

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.08.004

高速公路路面夜间逐时温度预报方法研究

林子静^{1,3}, 胡继超¹, 朱承瑛²

(1. 江苏省农业气象重点实验室, 江苏 南京 210044;

2. 中国气象局交通气象重点开放实验室, 江苏 南京 210009;

3. 温州市气象局, 浙江 温州 325000)

摘要: 为了提高高速公路路面的低温预报预警能力, 根据地表能量平衡原理、夜间净辐射及路面热特性参数与高速公路路表温度之间变化的关系, 建立了基于当日实时温度等相关气象要素观测信息的路表温度变化预报方程。收集了2016年至2017年江苏省高速公路路面逐小时温度等相关气象观测资料, 选取具有代表性的13个站点, 应用统计方法确定了模型中路面特性参数 B_0 值, 分析其路面温度变化特征, 确定了其参数并检验其预报效果。结果表明: 反演得到的参数 B_0 值变化范围为3.17~3.67, 随路面建筑材质不同而略有差异, 同一高速公路路面比较接近; 由其得到的模拟值与实测值相关系数高, 平均偏差和标准差小, 模型效率高。预报值与实测值偏差在1℃以内的超过50%, 预报值与实测值偏差在3℃以内的超过90%, 说明提出的预报方程具有较好的实用性和较高的预测精度, 预报结果可靠, 可以用来做高速公路路面温度的预测。

关键词: 道路工程; 路面温度预报; 模拟模型; 交通气象服务

中图分类号: U416

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2021) 08-0023-07

A Method for Forecasting Hourly Expressway Surface Temperature during Night Time

LIN Zi-jing^{1,3}, HU Ji-chao¹, ZHU Cheng-ying²

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing Jiangsu 210044, China;

2. Key Laboratory of Traffic Meteorology, China Meteorological Administration, Nanjing Jiangsu 210009, China;

3. Wenzhou Meteorological Bureau, Wenzhou Zhejiang 325000, China)

Abstract: In order to improve the ability of prediction and early warning of expressway surface temperature, according to the principle of surface energy balance, the relationship among net radiation at night, surface thermal characteristics and surface temperature of expressway, a road surface temperature change forecast equation based on the observation information of relevant meteorological elements such as daily real-time temperature is established. With the collected relevant meteorological observation data such as hourly temperature of expressway road surface in Jiangsu Province from 2016 to 2017, selecting 13 representative stations, the road characteristic parameter B_0 in the model is determined by statistical method. Its pavement temperature change characteristics are analyzed, its parameters are determined, and its forecasting effect is tested. The result shows that (1) The parameter B_0 obtained by the inversion varies from 3.17 to 3.67, which varies slightly with the pavement construction material, and the values of the same expressway pavement are relatively close. (2) The simulated value obtained from the forecast equation has high correlation coefficient with the measured value, the average deviation and standard deviation are small, and the model efficiency is high. The deviation within 1℃ between the forecast value and the measured value is more than 50%, and the deviation within 3℃ between the forecast value and the measured value is more

收稿日期: 2020-03-24

基金项目: 江苏省北极阁基金项目 (BJG201906); 江苏省农业气象重点实验室开放课题项目 (JKLAM1805)

作者简介: 林子静 (1995-), 女, 江苏淮安人, 硕士研究生. (1431471193@qq.com)

than 90% , indicating that the proposed forecast equation has good practicability and high prediction accuracy , it can be used to predict the road surface temperature of expressways.

Key words: road engineering; road temperature forecast; simulation model; traffic meteorological service

0 引言

低温条件下道路结冰后,湿滑对城市道路和高速公路交通安全构成威胁,会影响人们正常出行及增大交通事故发生概率而导致巨大的经济损失。资料表明,随着高速公路里程数的增加,由低温引起的高速公路事故发生频率呈逐年增长趋势。因此,考虑道路下垫面状况的改变,进行微小尺度范围温度的精细化预报一直是待攻关的难题和关注的热点。准确预报路面温度变化,可为道路维护(如撒盐融冰融雪等)和实施交通管制提供可靠决策信息依据,促进对低温天气的快速响应和及时处置,对保障交通出行安全、减少交通事故发生和财产损失具有重要意义。

