

董颜,郭文利,闵晶晶,等,2020.北京道面温度特征分析和统计预报研究[J].气象,46(5):716-724. Dong Y, Guo W L, Min J J, et al, 2020. Characteristics of road surface temperature in Beijing and its statistic forecasting model[J]. Meteor Mon, 46(5):716-724(in Chinese).

北京道面温度特征分析和统计预报研究^{*}

董 颜 郭文利 闵晶晶 李乃杰 张丰瑶

北京市气象服务中心,北京 100089

提 要: 分析了北京市道面温度在冬季和夏季不同天气状况下的日变化,利用 2012—2015 年的道面站温度与北京区域模式输出的气象要素之间的相关关系,以 5 个道面站为代表站筛选不同相关因子建立多个道面冬季最低温度和夏季最高温度的线性回归统计预测模型,并对 2016—2017 年冬季、夏季道面温度预测检验。结果表明:在不同天气条件下道面温度与气温变化对比明显;道面温度与气温、辐射、日照时数相关较大;夏季按天气类型建模预测准确度有所提升,在晴到多云状况下,模型预测冬季最低温度误差控制在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 内,夏季最高温度误差控制在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 左右,其他天气状况下误差增大,冬季预测模型好于夏季预测模型。

关键词: 道面温度特征,冬季道面最低温度,夏季道面最高温度,预测模型

中图分类号: P456, P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.05.012

Characteristics of Road Surface Temperature in Beijing and Its Statistic Forecasting Model

DONG Yan GUO Wenli MIN Jingjing LI Naijie ZHANG Fengyao

Beijing Meteorological Service Center, Beijing 100089

Abstract: This article analyzes the diurnal variation of road surface temperature in the different weather conditions for winter and summer in Beijing. Based on the 2012—2015 data of the road stations and the corresponding forecasting model outputs, the multiple linear regression statistical forecasting models are built to predict the road minimum temperature in winter and the maximum temperature in summer with the different correlative factors from the selected 5 representative road stations. Then the best forecasting model is chosen to make an assessment for winters and summers from 2016 to 2017. The results show that there exists a significant diurnal variation for the road surface temperature, suggesting that the road surface temperature is obviously different under different kinds of weather conditions. The road surface temperature is correlated to air temperature, atmospheric radiation and sunshine duration. In addition, the prediction accuracy of summer forecasting models for the various weather conditions is improved. Under the fair to cloudy condition, the errors of forecasting models could be controlled within the $\pm 2^{\circ}\text{C}$ in winter and $\pm 3^{\circ}\text{C}$ in summer, but it is worse under the other weather conditions. The models show a better performance in terms of the minimum temperature forecast in winter compared to the maximum temperature forecast in summer.

Key words: characteristics of road surface temperature, minimum road surface temperature in winter, maximum road surface temperature in summer, forecasting model

^{*} 国家重点研发计划(2018YFF0300105)和北京市科技计划项目(D171100000717002)共同资助

2019 年 1 月 7 日收稿; 2020 年 3 月 12 日收修定稿

第一作者:董颜,主要从事专业气象服务、数值预报及模式评估. Email: dongyancandice@163.com

通讯作者:郭文利,主要从事气候、应用气象等研究. Email: guowenli44@163.com

引 言

首都北京作为重要交通枢纽,是多条高速公路的起点,也是连接各个省会的运输中转站之一。市内环路及四通八达的放射式高速公路很多,导致交通运输安全保障责任重大。近年来受灾害性天气影响,人们对影响交通出行的天气信息获取需求日渐增长,在众多影响交通运输的气象条件中,道面极端温度是不容忽视的重要因素之一。冬季道面温度过低将会导致道面结冰、积雪,使得道面摩擦系数降低造成交通拥堵甚至引发交通事故。夏季炎热高温,加之车辆在路面上高速行驶,与道面摩擦增温极易造成爆胎,导致车毁人亡(Norrman et al, 2000)。气象部门准确提供相关的公路气象预测对道路交通安全保障具有至关重要的作用(尹志聪等, 2015; 翟亮等, 2018; 孙军等, 2018)。

分析发现冬季最低温度常见于夜间,加上积雪极易造成道面结冰影响交通线路正常运行(李迅等, 2012)。而夏季晴到多云状况下道面最高温度大于 45°C 有爆胎风险,阴天或降水期间道面最高温度在 $30\sim 45^{\circ}\text{C}$,爆胎风险明显降低(马筛艳等, 2013; 隋东等, 2017)。根据天气类型划分,对夏季道面最高温度预测有一定研究意义。

国外对道面温度的预测研究早在20世纪50年代开始,美国、加拿大以及荷兰开展了道面最高和最低温度的计算模型(Barber, 1957),进入21世纪以后,以道面温度和气温数据为依据,按照季节划分建立不同地区的道面最高、最低温度的预测模型(Shao and Lister, 1996; Diefenderfer et al, 2003;)和GIS预测模型(Chapman et al, 2001a; 2001b)。一些国外气象部门采用高密度检测模式提供道面温度预测业务,利用气象学和传热学相结合的数值分析方法建立模型,参数因子较多且大多采用专门仪器检测,短时间内本地化实现较为困难(Hertl and Schaffar, 1998; Hermansson, 2000; Kršmanc et al, 2014)。国内研究道面温度相对较晚,众多学者利用理论分析方法采用热传导微分方程建立道面温度预测模型(吴赣昌和凌天清, 1998; 冯涛等, 2012),并且初步利用陆面模式针对某地区进行精细化道面温度预报(孟春雷和张朝林, 2012),融合多源资料结果作为强迫场,建立道面温度预报模型(冯蕾等, 2017)。第二种是统计分析方法,结合物理模型搭建空间、

