

冯蕾,袁晓玉,赵瑞,等,2025.基于多源资料的路面温度实况模型构建[J].气象,51(1):97-109. Feng L, Yuan X Y, Zhao R, et al,2025. Construction of real-time road surface temperature model based on multi-source data[J]. Meteor Mon,51(1):97-109 (in Chinese).

基于多源资料的路面温度实况模型构建*

冯蕾^{1,2} 袁晓玉¹ 赵瑞¹ 苗蕾¹ 林明宇¹ 王然¹

1 中国气象局公共气象服务中心,北京 100081

2 中国气象局交通气象重点开发实验室,南京 210041

提 要: 选取北方三个试验区域(北京和天津、陕西和甘肃、青海),使用交通气象站观测资料、中国气象局陆面数据同化系统(CLDAS V2.0)地表温度产品、中国逐小时降水实时融合实况分析产品(CMPAS)和 FY-4A 反演地表辐射产品,研究路面温度的变化特征及其与环境气象因子之间的关系。基于线性回归、随机森林、深度神经网络方法,分季节、分时段构建路面温度实况模型,开展模型效果检验,探讨不同方法、不同数据组合的效果以及模型的空间泛化能力。结果表明:路面温度与道路环境气象因子显著相关,但表现出明显的区域、季节和时段差异;基于不同方法构建的路面温度实况模型结果差异不大,均能较好地再现夏季路面高温和冬季路面低温的逐日变化,冬季平均误差明显低于夏季。应用卫星产品可显著提升夏季路面高温实况模型效果;模型具有较好的空间适应性,与本站模型相比,路面温度误差均表现出不同程度的增加,其中北京和天津地区误差增加幅度最小。

关键词: 交通气象站,多源资料,卫星反演地表辐射,路面温度

中图分类号: P456,PU412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.100901

Construction of Real-Time Road Surface Temperature Model Based on Multi-Source Data

FENG Lei^{1,2} YUAN Xiaoyu¹ ZHAO Rui¹ MIAO Lei¹ LIN Mingyu¹ WANG Ran¹

1 CMA Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081

2 Key Laboratory of Transportation Meteorology of CMA, Nanjing 210041

Abstract: In order to solve the problem of meteorological service for transportation operation in areas with a few observation stations, three typical regions in northern China (Beijing-Tianjin, Shaanxi-Gansu and Qinghai) are selected. The data used include the transportation weather observation data, the surface data from China Meteorological Administration Land Data Assimilation System (CLDAS V2.0) and Multi-source Precipitation Analysis System (CMPAS), as well as surface short wave and long wave radiation retrieval products from FY-4A. The change characteristics of road surface temperature and its relationship with environmental meteorological factors are analyzed. Three methods (linear regression, random forest and deep neural network) are employed to construct a 1 h updated real-time road surface temperature model, and the effects of model results from different methods and different data combinations are tested. Besides, the spatial generalization ability of the model is also explored. The results show that the road surface temperature is significantly correlated to the environmental meteorological factors, but show different features in different regions, seasons and time periods. The independent test shows that there is no much difference

* 云南省气象局“揭榜挂帅”项目(YNJBGS202306)资助

2024年6月12日收稿; 2024年12月4日收修定稿

第一作者:冯蕾,主要从事交通气象监测预报服务技术研究. E-mail:fenglei21cn@163.com

among the model results based on different methods. All the model results can well reproduce the daily changes of road surface high temperature in summer and road surface low temperature in winter. The mean error in winter is significantly lower than that in summer. The application of satellite radiation products has a significant improvement effect on the road surface high temperature observation model results in summer. The model has good spatial adaptability. However, compared with the model constructed according to local observations, the error of the model using data from nearby traffic stations in the same climate region shows an increasing trend at different degrees, of which the error increasing in Beijing-Tianjin region is the smallest.

