

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.

基于 BJ-RUC 模式预报产品的北京 冬半年道面温度预报模型^{*}

董 颜 尤焕玲 郭文利 闵晶晶

北京市气象服务中心, 北京 100089

提 要: 选用 2012 年 11 月 1 日至 2013 年 3 月 30 日 3 km 分辨率 BJ-RUC 模式输出的气象要素与 5 个道面站数据(A1027, A1325, A1412, A1414, A1512)温度进行统计分析, 按不同起报时次(08、14 和 05 时)分别建立三类逐步回归统计模型预报未来 24 h 逐时道面温度, 选出最优模型预报 2013 年 11 月至 2014 年 3 月道面温度。结果表明: 道面温度与 RUC 输出的 2 m 温度、短波辐射显著相关, 与长波辐射、湿度次相关; 有显著气象因子参与的回归模型预报的道面温度好于仅加入前一天对应时刻道面温度的回归模型, 预报准确度可提高 25% 以上, 误差减少 1℃ 以上; 滚动筛选不同起报时次预报时段可将模型预报误差控制在 ±3℃ 以内, 且预报早高峰温度好于晚高峰, 白天好于夜间, 晴天好于其他天气类型。

关键词: 道面温度, 北京快速更新循环数值预报系统(BJ-RUC)预报, 回归模型

中图分类号: P456, P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.10.008

Models of Road Surface Temperature in the Beijing Region in the Winter Half Year Based on the BJ-RUC Forecast Product

DONG Yan YOU Huanling GUO Wenli MIN Jingjing

Beijing Meteorological Service Center, Beijing 100089

Abstract: In this paper we made a statistical analysis of the road surface temperature based on observations of the selected five road stations (A1027, A1325, A1412, A1414, A1512) and the meteorological elements output from the Beijing Rapid Update Cycle (BJ-RUC) numerical forecasting model with 3 km resolution from 1 November 2012 to 30 March 2013. We used the stepwise regression model methods to build three types of statistical models for hourly road surface temperature in 24 h in the winter half year for the different initial forecasting times (08:00, 14:00, 05:00 BT) and the different months. Then the best type is used to forecast the road surface temperature from 1 November 2013 to 30 March 2014. The results are as follows. The road surface temperature is significantly correlated to T_2 and the short-wave radiation, but secondarily correlated to the long-wave radiation and humidity output from RUC. Compared to the type of statistical model with the only one factor for the previous day, the type of regression model with meteorological elements of remarkable correlation inserted performs better in terms of the road surface temperature forecast accuracy by more than 25%, and the prediction error decreases by 1℃. For further enhancing the forecast accuracy rate, we selected the different initial times for verification so as to control error within ±3℃. The result of evaluation shows that the forecast value of the road surface temperature in the day-time is better than that over night, and sunny days are better than any other kinds of weather.

^{*} 北京市科技计划项目(Z151100002115040)和北京市自然科学基金项目(8174083)共同资助

2016 年 6 月 30 日收稿; 2017 年 6 月 16 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

通信作者: 郭文利, 主要从事气候、应用气象等方面工作. Email: guowenli44@163.com

Key words: road surface temperature, Beijing Rapid Update Cycle (BJ-RUC) forecast, regression model

引 言

冬半年的降雨、降雪和雾-霾等高影响天气易造成地面湿滑、道面结冰等现象,从而导致城市交通拥堵、事故频发,也严重影响了城市生活的正常运行。准确的道面气象条件预报成为交通天气信息系统的核心组成部分,而道面温度是判断道面结冰的先决条件,是交通部门提出决策意见的参考因子(Norrman et al, 2000)。当温度达到一定标准后,结合降水条件可以给出道面结冰警报,有助于减小交通流量的波动、减少事故的发生,此外对于政府控制喷洒融雪剂量、节约物资财力成本起到至关重要的作用(李迅等, 2012; 2014)。研究道面温度与气象条件的关系,开展道面温度预报服务,将会对道路使用效率以及评估可能产生的风险具有积极作用(罗慧等, 2007)。