线、点的道面站温度预测模型,但采用的气象因子多为实况数据,以温度为主,如最高、最低、平均气温等,其他观测数据如风、云量、降水、气压等为辅,并且与道面站温度数据相结合建立预测模型(李蕊等, 2011; 马筛艳等, 2012; 舒斯等, 2016; Liu et al, 2018)。然而,不管是人工还是自动观测的实况资料都需要上传时间且不可避免出现记录错误信息等问题。秦健和孙立军(2005)研究沥青路面温度场的分布规律时分析发现,气温和太阳辐射强度是影响沥青路面温度场的主要因素。通常实况无法观测辐射数据,因此需要模式资料辅助。李乃杰等(2017)利用机理分析方法改进陆面模式且引入北京区域模式数据中的辐射因子,预测结果比前人(张德山等, 2009; 冯涛等, 2012)效果好。

本文在董颜等(2017)分析不同起报时次对道面温度的滚动24 h逐小时预报模型基础上,分析了2008—2016年冬季和夏季北京道面温度的特征变化,再利用2012—2015年道面站温度与对应北京区域模式输出的气象要素之间的相关关系,建立多个线性预测模型并检验。后期可作为李乃杰等(2017)陆面模式的补充,统计模型与机理模型相结合,最终将北京道面温度从点到线、从格点化到道路沿线进行预测。

1 资料与方法

1.1 资料

北京28个道面站(图1),除A1063(木樨园桥)和A1062(六道口桥)在三、四环外,其他站点主要位于进出北京的高速公路(京藏、京哈、京津塘高速等)、五环和以首都为放射线交界处。选用2008年1月1日至2017年12月31日每日逐小时道面站观测信息,并以A1027(机场高速出京12.8 km)、A1325(西六环外环107.2 km)、A1414(京藏高速出京46.5 km)、A1512(京平高速出京54 km)、A1210(南六环内环54.5 km)5个道面站作为代表站分别建模。其中A1027数据健全,其他4个站分别位于北京四个方位,具有代表性。为区分不同天气类型,本文使用北京地区20个国家级观测站的日照时数(RZ)、逐日降雨、逐日降雪资料,通过差值处理成对应道面站的经纬度信息。

选用08时(北京时)起报的北京区域模式3 km

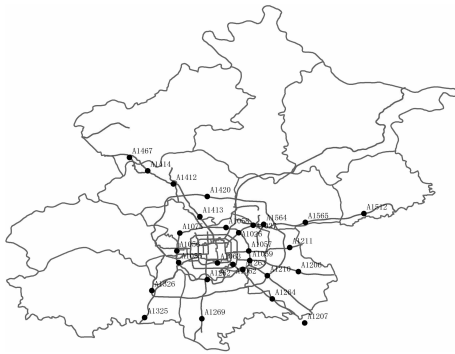


图 1 北京道面观测站空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of the road stations in Beijing

地面数据,包括长波辐射(GLW)、地表气压(p_{sfc})、湿度(RH_2)、短波辐射($SWDOWN$)、2 m 温度(T_2)、经向 10 m 风(U_{10})、纬向 10 m 风(V_{10})、逐小时累积降水量(P_{total}),预报时长为 24 h。

1.2 方法

采用董颜等(2017)对北京区域数值预报模式资料提取方法,将道面站点周边经纬度差值在 $\pm 0.5^\circ$ 范围内的格点值平均,作为对应道面站的预报数据。研究发现,道面温度除了与本身前一日对应时刻道面温度相关外,还与多个气象要素相关,不同站点相关气象因子不同,本文在此基础上进一步研究冬季最低道面温度与夏季最高道面温度预测模型,采用

回归统计方法,建立线性统计预测模型并检验。

2 道面温度变化特征

2.1 冬季和夏季道面温度的日变化

道面温度和 2 m 温度具有明显的日变化特征(图 2),最低值均出现在 06—07 时,日出后呈上升趋势,午后达到最高值随后下降。其中冬季夜间道面温度与气温相差不大;夏季道面温度普遍高于气温。总体上,道面温度在达到最高值后迅速下降,最高道面温度相位比 2 m 温度提前 2 h 左右,夜间二者温差相对稳定,夏季最高温度差比冬季大。

2.2 不同天气类型道面温度日变化特征

统计 2008—2016 年北京降雨日为 793 d,按照日照时数将无降水日划分为阴天、晴到多云(表 1),对应道面温度与气温进行讨论。

表 1 2008—2016 年北京冬季和夏季天空状况按日照时数分类

Table 1 Classification of weather conditions by the sunshine duration for the winter and summer of 2008—2016 in Beijing

