

吕晶晶,牛生杰,周悦,等. 2013. 冬季高速公路路桥温度变化规律及能量平衡分析[J]. 大气科学学报, 36(5):546-553.

Lü Jing-jing, Niu Sheng-jie, Zhou Yue, et al. 2013. Characteristics of bridge and road surface temperature changes in winter and energy budget analysis [J]. Trans Atmos Sci, 36(5):546-553. (in Chinese)

## 冬季高速公路路桥温度变化规律及能量平衡分析

吕晶晶<sup>1,2</sup>, 牛生杰<sup>1,2</sup>, 周悦<sup>1,2</sup>, 李蕊<sup>1,2</sup>, 柯怡明<sup>3</sup>, 杨志彪<sup>3</sup>

(1. 气象灾害教育部重点实验室(南京信息工程大学), 江苏 南京 210044;

2. 南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏 南京 210044; 3. 湖北省气象局, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 利用2009年10月—2010年3月湖北省武英高速凤凰关水库自动气象站逐时路、桥面温度和常规气象资料, 分析了冬季典型天空状况(晴空、阴天)和天气过程(雾、降雨、降雪)中气温、路面温度和桥面温度的变化规律。结果表明, 夜间桥面温度与气温接近, 比路面温度低2℃, 桥面0℃以下的低温维持时间为路面维持时间的2倍左右。利用下垫面能量平衡模型, 分别计算冬季夜间晴空和阴天时路、桥面辐射能量收支变化情况, 分析了夜间路面和桥面温度变化差异的原因, 并对桥面比路面更易结冰的现象给出了理论解释。

**关键词:** 桥面结冰; 路面温度; 天气状况; 低温维持时间; 能量平衡模式

**中图分类号:** P457.3    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-7097(2013)05-0546-08

## Characteristics of bridge and road surface temperature changes in winter and energy budget analysis

LÜ Jing-jing<sup>1,2</sup>, NIU Sheng-jie<sup>1,2</sup>, ZHOU Yue<sup>1,2</sup>, LI Rui<sup>1,2</sup>,  
KE Yi-ming<sup>3</sup>, YANG Zhi-biao<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster (NUIST), Ministry of Education, Nanjing 210044, China;

2. School of Atmospheric Physics, NUIST, Nanjing 210044, China; 3. Hubei Provincial Meteorological Bureau, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Based on the observations of road and bridge surface temperature and conventional meteorological data from Fenghuangguan reservoir automatic weather station along Wuying expressway from October 2009 to March 2010, the hourly variations of air temperature and bridge and road surface temperature were studied under different weather conditions including clear, overcast, foggy, rainy and snowy. The results showed that the bridge surface temperature was close to the air temperature and was usually 2℃ lower than the road surface temperature at night in winter. Moreover, surface freezing hours over the bridge is almost twice as long as that on the road. By using the validated underlying surface energy balance model, we calculated the energy budget elements of bridge surface at night under clear and overcast weather conditions respectively in winter, analyzed the difference in temperature changes between road and bridge surface and tried giving explanations for the phenomenon that bridge surface is apt to freeze compared with road surface.

**Key words:** bridge surface freezing; road surface temperature; weather conditions; persistent freezing hours; energy balance model

收稿日期: 2011-09-05; 改回日期: 2013-04-12

基金项目: 科技部科技支撑计划项目(2008BAC48B01); 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; 江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXLX11-0619)

通信作者: 牛生杰, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为云雾降水物理学与气溶胶研究, niusj@nuist.edu.cn.

## 0 引言

高速公路作为现代交通运输网络的重要组成部分,对国民经济发展具有重要的推动作用。近年来,随着中国高速公路密集度和交通工具人均保有量的持续攀升,致使受恶劣天气影响而引发的交通事故显著增加。尤其在冬季,冰雪雨雾等天气过程常导致高速公路产生路面(桥面)湿滑、能见度不足等危险路况,易酿成重大交通事故。开展路面状况预报预警服务,对有效预防和减少交通事故的发生具有积极作用。因此,对路面温度与气象条件相关性的研究受到各国政府部门和研究学者的广泛重视和关注。

早在20世纪50年代,欧美、南非等国的研究人员对高速公路路面温度状况进行了广泛研究,并取得了一些阶段性成果(Barber, 1957; Williamson, 1972)。自80年代末以来,发达国家相继开展了更加系统和深入的大型高速公路综合观测试验,诸如:SHRP(Strategic Highway Research Program)计划、LTPP(Long Term Pavement Program)项目等,并开始逐步建立和完善高速公路实时监测系统(RWIS, Road Weather Information System),收集了大量的路面温度实测数据和气象资料,建立了庞大的交通气象数据库,为路面温度状况物理预报模型和统计预报模型的研制、发展和应用奠定了坚实的数据支撑和理论基础(张朝林等,2007)。国际上先后投入业务运行的路面温度数值预报模式主要有:英国的MORST(Met Office Road Surface Temperature Model)(Thones, 1984; Rayer, 1987)和IceBreak模式(Shao and Lister, 1996),丹麦Bent(1992)的路面结冰预报模式,加拿大METRo(Model of the Environment and Temperature of Roads)模式(Crevier and Delage, 2001),以及法国的SIR(SAFRAN-ISBA-Route)模式(Bouilloud et al., 2009)等。为进一步提高模式预报的准确性,Chapman and Thornes(2006)将实时卫星地表温度、雷达资料和地形地貌数据引入模式,并取得了不错的预报效果。中国针对高速公路的研究起步虽晚,但近年来也取得长足的进步,不仅在沿海地区如北京(曲晓黎等,2010)、江苏(田华等,2009;朱承瑛等,2009)、广东(吴晟等,2006)等地陆续布设高速公路自动气象站,进行路面温度和气象要素的实时监测,而且开展路面温度变化特征的对比分析和经验统计预报方法的研究。此外,考虑到物理预报模式实用性广、普适性强

