合公式, 并分析路面结冰的气象条件。结果表明: 水泥和土壤路面温度变化幅度小于沥青路面温度, 且二者变化趋势非常一致。气温是影响路面温度变化最重要的因素之一。通过不同天气条件下的多种气象要素对路温进行多元回归拟合所得计算值与实测值相关系数除金沙站沥青路面为 0.88 外, 均在 0.9 以上, 预测效果较好。此外, 路面 0℃ 低温与路面积水对结冰产生和维持的密切关系, 对业务实践具有一定的指导意义。

**关键词:** 下垫面温度, 回归拟合, 结冰条件, 冬季

## Comparison of Three Kinds of Underlying Surface Temperatures and Analysis of the Road Icing Meteorological Conditions

LI Rui<sup>1</sup> NIU Shengjie<sup>1</sup> WANG Lingling<sup>1</sup> LV Jingjing<sup>1</sup> WANG Yan<sup>1</sup>  
XIE Zhenzhen<sup>1</sup> KE Yiming<sup>2</sup> YANG Zhibiao<sup>2</sup> XIONG Shouquan<sup>3</sup>

1 School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Hubei Provincial Meteorological Bureau, Wuhan 430074

3 Enshi Meteorological Office of Hubei Province, Enshi 445000

**Abstract:** Based on the observations of three different kinds of underlying surface temperatures and the automatic meteorological sensor measurements during January and February of 2009 winter in Enshi and Jinsha, Hubei Province, this paper studies the relationship of the three kinds of underlying surface temperatures and the air temperature by establishing multiple regressions accordingly with the statistic analysis method as well as the meteorological conditions of icy underlying surface. The results show that the range of soil and concrete road surface temperature is less than asphalt, and the former two variation trends are highly consistent. Air temperature is one of the most important factors influencing the underlying surface temperature. The underlying surface temperature in different weather conditions predicted by multiple regression are well validated, with 0.9 above correlated with observations except for 0.88 of asphalt underlying surface in Jinsha. Besides, the revealed close relationship between the low temperature around 0℃ on the underlying surface and the wet state for the road ice development will benefit the meteorological departments for their practical operation to some extent.

**Key words:** underlying surface temperature, multiple regressions, icing conditions, winter

\* 科技部科技支撑计划项目南方冰雪灾害天气预测预警评估技术研究 2008BAC48B01 和江苏省教育厅青蓝工程资助云雾降水物理学与气溶胶研究创新团队项目

2009 年 11 月 25 日收稿; 2010 年 6 月 30 日收修定稿

第一作者: 李蕊, 主要从事大气物理学方向研究. Email: lirui\_07@nuist.edu.cn

## 引言

在经济高速发展的今天,交通道路是国家物资运输的大动脉,其发达程度是一个国家经济实力的重要标志。但公路都会面临冰雪雨雾等恶劣天气的影响,而恶劣天气通常会导致高速公路路段出现诸如能见度低、路面积冰(积水)打滑等恶劣路况,蕴藏着交通事故隐患,并常常引发重大安全事故。公路交通安全运输属于对气象高度敏感的行业,其所追求的快速、高效、安全、准时的目标,在很大程度上要受到气象因素的制约。提供准确及时的公路气象与路状信息对道路交通安全保障具有至关重要的作用。

路面温度状况的研究已经有半个多世纪的历史。综合各国学者的研究方法<sup>[1-2]</sup>,大致可以归纳为两类:一是理论分析法<sup>[3-15]</sup>,即根据气象学和传热学的基本原理采用数值分析方法建立路面温度场的预测模型。二是统计分析法<sup>[16-17]</sup>,即通过大量的实测数据进行回归分析,建立路面温度同当地气温、太阳辐射等环境气象要素之间的定量关系,该类国内研究较少,大都针对一种或者两种下垫面。虽然基于理论的地温数值预测模型能够从本质上反映各种因素对路面温度场的影响机理,但理论模型形式复杂,输入参数多且不易获得,求解过程也较为繁琐。用统计分析方法虽然需要大量的实测数据,但其却克服了参数多、计算繁琐等缺点。本文主要采取统计分析法,研究冬季土壤、水泥、沥青三种常用的下垫面温度与气温等气象要素之间的关系,建立相应的多元回归拟合公式,并分析下垫面结冰的气象条件。

## 1 资料与方法

本文主要采用湖北省气象局在恩施雷达站和咸宁金沙区域大气本底站安装的一套自动监测三种不同下垫面包括土壤、水泥、沥青的温度传感设备、下垫面表面镶嵌的温度计以及记录常规气象要素的自动气象站资料。

观测地点和时间:恩施雷达站位于湖北省西南部利川市石板岭雷达站山顶(30°17'N、109°16'E),海拔 1722.2 m,观测起止时间为 2009 年 1 月 12 日至 2 月 28 日。金沙区域大气本底站位于湖北省东南部崇阳县金沙管理区韭菜岩山顶(29°38'N、114°12'E),海拔 751.4 m,观测起止时间为 2009 年

1 月 1 日至 2 月 28 日。

观测方法及项目:自动气象站逐分钟记录本站气压、气温、相对湿度、风速风向、降水量、能见度。三种下垫面温度传感器逐小时记录下垫面温度。为保证资料的准确和仪器的正常使用,并辅以每天 4 次人工观测,分别在北京时间 02、08、14、20 时记录三种下垫面表面温度计温度值、降水量、天气现象。