国外对道面温度预报方法研究方面起步较早,一些发达国家如丹麦、加拿大、德国等已经具备较完善的道面监测系统以及预报模式。研究道面温度状况的方法可归纳为两类,一是根据气象学和热传学的基本原理采用数值分析方法建立沥青道面温度场的预报模型,即理论分析法;二是统计分析方法(景元书等, 2009)。物理方法中主要以空间扩散和能量守恒方法研制道面温度和道面状况预报模型(Shao and Lister, 1996),建立了用于计算高温条件下沥青道面温度场的仿真模型,根据风速、气温和路表温度算得模型中路表温度的对流损失,进而模拟道面温度场的日变化(Hermansson, 2000)。然而物理方法在实现测量和仿真校正上相对较为复杂,有时会导致大量错误。虽然大多数参数化方案的引进可以降低或解决以上问题,但是效果不显著(Kršmanc et al, 2014)。统计分析方面,统计了决定道面温度条件的气象因子,采用不同起报时间的逐步线性回归分析预报道面温度(Kršmanc et al, 2013),分析了预报冰的结构可能性(Berrocal et al, 2010)。国内总结了国外道面温度的研究方法,详细阐述了国外利用统计方法研究道面温度的发展情况,为建立统计方法的道面温度预报模型提供了参考(秦健和孙立军, 2005)。根据区域特色,不同程度地研究了不同天气状况、不同材质以及不同下垫面道面温度变化特征,并在此基础上建立统计模型(吴晟等, 2006;

李蕊等, 2011; 马筛艳等, 2012; 舒斯等, 2015)。

2008年北京夏季奥运期间根据自动气象站的气象要素分路段按照线性回归粗略生成各个交通路段客观预报产品(张德山等, 2009),针对冬季研究了北京市高速公路道面结冰特征及气象条件(李迅等, 2012),考虑太阳短波辐射、大气和地面的长波辐射、潜热、感热传输等能量之间的平衡,应用地表热量平衡方程建立了道面温度模型(冯涛等, 2012)。这些虽然针对北京地区道面温度有一定的研究,但是建立的模型没有延展性,且预报时间较短,预报误差大。近年来,北京快速更新循环数值预报系统(Beijing Rapid Update Cycle, BJ-RUC)的应用范围广泛开展(李迅等, 2015; 魏东等, 2011)。本文在分析北京市冬季道面温度与气象观测站点温度的基础上,利用 BJ-RUC 模式预报出的气象要素和前一日道面温度实况建立多个逐步回归模型,对比有无气象要素参与的回归模型预报准确度,为减少随预报时效延长误差加大的出现,分不同起报时次点对点滚动预报未来 24 h 逐时道面温度。通过检验不同时段道面温度预报效果,从而对后期业务上的应用提供一定的参考依据。

1 资料与方法

1.1 道面站选取

北京大部分道面材料选用了耐高温、水稳定性的沥青混凝土作为上层道面。北京道面观测有效站点共有 16 个,主要分布在四环以外、高速路进京位置。通过对北京道面站数据的筛选,最终确定了 A1027 (40. 03° N、116. 56° E, 机场高速出境 12.8 km)、A1325 (39. 36° N、116. 03° E, 西六环外环 107.2 km)、A1412 (40. 13° N、116. 11° E, G4 京港澳高速进京 42 km)、A1414 (40. 17° N、116. 04° E, 北六环外环 177.7 km)、A1512 (40. 05° N、117. 04° E, 京平高速出京 54 km) 5 个道面站进行分析。

1.2 RUC 预报资料

RUC 数值预报输出产品的延后时间为 4 h,为了便于后期业务应用,选取 08、14 和 05 时(北京时) 3 个不同起报时次的预报产品。BJ-RUC 在 08 时起

报相较其他起报时次的预报稳定性较差(刘梦娟和陈敏,2014;闵晶晶,2014),因此 08 时作为校准时次;14 和 05 时分别对应发布 17 时(晚高峰)和 08 时(早高峰)逐小时道面温度预报,预报时长为 24 h。

1.3 方法

选用 2012 年 11 月 1 日至 2013 年 3 月 30 日 BJ-RUC 数值预报 3 km 分辨率输出气象要素与对应时次道面站温度进行分析,找出显著气象相关因子,按不同起报时次、不同月份与道面站温度建立多组逐步回归方程未来 24 h 逐时预报,筛选最优回归方程预报 2013 年 11 月 1 日至 2014 年 3 月 31 日道面温度并进行检验。

为更准确地提取数据,根据 5 个道面站的经纬度,提取 BJ-RUC 数值预报资料时,选取周边经、纬度偏差 0.5° 范围内的所有格点数据进行平均,得到对应道面站的预报数据。如 A1027 的经纬度 40.03°N 、 116.56°E ,选取周边经、纬度偏差 0.5° 范围内,即 $39.53^\circ\sim 40.53^\circ\text{N}$ 、 $116.06^\circ\sim 117.06^\circ\text{E}$ 的所有格点数据(共 989 个数据),取平均数为对应道面站的预报值。