Key words: transportation weather station, multi-source data, surface radiation retrieved product from satellite, road surface temperature

引 言

在影响公路交通安全运行的不利天气条件中,路面极端温度是不容忽视的重要因素之一。冬季路面低温是造成道路冰雪的必要条件(黄佳威等,2024);夏季路面高温易造成爆胎等事故。目前我国路面要素观测站点非常稀少,远远满足不了交通气象服务需求。因此,研究站点稀少地区路面温度特征、影响因子及模型构建具有重要意义。

关于路面温度实况的获取,除了站点观测,使用较多的是热谱地图技术(Sugrue et al,1983;Shao and Lister,1995;Shao et al,1996)。热谱地图技术通常用于道路危险路段的识别、交通气象站点选址以及站点监测预报向路网的拓展等(汤筠筠等,2008;彭莲等,2012;罗潇等,2023)。热谱地图技术采集成本较高,需要针对不同天气进行多次测量才能获得相对精确可靠的道路热谱指纹,且采集时很难保证车辆完全保持匀速行驶,因此使用热谱地图技术开展大范围公路网路面温度实时监测也存在困难。

通过建立路面温度与环境气象条件的统计关系进行路面温度的定量估计也是较为常用的路面温度获取方法(秦健和孙立军,2005)。统计模型简单易行,在实际业务中可推广。使用较多的是线性回归方法(田华等,2009;董颜等,2017;2020)。近些年支持向量机、随机森林等机器学习方法越来越多应用于路面温度实况模型构建(董天翔等,2018;王可心等,2021;Wang et al,2022;熊国玉等,2024),但多数为单一方法的分析,且局限于某一特定地区和特定季节,缺乏不同地区、不同季节的综合对比分析。

卫星反演、多源资料融合分析等格点实况技术的进步,为路面温度的准确推算提供了更为丰富的

数据来源。与站点观测数据相比,格点实况分析产品具有覆盖范围广、时空精度高的特点,尽管格点产品的空间精度还不能达到道路的空间尺度,但使用这些新产品、新资料构建模型来推算路面温度,是稳定获取无观测路段路面温度实况的一种简单易行的方法。针对我国不同气候区域,使用交通气象站路面温度及其他气象观测数据、卫星反演地表辐射产品,以及格点实况地表温度、降水量产品,在研究路面温度变化规律及与各因子之间关系的基础上,分别使用线性回归方法和非线性方法构建模型,对比分析不同方法在不同地区、不同季节和时段的效果,为开展交通路网路面气象要素监测预报服务提供参考。

1 使用资料

1.1 交通气象站气象观测数据

综合考虑气候特征、海拔高度、地形等因素,选取北方[北京和天津(京津)、陕西和甘肃(陕甘)、青海]易发生低温雨雪冰冻且有路面温度观测的交通气象站点,开展路面温度特征研究及建模对比分析。表1给出六个交通气象站点的具体信息。其中,651349站(1号站)位于北京房山六环线京昆进京大宛桥处,653663站(2号站)位于天津京沪高速路边,860002站(3号站)位于陕西咸阳机场高速西安渭河特大桥桥头,877022站(4号站)位于甘肃境内青兰高速静宁隧道口处,以上四个站点均使用埋入式路面温度观测设备。883081站(5号站)和886039站(6号站)位于青海境内,观测点位于公路旁边草坪,周边为草原,为了更加还原高速路环境,在地面浇筑了沥青,采用遥感式路面温度观测设备探测沥青路面温度。

表 1 交通气象站地理信息

气象站	位置	道路	海拔/m
1 号	北京房山	六环线(G4501)	61
2 号	天津武清	京沪(G2)	6
3 号	陕西西安	机场高速	41
4 号	甘肃平凉	青兰(G22)	1675
5 号	青海海南	京藏(G6)	3067
6 号	青海果洛	G227	3492

使用的交通气象站气象观测资料包括路面温度、气温、风速、相对湿度,时间为 2018—2020 年,观测频次为 1 h。使用前对资料进行了极限值控制和时间均一性检验,个别缺测时刻采用线性内插方法对数据进行插补。