三种下垫面温度监测简介:水泥下垫面和沥青下垫面的场地规格均为 2 m(东西)×1 m(南北)×30 cm(厚)。传感器位于观测地段的中央,埋入水泥或柏油下垫面一半,与水泥或柏油下垫面紧贴,另一半露于空中。水泥和沥青下垫面按省级 1 级公路等级标号设定。并在土壤、水泥和沥青下垫面偏西的位置设置安装三支地面温度表,用来人工观测下垫面温度,以对比验证自动检测数据的准确性。

## 2 三种下垫面温度对比观测

考虑到恩施资料较为完整,通过对恩施冬季 1 和 2 月三种下垫面逐时温度求取平均值,得到三种下垫面温度冬季平均日变化,如图 1。由图可见,三种下垫面温度逐时变化曲线均呈波浪型,日变化趋势基本一致,但在温度范围和极值上有所差异。

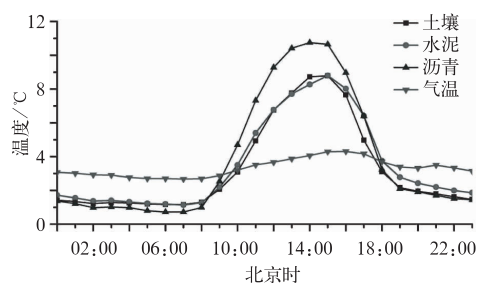


图 1 恩施冬季三种下垫面温度与气温的平均日变化

Fig. 1 Mean daily variation of three kinds of underlying surface temperatures and air temperature in winter of Enshi

一方面,通过下垫面温度日变化可以看出,恩施日出前和日落后,即夜晚时三种下垫面温度非常接近,并维持在 1 °C 低温左右。从 08 时三种下垫面温度均开始急剧升高,并在 14 至 15 时左右达到峰值。之后急剧降低,在 18 时左右变化放缓,进入低温维持阶段。

另一方面,通过对比土壤、水泥、沥青三种不同下垫面温度可以看出,水泥和土壤下垫面温度变化

幅度小于沥青下垫面温度,且二者变化趋势非常一致,在 14 时左右达到峰值 9 °C 左右。沥青下垫面平均温度在 14 时左右最高可达 11 °C 左右,而夜间三者温差不大,在 0.3 °C 左右,沥青略低。表 1<sup>[6]</sup>给出了不同国家和地区不同研究者分析路面温度时根据不同路面性质所采用的比热值。可以看出,虽然同种材料比热取值存在差异,但普遍认为沥青的比热容小于水泥的比热容,土壤与水泥比热容近似相等。因此,沥青路面温度日变化幅度较大可能由于其比热容较小,在白天同样的太阳辐射条件下,升温 and 降温更为剧烈所致。表 2<sup>[7-8]</sup>给出了不同下垫面的平均反照率和长波比辐射率主要两种辐射特性。可以看出,沥青的反照率最小,且因其颜色最深,相同的太

表 1 不同道路材料的比热容取值<sup>[6]</sup>  
Table 1 Typical values of heat capacity of road materials

来源	物质	比热容/ $10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
Farmer & Tonkinson(1989)	沥青 表面	2.1
	底土	2.5
	水泥 道床	2.4
	底土	2.5
	沥青	1.855
Thornes(1984)	水泥	2.11
Oke(1987)	沥青	1.9
	水泥 路表	2.11
Weng et al. (1981)	70%饱和土壤	3.1

表 2 不同下垫面的辐射特性<sup>[7-8]</sup>

Table 2 Radiation characteristics of different underlying surface

下垫面种类	土壤	水泥	沥青
下垫面平均反照率	0.02~0.2	0.3~0.5	0.05~0.1
下垫面长波辐射比辐射率	0.95~0.97	0.5~0.7	0.956

阳辐射条件下,吸收的太阳辐射最多,因此在白天升温速度最快。由于夜间温度受长波辐射影响较大,而由表 2 可知三种下垫面的长波比辐射率相差不大,因此三者夜间温度较为接近。

### 3 三种下垫面温度与气温的关系

#### 3.1 恩施冬季三种下垫面温度与气温平均日变化

据统计,恩施冬季 1、2 月份中 62.5% 的总天数为雨雾天气,故总体平均日变化气温值变化不大,最大温差在 2 °C 以内,如图 1。18 时至 09 时左右气温高于三种下垫面温度 2 °C 左右,而 09 时至 18 时平均温度远低于三种下垫面温度,最多可相差 8 °C 左右。由此可见,白天下垫面对气温有正强迫,而夜晚气温对下垫面有正强迫,该现象与 Thornes 等<sup>[6]</sup>分析路面温度与气温的相关关系时,得出的结论相同,即白天路面温度高于气温,并驱动气温变化,而夜晚则相反。