季节	日照时数/h	
	阴天	晴到多云
冬季(12月至次年2月)	日照 ≤ 1	日照 > 1
夏季(6—8月)	日照 ≤ 3	日照 > 3

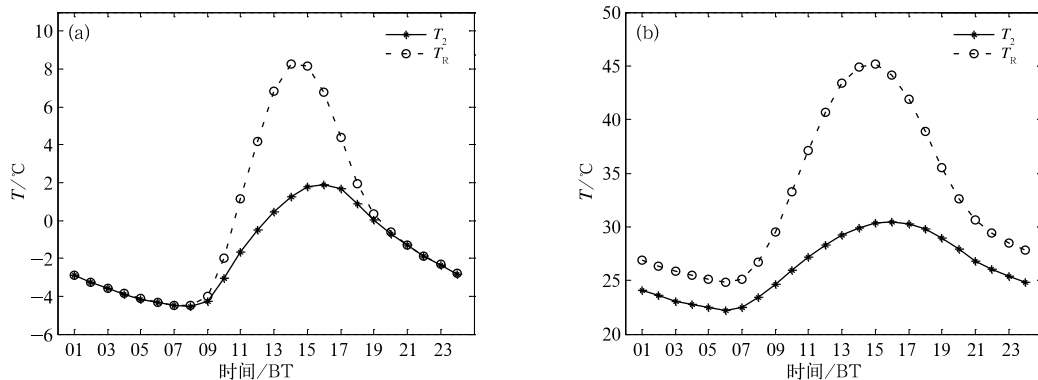


图 2 2008—2016 年冬季(a)、夏季(b)北京道面温度(T_R)与 2 m 温度(T_2)的日变化

Fig. 2 Diurnal variation of the road surface temperature (T_R) and 2 m temperature (T_2) in (a) winter, (b) summer in Beijing during 2008—2016

图 3 显示冬、夏季不同天气条件下道面温度与气温日变化对比。冬季白天晴到多云天气下道面温度和气温都要高于阴天,而夜间却相反;降水时温度相比晴到多云、阴天明显降低 3~4℃;夜间晴到多云下道面温度略低于气温,阴天相差不大。夏季除夜间降水时气温略低外,其他状况下二者走势类似。结合图 2,在日出后 1.5 h 至日落前 1.5 h,道面温度与气温有较大差异。道面温度在日出后的位相较气温超前,考虑气温的加热主要来源于下垫面的长波辐射,而地温的加热主要源于太阳短波辐射,且白天路上行车较多,摩擦后以沥青路为主的道面有很好的吸热散热功能。日落后道面温度下降较气温快,夜间长波辐射起主导作用,气温降温幅度稍缓。

对比不同站点(图略)道面温度变化发现,高速路及主要路段因环境不同造成各个道面站温度有所差异。冬季各站同时刻温差可维持在±2℃以内,但夏季同时刻最大温差相差近 15℃。

3 道面温度模型建立与检验

利用 2012—2015 年数据进行建模,再利用 2016—2017 年数据进行检验。根据冬季道面最低温度及夏季道面最高温度与气象因子、前一日道面

温度的关系筛选出主要影响因子,将其带入到回归统计模型中建模。考虑各站差异,本文以 A1027 进行详细阐述,再以同样方法对 A1325、A1414、A1512、A1210 建模。

3.1 冬季最低道面温度与气象因子的关系

通过表 2 显示的冬季道面站最低温度与对应北京区域模式输出气象要素预报值的相关关系发现,道面最低温度与预报温度(\bar{T}_2 、 T_{2_min} 、 T_{2_max})的相关系数最高;其次是 GLW、 p_{sfc} 、SWDOWN,其余因子相关性偏弱。其中 p_{sfc} 、 RH_2 、 U_{10} 与道面最低温度呈负相关。冬季道面最低温度常出现在夜间,长波辐射起关键作用,为此本文引入北京区域模式预测的辐射资料进行建模。

3.2 冬季最低道面温度统计模型

参照表 2 对因子筛选,利用多元回归方法对 5 个站分别建立冬季最低道面温度预报模型。将气象因子标记为 $X_{i,j}$, $i=1$ 为当日要素, $i=2$ 为前一日要素, $j=1, 2, \dots, 11$ 为表 2 序号因子,如 $j=1$,代表 GWL,前一日道面最低温度表示为 T_{min_ex} ;建模方法参考董颜等(2017)的阐述得到线性回归方程(Y_1):

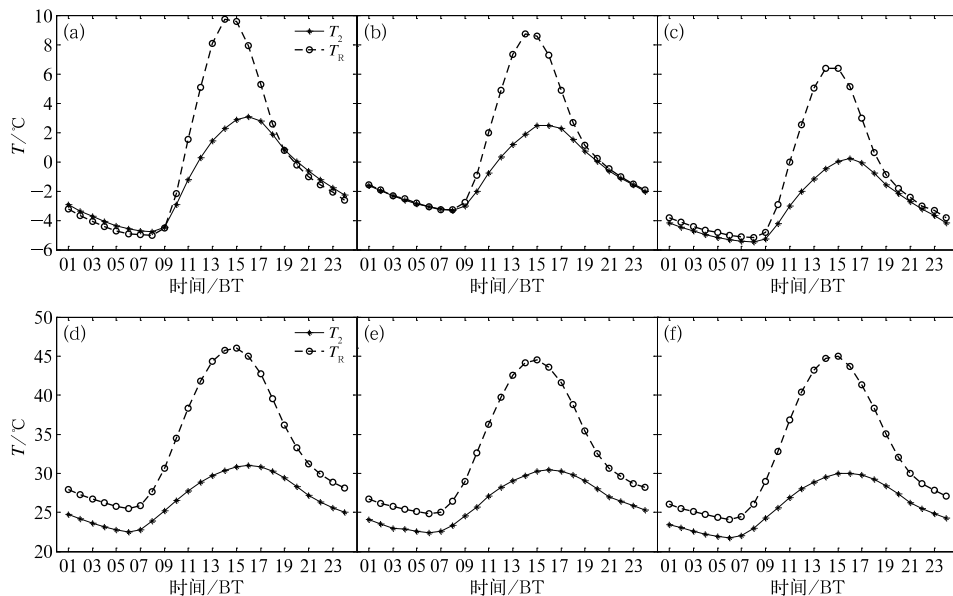


图 3 2008—2016 年冬季(a, b, c)、夏季(d, e, f)不同天气类型道面温度(T_R)与 2 m 温度(T_2)的日变化 (a, d)晴到多云, (b, e)阴天, (c, f)降水