的特点,刘熙明等(2004)依据辐射平衡原理开发了夏季水泥路面温度预报模式;牛生杰等(2011)针对冬季三种不同下垫面(沥青、水泥、土壤)温度观测数据进行对比分析,并应用地表热量平衡方程,考虑太阳短波辐射、大气和地面的长波辐射、潜热和感热传输等能量之间的平衡以及水汽、气溶胶、浮尘和云等对太阳短波辐射的吸收和散射,建立了一种较实用的下垫面温度预报模型。

本文利用湖北省武英高速公路凤凰关水库交通自动气象站逐时气象要素数据,分析冬季典型天空状况(晴空、阴天)和天气过程(雾、降雨、降雪)前后路桥温度和气温的变化规律。此外,由观测事实可知:冬季桥面相比于路面更易发生结冰现象。桥面结冰隐蔽性强,发生恶性交通事故的概率更高,危害更大,因此,利用实测路桥温度数据,从能量收支平衡角度,针对冬季典型晴空和阴天夜晚,研究桥面和路面温度变化差异具有重要意义。

## 1 资料来源

### 1.1 观测地点

武英高速是首条穿越大别山区的高速公路,起于湖北省武汉,经团风、浠水、罗田和英山,止于鄂皖交界处的英山县大枫树岭,全长131.14 km。湖北省气象局于2009年9月将首个高速公路交通气象站安装于湖北省罗田境内凤凰关水库大桥(115°31'25"E,30°47'33"N)附近,同时监测路面和桥面温度变化。观测地点位于大别山腹地(图1),冬季夜间冷空气沿着山体下降,容易在低洼山谷处形成具有较低温度的冷池(Tabony, 1985)。此外,观测点大桥下的凤凰关水库可以提供较充分的水汽,使得观测路段容易满足路、桥面结冰的条件。

### 1.2 观测仪器

交通气象自动站主要用于实时监测气温(AT, air temperature)、相对湿度(RH, relative humidity)、10 m 风向风速、降水量、路面温度(RST, road surface temperature)、路基温度(RBT, road base temperature)、桥面温度(BST, bridge surface temperature)、桥基温度(BBT, bridge base temperature)、降水率(PR, precipitation rate)等气象要素变化。路(桥)面及路(桥)基的4个温度传感器分别置于路、桥面以下1 cm和10 cm处,均采用稳定性和线性俱佳的铂丝热电阻传感器(PT-100型),其热响应时间短,数据可信度高。路、桥面温度传感器安装时须一半暴露在外,另一半嵌入沥青之中,以尽量减少短波辐射

对传感器测量值的影响。

### 1.3 观测资料

采用 2009 年 10 月—2010 年 3 月武英高速凤凰关水库交通气象站逐小时气象要素数据,以及距此观测点 11.9 km 的罗田(115°24′00″E,30°46′48″N,海拔 105.8 m)和 15.7 km 的英山(115°40′12″E,30°43′48″N,海拔 123.8 m)气象站每 3 h 的人工观测数据,包括云量、云状、气压和天气现象等。



图 1 观测地点地形

Fig. 1 Map of study area with locations of meteorological observation stations

## 2 冬季不同天气状况下路桥温度对比

### 2.1 日变化

受气温和短波辐射影响,高速公路路面温度日变化通常具有明显的峰谷特征。由于云层能够通过直接反射短波辐射导致地面接收到的太阳辐射量减小(Ramanathan et al., 1989),一般来讲,云量增加(或减少)会使得太阳辐射减少(或增加),从而间接影响白天路面温度场的变化。本文利用罗田和英山气象站每 3 h 一次的人工观测总云量数据,计算其日均总云量,并据此数据将观测地点天空状况分为晴空、多云、阴天 3 种,定义日均总云量 0~2 成为晴空,3~7 成为多云,8~10 成为阴天,并辅以云状和天气现象数据进行分析,同时分别选取冬季晴空和阴天两种典型天空状况,讨论路桥温度和气温的日变化特征。