1.2 格点实况产品

本文使用的格点实况产品包括中国气象局陆面数据同化系统(CLDAS V2.0)地表温度产品、中国

逐小时降水实时融合实况分析产品(CMPAS),以及 FY-4A 反演地表辐射产品,具体信息见表 2,以上数据均通过“天擎”气象大数据云平台获取。

2 研究方案

本文研究方案如下:根据交通气象站所在经纬度,通过双线性插值法,将格点地表温度、降水量以卫星反演地表辐射通量产品插值到站点位置,实现

表 2 格点实况分析产品信息表

产品名称	分辨率	单位	产品简介	数据获取地址
CLDAS V2.0 地表温度产品	0.0625°	℃	CLM3.5、CoLM、Noah-MP 等陆面模式地表温度模拟结果集成(王丹等,2023)	http://idata.cma/idata/web/data/index?dataCode=NAFP_CLDAS2.0_NC_GST
CMPAS 格点降水量分析产品	5 km	mm · h ⁻¹	利用地面降水观测资料、雷达定量估测降水数据和卫星反演降水数据,采用偏差订正、融合分析等关键技术研制(潘昶等,2018;2022)	http://idata.cma/idata/web/data/index?dataCode=NAFP_NMIC_ART_CMPAS_0P05_CHN_MUL_PRE_RT
FY-4A 反演地表辐射产品	4 km	W · m ⁻²	地表入射太阳短波辐射(SSD)	采用离散纵标法辐射传输软件包平面平行算法反演(徐丽娜等,2021;梁进秋等,2020)
			地表上行长波辐射(ULR)	通过红外辐射传输模拟,建立通道亮温与低层大气有效辐射温度的回归关系、大气柱总可降水量与低层大气比辐射率的回归关系,依据黑体辐射定律建立估算反演模式(吴晓,2014)
			地表下行长波辐射(DLR)	通过全球大气廓线的 ULR、多通道辐射亮度模拟,借助多元线性回归软件建立(吴晓等,2018;闵敏和吴晓,2020)

不同类型数据的空间匹配,构建 2018—2021 年逐小时路面温度与气温、相对湿度、风速、降水量、地表温度、地表入射太阳短波辐射、地表上行长波辐射和地表下行长波辐射历史数据集。通过气候异常值剔除等措施,对数据进行清洗。

针对表 1 中交通气象站,使用 2018—2020 年逐小时数据开展路面温度与环境气象因子的相关性分析,研究路面温度与环境气象因子之间的关系规律,在此基础上,分别采用线性回归法、随机森林法(王

可心等,2021;Wang et al,2022;南刚强等,2021)、深度神经网络法(陈鹤等,2022;黄骄文等,2021;南刚强等,2021;蒋薇等,2021)构建路面实况温度模型。使用 2021 年逐小时数据开展独立性检验,对比分析不同方法在不同地区、不同季节、不同时段的效果。此外,使用交叉检验研究模型在同一气候区域的空间泛化能力。

交通气象站观测数据以及 CLDAS V2.0、CMPAS 近实时实况产品较为连续,可用于模型的稳定输入。

受云遮挡的影响,卫星反演长波辐射数据存在较多缺失。另外,太阳短波辐射仅在白天有值。为考察卫星反演地表辐射产品对路面温度实况模型准确度提升的贡献,便于在实际业务服务中选取因子,本文将对比分析使用卫星资料前后的效果。

3 路面温度变化特征及影响因子分析

表 3 给出了六个交通气象站路面温度特征值统

计情况。青海地区冬季和夏季路面温度平均值总体较低,且冬季白天和夜间路面温度平均值均低于 0°C ,这跟当地海拔高度较高有关。无论冬季和夏季,青海地区 6 号站路面温度极大值相对其他交通气象站偏高。路面温度极小值也出现在青海地区。6 号站夏季夜间路面温度甚至低于 0°C 。从路面温度标准差的对比来看,青海地区路面温度标准差总体上高于其他地区,尤其是白天差异更加明显,但冬季夜间与其他地区差异不大。

表 3 各交通气象站路面温度特征值统计(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Table 3 Statistics of the road surface temperature at each transportation weather station (unit: $^{\circ}\text{C}$)								
统计值	季节	时间	1 号站	2 号站	3 号站	4 号站	5 号站	6 号站
平均值	冬季	白天	-0.85	3.16	5.18	3.16	-1.33	-1.99
		夜间	-4.18	-3.59	2.73	-2.49	-10.16	-7.92
	夏季	白天	36.75	38.52	33.23	27.86	28.36	25.60
		夜间	27.22	26.42	27.06	20.07	14.45	12.86
极大值	冬季		19.20	26.60	22.30	29.40	25.30	30.00
极小值			-13.90	-15.80	-5.50	-11.70	-22.20	-19.00
极大值	夏季		57.60	61.70	54.60	55.00	59.50	62.40
极小值			17.90	15.90	17.90	12.20	1.30	-2.10
标准差	冬季	白天	6.36	6.91	3.91	7.26	9.56	8.96
		夜间	4.58	3.96	3.04	3.42	4.09	3.84
	夏季	白天	9.23	9.46	7.24	9.03	13.00	13.43
		夜间	4.22	4.03	3.66	3.40	5.71	5.33