通过 3 个不同起报时次(08、14 和 05 时),提取 RUC 数值预报产品中的长波辐射(GLW)、地表气压(p_s)、湿度(RH_2)、短波辐射(SWDOWN)、2 m 温度(T_2)、径向 10 m 风(U_{10})、纬向 10 m 风(V_{10})、逐小时累计降水量(P_t)共 8 个要素与道面温度进行对比,并加入前一日对应小时道面温度(Tex_day)分时、逐月建模。在建模过程中,为对比有无气象要素参与的回归模型预报准确度,选择不同因子参与建立 3 类逐步回归方程:只含有 Tex_day 的回归方程,用于参考 Tex_day 的权重比例及自身道面温度变化的影响;筛选主要显著相关因子参与的回归方程;汇点所有显著相关的气象因子参与的回归方程最终建立 225 个方程(3 个时次、5 个站点、5 个月份,3 类方程)。对建立的这 3 类方程进行统计拟合检验,选出最优回归方程,并预报下一年道面温度,通过与实况值对比验证回归模型的可应用性。

2 冬半年道面温度统计模型

道面温度受自然环境影响很大,对其产生影响的气象因子很多,本文通过统计分析 BJ-RUC 预报输出资料与道面温度相关的气象因子,并加入前一

日道面温度,根据不同道面站按不同起报时次逐月建立道面温度预报回归模型。

2.1 道面温度与 RUC 预报气象因子的关系

从表 1 2012—2013 年冬季逐时道面站温度与 BJ-RUC 气象要素预报值的相关系数(R)看出,3 个时次前一日的道面温度 Tex_day 与当日道面温度相关性最大,在 0.9 以上。主要显著相关的气象因子有 SWDOWN、 T_2 , R 在 0.5 以上;其次为 GLW、 RH_2 , R 在 0.3 以上;而 U_{10} 、 V_{10} 、 P_t 在不同起报时次中显著相关性有所差异,在建立不同参与气象因子回归方程中将会分别考虑。其中, BJ-RUC 预报的 p_s 、 RH_2 与道面温度呈负相关。

表 1 2012—2013 年冬季逐时道面站温度与对应 BJ-RUC 气象要素预报值的相关关系

Table 1 Correlation coefficients between road temperature and meteorological factor output by the BJ-RUC in the winter half year from 2012 to 2013

因子	起报时次		
	08 时	14 时	05 时
GLW	0.413 **	0.384 **	0.429 **
p_s	-0.035 *	-0.038 *	-0.031 *
RH_2	-0.386 **	-0.368 **	-0.363 **
SWDOWN	0.589 **	0.581 **	0.577 **
T_2	0.858 **	0.852 **	0.857 **
U_{10}	0.009	-0.009	-0.006
V_{10}	0.076 *	0.111 **	0.091 **
P_t	0.019 *	0.040 *	0.037 *
Tex_day	0.913 **	0.914 **	0.911 **

注:自由度 $n=3369$, * 和 ** 分别代表超过 0.05 和 0.01 显著性水平检验。
Note: degree of freedom $n=3369$, * and ** represent passing through 0.05 and 0.01 significance level of test, respectively.

基于 2012—2013 年冬季 BJ-RUC 与道面温度的关系,进一步分析不同起报时次、不同站点 BJ-RUC 预报的各气象要素与道面温度相关权重关系(图 1)。图 1 中点图为相关权重概率,即 $W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_i|$, i 为月份, R 为相关系数, W 取值 0~1, 越接近 1 代表权重越高。条形图为统计相关贡献量,即 $C = \sum_{i=1}^n R_i$, C 为正值时因子贡献为正,负值则相反。两者结合可以看出各因子相对道面温度关系中所占权重大小。从图 1 可知, BJ-RUC 预报不同气象要素值对道面温度有显著性个别差异,其主要显著相关仍然是 Tex_day 、SWDOWN、 T_2 (同表 1), 而相同气象要素在不同起报时次的相关权重差异略