2009 年 12 月 22—23 日典型冬季晴空(图 2)和 2010 年 2 月 5—6 日阴天(图 3)条件下,气温、路面温度、桥面温度的日最低温度均出现在 07 时前后,且桥面温度比路面温度低 2℃左右,并与气温较接近;日出后,短波辐射逐渐增强,三者温度迅速攀高,日最高温度均出现在 14 时前后,此时桥面温度和路面温度相当,两者温度远高于气温;随后,短波辐射

开始减弱,三者温度迅速回落,18 时左右下降速率趋缓,进入夜间低温维持阶段。

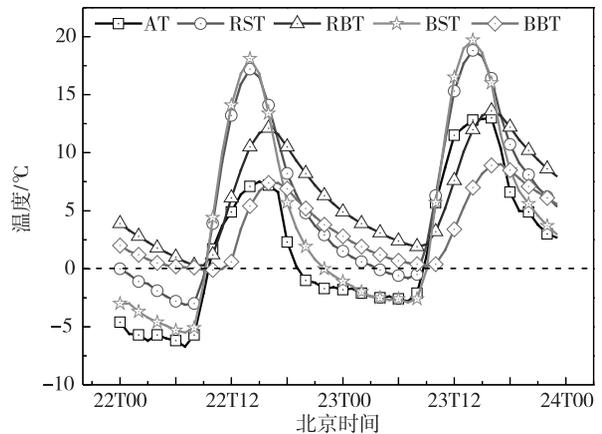


图 2 2009 年 12 月 22—23 日冬季典型晴空时气温和路、桥温度变化

Fig. 2 Typical variations of air temperature and temperature at each position of the road and bridge during 22 and 23 December 2009 under clear weather condition

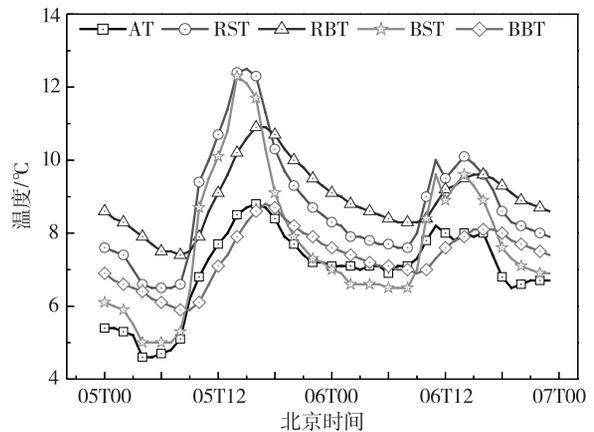


图 3 2010 年 2 月 5—6 日冬季典型阴天时气温和路、桥温度变化

Fig. 3 Typical variations of air temperature and temperature at each position of the road and bridge during 5 and 6 February 2010 under overcast weather condition

路基温度和桥基温度的变化情况主要为路层热传导过程。日出后,路面接收短波辐射后,将热量向下传导至路基,使路、桥基温度上升;日落后,路、桥基将热量向上传导至路面,并向上发射长波辐射,路、桥基温度回落。可见路基和桥基温度分别与路面和桥面温度关系密切,前两者日变化通常在位相上滞后于后两者 1.5 h 左右且变化幅度较小,变化趋势呈波浪形。一般来说,冬季路基温度高于桥基温度,日出后路、桥面温度高于路、桥基温度,日落后

则两者情况相反。

对比图 2 和图 3 可以发现:晴空时各温度日变化幅度均高于阴天,尤以桥面温度的变化幅度最大。值得注意的是,晴空 22 日 14 时桥面温度高达 18.1℃,23 时左右进入 0℃ 以下低温阶段,并维持近 11 h,其间平均温度为 -1.75℃;而路面温度从 23 日 04 时起才降至 0℃ 以下,并维持近 5 h,其间平均温度为 -0.48℃。

由以上分析可知,天空状况(总云量)对温度日变化幅度具有一定影响。为了分析两者关系,引入标准差  $D_{ST}$  表征各项温度日变化离散程度。

$$D_{ST} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2} \quad (1)$$

其中: $n$  为 24; $i$  为时刻; $T_i$  为  $i$  时刻的各项温度; $\bar{T}$  为日平均各项温度。利用日均总云量资料,按天空状况将自动站 182 d 观测数据分为晴空、多云、阴天 3 类,同时将各项温度每天 24 个逐时数据依次分组,计算各要素每日  $D_{ST}$ 。从三种天空状况下气温标准差  $D_{STAT}$ 、路面温度标准差  $D_{STRST}$ 、桥面温度标准差  $D_{STBST}$  的变化范围(表 1)可以看出,各要素标准差是晴天最高,多云次之,阴天最低。由此可见,在天空状况数据缺失的情况下,利用温度日变化的  $D_{ST}$  变化范围,可对天空状况进行大致判断。

表 1 三种天空状况下各温度日变化标准差变化范围  
Table 1 Standard deviation ranges of daily AT, RST, and BST under three kinds of weather conditions