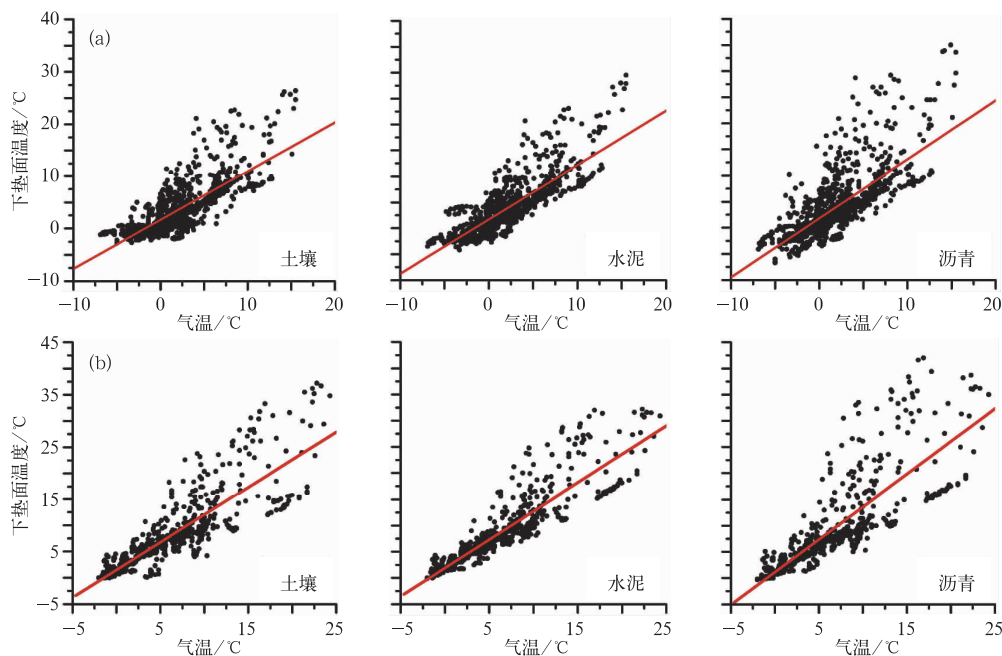


图 2 三种下垫面温度与气温的相关性

(a) 恩施; (b) 金沙

Fig. 2 The correlation between three kinds of underlying surface temperatures and air temperature; (a) Enshi, (b) Jinsha

### 3.2 恩施、金沙三种下垫面温度与气温的相关性分析

#### 3.2.1 三种下垫面温度与气温的相关性

为研究冬季下垫面温度与气温之间的关系,以下垫面温度为纵坐标,气温为横坐标,寻找二者之间的联系,如图 2,其中直线为散点图的线性拟合,恩施土壤、水泥、沥青的三种下垫面温度与气温相关系数分别是 0.79、0.84、0.76,金沙的分别为 0.84、0.89、0.82,均通过了 0.001 的显著性检验,与 1976

年国外学者<sup>[2]</sup>所得出的路表温度与气温呈线性关系的结论一致。但由图可以看到,路温在 10℃ 以上相关性随气温的增加而剧减,因此需结合下垫面温度与气温平均日变化的研究结论,进一步明确路表温度和气温之间的关系,对路表温度进行分类拟合。