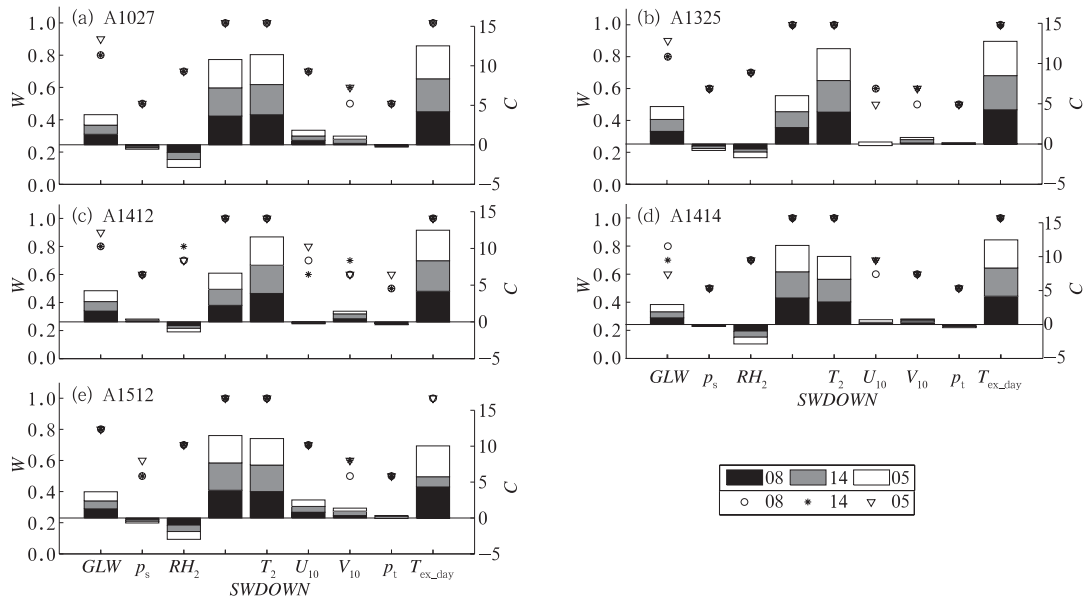


图 1 5 个道面站不同起报时次气象要素的相关权重比

(点图为相关权重概率, 条形图为统计相关贡献量)

Fig. 1 Weight ratio of meteorological factors for different initial forecast times at five road stations

(Scatterplot is for correlation weight probability, and bar is for relevant statistic contribution)

有不同, 对比各站发现, p_s 、 U_{10} 、 V_{10} 这 3 个气象因子差异较大, 因此在建立回归方程中除了主要考虑 T_{ex_day} 、 $SWDOWN$ 、 T_2 3 个因子建立的 Y2 外, 剩余的其他因子根据不同时次、不同站点的显著性参与到 Y3 方程的建立。

2.2 建立回归模型

根据不同月份、不同起报时次、不同站点, 参考不同相关因子分别建立 3 类逐步回归方程, 总共建立 225 个方程: Y1 的参数只有前一日的道面温度 T_{ex_day} ; Y2 的参数加入显著相关系数较大的 $SWDOWN$ 和 T_2 ; Y3 加入各时次全部具有显著相关的因子参与计算。其中 Y1 与 Y2、Y3 相比可以反映出气象因子对于道面温度预报的贡献性问题, 通过逐步回归方程因子筛选, 很可能将 Y3 中相关性相对差的气象因子删除掉 (与加入 T_{ex_day} 、 $SWDOWN$ 和 T_2 3 个因子参与的 Y2 方程重合), 但实际对比 Y2 与 Y3 两类方程发现, 并没有发现重合。为便于展示, 本文以 A1027 站为主详细阐述建模方法, 然后按照同样的方法建立剩余 4 个道面站温度的回归方程并检验。

图 2 为 A1027 站 08 时起报的 2012—2013 年

冬半年期间所建立的 15 个 (5 个月份, 3 类方程) 回归方程的预报值与当月站点实况值对比。由图 2 可见, 逐月建立的 3 个对比回归方程预报值都能拟合出全天的温度变化趋势, 尤其是 Y3 预报的波峰、波谷更加接近实况值。随月份变化, 预报拟合趋势随实况值走势先降后升, 说明能够反映出整个冬半年气候态温度变化。个别的, 11 月 3—4 日、10 日和 1 月 11 日 3 个方程模拟的道面温度偏高, 通过历史资料查询发现当日对应的实况天空状况较差, 因此建立的方程对降水、多云天气的道面温度预报相对偏差。对比不同月份可以看出, 建立的方程对 2 和 3 月的预报效果不如其他月份。

仍以 A1027 站 08 时起报为例, 通过建立回归方程后拟合误差分析得到表 2。对于只加入前一日道面温度 T_{ex_day} 的回归模型 Y1 预报检验效果最差, 加入主要显著相关因子后的 Y2 误差相对 Y1 有所提高, 而最好的为所有相关因子参与的回归模型 Y3, 预报效果对比: $Y3 > Y2 > Y1$ 。Y3 相对 Y1 预报准确度提高了 25% 以上, 平均绝对误差 (MAE) 控制在 2.8℃ 以内, 均方根误差 (RMSE) 在 3.7℃ 以内。3 类方程的建立反映出在建模过程中, 考虑加入 BJ-RUC 预报气象因子十分必要。