天空状况	样本数	$D_{STAT}/^{\circ}\text{C}$	$D_{STRST}/^{\circ}\text{C}$	$D_{STBST}/^{\circ}\text{C}$
晴空	42	4.96 ~ 7.56	6.42 ~ 10.92	7.94 ~ 12.56
多云	71	2.34 ~ 5.14	2.87 ~ 6.63	3.87 ~ 8.32
阴天	69	0.22 ~ 2.31	0.31 ~ 3.06	0.34 ~ 4.41

### 2.2 雾过程

雾一般出现在晴朗、微风而近地面层比较潮湿的夜晚或清晨,由于辐射冷却作用气温降到露点温度以下,使得近地面气层水汽发生凝结而形成雾(盛裴轩等,2003)。由前述可知,清晨是路、桥面出现最低温度的时段,由于雾中包含大量液态水,当液滴与温度低于 0℃ 的路、桥面接触时,容易在其表面冻结形成一层薄冰,埋下交通安全隐患。图 4 给出了 2010 年 1 月 2 日一次辐射雾过程中气温与路桥温度的变化特征。可见,雾形成于凌晨 01 时左右,日出后 08 时左右发生消散,其间相对湿度保持在 95% 以上。00 时后各温度均呈下降趋势,其中气温下降最快,桥面温度次之。02 时气温降至 0℃ 以下,在平均风速 1.5 m/s 的情况下与桥面发生热交

换,桥面温度在 03 时进入 0℃ 以下低温阶段,并维持 6 h,日最低温度 -1.7℃ 出现在 08 时前后,而此时路面温度刚接近 0℃,随后由于日出后短波辐射增加使各温度迅速升高,辐射雾也随之消散。观测事实指出:在冬季大雾时期,交通气象预报除发布能见度不足预警外,还应提醒驾乘人员注意桥面出现结冰现象,以避免酿成交通事故。

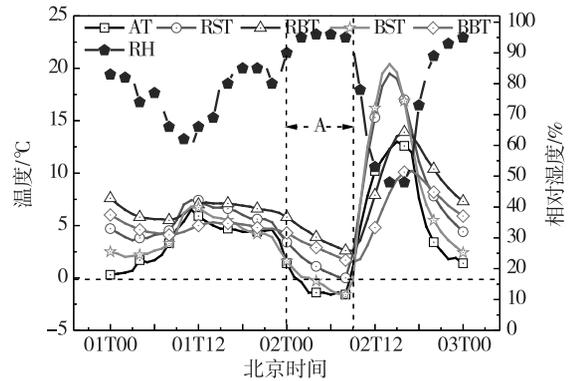


图 4 2010 年 1 月 2 日一次冬季雾过程中气温和路、桥温度变化(A 为雾过程,相对湿度大于 95%)

Fig. 4 Variations of air temperature and temperature at each position of the road and bridge during the fog period on 2 January 2010 (A indicates fog stage, RH more than 95%)

### 2.3 降雨过程

冬季降雨后的晴空夜晚,伴随辐射冷却效应,雨水通常会在路面发生冻结现象(Tobias and Willi, 2005)。2009 年 12 月 14 日 12 时—15 日 12 时出现一次连续降雨过程,降雨期间相对湿度保持在 90% 左右,各温度呈缓慢下降趋势,桥面温度和气温接近,最低温度维持在 3℃ 近 7 h,此间两者明显比路面温度低 2℃ 左右(图 5)。由于降雨后水汽充沛,16 日相对湿度保持在 66% ~ 90% 之间变化,17 日 00 时相对湿度上升至 95% 以上,并进入持续 8 h 的一次辐射雾过程。其间,桥面温度在 06 时出现 0℃ 以下低温现象,而此时路面最低温度为 2.3℃。由此可见,降雨过程可使路、桥面温度降低,但一般不会出现路桥面结冰现象,而在随后发生的辐射雾过程中常出现桥面冻结现象。

### 2.4 降雪过程

图 6 显示 2010 年 2 月 13—17 日一次降雪过程,整个过程根据桥面温度变化分为三个阶段:降雪,积雪,融雪。降雪阶段:受冷空气影响,降雪前各温度呈快速下降趋势,尤以气温下降最快,13 日 14 时降雪开始,此时路、桥面温度仍在 0℃ 以上,降雪很快融化,同时带走下垫面部分热量,使两者温度继

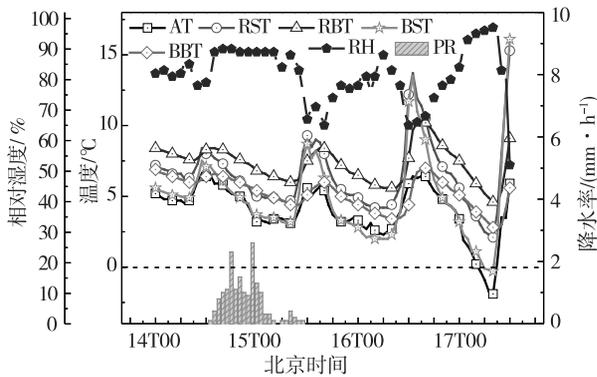


图 5 2009 年 12 月 14—17 日一次冬季降雨过程及其后气温、路桥温度、相对湿度和降水率变化

Fig. 5 Variations of air temperature, temperature at each position of the road and bridge, RH and PR during and after the light rainfall from 14 to 17 December 2009