Fig. 3 Diurnal variations of the road surface temperature (T_R) and 2 m temperature (T_2) in different weather conditions in winter (a, b, c) and summer (d, e, f) during 2008—2016 (a, d) fair to cloudy, (b, e) overcast, (c, f) precipitation

表 2 2012—2015 年冬季道面站最低温度与对应北京气象要素预报值的相关关系
Table 2 Correlation coefficients between minimum temperature and meteorological element outputs by the Beijing regional model for the winter from 2012 to 2015

序号	站点	A1027		A1210		A1325		A1414		A1512	
		当日	前一日	当日	前一日	当日	前一日	当日	前一日	当日	前一日
1	GLW	0.792**	0.658**	0.704**	0.653**	0.731**	0.667**	0.757**	0.630**	0.780**	0.638**
2	p_{sfc}	-0.699**	-0.604**	-0.667**	-0.630**	-0.713**	-0.669**	-0.643**	-0.559**	-0.681**	-0.595**
3	RH_2	-0.066	-0.145	-0.204*	-0.244**	-0.240**	-0.272**	-0.130	-0.232**	-0.043	-0.158
4	SWDOWN	0.442**	0.469**	0.508**	0.527**	0.484**	0.521**	0.476**	0.509**	0.462**	0.485**
5	\bar{T}_2	0.952**	0.898**	0.948**	0.932**	0.941**	0.921**	0.958**	0.913**	0.949**	0.902**
6	T_{2_min}	0.948**	0.898**	0.933**	0.921**	0.916**	0.904**	0.949**	0.911**	0.951**	0.896**
7	T_{2_max}	0.909**	0.861**	0.932**	0.912**	0.922**	0.901**	0.928**	0.882**	0.904**	0.874**
8	U_{10}	-0.259**	-0.189*	-0.202*	-0.173*	-0.144	-0.092	-0.303**	-0.243**	-0.305**	-0.206*
9	V_{10}	0.284**	0.274**	0.160	0.149	0.096	0.142	0.255**	0.228**	0.337**	0.246**
10	P_{t_total}	0.145	0.125	0.114	0.107	0.164	0.139	0.129	0.105	0.221**	0.155*
11	RZ	-0.050	0.104	0.080	0.176*	0.731**	0.667**	0.757**	0.630**	0.780**	0.638**
12	T_{min_ex}	—	0.888**	—	0.956**	—	0.960**	—	0.892**	—	0.893**

注:自由度 $n=332$, * 和 ** 分别代表通过 0.01 和 0.05 显著性水平检验, T_{2_min} :最低温度、 T_{2_max} :最高温度、 T_{min_ex} :前一日最低道面温度,下同。

Note: $n=332$; * and ** indicate passing 0.01 and 0.05 significance levels of test, respectively; T_{2_min} : minimum air temperature, T_{2_max} : maximum air temperature, T_{min_ex} : road minimum temperature of the previous day.

$$Y_1 = -12.430 + 0.052X_{1_1} + 0.028X_{1_3} + 0.025X_{1_4} + 0.439X_{1_5} + 0.161X_{1_7} - 1.283X_{1_8} + 0.081X_{1_9} - 0.018X_{2_1} - 0.02X_{2_4} + 0.307T_{min_ex} \quad (1)$$

模型模拟检验相关系数为 0.975,均方根误差为 1.17℃。经统计,2012—2015 年冬季阴天日数为 83 d,降水日数为 27 d,其中超过 0.1 mm 降水量的日数为 12 d,因为数据太少无法按照天气类型划分建模,所以冬季道面最低温度不再做天气分型讨论。

3.3 夏季最高道面温度与气象因子的关系

表 3 显示 2012—2015 年夏季道面站最高温度

与对应北京区域模式气象要素预报值的相关关系,经过筛选发现,夏季道面最高温度与预报温度(\bar{T}_2 、 T_{2_min} 、 T_{2_max})、RZ 和 SWDOWN 的相关系数最高,而与道面站前一日最高温度的相关系数不足 0.5,考虑夏季高温出现在白天午后,正是太阳短波辐射地表吸热最强的时候,SWDOWN 比 GLW 相关性大。表 3 中 GLW 与道面温度在某些站当天显示负值,考虑在夏季中午前后,如果云量增大,会极大减少 SWDOWN,但是 GLW 受云量影响较少,甚至还会略有增加,且夏季正午 SWDOWN 值基本比 GLW 大一倍以上,云量增加导致地表热源减少,道面温度反而会降低。总体看所有因子与夏季道面最