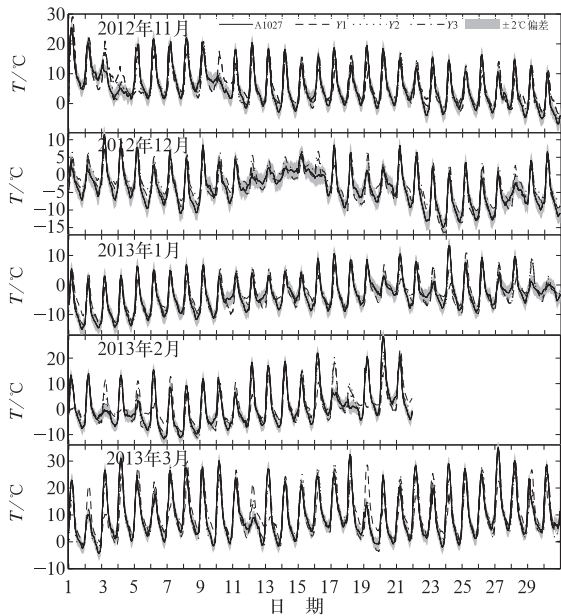


图 2 2012—2013 年冬半年 08 时起报 3 个回归模型预报值与 A1027 道面站温度对比
(2 月数据有缺测)

Fig. 2 Comparison between temperature forecasts by the three regression models and observations at A1027 station starting from 08:00 BT in the winter half year from November 2012 to March 2013
(Some data of February are not available)

表 2 2012 年 11 月至 2013 年 3 月 A1027 站 08 时不同回归模型预报方法预报结果比较

Table 2 Comparison of the forecast results by different regression models at A1027 station at 08:00 BT from 1 November 2012 to 30 March 2013

月份	08 时	方程			效果提升
		Y1	Y2	Y3	
11 月	R	0.87	0.951	0.957	
	MAE/°C	2.172	1.498	1.386	36.2%
	RMSE/°C	3.073	1.941	1.809	41.1%
12 月	R	0.759	0.927	0.932	
	MAE/°C	4.452	1.447	2.054	46.1%
	RMSE/°C	5.487	1.778	2.493	45.4%
1 月	R	0.866	0.924	0.928	
	MAE/°C	2.002	1.522	1.515	24.3%
	RMSE/°C	2.671	2.045	1.993	25.4%
2 月	R	0.769	0.911	0.926	
	MAE/°C	3.473	2.326	2.241	35.5%
	RMSE/°C	4.793	3.099	2.833	40.9%
3 月	R	0.803	0.874	0.908	
	MAE/°C	3.752	3.151	2.78	25.9%
	RMSE/°C	5.132	4.223	3.644	30.0%

3 检验结果分析

3.1 利用最优回归模型预报检验

选用 Y3 类逐步回归模型预报 2013 年 11 月 1 日至 2014 年 3 月 31 日道面温度,并与对应 5 个道面温度实况进行检验分析(图 3)。由图 3 可以看出,回归模型预报值与实况有较好的相关性。对比逐时预报与实况可知,预报模型基本能够将道面温度日变化趋势展现出来,预报的峰值与实况有偏差,这也是造成散点图中个别点严重偏离对角线的原因。相比而言,两者在夜间时段预报最低温度相差较大,从大气强迫数据的角度可知,向下长波和短波辐射是能量的主要来源,夜间长波辐射起关键作用,由表 1 中相关关系可知长波辐射对道面温度的影响不如短波辐射,因此在一定程度上说明白天预报效果好于夜间。从图 3 误差分布密度发现,误差呈正态分布。A1325 站预报效果最好,误差集中在 0℃ 的概率达到 20% 以上,其次为 A1412 站,剩余 3 个站预报效果持平。3 个起报时次预报 A1027 站的道面温度低于实况,误差分布密度峰值低于 0℃。预报误差随预报时效延长而加大,前 10 h 滚动预报误差上升趋势平缓,随后误差波动增长较快,到了 15 h 后波动较大,基本到 19 h 后各站 MAE 超过 3℃。因此,适当选取不同起报时次预报误差小的时段,滚动组合预报未来 24 h 逐时道面温度显得尤为必要。

图 4 为各站 Y3 回归模型对不同天气类型的温度预报。由图 4 可见,模型基本可以将不同天气类型的道面温度日变化趋势预报出来,其中预报晴天温度的效果最好,平均误差控制在 2℃ 以内,晴天预报温度峰值普遍比实况值偏高。模型预报多云天气效果最差,特别是 1 月 25 日白天温度峰值相比实况偏低 5℃ 以上,因为短波辐射在 Y3 类方程中的权重比例较高,而在多云天气状况下 BJ-RUC 预报的短波辐射有偏差影响了道面温度预报的准确度。模型在预报降水天气时温度峰值接近或低于实况值,这与晴天预报结果相反。A1414 站相比其他站预报偏差大,初步考虑是由站点所处地势原因导致的结果不理想。