江苏省位于我国大陆东部沿海,南北狭长,在 30°45'N ~ 35°20'N, 116. 18°18'E ~ 121°57'E 之间,处南北分界线之间,地貌由平原、水域和低山丘陵组成。江苏省高速公路是我国华东地区重要的交通枢纽,通车里程于 2019 年达 4 865 km,高速公路密度位居全国前 5 名。研究表明,道路结冰是我国公路交通的主要气象灾害,在江苏省占主要灾害第 3 位^[1],因此研究江苏省高速公路地温的变化具有很高的代表性。

关于地表温度预报方法已有很多研究,国外 20 世纪 80 年代就开始有报道^[2],随后 90 年在欧洲和北美迅速发展,相继研制出一些道路结冰预报模型并得到了应用^[3-6],如:较著名的加拿大 METRo 模型^[2]、RoadSurf 模型^[3]、荷兰 KNMI-RWM 模型^[5]等,模型中除路面积水/雪模块外,路面温度预报模型是其重要组成部分。这些模型大多基于地表能量平衡方程,模型参数多,能量通量计算过程中会带来误差传递,影响了温度预测精度。为了能够做出精准的预报预警,研究人员采用统计分析方法,将路面附近气象要素^[7-11](如风、气温和云量、地形等)的影响纳入考虑范围,同时基于实时自动气象站的数据应用也受到重视^[12-14]。对路面温度和路面状况的监测预警与预报研究也日益受到重视,在路面温度预测模型方面已取得较多研究成果^[15-16]。然而,能量平衡法^[13-14,17-19]虽然通用性强,但是建模需要输入参数多、且不易获取而影响了模型的精确度,降低了适用性,特别是材料的热力学参数,建模过程复杂。统计分析方法^[20-21]虽建模需要输入参

数少,建模过程简单,但是存在预估公式地域适用性差的缺点,难以达到道路预警服务要求。

本研究在上述温度预报模型研究与应用的基础上,综合考虑数值天气预报模式要素输出信息(天气背景)、路面实时气象观测信息(反映道路状况局地变化)和路面温度变化特征,建立一套具有反映温度机理性变化特征能力的路面温度预测模型并进行验证,并且寻找其中路面热特性参数 B_0 在时空范围上的变化,提升 24 h、微小尺度范围内的逐时路面温度预报精度,预报时效提前 3 h 以上,以期为业务化应用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 资料来源

收集了 2016—2017 年江苏省高速公路气象监测站的自动气象观测资料,包括 2 m 高度的空气温度、露点温度、降水、风速、路面状况、地面温度、10 m 空气温度、相对湿度等气象要素,约 240 多个站点。以高速公路路线、经纬度和途经城市等为筛选条件,选择了 4 条高速公路(京沪高速公路、沈海高速公路、常合高速公路和长深高速公路)上的 13 个站点,对比同一条高速公路上不同纬度上预报方程的效果,途经同一城市不同高速公路上 B 值,以及同一纬度上不同高速公路上 B 值效果等。应用 2016 年的资料建立地表温度预测方程并确定模型中的参数,然后用 2017 年高速公路路面温度数据进行验证。

表 1 高速公路江苏省域内的气象观测站点列表

Tab. 1 List of meteorological observation stations of expressway in Jiangsu Province

高速公路	站点名	经度/°E	纬度/°N	途经城市
京沪高速 公路 G2	M9347	120. 25	32. 01	泰州
	M9309	119. 50	32. 86	扬州
	M9296	118. 39	34. 42	徐州
沈海高速 公路 G15	M9340	120. 76	32. 32	南通
	M9337	120. 43	32. 87	盐城
	M9331	120. 00	33. 90	盐城
	M9326	119. 30	34. 41	连云港
常合高速 公路 S38	M9263	119. 84	31. 67	常州
	M9266	119. 33	31. 73	镇江
	M9254	120. 65	31. 77	苏州
长深高速 公路 G25	M9273	119. 27	31. 55	常州
	M9270	118. 98	31. 86	南京
	M9421	119. 19	34. 73	连云港

1.2 预报方法

1.2.1 低温预报方程的建立

使用正弦函数模型^[22]做地表日温的预测, 该模型将 $12 - dl/2 < t_i < 12 + dl/2$ (dl 为日长, t_i 为台站真太阳时) 记为白天, 则白天 t_i 时刻温度 T_i 可表示为:

$$T_i = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min}) \cdot \sin \frac{\pi \cdot (t_i - 12 + dl/2)}{dl + 2p}, \quad (1)$$