路面温度的变化取决于太阳辐射、云层状况、大气温度、相对湿度、风速、降水量等环境因素,以及路面反照率、比热等路面特性因素。在路面特性相对稳定的情况,了解掌握路面温度与相关气象要素之间的关系规律与细节特征,有助于开展精细化的模型构建。

图 1 给出了 2018—2020 年冬季和夏季一日不同时段路面温度与气温的相关系数分布。路面温度

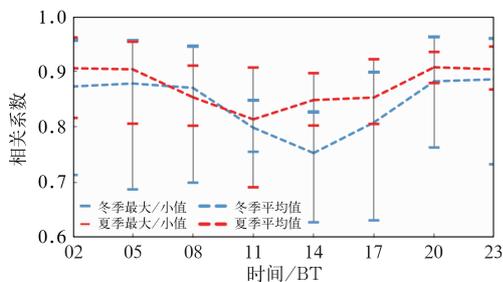


图 1 2018—2020 年交通气象站路面温度与气温之间的相关关系

Fig. 1 The correlation between the road surface temperature and the air temperature at transportation weather stations during 2018—2020

与气温的相关系数整体都在 0.60 以上,最高达到 0.96,均通过显著性水平为 0.001 的 t 检验。大多数情况下路面温度与气温之间的相关系数呈现夜间时段高、白天时段降低的特点。夏季和冬季平均相关系数最低值分别出现在 11 时(北京时,下同)和 14 时。除 08 时左右外,夏季平均相关系数高于冬季。从同一时刻相关系数最大值和最小值的分布来看,不同地区交通气象站路面温度与气温之间的关系存在较大的差异。总体上冬季各站点之间的差异大于夏季。

公路路面加热的主要能量来源是太阳短波辐射。白天路面受太阳加热影响迅速增温,而近地层大气温度升高主要受地表长波辐射的影响,变化速率较地表温度小,因此白天尤其是中午时段两者之间的相关关系减弱。此外,气温和地表温度之间的关系还受多种环境因素的影响,包括大气湿度、气压、风速、地表湿度、地表性质等,其中影响最大的是湿度因子(韩秀珍等,2012)。由于大气湿度具有明显的日变化和季节变化,白天时段显著降低,冬季低于夏季,对路面温度与气温之间关系的日变化和季节变化也有一定的影响。

路面温度与相对湿度的相关系数也呈现明显的季节和时段差异(图 2)。夏季两者之间的相关关系呈现较高的负相关,除个别台站凌晨时段外,相关系数均超过了 0.001 显著性水平的 t 检验,午后至下午时段(14—17 时)负相关系数绝对值达到最大值。冬季凌晨至早上时段路面温度与相对湿度之间的相关系数为正相关,之后转为负相关,中午时段(14 时左右)负相关最强,夜间转为正相关。从同一时刻相关系数最大值最小值分布来看,各站点之间的差异也较大,特别是夏季夜间和凌晨时段以及冬季白天时段。白天水汽含量增加可能像云层一样削弱太阳辐射,不利于地表温度升高,然而在夜间能通过增加大气逆辐射来提高地表温度(刘霞等,2011)。从图 2 来看,对于交通气象站而言,高相对湿度对于路面温度总体上是降温作用,仅在少数台站凌晨至早上时段为增温作用,且冬季凌晨时段增温较为明显。

路面温度与风速之间的相关系数相对较小,两者之间的关系稳定性较差,无明显规律可循(图略)。以往关于路面温度与风速的关系研究也反映出明显的地区差异特点(曲晓黎等,2010;董天翔等,2018;田华等,2009;董颜等,2020),这主要与当地气流来源的冷热属性和干湿属性有关。

冬季路面温度与小时降水量的关系为白天负相关,夜间正相关;而夏季路面温度与小时降水量均表现出负相关,且白天时段负相关增强(图略)。这是由于冬季白天时段以及夏季温度较高,较多的降水导致地面蒸发量增加,空气中水汽含量增加,地表温度降低。而冬季夜间时段温度较低,蒸发量小,同时地表雨雪覆盖物的存在也可能阻止地表热量的散失,导致地表温度升高。