总体检验发现,随着预报时间延长,预报的误差逐渐加大,建立的 3 个起报时次的回归模型需要按照不同时刻进行交替使用。3 个时次预报效果偏差

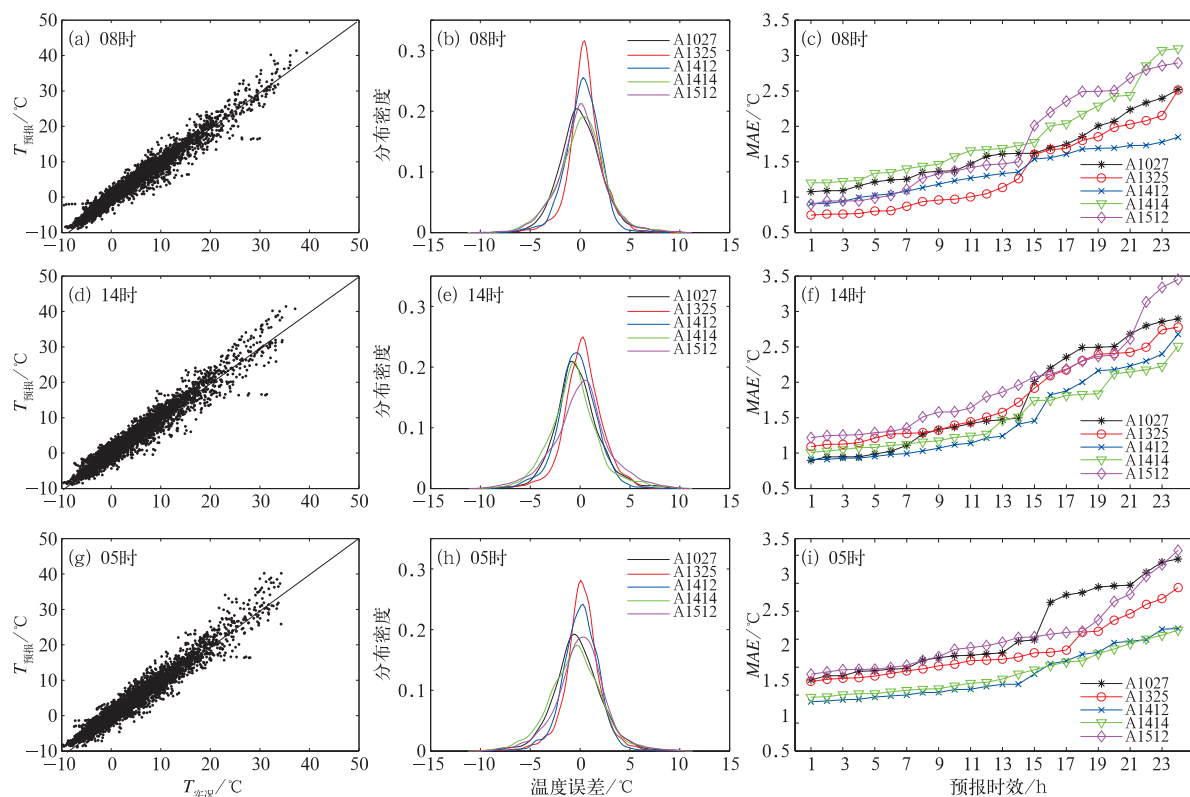


图 3 不同起报时次各道面站温度预报与实况值误差评估

(a,d,g) 实况-预报散点图, (b,e,h) 温度误差-分布密度图, (c,f,i) 平均绝对误差

Fig. 3 Error estimation between road temperatures forecasts and observations starting at 08:00 BT, 14:00 BT and 05:00 BT, respectively

(a,d,g) the observed-forecast scatter, (b,e,h) the error distribution density plot, (c,f,i) the mean absolute error