式中, $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 分别为日最高、最低路面温度; p 为日最高温度出现的时刻与正午时刻之间的小时数, 这里取 $p = 2.0$ h。

夜间, 路面净辐射能量损失 R_n 与路面温度梯度和路面热特性有密切关系。根据胡继超^[23]的研究, 该关系可以表示为:

$$R_n = \kappa \rho c \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0}, \quad (2)$$

式中, κ 为导热率; ρ 为路面材料密度; c 为比热容; z 为深度。

将式(2)写成差分形式, 可得到夜间地表 ($z=0$) 的温度 T_i 为:

$$T_i = T_0 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{R_n}{\rho c \sqrt{\kappa}} \sqrt{t_i}, \quad (3)$$

式中, T_i 为夜间时刻 t_i 时待预报的温度; T_0 为日落 2 h 的温度。

另有:

$$R_n = \sigma \bar{T}^4 (1 - a - b\sqrt{e}) (1 - c_1 C_n), \quad (4)$$

式中, a 和 b 为系数, 这里取 $a = 0.66$, $b = 0.14$; e 为水汽压; σ 为斯蒂芬波尔兹曼常数, 这里取 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; $\bar{T}$ 为夜间地表平均温度; C_n 为云量 (云占天空百分比); c_1 为参数。

可得:

$$T_i = T_0 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{R_n}{\rho c \sqrt{\kappa}} \sqrt{t_i} = T_0 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sigma \bar{T}^4 (1 - a - b\sqrt{e}) (1 - c_1 C_n)}{\rho c \sqrt{\kappa}} \sqrt{t_i}. \quad (5)$$

令:

$$B_0 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\rho c \sqrt{\kappa}},$$

$$B = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sigma \bar{T}^4 (1 - a - b\sqrt{e}) (1 - c_1 C_n)}{\rho c \sqrt{\kappa}} = B_0 R_n, \quad (6)$$

则:

$$T_i = T_0 - B_0 R_n \sqrt{t_i} = T_0 - B \sqrt{t_i}, \quad (7)$$

式中, T_i 为夜间 t_i 时刻待预报的温度; T_0 为日落 2 h 的温度。根据历史观测资料及路面材质信息, 可以确定 T_0 和路面热特性参数 B_0 。

由式(1)与式(7)可得地表温度预报方程:

$$T_i = \begin{cases} T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min}) \cdot \sin \frac{\pi \cdot (t_i - 12 + dl/2)}{dl + 2p}, & 12 - dl/2 < t < 12 + dl/2 \\ T_0 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{R_n}{\rho c \sqrt{\kappa}} \sqrt{t_i}, & t > 12 + dl/2 \text{ 或 } t < 12 - dl/2 \end{cases}. \quad (8)$$

这样, 根据上面的系列公式, 就可以预报从当天日落时刻开始, 未来 24 h 内逐时或任意给定时刻 t_i 的道路温度值。

1.2.2 参数值 B_0 的确定

在式(7)中, 路面热特性参数 $B_0 \propto 1/\rho c \sqrt{\kappa}$, 主要与路面建筑材料的热特性有关。参数 B 值的物理含义为夜间每小时高速公路路表降温的幅度。有 2 种途径确定参数 B 和 B_0 值: 一是可根据高速公路路面材料的 ρ , c , κ 值, 先计算得到 B_0 值, 然后依据天气状况计算得到 B 值; 另一途径是根据历史气象观测资料用公式 $T_i = T_0 - B \sqrt{t_i}$ 反演出 B 值, 再根据 $B = B_0 R_n$ 推算出 B_0 。本研究将 2 种途径得到的 B_0 进行了对比, 用统计回归方法分析它们的一致性, 确定 B_0 值的合理范围。

下面是收集高速公路路表常用材料^[24]及水和冰^[25]的 ρ , c , κ ($\kappa = \frac{\lambda}{c}$) 值, 并由此计算与下垫面特征有关的 B_0 值。

表 2 水和沥青混凝土路面热特性值及 B_0 值计算结果

Tab. 2 Calculation result of thermal characteristics of cement and asphalt concrete pavement and B_0

材料	计算参数			B_0
	干密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热率/[$\text{W} \cdot$ ($\text{m} \cdot \text{K}$) $^{-1}$]	比热容/[$\text{kJ} \cdot$ ($\text{kg} \cdot \text{K}$) $^{-1}$]	
沥青混凝土	2 100	1.05	1.68	3.57
水 (20 ℃, 静滞)	1 000	0.57	4.18	3.07
冰 (0 ℃, 纯净)	920	2.24	2.10	2.28