#### 3.2.2 白天和夜晚三种下垫面温度分别与气温的相关性

根据路表温度与气温平均日变化关系的结论,白天和夜晚下垫面温度与气温之间有不同的对应关

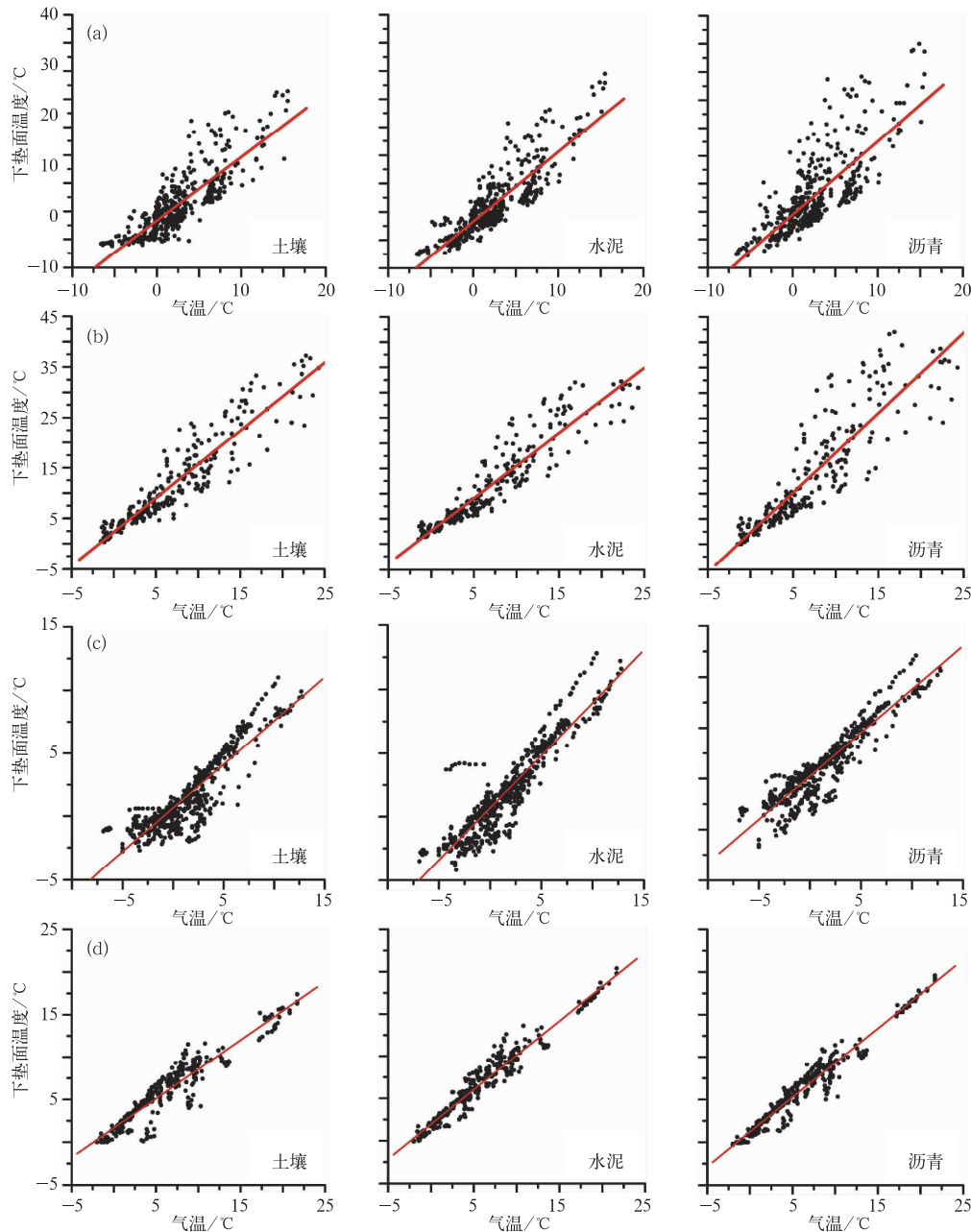


图 3 不同时间恩施、金沙三种下垫面温度与气温相关性  
恩施: (a) 白天, (c) 夜晚; 金沙: (b) 白天, (d) 夜晚

Fig. 3 The correlation between underlying surface temperature and air temperature in different time in Enshi and Jinsha  
Enshi: (a) daytime, (c) nighttime; Jinsha: (b) daytime, (d) nighttime

系,将恩施、金沙两地冬季路表温度划分成白天和夜晚两个时间段来讨论。白天和夜晚主要是根据冬季恩施、金沙当地日出和日落时间来划分的,即:白天为08至18时,夜晚为19至次日07时。拟合图见图3,相关系数见表3。相关系数比不分白天和夜晚的拟合情况均有所提高,其中金沙夜晚三种下垫面均达到0.9以上,最高达0.98,拟合效果很好。由此亦可知,气温是影响下垫面温度变化的因素中最为重要的一个,与Thornes等<sup>[6]</sup>的互相关分析中的结论一致。

表3 恩施、金沙白天和夜晚三种下垫面温度分别与气温的相关系数

Table 3 The fitting correlation coefficients between three kinds of underlying surface temperatures and air temperature in diurnal and nocturnal Enshi and Jinsha

		土壤	水泥	沥青
白天	恩施	0.83	0.87	0.77
	金沙	0.93	0.93	0.89
夜晚	恩施	0.90	0.92	0.93
	金沙	0.94	0.97	0.97

#### 4 三种下垫面温度不同天气条件下拟合预测及误差分析

由于太阳辐射、风速、降水量以及相对湿度均对路面温度变化和路面结冰有一定影响,因此,为了能较为准确地拟合预测路面温度,同时考虑气温以及上述几个方面因素,综合分析和拟合路面温度值。

##### 4.1 三种下垫面温度不同天气条件下拟合对比

对于太阳辐射的考虑,是按照日平均总云量对两地所有观测数据分成三种不同天气条件进行下垫面温度拟合。三种不同的天气条件划分范围为:

(1) 雾天:一天中出现能见度低于1 km时,该天即定义为雾天。根据所有观测数据统计,恩施、金沙两地雨天前后均有雾出现,且雨、雾天数分别为30和32天,占总日数的62.5%和54.2%。由此可见,该种天气为恩施、金沙等山区冬季典型且重要类型,故单独列出分析。

(2) 多云、阴天:除雨、雾天外,平均总云量为40~100的日数。根据气象学分析的定义,0至10为晴天,20至40为少云,40至80为多云,90至100为阴天。

(3) 少云、晴天:除雨、雾天外,平均总云量为0~40的日数。

恩施、金沙两地三种不同天气条件日数统计见

表4。由表可知,恩施、金沙山区冬季晴天样本数最少,雨雾天样本数最多,占一半以上。

表4 恩施、金沙三种不同天气条件日数  
Table 4 Statistics of three different weather conditions in Enshi and Jinsha

地点	多云、阴天	少云、晴天	雨、雾天	总日数
恩施	14	4	30	48
金沙	16	11	32	59

运用自动监测温度传感器观测得到的恩施、金沙三种下垫面温度( $T$ )与自动气象站自动记录的气温( $T_a$ )、风速( $V$ )、降水量( $P$ )、相对湿度( $RH$ )4个因子,进行多元线性回归拟合,并在三种不同天气条件下分为白天和夜晚,两地共得到12组拟合公式,每组包括三种不同下垫面情况。

通用拟合公式为: $T = a + bT_a + cV + dP + eRH$ 。公式中不同条件下的 $a, b, c, d, e$ 5个参数见表5。其中, $/$ 表示该条件下降水量缺测,对应的参数 $d$ 无法获得。表6为对应不同条件下的拟合公式与相应观测值的相关系数。

通过与只用气温拟合结果表3对比,表6中雨、雾天的相关系数总体提高很多,恩施夜晚土壤、水泥、沥青下垫面温度的相关系数分别最高达0.99、0.97、0.97,为雨、雾天气条件下对下垫面温度预测以及下垫面结冰的预报提供了参考。少云、晴天的预报效果也较表3显著提高,由之前的平均0.9提高到0.94,但阴天效果较之前有所下降,这可能由于同为阴天多云天气的各日,到达下垫面的太阳辐射变化较大,导致下垫面温度拟合效果稍差。