表 3 同表 2,但为夏季

Table 3 Same as Table 2, but for summer

序号	要素	A1027		A1210		A1414		A1512		A1325	
		当日	前一日	当日	前一日	当日	前一日	当日	前一日	当日	前一日
1	GLW	-0.324**	0.226**	0.119	0.234**	0.116	0.277**	-0.005	0.184*	-0.307**	0.195*
2	p_{sfc}	-0.465**	-0.275**	-0.250**	-0.200**	-0.312**	-0.255**	-0.243**	-0.260**	-0.466**	-0.235**
3	RH_2	0.633**	-0.165*	-0.351**	-0.107	-0.378**	-0.120	-0.452**	-0.158*	0.664**	-0.169*
4	SWDOWN	0.563**	0.315**	0.522**	0.247**	0.581**	0.241**	0.551**	0.290**	0.504**	0.290**
5	\bar{T}_2	0.663**	0.643**	0.605**	0.689**	0.653**	0.642**	0.679**	0.613**	0.691**	0.630**
6	T_{2_min}	0.615**	0.534**	0.542**	0.492**	0.498**	0.573**	0.551**	0.511**	0.583**	0.470**
7	T_{2_max}	0.586**	0.562**	0.535**	0.587**	0.584**	0.534**	0.539**	0.542**	0.529	0.524**
8	U_{10}	-0.038	-0.087	-0.012	-0.100	0.072	-0.011	0.121	-0.02	-0.031	-0.077
9	V_{10}	-0.305**	0.050	-0.028	0.042	0.132	0.156*	-0.026	0.128	-0.286**	0.036
10	P_{t_total}	-0.324**	-0.012	-0.280**	-0.042	-0.201**	-0.077	-0.239**	0.046	-0.307**	0.041
11	RZ	0.552**	0.177*	0.562**	0.094	0.565**	0.125	0.626**	0.196*	0.672**	0.149*
12	T_{max_ex}	—	0.428**	—	0.415**	—	0.429**	—	0.490**	—	0.463**

注:自由度 $n=350$, T_{max_ex} :前一日最高道面温度。

Note: $n=350$, T_{max_ex} : road maximum temperature of the previous day.

高温度的相关性普遍低于冬季道面最低温度。

3.4 夏季最高道面温度模型

参考冬季建模方案,建立线性回归方程 Y_2 :

$$Y_2 = 3.942 + 0.027X_{1_4} + 0.883X_{1_5} + 16.611X_{1_{11}} + 0.148T_{\max_{ex}} \quad (2)$$

经模型模拟检验发现相关系数为 0.788,均方根误差为 7.47℃。考虑研究夏季道面最高温度用于判断爆胎指数,误差太大会影响判断的准确度,为进一步减少误差,将夏季按照天气类型分型讨论,采用回归方法建立模型,以 A1027 站为准,按不同天气划分建模公式如下:

$$\text{晴到多云: } Y_3 = 19.05 + 0.21X_{1_2} - 0.042X_{1_3} + 0.018X_{1_4} + 0.953X_{1_7} - 0.785X_{1_9} + 0.113T_{\max_{ex}} \quad (3)$$

$$\text{阴天: } Y_4 = 26.951 + 0.033X_{1_4} + 0.426X_{1_7} + 10.562X_{1_{11}} + 0.121T_{\max_{ex}} \quad (4)$$

$$\text{降水: } Y_5 = 19.807 + 1.245X_{1_9} - 15.89X_{1_{11}} + 0.219T_{\max_{ex}} \quad (5)$$

按照不同天气类型划分建立的预测模型中,SWDOWN 和 RZ 作为主要因子参与建模,但 RZ 是观测站实况数据,在实际应用中需要预报员做出预估。以同样方法建立其余 4 个站方程,图 4 为 5 个道面站在不同天气类型下的预测模型和总体预测模型的模拟结果。按照不同天气类型划分的预测模型的模拟结果好于总体预测模型 Y_2 ,尤其是降水天气相关系数提高了 0.2 以上,误差降低了 5℃。特别是 A1325 和 A1414 两站的降水预测模型比总体预

测模型的相关系数提高了近 0.4,从地理位置上看,两站分别在北京的西南、西北方向,站点海拔较高,因此可初步推断按照不同天气类型建立的预测模型预测山区站点的准确度相比平原站更明显。

3.5 模型检验

利用 2016—2017 年数据对预测模型进行验证,冬季采用最低温度预测模型 Y_1 ;夏季最高温度采用不同天气类型的预测模型(晴到多云 Y_3 、阴天 Y_4 、降水 Y_5),在检验前需要对天气类型进行预判然后选择对应模型进行检验,模型预报时长为第二日的最高、最低道面温度。

从图 5 冬季、夏季道面温度预测值与实况时序走势看出,预报模型可表现出逐日的最高、最低温度变化。冬季最低温度预测整体误差基本在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 内,但有些时段表现不理想,例如 12 月 16—20 日和 26—30 日,经查日照时数数据,此段时间为阴天,而 2 月 7—8 日为降雪日,预测结果也有偏差。从时序上看,每一次天气过程结束后对最低温度的回温预测有推迟,后期需要进一步验证调整。夏季最高温度预测误差相较于冬季偏大,大部分误差可控制在 $\pm 3^\circ\text{C}$,但个别误差较大,体现在高温逐日变化剧烈情况下。从趋势上看道面站夏季逐日最高温度相差很大,这也是预报的难点。模式预报夏季最高温度中的低值(波谷)相对偏低,单日如 6 月 16 日、18 日和 7 月 31 日,连续预测最差的日期为 8 月 16—20 日,对应天气状况是阴天或连续阴雨。