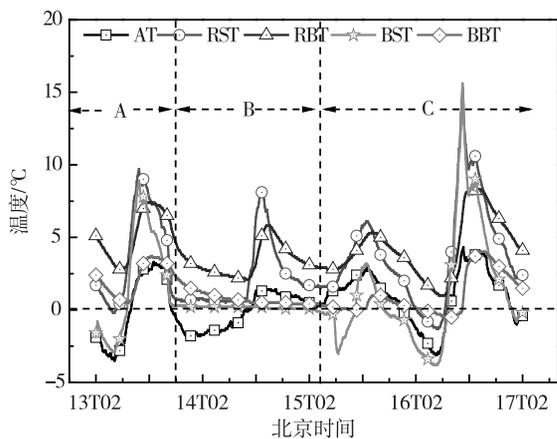


图 6 2010 年 2 月 13—17 日冬季一次降雪过程及其后气温和路、桥温度变化(A 为降雪阶段, B 为积雪阶段, C 为融雪阶段)

Fig. 6 Variations of air temperature and temperature at each position of the road and bridge during and after the snow from 13 to 17 February 2010 (A refers to snow falling stage, B refers to snow mantle stage, and C refers to snow melting stage)

续下降。积雪阶段:13 日 20 时前后,路、桥面温度降至  $0^{\circ}\text{C}$ ,降雪开始在地面累积,由于雪是一种多孔介质,具有一定的绝热效果,使得桥面温度始终保持在  $0^{\circ}\text{C}$  长达 32 h。相比于桥面,路面温度受积雪影响较小,其  $0^{\circ}\text{C}$  低温维持阶段为 16 h,至 15 日 12 时,受到太阳短波辐射影响,路面温度急速上升,15 时达到峰值  $7.7^{\circ}\text{C}$ ,此后路面温度一直处于  $0^{\circ}\text{C}$  以上。融雪阶段:15 日 05 时起桥面温度出现陡然下降,最低值为  $-2.9^{\circ}\text{C}$ ,12 时前后,受太阳短波辐射影响,桥面温度上升至  $0^{\circ}\text{C}$  以上,峰值为  $2.6^{\circ}\text{C}$ ,

积雪开始融化,日落后,桥面温度于 18 时再次进入  $0^{\circ}\text{C}$  以下低温维持阶段,若此时桥面存在融化的雪水,将再次被冻结,直到 16 日 09 时,桥面温度上升至  $0^{\circ}\text{C}$  以上。相比于降雪和积雪阶段,蕴含交通事故隐患最大的是融雪阶段,若融化的雪水在夜间再次冻结于桥面之上,将导致其湿滑程度大幅提高。

### 3 能量平衡计算模型

下垫面能量平衡方程为

$$G(t) = (1 - \alpha)R_s + (R_{ld} - R_{lu}) + E_H + E_L \quad (2)$$

其中: $G(t)$  为  $t$  时刻下垫面热通量; $R_s$  为下垫面所受到的短波辐射; $(R_{ld} - R_{lu})$  为下垫面的净长波辐射; $E_H$ 、 $E_L$  分别为感热通量和潜热通量; $\alpha$  为下垫面反射率,取常数 0.1 (Bent, 1992)。

#### 3.1 短波辐射 $R_s$ 的计算

到达地面的短波辐射主要受大气中的气溶胶粒子浓度、空气污染程度、以及云量、云状、水汽等因素的影响。Shao and Lister (1996) 给出的太阳短波辐射计算公式为

$$R_s = f s_0 t_R t_g t_w t_p t_c \cos \theta_0 \quad (3)$$

其中: $s_0$  为太阳常数 ( $1366.97 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ); $f$  为与日地距离有关的因子; $\theta_0$  为太阳天顶角。 $t_R$  和  $t_g$  分别为 Rayleigh 散射和痕量气体的吸收系数; $t_w$  为水汽吸收系数; $t_p$  为气溶胶和浮尘的消光系数; $t_c$  为云的削弱系数。相关系数的计算公式如下

$$\cos \theta_0 = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (4)$$

其中: $\varphi$  为地理纬度; $\delta$  为太阳赤纬; $\omega$  为时角。

$$f = 1 + 0.034 \cos \left[ \frac{2\pi(D-1)}{365} \right] \quad (5)$$

其中: $D$  为儒略日。

$$t_R t_g = 1.012 - 0.084 [m(949p^{-5} + 0.051)]^{1/2} \quad (6)$$

其中: $p$  为本地气压; $m$  为光学质量,一般取  $1/\cos \theta_0$ 。

$$t_w = 1 - 0.077(w - m)^{0.3} \quad (7)$$

其中: $w = \exp[1.3709 - \ln(E + 1) + 0.07074T_d]$ 。 $E$  为与纬度有关的常数(取 2.0); $T_d$  为露点温度。