1.3 预报效果评价指标

本研究利用路面温度预报值与实测值进行对比研究。用预报值 (模拟值) 与实测值之间的相关系数 r 、平均偏差 MBE 、均方误差 $RMSE$ 和模型效率 ME 来描述模型模拟效果。

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i), \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}, \quad (10)$$

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}, \quad (11)$$

式中, $\hat{Y}_i$ 为模拟值; Y_i 为观测值; $\bar{Y}$ 为观测平均值; N 为观测样本数。相关系数 R 越大, 平均偏差与标准差越低, 模型效率越接近于 1, 说明该算法的预报效果越好。

2 预报结果与差异分析

2.1 参数 B_0 值的计算结果及分析

先利用观测资料根据 $T_i = T_0 - B \sqrt{t_i}$ 计算得到 B 值, 再由 $B = B_0 R_n$, 在晴天无云的情况下, 去除 B 中 R_n 的影响, 则得到与高速公路路表建筑材料有关的 B_0 值, 将求得的各站点路面热特性参数 B_0 值列于表 3。

表 3 所选测站路面在晴天条件下的 B 值及 B_0 值

Tab. 3 B and B_0 of selected stations under sunny conditions

高速公路	站点	B							B_0
		1月	2月	3月	4月	10月	11月	12月	
京沪高速公路	M9347	-1.5	-1.9	-2.5	-2.5	-2.4	-1.9	-1.5	3.24
	M9309	-1.6	-1.9	-2.5	-2.8	-2.3	-1.9	-1.5	3.31
	G2 M9296	-1.45	-1.9	-2.1	-2.3	-2.4	-2	-1.5	3.18
沈海高速公路	M9340	-1.5	-1.9	-2.3	-3	-2.9	-2	-1.5	3.63
	M9337	-1.5	-1.9	-2.3	-2.7	-2.6	-2	-1.8	3.61
	G15 M9331	-1.5	-1.9	-2.3	-2.6	-2.5	-2.4	-1.8	3.63
	M9326	-1.5	-1.9	-2.3	-2.5	-1.8	-1.7	-1.5	3.67
常合高速公路	M9263	-1.5	-1.9	-2.4	-2.5	-1.8	-1.6	-1.5	3.27
	M9266	-1.5	-1.9	-2.4	-2.9	-1.8	-1.6	-1.5	3.21
	S38 M9254	-1.5	-1.9	-2.1	-2.6	-2.5	-2.2	-1.5	3.17
长深高速公路	M9425	-1.5	-1.7	-2.2	-2.5	-1.8	-1.7	-1.4	3.52
	M9270	-1.5	-1.7	-2.2	-2.5	-1.8	-1.7	-1.4	3.50
	G25 M9421	-1.5	-1.7	-2.2	-2.4	-1.8	-1.7	-1.4	3.56

(1) 表 3 中由实测数据反演得到的热特性参数 B_0 的计算结果变化于 3.17 ~ 3.67 之间, 将其与表 2 中用路面热特性值 ρ , c , κ 值推算得到的 B_0 (在 3.6 左右) 进行比较可知, 二者能很好地吻合, 表明表 3 中热特性参数 B_0 的计算结果是合理的。(2)

分析同一高速公路路面由实测数据反演得到的热特性参数 B_0 , 二者非常相似, 这是它们的建筑材质一致导致的必然结果。(3) 不同高速公路因建筑材质不一样, 路面热特性参数 B_0 明显不同, 从表 3 得到, G15 沈海高速公路段 B_0 值约为 3.63, 比 G25 长深高速公路 B_0 值 (3.53) 略高, 比 G2 沪宁高速公路段上 B_0 值 (3.25) 高约 10%。而 S38 常合高速的 B_0 值 (3.21) 最低。

B 值绝对值的变化与其所在经纬度和月份有关, 由 B 值计算公式: $B = B_0 \sigma T^4 (1 - a - b \sqrt{e}) (1 - c_1 C_n)$, B_0 值不变时, 温度升高时 B 值随之升高。在同一站点, B 值随着月份的增加而增加, 下半年则呈现出相反的趋势, 这是因为不同季节路表温度不同, 因而同一站点呈现出 B 值随月份变化而发生相应改变的现象。