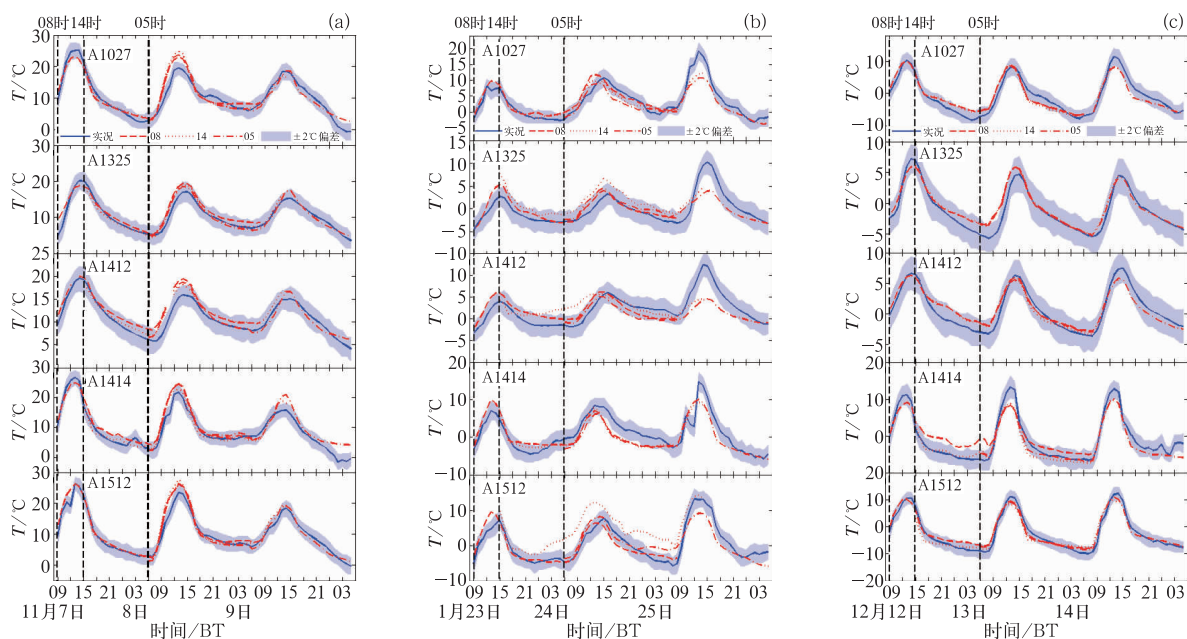


图 4 不同天气状况道面站温度预报对比

(a) 晴天: 2013 年 11 月 7—9 日, (b) 多云: 2014 年 1 月 23—25 日, (c) 降水: 2013 年 12 月 12—14 日

Fig. 4 Temporal variations of temperature forecasts under different weather conditions

(a) sunny: 7—9 November 2013; (b) cloudy: 23—25 January 2014; (c) rainy: 12—14 December 2013

不大,5 站对比中 A1325 站预报最好。考虑 BJ-RUC 预报结果推后 3 h 左右,最终选用 08 时起报 11—17 时温度,14 时起报 17 时至次日 07 时温度,05 时起报 08—10 时温度。通过 3 个时次交替使用,将误差控制在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 以内,进而可用于业务。

3.2 误差来源分析

参考前人研究(李蕊等,2011;马筛艳等,2012;张德山等,2009)可知,道面温度统计方法中分不同天气状况以气象站实况资料为主分别建模,大多数建模以 2 m 温度为主要参考因子,根据表 1 分析可知,短波辐射和长波辐射与道面温度有较大相关,而气象站并没有辐射资料。同时,上传气象站资料进行汇总也需要时间,利用 BJ-RUC 建模可以减少人工参与,并且参考的气象因子更加全面,BJ-RUC 预报的气象要素可以根据不同天气条件分别有所体现,避免按天空状况分别建模,可实用性较强。

温度在建模中所占权重比例最大,通过实况与预报温度对比可以很好判断误差来源。在图 5 中,08 和 14 时预报明显好于 05 时,05 时起报第 16 个小时相关系数降低到 0.8,随后预报温度参考意义不大。而 RMSE 随预报时效延长而增大,14 时预报温度相对较好,误差增长缓慢。根据闵晶晶(2014)对 BJ-RUC 不同起报时次 2 m 温度检验,发现随预报时效变化的平均误差在 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$,平均绝对误差在 2°C 以内,08、14 和 05 时 3 个时次预报结果整体偏高。在 3.1 节中检验不同天气状况下预报的道面温度时误差相差较大,这主要是由考虑长波辐射和短波辐射造成的,结合分析,对不同起报时次、

不同天气类型由模式造成的道面温度预报存在一定偏差。

4 结论与讨论

通过研究北京冬半年温度变化特征,并利用 BJ-RUC 预报输出气象要素加入前一日道面温度资料建立多个回归预报道面温度模型,最终选用最优回归模型预报 2013 年 11 月至 2014 年 3 月的道面温度,并进行检验,得到以下初步结论:

(1) 道面温度除与自身前一日对应时刻道面温度有较大相关性外,与 BJ-RUC 预报的短波辐射、2 m 温度相关性最为显著,其次为长波辐射、相对湿度。

(2) 建立的 3 类逐步回归模型都能拟合出全天的温度日变化趋势,而有显著气象因子参与的回归模型预报的道面温度好于仅加入自身前一日对应时刻的道面温度的回归模型。Y3 类模型考虑参与的气象因子更加全面,相对 Y1 类回归模型预报准确度提高了 25% 以上,误差减少了 1°C 以上。

(3) Y3 类回归模型能够预报出 2013 年 11 月 1 日至 2014 年 3 月 31 日道面温度日变化趋势,误差密度集中在 0°C 附近,预报早高峰好于晚高峰,白天好于夜间,晴天好于其他天气类型。考虑 BJ-RUC 预报结果推后 3 h 左右,最终选用 08 时起报预报 11—17 时温度,14 时起报预报 17 时至次日 07 时温度,05 时起报预报 08—10 时温度。通过 3 个时次交替使用,模型预报误差控制在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 以内,可应用于业务。