$$t_p = \chi^m \quad (8)$$

其中: $\chi$  为常数(取 0.95)。对于云的削弱,本文采用较为简单的埃斯屈姆—萨维诺夫公式(王名才, 1994):

$$t_c = 1 - (1 - k)N \quad (9)$$

其中: $N$  为总云量; $k$  为经验系数,取 0.45。

### 3.2 净长波辐射( $R_{ld} - R_{lu}$ )的计算

长波辐射分为下垫面发射的长波辐射  $R_{lu}$  和大气逆辐射  $R_{ld}$  两个部分,由 Stefan-Boltzman 定律,长波辐射计算公式为

$$R_{ld} = \varepsilon_a \sigma (T_a + 273)^4, \quad (10)$$

$$R_{lu} = \varepsilon_s \sigma T_s^4 + (1 - \varepsilon_s) R_{ld}. \quad (11)$$

其中: $\sigma$  为 Stefan-Boltzman 常数( $5.6697 \times 10^{-8} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ ); $T_a$ 、 $T_s$  分别为气温和下垫面温度; $\varepsilon_s$  为下垫面的比辐射率(表 2); $\varepsilon_a$  为天空显性辐射系数,根据左大康等(1991)所总结的经验公式得到

$$\varepsilon_a = 0.699 + 0.0083e + 0.077N^2. \quad (12)$$

其中: $e$  为水汽压; $N$  为总云量(取值在 0~1)。

表 2 沥青和混凝土材料性质参数

Table 2 Asphalt and concrete material properties

	下垫面吸收率 $\varepsilon_s$	下垫面材料比热容 $c_v / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})$	下垫面材料密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
混凝土	0.956	879	2400
沥青	0.950	950	2000

### 3.3 感热、潜热通量的计算

假设传输过程是发生在均匀混合的边界层中,一般来说,感热和潜热通量可以通过以下方法(Rayer,1987)计算。

$$E_H = c_p \rho C_H V (T_a - T_s), \quad (13)$$

$$E_L = L \rho C_L V (q_a - q_s). \quad (14)$$

其中: $\rho$  为近地面空气密度( $1.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ); $c_p$  为空气的比定压热容,取值为  $1.0 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ ;  $C_H$  和  $C_L$  分别为感热和水汽输送系数,分别取值为  $1.81 \times 10^{-3}$  和  $0.15 \times 10^{-3}$ ;  $L$  为水汽的凝结潜热,值为  $2.5 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ ;  $V$  为近地面处风速; $T_a$  为气温; $q_a$  为空气湿度; $T_s$ 、 $q_s$  分别为下垫面温度和下垫面湿度。

### 3.4 计算模型验证

为验证下垫面能量平衡模型的计算准确性,利用 2009 年 10 月—2010 年 3 月观测数据对模型进行验证。根据方程(2)—(14)可以求出下垫面热通量  $G(t)$ 。假设下垫面为均匀分布的均质体,根据热传导方程, $t$  时刻单位质量的下垫面温度  $T_s(t)$  与热通量  $G(t)$  之间的关系(Shao and Lister,1996)为

$$\frac{\partial T_s(t)}{\partial t} = \frac{1}{c_v \rho} \frac{\partial G(t)}{\partial t}. \quad (15)$$

其中: $c_v$  为下垫面比热容; $\rho$  为下垫面密度(表 2)。将(15)式进行差分,取  $\Delta t$  为 1 h,代入  $t$  时刻下垫面

温度的初始场资料,即可求得( $t+1$ )时刻的下垫面温度。对比图 7 和图 8 中路面、桥面温度测量值和能量平衡模型计算值的结果,发现两物理量的测量值和对应计算值的相关性均在 0.94 以上,并通过了 0.001 的信度检验,说明模型对下垫面各辐射能量分量的计算结果具有较高可靠性。

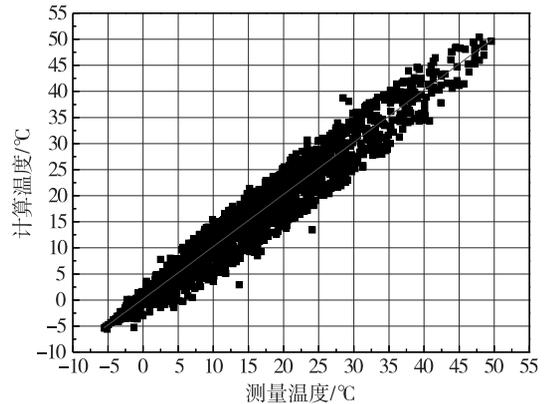


图 7 冬季桥面温度测量值和计算值对比

Fig. 7 Comparison of observed and calculated bridge surface temperature in winter