图4为三种不同天气条件下用相应拟合公式算出的拟合计算值与实测值的对比,纵坐标为拟合计算值,横坐标为实测值,其中对角线表示函数 $x = y$ ,当散点越接近该直线,则表明拟合效果越好,误差越小;当散点在该直线上方时,表示拟合值大于实测值,反之表示小于实测值。对于实测值小于0℃时,即在直线下方的散点,当拟合值大于实测值,则可能漏报路面结冰,存在潜在的交通隐患。相反,若拟合值小于实测值,则可能多报了路面结冰,会造成采取相应预防措施的人力物力的浪费。但总体来说,拟合值大于实测值潜在危险更大,应尽量避免,仍需在业务中根据具体情况作相应的订正。由图4a和b可以看出,雾天夜晚预测效果好于白天,白天随气温的增加,误差增大。这可能与随着温度增加,太阳辐射增强,而此拟合对太阳辐射的考虑较为粗略,没能反映出该变化有关。对比三种不同天气时夜晚

表 5 恩施、金沙不同天气条件下拟合公式参数

Table 5 Parameters of fitting formulas in different weather conditions in Enshi and Jinsha

		白天						夜晚					
		雨、雾天		阴、多云		晴、少云		雨、雾天		阴、多云		晴、少云	
		恩施	金沙	恩施	金沙	恩施	金沙	恩施	金沙	恩施	金沙	恩施	金沙
土壤	a	24.86	12.09	6.12	6.65	22.71	8.81	-9.34	-0.72	-1.56	-2.56	-8.36	-3.7
	b	0.97	1.42	0.91	1.03	1.21	1.42	0.87	0.71	0.35	0.69	0.73	0.78
	c	-0.13	-0.49	0.04	-0.28	0.13	-0.79	-0.05	-0.01	-0.12	0.1	0.35	0.15
	d	-0.78	-1.29	-3.2	/	43.65	/	0.19	-0.02	-1.09	/	/	/
	e	-21.11	-9.08	-3.92	2.58	-25.56	-1.95	10.14	2.29	2.52	4.16	7.96	2.07
水泥	a	35.69	20.67	10.11	6.32	25.84	-3.15	-6.32	9.02	2.85	7.37	-2.2	8.27
	b	0.97	1.19	0.96	1.17	1.4	1.26	0.92	0.45	0.54	0.41	0.91	0.58
	c	-0.07	0.17	0.12	-0.14	-0.28	0.4	-0.11	0.27	-0.11	0	0.09	-1.06
	d	-0.67	1.59	-2.6	/	58.89	/	0.27	-0.32	3.3	/	/	/
	e	-32.46	-18.66	-8.91	-3.8	-27.33	-1.07	7.49	-6.97	-2.78	-1.24	1.11	2.65
沥青	a	47.99	27.27	16.17	4.64	34.11	-8.98	-6.34	11.17	-1.26	5.49	-4.97	6.77
	b	1.05	1.63	1.09	1.6	1.35	1.54	0.91	1.01	0.66	0.41	0.96	0.6
	c	-0.21	-0.52	0.02	-0.36	-0.65	0.65	0.09	0.59	0	0.07	0.26	-0.07
	d	-0.73	-1.99	2.84	/	63.34	/	0.15	-0.72	1.18	/	/	/
	e	-44.19	-26.25	-13.92	-4.11	-31.66	1.6	7.15	-0.29	1.41	-0.76	2.43	-2.3

表 6 拟合计算值与观测值相关系数

Table 6 The correlation coefficients between simulations and observations

		雨、雾天			多云、阴天			少云、晴天		
		土壤	水泥	沥青	土壤	水泥	沥青	土壤	水泥	沥青
白天	恩施	0.85	0.92	0.87	0.80	0.87	0.79	0.88	0.96	0.88
	金沙	0.97	0.90	0.88	0.75	0.56	0.61	0.83	0.97	0.95
夜晚	恩施	0.99	0.97	0.97	0.72	0.77	0.83	0.97	0.99	0.99
	金沙	0.94	0.71	0.74	0.96	0.84	0.84	0.98	0.96	0.95

预测情况,由图 4b,4c 和 4d 可以看出,分成雾天、阴天、晴天后,下垫面温度拟合值与实际值符合较好,雾天和晴天情况稍好于阴天,可能与阴天夜晚云量分类较为简单,而云量对阴天夜晚大气逆辐射影响较大,以致下垫面温度变化有较大误差有关。对比三种下垫面,由图 4 看出没有明显的差别,表明三种下垫面不同热力性质包括比热容、传导率等对预测影响较小,细微差别需进一步通过误差分析来讨论。

## 4.2 拟合值误差分析

### 4.2.1 拟合公式的地域适用性检验

利用恩施、金沙两地冬季 1、2 月三种下垫面温度实际观测值来检验用不同天气条件下两地拟合公式计算得到下垫面温度拟合计算值的准确性,结果见表 7。从表 7 可以看出,两地三种下垫面温度相关系数除金沙沥青下垫面为 0.88 外,均在 0.9 以上,且通过了 0.001 的显著性水平检验,两地三种下垫面预报误差的方差平均值分别为 3.69 °C 和 8.38 °C,拟合预测效果较好。

图 5 给出了恩施和金沙冬季 1、2 月三种下垫面拟合值与实测值之间的误差频率分布图。对比两图

可知,恩施三种下垫面误差稍小于金沙站,预报误差在 -3~3 °C 之间的频率最大,分别占到了 91%、94%、87%,金沙分别占了 84%、82%、75%。另一方面,土壤和水泥拟合效果稍好于沥青路面,这可能与沥青比热容稍小,热通量对路面温度影响稍大有关。