图 6 为 5 个站的预测与实况误差对比,从散点

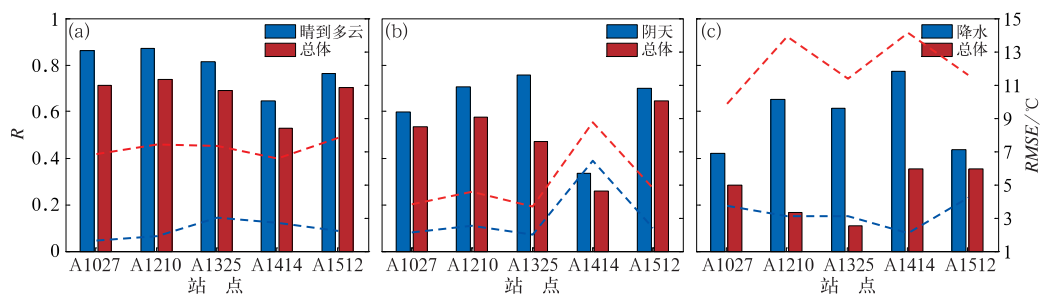


图 4 2012—2015 年不同天气类型下预测模型和总体预测模型的模拟结果对比
(a)晴到多云,(b)阴天,(c)降水
(柱状为 R,虚线为 RMSE)

Fig. 4 Comparison of the simulation results under different weather conditions with the whole ones during 2012—2015
(a) fair to cloudy, (b) overcast, (c) precipitation
(bar: correlation coefficient, dashed line: root mean square error)

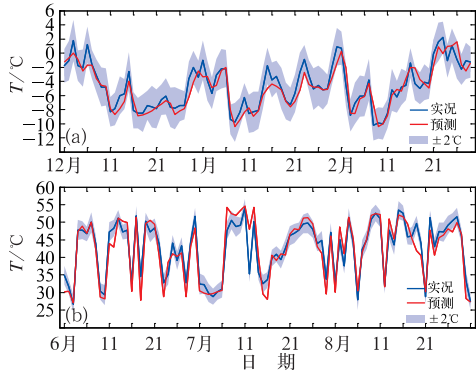


图 5 A1027 站道面温度预测与实况时序分布
(a) 冬季道面最低温度, (b) 夏季道面最高温度
Fig. 5 Time serials of temperature forecasts and observations at the A1027 Station
(a) minimum temperature in winter,
(b) maximum temperature in summer

分布上看,建立的模型预测冬季最低温度集中在对角线上,只有零散几个点偏离,且误差集中在 0°C 附近,各站点围绕 0°C 的误差分布密度集中,误差最大值出现在 A1512 站,接近 -6°C ,其余误差基本在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 内。夏季散点图相对分布较散漫,特别是预测 $45\sim 55^{\circ}\text{C}$ 的最高温度更为明显。与冬季误差分布密度相比,夏季道面最高温度虽然以 0°C 向正负方向呈正态分布,但是曲线面积相对较宽,集中在 0°C 峰值较低。综上所述,模型预测冬季道面站最低温度和夏季道面最高温度与实况较一致,但个别日期预测误差较大,主要对应的天气状况为降水日和阴天。模型对冬季道面最低温度预测要好于夏季道面最高温度的预测。