2.2 单站逐时温度预报效果检验

应用路面温度逐时预报方程对高速公路路面温度进行预报。取 1 h 作为时间步长, 以 1 h 时间间隔的气象要素观测资料作为实测值, 以预报起报时的高速公路路面温度实况值作为计算未来 24 h 高速公路路面温度初始值。在本模型中, 以日出日落为界限将每天分为白天和夜间 2 个部分, 白天应用正弦函数对地温进行预测, 夜间以日落时间为预报起报时间, 利用当天的最高地温和前一天的最低地温计算夜间逐时的高速公路路面温度预报值, 对各站点 2 月份的逐时地温预报效果进行检验。

如表 4 所示, 13 个站点温度预报方程的预测值与实测值相关系数 r 均大于 0.91, 平均偏差 MBE 的绝对值小于 1.2, 标准差较小, 模型效果基本达到 0.75 以上, 预报方程效果好, 可以较准确地预测高速公路路面温度。

由表 4, 选择相关系数最高 (M9340, $r = 0.962$) 和最低 (M9266, $r = 0.919$) 的 2 个站点作为代表性站点分析方程模拟效果, 绘制逐时地表温度实测值和预测值的对比图。由图 1 可见, 2 个测站的路面温度预测值与实测值吻合程度非常高, 路面预报方程不仅可以很好地预测高速公路地表温度的变化趋势, 而且二者偏差很小, 尤其在晴朗的夜晚。

由图 1, 本研究对地表温度的预测可以很好地预测出地表温度逐时变化趋势, 结合气象要素实测数据做误差分析。在晴朗干燥的夜晚, 实测值与预报值拟合较好, 误差相对较小; 在多云与阴天天气条件下, 当日日较差较小, 由于云的保温作用, R_n 发

表 4 测站路面逐时温度预报效果检验

Tab. 4 Test of hourly temperature prediction effect of station pavement

站点	r	MBE	$RMSE$	ME
M9347	0.921	-0.791	3.019	0.793
M9309	0.925	-0.770	3.136	0.814
M9296	0.948	-0.495	3.199	0.764
M9340	0.962	-0.588	2.155	0.902
M9337	0.933	-1.189	3.196	0.823
M9331	0.929	-1.107	3.224	0.803
M9326	0.920	-1.024	3.002	0.784
M9263	0.956	-0.910	2.526	0.858
M9266	0.919	-0.560	3.278	0.786
M9254	0.922	-0.827	3.120	0.812
M9425	0.946	-1.106	2.547	0.911
M9270	0.948	-0.495	3.199	0.754
M9421	0.923	-1.117	3.206	0.784

生变化, 夜间降幅度不大, 预测值仍是以下降趋势为主, 但预报值相比实测值较小。在阴天或多云后的晴天, 预测值比实测值偏大, 可能是因为多云日日较差较小, 影响了当日预报效果。

选取 M9340 站点 2 月份夜间地温预报值与实测值做不同天气状况下的具体分析。如图 2、表 5 所示, 晴朗夜间方程预报效果极佳, 预报值与实测值偏差在 1℃ 以内的达到 72%, 偏差 2℃ 内的达到 92%, 偏差在 3℃ 内的达到 100%。多云、阴天天气状况下的高速公路地表温度预报可以较好地体现地表温度发展趋势, 偏差在 3℃ 以内的达到 92%。

2.3 最低温预报效果检验

以 2017 年 1 月至 4 月、10 月至 12 月 13 个站点的气象观测资料为本研究建立的预报方程最低温度预报效果的检验数据。图 3 是所选测站路面日最低温度实测值与预报值的散点图, 其中预报值与实测