### 4.2.2 三种下垫面温度 0 °C 以下误差分析

为了进一步研究冬季路面结冰条件并为气象部门冬季路面结冰预警提供参考,以及验证下垫面温度低于 0 °C 时拟合公式预测效果,表 8 给出了恩施三种下垫面温度低于 0 °C 时的拟合值误差分析。从表中可以看出,三种下垫面平均绝对误差和绝对误差的方差均小于 1 °C,预报效果较好,对实际业务具有一定的参考价值。

## 5 三种下垫面结冰的气象条件分析

冬季路面出现的主要灾害之一就是道路溜滑引起的各种交通事故,而道路溜滑主要是由于路面结冰引起的。路面结冰的产生和维持受到多方面因素影响,本文主要讨论三种不同下垫面结冰的气象条件,包括温度、风速、相对湿度和降水量。以恩施冬



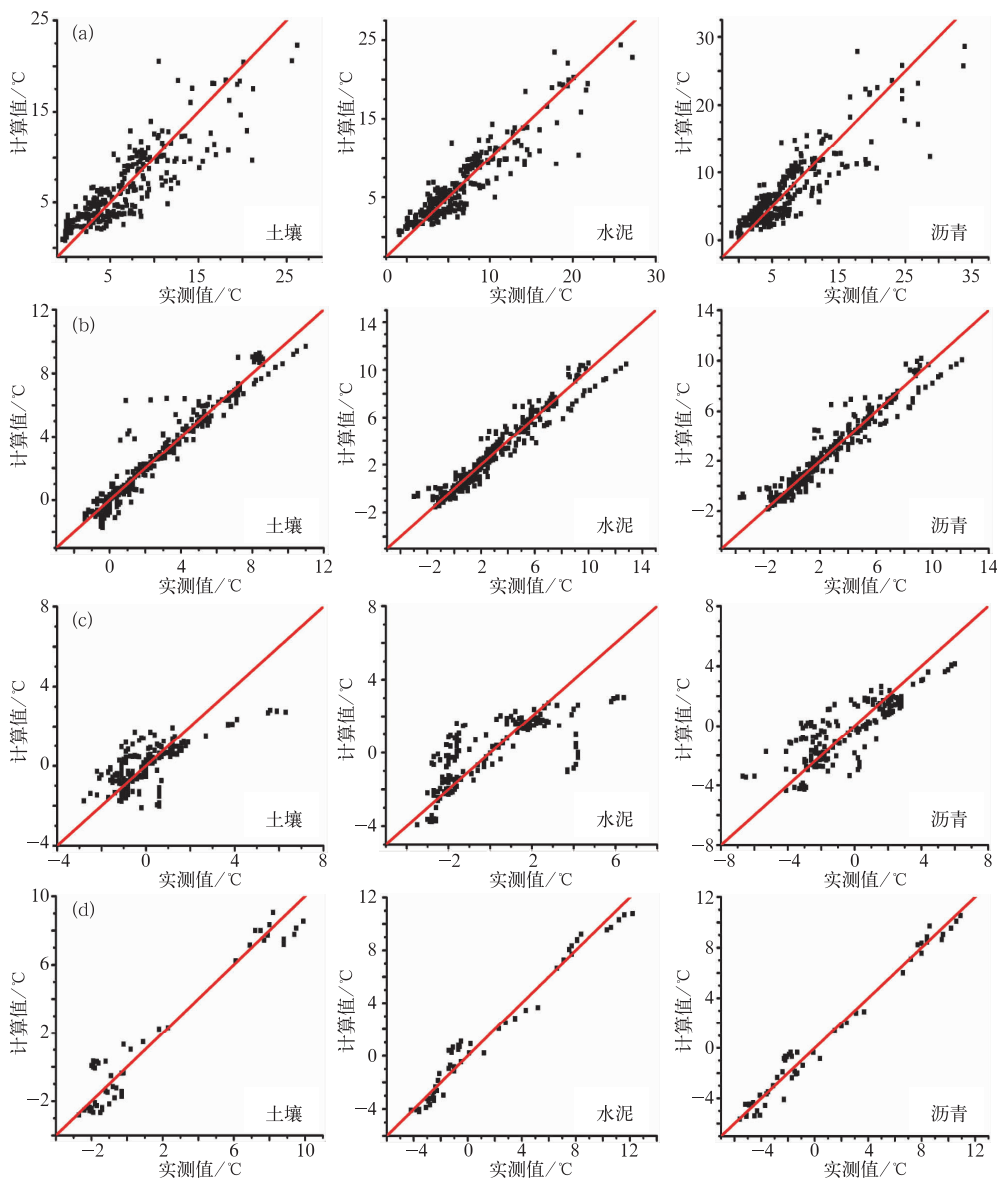


图 4 恩施三种不同天气条件下下垫面温度拟合计算值与实测值对比

白天: (a) 雾天; 夜晚: (b) 雾天, (c) 阴天, (d) 晴天

Fig. 4 Scatter diagrams of simulated underlying surface temperatures versus observations in three different weather conditions in Enshi

Daytime: (a) foggy days; Nighttime: (b) foggy days, (c) cloudy days, (d) sunny days

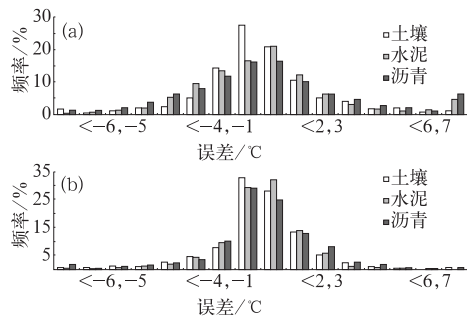


图 5 下垫面温度拟合值误差频率分析 恩施(a); 金沙(b)