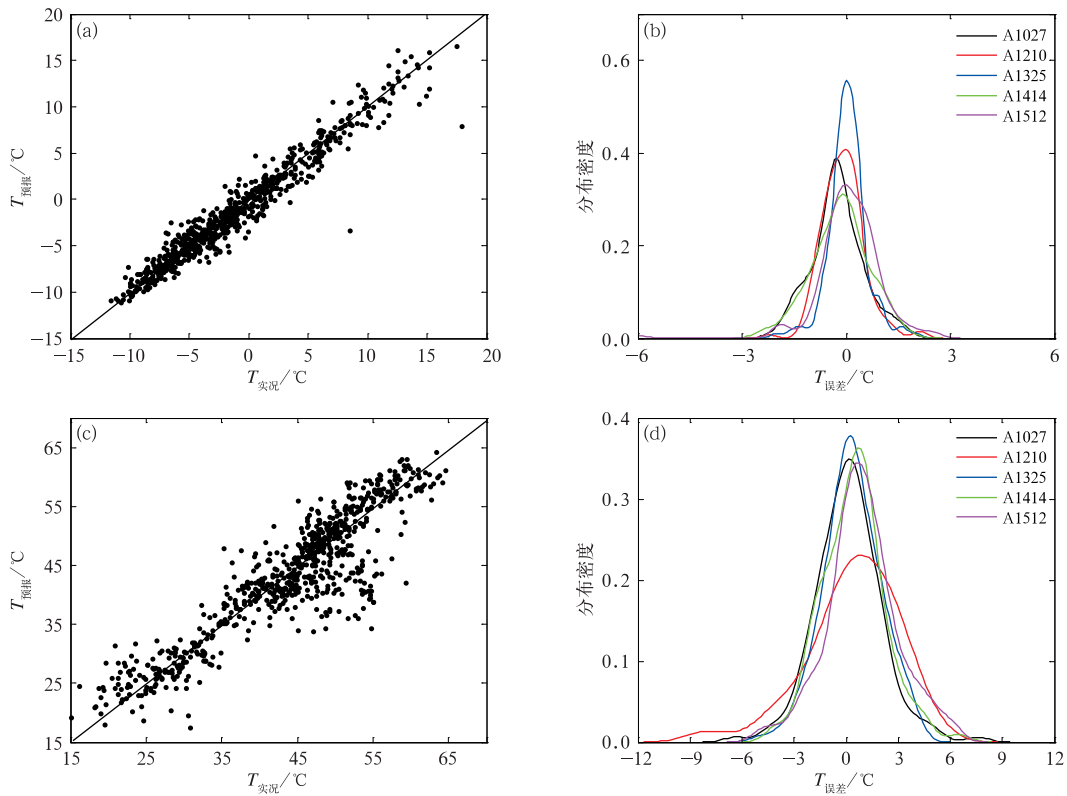


图 6 冬季道面最低温度(a,b)和夏季道面最高温度(c,d)的预测与实况误差对比

(a,c) 实况-预报散点图, (b,d) 温度误差分布密度图

Fig. 6 Error estimation of forecasts and observations of the minimum

temperature in winter (a, b) and the maximum temperature in summer (c, d)

(a, c) scatter diagram of observation and forecast, (b, d) error distribution density plot

4 结论与讨论

本文分析了冬季和夏季不同天气下道面温度日

变化特征,并根据不同站点筛选与道面温度相关的北京区域模式输出的气象因子,建立冬季道面最低温度和夏季道面最高温度的线性及非线性回归模型,择优进行检验,得到以下结论:

(1)道面温度存在明显的日变化,不同天气条件下道面温度与气温变化对比明显。冬季入夜后道面温度与实况气温相差不大,降水天气最低温度相比其他天气状况温度低;夏季道面温度白天升温较快,道面最高温度与实况气温相差 15℃左右,晴到多云天气下道面最高温度明显高于阴天和降水。

(2)道面温度与模式输出的气象因子有较好相关性。气温与道面温度相关性最大;其次是辐射因子和日照时数,考虑各道面站的相关因子不同,最终参与建模的因子分季节和站点不同而有差异。

(3)建立的预测模型中线性回归模型好于非线性回归模型,其预测结果与实况较为一致。冬季道面最低温度预测模型不分天气,夏季道面最高温度预测模型按照天气类型划分,在应用前需对天气类型做好预判。晴到多云天气下,冬季最低温度预测误差基本在±2℃内,夏季最高温度预测误差在±3℃,阴天或降水天气,误差加大。总体上冬季预测模型好于夏季预测模型。

本文建模因子依托北京市气象局开发的区域模式输出,2017年以前是BJ-RUC模式,之后采用RMAPS模式,经内部诊断模式预报在温度和降水预测上精确度略有提高,且模式3 km范围及分辨率一样,因此建立的预测模型可以通用。但是,站点统计方法只能针对点对点建立模型,如覆盖面上的道路温度,还要进一步结合机理改进预测模型。有些道面站受环境改变、站点数据缺失或错误,对后期这些站的建模产生影响,因此还要寻求合适差值方法统计建模。

参考文献

董颜,尤焕玲,郭文利,等,2017. 基于BJ-RUC模式预报产品的北京冬半年道面温度预报模型[J]. 气象,43(10):1241-1248. Dong Y, You H L, Guo W L, et al, 2017. Models of road surface temperature in the Beijing Region in the winter half year based on the BJ-RUC forecast product[J]. Meteor Mon, 43(10):1241-1248(in Chinese).

冯蕾,王晓峰,何晓凤,等,2017. 基于INCA和METRo的江苏省路面高温精细化预报[J]. 应用气象学报,28(1):109-118. Feng L, Wang X F, He X F, et al, 2017. Fine forecast of high road temperature along Jiangsu highways based on INCA system and METRo model[J]. J Appl Meteor Sci, 28(1):109-118(in Chinese).

冯涛,李迅,丁德平,2012. 高速公路道面温度预报[J]. 公路交通科技,29(5):19-23,29. Feng T, Li X, Ding D P, 2012. Prediction of expressway surface temperature[J]. J Highway Trans Res Dev,

29(5):19-23,29(in Chinese).

李乃杰,李迅,董颜,2017. 冬季车辆热源对道面温度影响的估算[J]. 干旱气象,35(4):682-687. Li N J, Li X, Dong Y, 2017. Estimate on the effect of vehicle heat source on road surface temperature in winter[J]. J Arid Meteor, 35(4):682-687(in Chinese).

李蕊,牛生杰,汪玲玲,等,2011. 三种下垫面温度对比观测及结冰气象条件分析[J]. 气象,37(3):325-333. Li R, Niu S J, Wang L L, et al, 2011. Comparison of three kinds of underlying surface temperatures and analysis of the road icing meteorological conditions[J]. Meteor Mon, 37(3):325-333(in Chinese).

李迅,尹志聪,丁德平,等,2012. 北京地区高速公路道面结冰特征及气象条件[J]. 应用气象学报,23(5):578-584. Li X, Yin Z C, Ding D P, et al, 2012. Meteorological conditions of road surface icing on Beijing expressway[J]. J Appl Meteor Sci, 23(5):578-584(in Chinese).