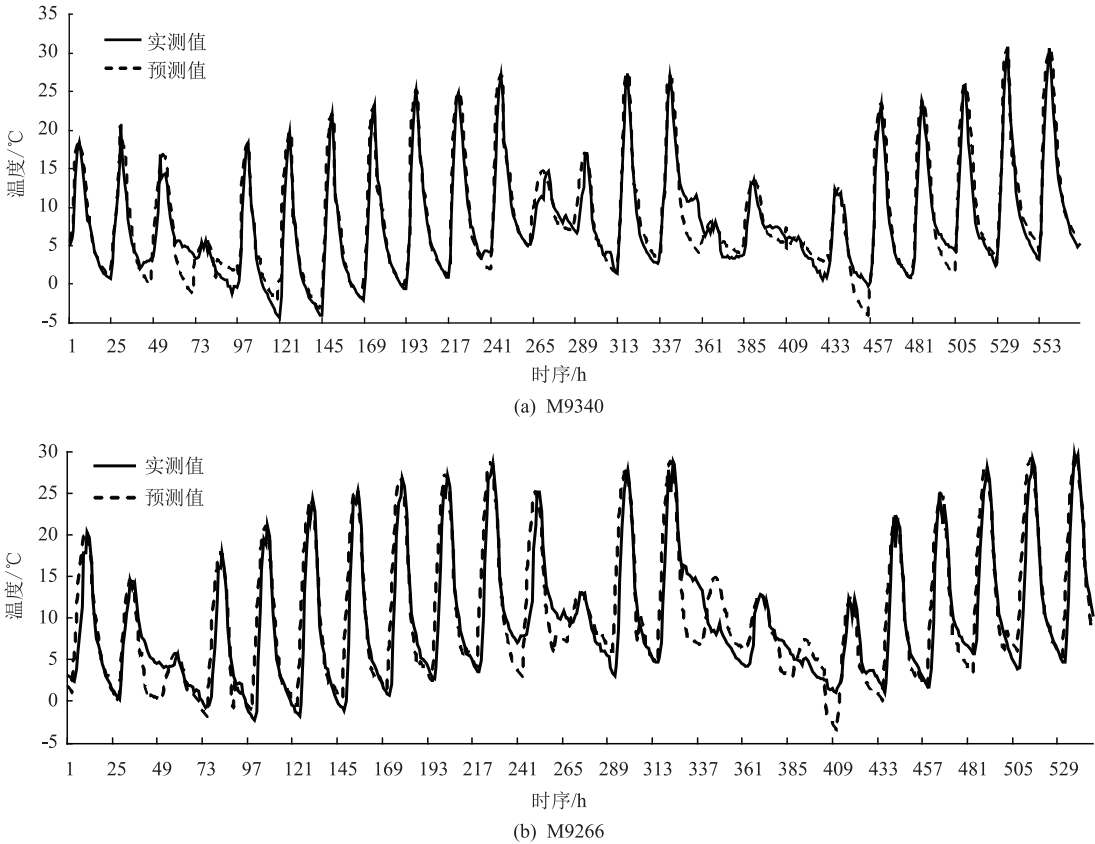


图 1 2 月的逐时地温预报效果检验

Fig. 1 Test of hourly surface temperature forecast effect in February

值数据点比较集中, 且其拟合线与 45° 等值线很吻合, 说明该方程预报精度较高。由表 6 可知, 由预报方程得到的最低温度预报值与实测值相关系数达 0.96, 均方差误差小于 2℃, 平均偏差为 0.08℃,

模型效果达 0.9。实测值与预报值偏差在 1℃ 内的为 45.23%, 偏差为 2℃ 内的为 75.82%, 偏差在 3℃ 内的达 92%, 预报结果可作为高速公路最低温预报的参考值。

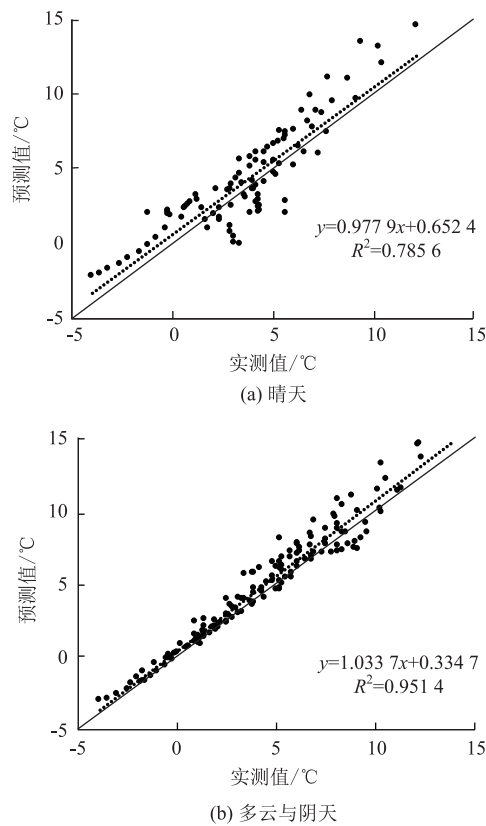


图 2 不同天气情况下夜间地表温度模拟值与实测值的对比
Fig. 2 Comparison of simulated and measured nighttime surface temperature under different weather conditions
表 5 M9340 不同天气状况下预报效果分析 (单位: %)
Tab. 5 Analysis of forecast effect of at Station M9340 under different weather conditions (unit: %)