Fig. 5 Frequency distribution (%) of simulated underlying surface temperature error band in Enshi (a) and Jinsha (b)

表 7 恩施、金沙三种下垫面温度拟合值误差分析  
Table 7 Error analysis of three kinds of simulated underlying surface temperatures in Enshi and Jinsha

		样本数	相关系数	预报误差的方差/°C
恩施	土壤	1152	0.92	3.52
	水泥	1152	0.95	2.5
	沥青	1152	0.93	5.06
金沙	土壤	1416	0.93	7.09
	水泥	984	0.91	6.33
	沥青	984	0.88	11.73

季 1 月 12 日至 2 月 28 日观测资料为例,分析下垫面结冰与该四种气象要素之间的关系,如图 6a。图 6b 表示恩施冬季白天气温和三种路面温度。可

表 8 恩施三种下垫面温度 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 拟合值绝对误差分析Table 8 Analysis of absolute errors of three kinds of underlying temperatures below  $0^{\circ}\text{C}$  in Enshi

	土壤	水泥	沥青
样本数	262	237	240
平均绝对误差/ $^{\circ}\text{C}$	0.862	0.949	0.976
绝对误差的方差/ $^{\circ}\text{C}$	0.919	0.854	0.934

可以看出,恩施冬季白天温度基本都在  $0^{\circ}\text{C}$  以上,日温差较大,最高温度可达  $25^{\circ}\text{C}$ ,白天路面不易结冰,却可以融化积冰并减少路面湿度。图 6c 为夜晚情况,可以看出,夜晚可维持在  $0^{\circ}\text{C}$  附近或者以下,为结冰提供温度条件,因此,路面结冰主要发生在夜晚。

当路面温度徘徊在  $0^{\circ}\text{C}$  附近或以下时,且路面因降水仍有积水时,路面发生结冰的概率较大。例如图 6 中 2 月 15 日至 21 日,夜间三种下垫面温度及气温均维持在  $0^{\circ}\text{C}$  左右,且此期间为连续低温阴

雨天气,均有路面结冰现象产生。

在没有明显降水发生,当气温及路面温度在  $0^{\circ}\text{C}$  以下,地面潮湿或有积水以及积雪未能及时融化,也容易维持路面结冰现象。例如图 6 中 1 月 27 日至 31 日,由于 26 日出现较强雨雪天气,虽然之后 4 天均未有降水发生,但夜间持续  $0^{\circ}\text{C}$  以下的路面温度以及气温,导致这 4 日连续有结冰现象出现。

由以上分析可知,路面温度维持在  $0^{\circ}\text{C}$  及以下,是路面结冰的必要条件,也是相关性最高的条件。对于降水来说,当日有降水发生,并不是低温路面结冰的必要条件。若前几日有降水,而当日并无降水发生,但空气相对湿度较高,风速不大,地面积水蒸发不强的情况下,路面维持潮湿或积水,也可能导致低温路面结冰。对于风速,由图 6a 可以看出,总体来看结冰日的风速相对未结冰日偏小,可能由于湍