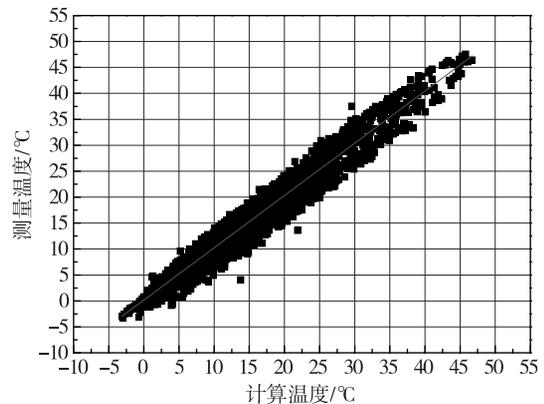


图 8 冬季路面温度测量值和计算值对比

Fig. 8 Comparison of observed and calculated road surface temperature in winter

### 3.5 能量收支平衡分析

根据观测事实,冬季路、桥面结冰现象通常都发生在夜间(17 时至次日 07 时),且桥面相对于路面,更易出现  $0 \text{ °C}$  以下低温状态,并维持更长时间。为了进一步从能量平衡角度说明桥面温度的变化规律,利用上述能量平衡模型,模拟了冬季典型晴空(2009 年 12 月 22 日 17 时—23 日 07 时)和阴天(2010 年 2 月 5 日 17 时—6 日 07 时)状况下,夜间路、桥面辐射能量收支变化情况。

由于夜间短波辐射  $R_s = 0$ ,下垫面净长波辐射  $R_n = R_{ld} - R_{lu}$ ,所以公式(2)可简化为

$$G = R_n + E_H \quad (16)$$

可见,夜间下垫面热通量  $G$  主要与净长波辐射  $R_n$  和感热  $E_H$  有关。图 9 为冬季典型晴空下夜间桥面辐射能量收支变化情况。夜晚桥面净长波辐射  $R_n$  为  $-100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 并近似等于桥面热通量  $G$ , 桥面感热  $E_H$  在 21 日 17 时为  $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 此后一直处于  $0 \sim 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  变化之中。在晴空状态下, 由于没有云层遮盖, 桥面能量收支情况主要由其上行长波辐射  $R_{lu}$  主导, 即通常所说的长波辐射冷却, 由此使得桥面温度迅速大幅下降。图 10 为冬季阴天夜间桥面辐射能量收支变化。相比于晴空时, 各项辐射能量变化幅度均较小, 整晚桥面净长波辐射  $R_n$  为  $-50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 桥面感热  $E_H$  始终保持在 0 值附近, 所以使得桥面温度在 19 时之后, 呈现缓慢下降趋势。

通过对比桥面和路面(图略)夜间各项辐射能量变化的计算结果, 发现两者热通量  $G$  没有明显差异, 一般两者差值变化在  $\pm 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  之间。桥梁构建材质多为混凝土, 而路面材质均为沥青, 一般来说, 混凝土比热容低于沥青, 即两者若吸收(或发散)相同辐射能量, 前者温度上升(或下降)速率快于后者。此外, 本次研究受观测条件限制, 只对桥面上层和桥基温度进行监测, 并未考虑桥面底层和侧面的能量变化情况。由于桥梁均悬于空中, 其与空气的接触面多于路面, 由公式(13)可知, 假设在气温、风速和路、桥面温度一定的情况下, 桥面以感热形式与空气进行热交换的能量应多于路面, 可见感热输送也是影响冬季夜间路桥面温度变化差异的主要因素之一。

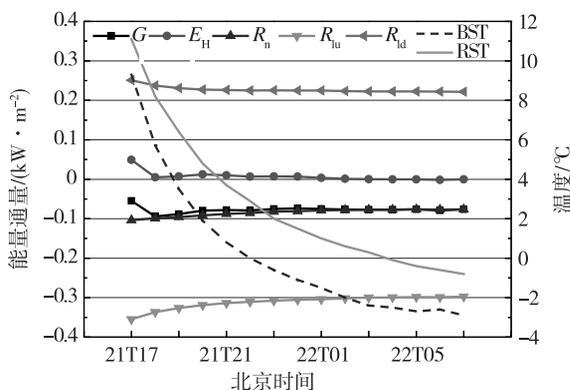


图 9 冬季晴空夜晚桥面能量收支变化及路面、桥面温度变化

Fig. 9 Variations of RST, BST and energy budget elements over bridge surface at night under clear weather condition in winter

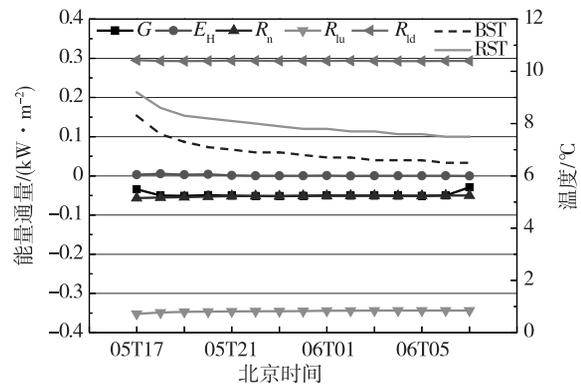


图 10 冬季阴天夜晚桥面能量收支变化及路面、桥面温度变化

Fig. 10 Variations of RST, BST and energy budget elements over bridge surface at night under overcast weather condition in winter