天气	偏差 1 ℃	偏差 2 ℃	偏差 3 ℃
晴天	72.34	92.91	100.00
阴天、多云	31.25	76.04	93.75

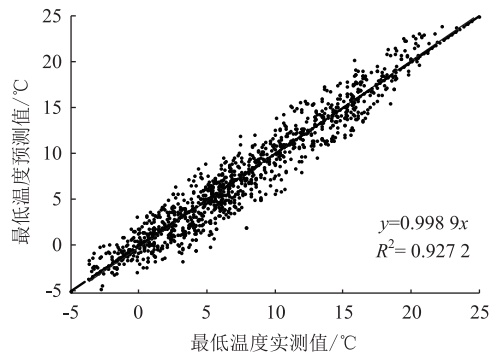


图 3 最低温度模拟值与实测值的对比
Fig. 3 Comparison of simulation value and measured value of lowest temperature

3 结论

(1) 本研究建立的预报方程具有较好的实用性

表 6 最低温预报效果检验
Tab. 6 Test of lowest temperature forecast effect

r	MBE	RMSE	ME	偏差 1 ℃ 以内	偏差 2 ℃ 以内	偏差 3 ℃ 以内
0.96	0.09	1.70	0.92	45.23%	75.82%	92.63%

和较高的预测精度,晴朗夜间高速路面温度预测值与实际值偏差在 1 ℃ 以内的比例达到 72%,阴天和多云天气时高速路面温度预测值与实际值偏差在 2 ℃ 以内比例达到 76%。模拟值与实测值相关系数高,均方根差值小,模型模拟效果好,表明模型具有很好的预测能力,可以用来进行路表温度的预测。

(2) 预报方程的参数 B_0 值仅与路面状况 ρ , c , κ 有关,因此随着高速公路路表性质发生改变时, B_0 值也会相应发生变化。本研究确定了江苏段内可用于路面低温预报方程的 B_0 值。 B 值在 B_0 的基础上考虑了局地小气候的影响,与 R_n 有关,随温度发生变化,同一季节纬度升高 B 值绝对值逐步增大、同一地点随着整体气候逐渐变暖, B 值绝对值也在逐步增加。总地说来, B 值绝对值随高速公路地表最低温度增大而增大。由于地表温度随月份变高,夜间 R_n 负值会变大, B 值的绝对值是变大的。

(3) 文中提出的地面温度预报方程在晴天天气状况下预报效果良好,冷平流发生时,地面平衡状态发生改变,预报值相对实测值偏高。降水发生或路面结冰时路面干湿状况发生改变,下垫面参数 ρ , c , κ 变化, B_0 随之改变,根据表 2,有积水或冰雪路面的 B_0 值为 2.07 和 2.28,比干燥路面 B_0 值小。由此推断当路面积水或积冰发生时,路面温度下降幅度相对小些,这一推测有待更多的观测资料来验证。

参考文献:

References:

[1] THORNES J E. The Prediction of Ice Formation on Roads [J]. Highways and Transportation, 1985, 32 (8): 3-12.

[2] CREVIER L P, DELAGE Y. METRo: A New Model for Road Condition Forecasting in Canada [J]. Journal of Applied Meteorology, 2001, 40 (11): 2026-2037.

[3] BOUILLAUD L, MARTIN E, HABETS F, et al. Road Surface Condition Forecasting in France [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2009, 48 (12): 2513-2527.