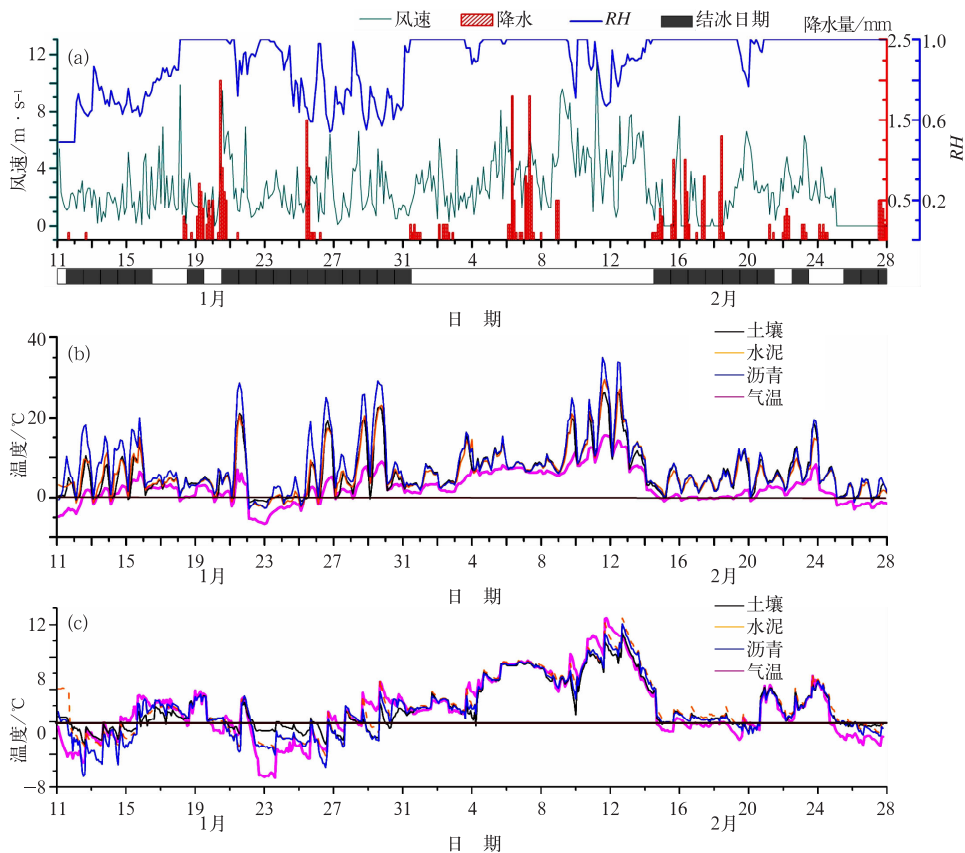


图 6 恩施冬季三种下垫面温度与四种气象因子日际变化

(a) 风速、降水量、相对湿度及结冰日期; (b) 白天三种下垫面温度及气温;  
(c) 夜晚三种下垫面温度及气温

Fig. 6 Comparison of three kinds of daily underlying surface temperatures and four meteorological factors

(a) wind speed, precipitation, relative humidity and icing date, (b) diurnal three kinds of underlying surfaces and air temperature, (c) same as (b), but for nocturnal observations



流较小,减少路面水分蒸发,有利于水分维持在路面,在夜间低温条件下,易于结冰。对于相对湿度,由于冬季1、2月观测期间,相对湿度一直维持较高,与路面结冰没有明显的对应因果关系,但较高的相对湿度,有利于维持路面湿度,在低温条件下,也易于结冰。

## 6 结果与讨论

(1) 通过对比土壤、水泥、沥青三种不同下垫面温度平均日变化可以看出,水泥和土壤下垫面温度变化幅度小于沥青下垫面温度,且二者变化趋势非常一致。白天后者比前二者温度可高 $2^{\circ}\text{C}$ 左右,而夜间三者温差不大,在 $0.3^{\circ}\text{C}$ 左右,沥青略低。

(2) 白天下垫面温度对气温有正强迫,夜晚反之。冬季1、2月恩施、金沙两地分别计算白天和夜晚的三种下垫面温度与气温相关性比不分白天和夜晚的相关性均有显著提高,最高达97%以上,表明气温是影响下垫面温度变化的因素中最为重要的一个。

(3) 将恩施、金沙两地天气条件分为雨、雾天,少云、晴天以及多云、阴天三种,同时考虑气温、风速、降水量以及相对湿度四种气象要素对三种下垫面温度进行多元回归拟合,雨、雾天恩施夜晚土壤、水泥、沥青下垫面温度的相关系数分别高达98.68%、97.26%、97.01%。从误差分析也可看出,两地三种下垫面温度拟合值与实测值相关系数大多在0.9以上。预报误差在 $-3\sim 3^{\circ}\text{C}$ 之间的频率最大,分别占到了90.6%、94.02%、87.37%,金沙分别占了83.95%、81.58%、74.74%。以上结果均表明该拟合公式拟合效果较好。

(4) 分析下垫面结冰气象条件发现,路面温度维持在 $0^{\circ}\text{C}$ 及以下,是路面结冰的必要条件,也是相关性最高的条件。较低的风速、较大的相对湿度和地面湿度,有利于低温路面结冰现象的形成。

## 参考文献

- [1] 张朝林,张利娜. 高速公路气象预报系统研究现状与未来趋势[J]. 热带气象学报,2007,23(6):653-658.
- [2] 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.
- [3] Barber E S. Calculation of Maximum Pavement Temperatures from Weather Reports[A]. Highway Research Board, Bulletin 168, National Research Council, Washington DC, 1957.
- [4] Bent H Sass. A numerical forecasting system for the prediction of slippery roads[J]. J Appl Meteor, 1997, 36(6):801-817.
- [5] Rayer P J. The meteorological office forecast road surface temperature model[J]. Meteor Mag, 1987, 116: 180-191.
- [6] Thornes J E and Shao J. Spectral analysis and sensitivity tests for a numerical road surface temperature prediction model[J]. Meteor Mag, 1991, 120:117-123.
- [7] 刘文燕,耿耀明. 混凝土表面太阳辐射吸收率试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2004,4(8):8-11.
- [8] 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,2003:100-102.
- [9] Shao J and Lister P J. An automated nowcasting model of road surface temperature and state for winter road maintenance[J]. J Appl Meteor, 1996, 35: 1352-1361.
- [10] Sass B H. A numerical model for prediction of road temperature and ice[J]. J Appl Meteor, 1992, 31: 1499-1506.
- [11] 曹广真,侯鹏,毛显强. 北京市城市化对地表温度时空特征的影响[J]. 气象,2010,36(3):19-26.
- [12] Thornes J E and Shao J. A comparison of UK ice prediction models[J]. Meteorol Mag. 1991,120:51-57
- [13] Bradley A V, Thornes J E, Chapman L, et al. Modeling spatial and temporal road thermal climatology in rural and urban areas using a GIS[J]. Climate Research, 2002,22: 41-55.
- [14] Chapman L and Thornes J E. A blueprint for 21st century road ice prediction[R]. Proceedings of the 11th SIRWEC Conference, 26-28 January 2002, Sapporo, Japan.
- [15] 闵文彬,李跃清. 利用MODIS反演四川盆地地表温度与地面同步气温、地温观测值的相关性试验[J]. 气象,2010,36(6):101-104.
- [16] 景天然,严作人. 水泥混凝土路面温度状况的研究[J]. 同济大学学报,1980,(3):80-81.
- [17] 黄立葵,贾璐,刀剑平,等. 沥青路面温度状况的统计分析[J]. 中南公路工程,2005,30(3):8-10.