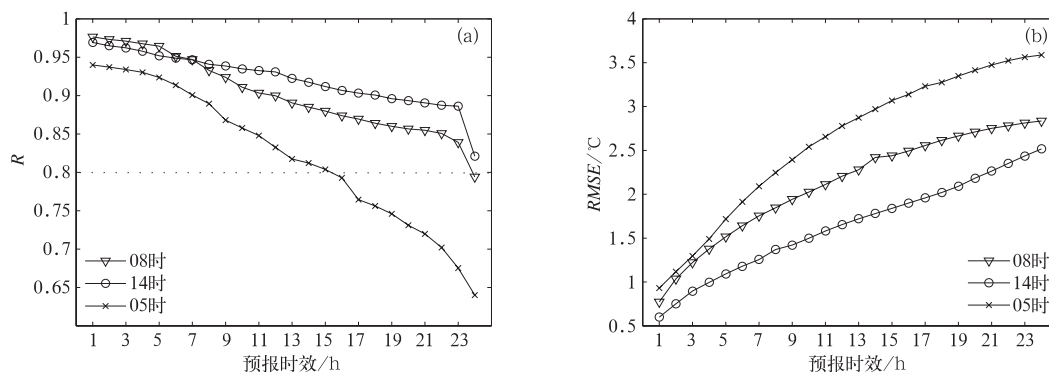


图 5 不同起报时次 5 站平均观测气温与 BJ-RUC 预报温度 R (a)和 RMSE(b)的对比

Fig. 5 Comparison between the observed temperature from the road stations and the forecast temperature from the BJ-RUC

(a) correlation coefficient, (b) root-mean-square error

本研究基于 BJ-RUC 预报建立的回归统计模型,预报准确率依赖 BJ-RUC 预报的精准率。对不同起报时次、不同天气类型由模式造成的道面温度预报存在一定偏差,目前还不能进一步确定模式误差具体准确值。BJ-RUC 每隔 3 h 预报一次,考虑工作量问题只选用 3 个时次进行研究,研究时间间隔有待于进一步缩短。由于道面站数据筛选过程中可用于研究的站点不多,因此不能全方位覆盖北京区域,只能点对点进行统计研究。

参考文献

- 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):19-29.
- 景元书,王贵军,朱承瑛,2009. 公路路面温度分析和极端天气影响[J]. 中国科技信息,(8):21-22.
- 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.
- 李迅,冯涛,丁德平,等,2015. BJ-RUC 产品在小区供暖供回水温度预报的应用研究[J]. 气象,41(2):234-239.
- 李迅,甘璐,丁德平,等,2014. G2 京津塘高速公路交通气象安全指数的预报研究[J]. 气象,40(4):466-472.
- 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.
- 刘梦娟,陈敏,2014. BJ-RUC 系统对北京夏季边界层的预报性能评估[J]. 应用气象学报,25(2):212-221.
- 罗慧,李良序,胡胜,等,2007. 公路交通事故与气象条件关系及其气象预警模型[J]. 应用气象学报,18(3):350-357.
- 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.
- 闵晶晶,2014. BJ-RUC 系统模式地面气象要素预报效果评估[J]. 应用气象学报,25(3):265-273.
- 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):19-23.
- 舒斯,成丹,韩芳蓉,2015. 沪渝高速(湖北段)公路路面温度特征及预报模型[C]//第 32 届中国气象学会年会 s14 第五届气象服务发展论坛-气象服务与信息化. 天津:中国气象学会.
- 魏东,尤凤春,杨波,等,2011. 北京快速更新循环预报系统(BJ-RUC)要素预报质量评估[J]. 气象,37(12):1489-1497.
- 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.
- Berrocal V J, Raftery A E, Gneiting T, et al, 2010. Probabilistic weather forecasting for winter road maintenance[J]. J Am Statist Assoc, 105(490):522-537.
- Hermansson A, 2000. Simulation model for calculating pavement temperatures including maximum temperature[C]//Transportation Research Board 79th Annual Meeting. Washington DC: Transportation Research Board.
- Kršmanc R, Slak A Š, Demšar J, 2013. Statistical approach for forecasting road surface temperature[J]. Meteor Appl, 20(4):439-446.
- Kršmanc R, Tarjáni V, Habrovský R, et al, 2014. Upgraded METRo model within the METRoSTAT Project[C]//17th International Road Weather Conference. Andorra; SIRWEC.
- Norrman J, Eriksson M, Lindqvist S, 2000. Relationships between road slipperiness, traffic accident risk and winter road maintenance activity[J]. Climate Res, 15(3):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.