[4] KANGAS M, HEIKINHEIMO M, HIPPI M. RoadSurf: A Modelling System for Predicting Road Weather and Road Surface Conditions [J]. Meteorological Applications,

- 2015, 22 (3): 544–553.
- [5] KARSISTO V, TIJM S, NURMI P. Comparing the Performance of Two Road Weather Models in the Netherlands [J]. *Weather Forecasting*, 2017, 32: 991–1006.
- [6] WALKER C L, ANDERSON M R. Cloud Impacts on Pavement Temperature and Shortwave Radiation [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2016, 55 (11): 2329–2347.
- [7] 马晶昊, 廖春花, 张永锋. 长沙公路路面温度变化特征及预报模型 [J]. *科技广场*, 2017 (2): 22–25.
MA Jing-hao, LIAO Chun-hua, ZHANG Yong-feng. Variation Characteristics of Road Surface Temperature on Highway of Changsha and Its Prediction Model [J]. *Science Mosaic*, 2017 (2): 22–25.
- [8] ASEFZADEH A, HASHEMIAN L, BAYAT A. Development of Statistical Temperature Prediction Models for a Test Road in Edmonton, Alberta, Canada [J]. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2017, 10 (5): 369–382.
- [9] MARCHETTI M, CHAPMAN L, KHALIFA A, et al. New Role of Thermal Mapping in Winter Maintenance with Principal Components Analysis [J]. *Advances in Meteorology*, 2014, 2014: 1–11.
- [10] MARCHETTI M, KHALIFA A, BUES M. Methodology to Forecast Road Surface Temperature with Principal Components Analysis and Partial Least-square Regression: Application to an Urban Configuration [J]. *Advances in Meteorology*, 2015, 2015: 1–10.
- [11] SOKOL Z, BLIZNAK V, SEDLAK P, et al. Ensemble Forecasts of Road Surface Temperatures [J]. *Atmospheric Research*, 2017, 187: 33–41.
- [12] TOMS B A, BASARA J B, HONG Y. Usage of Existing Meteorological Data Networks for Parameterized Road Ice Formation Modeling [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2017, 56 (7): 1959–1976.
- [13] SADATI S M S, CETIN K, CEYLAN H. Energy and Thermal Performance Evaluation of an Automated Snow and Ice Removal System at Airports Using Numerical Modeling and Field Measurements [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 43: 238–250.
- [14] FUJIMOTO A, TOKUNAGA R A, KIRIISHI M, et al. A Road Surface Freezing Model Using Heat, Water and Salt Balance and Its Validation by Field Experiments [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 106/107: 1–10.
- [15] 王琨, 郝培文. 不同层位沥青路面温度预估模型 [J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2017, 37 (6): 24–30.
WANG Kun, HAO Pei-wen. Prediction Model of Temperature in Different Layers of Asphalt Pavement [J]. *Journal of Chang'an University: Nature Science Edition*, 2017, 37 (6): 24–30.
- [16] SOKOL Z, ZACHAROV P, SEDLAK P, et al. First Experience with the Application of the METRo Model in the Czech Republic [J]. *Atmospheric Research*, 2014, 143: 1–16.
- [17] MENG C. A Numerical Forecast Model for Road Meteorology [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2017, 130: 485–498.
- [18] LIU D, GRIMMOND C S B, TAN J, et al. A New Model to Downscale Urban and Rural Surface and Air Temperatures Evaluated in Shanghai, China [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2018, 57 (10): 2267–2283.
- [19] 罗喜平, 周明飞, 汪超. 贵州省冬季地表 (0cm) 温度预报探讨 [J]. *贵州气象*, 2016, 40 (4): 1–5.
LUO Xi-ping, ZHOU Ming-fei, WANG Chao. The Research of Land Surface Temperature Prediction in Winter of Guizhou [J]. *Journal of Guizhou Meteorology*, 2016, 40 (4): 1–5.
- [20] 周斌, 陈鹏狮, 李晶, 等. 辽宁省春季表层地温变化特征及其与气温的关系 [J]. *中国农学通报*, 2014, 30 (36): 285–290.
ZHOU Bin, CHEN Peng-shi, LI Jing, et al. Variation Characteristics of Surface Ground Temperature of Liaoning in Spring [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30 (36): 285–290.
- [21] 胡继超, 申双和, 孙卫国, 等. 微气象学基础 [M]. 北京: 气象出版社, 2014: 171–172.
HU Ji-chao, SHEN Shuang-he, SUN Wei-guo, et al. *Foundation of Micrometeorology* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2014: 171–172.
- [22] 华南理工大学, 重庆大学, 大连理工大学, 等. 建筑物理 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002.
South China University of Technology, Chongqing University, Dalian University of Technology, et al. *Architectural Physics* [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2002.
- [23] ARYA S P. *Introduction to Micrometeorology* [M]. 2nd ed. Salt Lake City: Academic Press, 2001.