## 4 结论

1) 云量是影响路、桥面温度变化的主要因素之一, 根据总云量定义晴空、多云和阴天三种天空状况, 并用标准差  $D_{ST}$  表征气温、路面温度、桥面温度日变化幅度, 对 182 d 观测数据进行计算分类后发现: 晴空温度日变化标准差  $D_{ST}$  最高, 多云次之, 阴天最低, 并给出了具体的  $D_{ST}$  变化范围。

2) 通过分析冬季典型天空状况(晴空、阴天)和天气过程(雾、降雨、降雪)中气温、路面温度和桥面温度变化规律后发现: 夜间桥面温度与气温较接近, 通常比路面温度低  $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 相比于路面, 桥面温度更易降低到  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  以下, 且其低温维持时间通常是路面的 2 倍左右。

3) 综合考虑太阳短波辐射、大气和下垫面的长波辐射以及潜热、感热传输过程, 建立下垫面能量平衡模型, 利用 2009 年 10 月—2010 年 3 月观测数据对模型进行计算精度验证, 结果显示: 路面、桥面温度测量值和计算值之间相关性均在 0.94 以上, 并通过 0.001 信度检验, 说明模型对下垫面各项辐射能量具有较高计算准确性和可靠性。

4) 应用下垫面能量平衡模型, 计算冬季夜晚晴空和阴天状况下, 路桥面辐射能量收支变化。晴空时, 桥面整晚净长波辐射  $R_n$  为  $-100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 而阴天时, 桥面净长波辐射  $R_n$  为  $-50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 两者  $R_n$  都与桥面热通量  $G$  接近, 因而晴空时夜晚桥面温度下降幅度大于阴天。下垫面辐射能量变化幅度大, 相应的下垫面温度变化也大, 反之亦然。

5) 桥面和路面的热通量  $G$  差异不大, 但桥梁材

质混凝土的比热容低于路面材质沥青,即两者若吸收(或发散)相同辐射能量,桥面温度上升(或下降)速率快于路面。由于桥梁悬于空中,与空气的接触面多于路面,因而夜间桥梁以感热形式与空气进行热交换的能量应高于相同气象条件的路面。

## 参考文献:

- 刘熙明,喻迎春,雷桂莲,等. 2004. 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,15(5):623-628.
- 牛生杰,李蕊,吕晶晶,等. 2011. 三种下垫面温度及结冰预报模型研究[J]. 地球物理学报,54(4):909-917.
- 曲晓黎,武辉芹,张彦恒,等. 2010. 京石高速路面温度特征及预报模型[J]. 干旱气象,28(3):352-357.
- 盛裴轩,毛节泰,李建国,等. 2003. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社.
- 田华,吴昊,赵琳娜,等. 2009. 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,20(6):737-744.
- 王名才. 1994. 大气科学常用公式[M]. 北京:气象出版社.
- 吴晟,吴兑,邓雪娇,等. 2006. 南岭山地高速公路路面温度变化特征分析[J]. 气象科技,34(6):783-787.
- 张朝林,张利娜,程丛兰,等. 2007. 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,23(6):653-658.
- 朱承璞,谢志清,严明良,等. 2009. 高速公路路面温度极值预报模型研究[J]. 气象科学,29(5):645-650.
- 左大康,周允华,项月琴,等. 1991. 地球表层辐射学研究[M]. 北京:科学出版社.
- Barber E S. 1957. Calculation of maximum pavement temperatures from weather reports [R]. Washington D C: Highway Research Board Bulletin.
- Bent H S. 1992. A numerical model for prediction of road temperature and ice[J]. J Appl Meteor,31:1499-1506.
- Bouilloud L, Martin E, Habets F, et al. 2009. Road surface condition forecasting in France [J]. J Appl Meteor Climatol, 48 (12): 2513-2527.
- Chapman L, Thornes J. 2006. A geomatics-based road surface temperature prediction model[J]. Sci Total Environ,360(1/2/3):68-80.
- Crevier L P, Delage Y. 2001. Metro: A new model for road-condition forecasting in Canada[J]. J Appl Meteor,40:2026-2037.
- Ramanathan V, Cess R D, Harrison E F, et al. 1989. Cloud-radiative forcing and climate: Results from the Earth Radiation Budget Experiment[J]. Science,243(4887):57-63.
- Rayer P J. 1987. The Meteorological Office forecast road surface temperature model[J]. Meteor Mag,116:180-191.
- Shao J, Lister P J. 1996. An automated nowcasting model of road surface temperature and state for winter road maintenance[J]. J Appl Meteor,35:1352-1361.
- Tabony R C. 1985. Relations between minimum temperature and topography in Great Britain[J]. J Climatol,5:503-520.
- Thones J E. 1984. The prediction of ice formation on motorways in Britain[D]. London: University of London.
- Tobias G, Willi S. 2005. Nowcasting precipitation, clouds, and surface state in winter[J]. Atmos Res,77:378-387.
- Williamson R H. 1972. Effects of environment on pavement temperatures[C]//3rd Intl Conf Structural Design Proc, Expanded Abstracts,144-158.

(责任编辑:刘菲)