马筛艳,李剑萍,刘玉兰,等,2012. 银川城市道路路面温度变化特征及统计模型[J]. 气象研究与应用,33(1):48-51. Ma S Y, Li J P, Liu Y L, et al, 2012. Road surface temperature variation and the statistical model in Yinchuan City[J]. J Meteor Res Appl, 33(1):48-51(in Chinese).

马筛艳,马金仁,孙卫武,等,2013. 银川市路面温度预报与爆胎指数预报方法研究[J]. 干旱气象,31(4):825-830. Ma S Y, Ma J R, Sun W W, et al, 2013. Study of forecasting method for urban road temperature and the index of car tire's explosion[J]. J Arid Meteor, 31(4):825-830(in Chinese).

孟春雷,张朝林,2012. 路面气象数值预报模型及性能检验[J]. 应用气象学报,23(4):451-458. Meng C L, Zhang C L, 2012. Development and verification of a numerical forecast model for road meteorological services[J]. J Appl Meteor Sci, 23(4):451-458(in Chinese).

秦健,孙立军,2005. 国外沥青路面温度预估方法综述[J]. 中外公路,25(6):22-26. Qin J, Sun L J, 2005. Summary of methods for predicting asphalt pavement temperature from abroad[J]. J China Foreign Highway, 25(6):22-26(in Chinese).

舒斯,曾琦,鲁静,等,2016. 沪渝高速(三岔口大桥)路面温度特征及模型研究[J]. 暴雨灾害,35(4):378-385. Shu S, Zeng Q, Lu J, et al, 2016. Characteristics of road surface temperature of San-chakou Bridge and the study of its model[J]. Torr Rain Dis, 35(4):378-385(in Chinese).

隋东,梁红,安昕,等,2017. 沈阳爆胎气象条件指数预报方法研究[J]. 干旱气象,35(5):893-898. Sui D, Liang H, An X, et al, 2017. Tire burst meteorological condition index forecast method in Shenyang[J]. J Arid Meteor, 35(5):893-898(in Chinese).

孙军,马学款,代刊,等,2018. 北京几次弱降水过程预报失误分析[J]. 气象,44(1):26-41. Sun J, Ma X K, Dai K, et al, 2018. Analysis of unsuccessful forecasts of several weak rainfall processes in Beijing[J]. Meteor Mon, 44(1):26-41(in Chinese).

吴赣昌,凌天清,1998. 半刚性基层温缩裂缝的扩展机理分析[J]. 中国公路学报,11(1):21-28. Wu G C, Ling T Q, 1998. The analysis

- of developing mechanism of thermal crack of the semi-rigid roadbase[J]. *China J Highway Transp*, 11(1): 21-28 (in Chinese).
- 尹志聪, 郭文利, 李乃杰, 等, 2015. 北京城市内涝积水的数值模拟[J]. *气象*, 41(9): 1111-1118. Yin Z C, Guo W L, Li N J, et al, 2015. Numerical simulation of urban ponding in Beijing[J]. *Meteor Mon*, 41(9): 1111-1118 (in Chinese).
- 翟亮, 郭淳薇, 马新成, 等, 2018. 北京 2016 年“11·20”初雪预报偏差分析[J]. *气象*, 44(1): 151-158. Zhai L, Guo C W, Ma X C, et al, 2018. Forecast deviation analysis of the first snow in Beijing on 20 November 2016[J]. *Meteor Mon*, 44(1): 151-158 (in Chinese).
- 张德山, 丁德平, 穆启占, 等, 2009. 北京奥运交通路段精细预报[J]. *应用气象学报*, 20(3): 380-384. Zhang D S, Ding D P, Mu Q Z, et al, 2009. The subtle weather forecast of the highway traffic during 2008 Beijing Olympic Games[J]. *J Appl Meteor Sci*, 20(3): 380-384 (in Chinese).
- Barber E S, 1957. Calculation of maximum pavement temperatures from weather reports[R]. Washington: Highway Research Board.
- Chapman L, Thornes J E, Bradley A V, 2001a. Modelling of road surface temperature from a geographical parameter database. Part 1: statistical[J]. *Meteor Appl*, 8(4): 409-419.
- Chapman L, Thornes J E, Bradley A V, 2001b. Modelling of road surface temperature from a geographical parameter database. Part 2: numerical[J]. *Meteor Appl*, 8(4): 421-436.
- Diefenderfer B K, Al-Qadi I L, Reubush S D, et al, 2003. Development and validation of a model to predict pavement temperature profile[R]. Washington: Transportation Research Board.
- Hermansson A, 2000. Simulation model for calculating pavement temperatures including maximum temperature[J]. *Transp Res Rec: J Transp Res Board*, 1699(1): 134-141.
- Hertl S, Schaffar G, 1998. An autonomous approach to road temperature prediction[J]. *Meteor Appl*, 5(3): 227-238.
- Kršmanc R, Tarjáni V, Habrovský R, et al, 2014. Upgraded METRO model within the METRoSTAT Project[C]// 17th International Road Weather Conference. Andorra: SIRWEC.
- Liu B, Yan S, You H L, et al, 2018. An ensemble RBF extreme learning machine to forecast road surface temperature[C]// Proceedings of 2017 16th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications. Cancun: IEEE: 977-980.
- Norrman J, Eriksson M, Lindqvist S, 2000. Relationships between road slipperiness, traffic accident risk and winter road maintenance activity[J]. *Clim Res*, 15: 185-193.
- 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(8): 1352-1361.