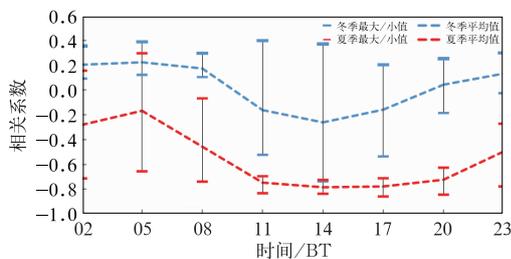


图 2 2018—2020 年交通气象站路面温度与相对湿度之间的相关关系

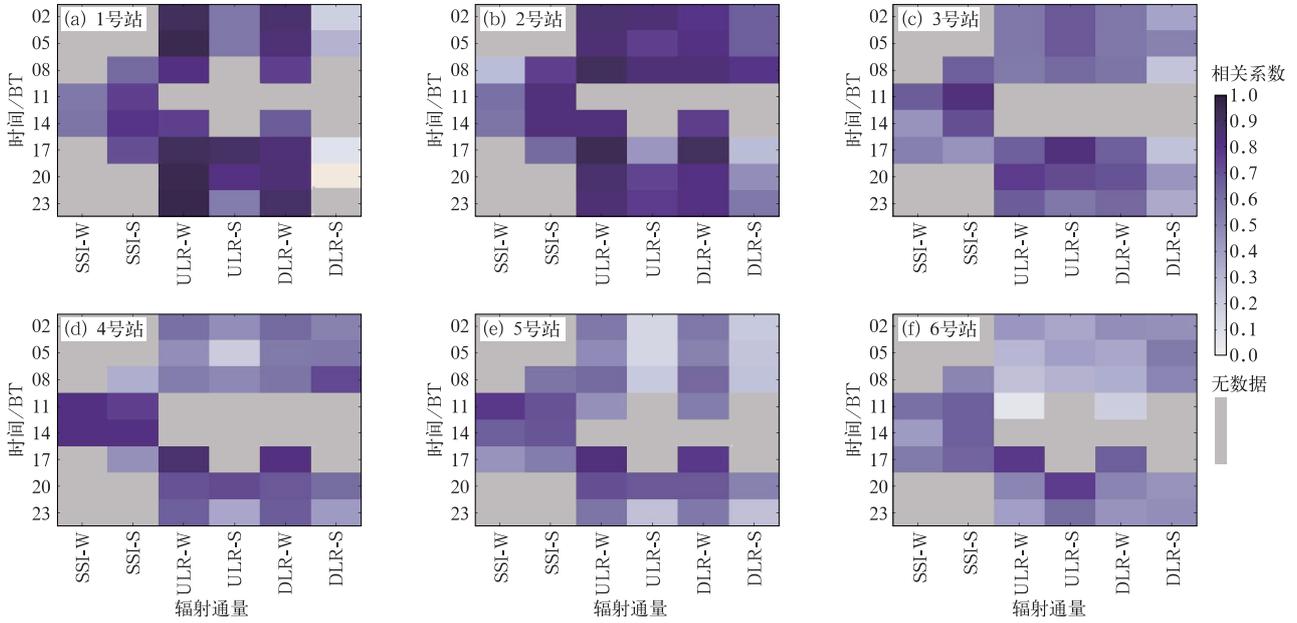
Fig. 2 The correlation between the road surface temperature and the relative humidity at transportation weather stations during 2018—2020

尽管 CLDAS V2.0 分析地表温度与公路沿线监测的路面温度存在面和点差异,但变化规律具有一定的相似性。不同地区公路路面温度与 CLDAS V2.0 地表温度之间均呈现出显著的正相关,通过了显著性水平为 0.001 的 t 检验(图略)。夏季平均相关系数高于冬季,均为 0.80 以上,但相关系数日变化均不明显。

关于公路路面温度与卫星反演地表辐射通量之间的关系,不同地区、不同季节、不同时段均表现出正相关(图 3),大多数通过了显著性水平为 0.001 的 t 检验。京津地区路面温度与地面长波辐射通量的相关关系好于其他两个地区,青海地区最低。受云遮挡的影响,地面长波辐射数据量在中午时段较少。多数情况下,冬季路面温度与地面长波辐射通量的相关系数高于夏季。夏季地面短波辐射时长比冬季有所增加。多数情况下夏季路面温度与地面短波辐射通量之间的相关关系高于冬季,中午时段高于其他时段。

以上六个交通气象站的相关分析表明,路面温度与温度变量(气温、地表温度)和湿度变量之间的相关性在时间、空间上一致性较高,表现出较为稳定的特征。图 4 进一步给出不同地区交通气象站路面低温($\leq 0^{\circ}\text{C}$)和高温($\geq 55^{\circ}\text{C}$)情况下温度及湿度分布箱线图(方法见卞光辉等,2010)。在路面低温情况下(图 4a),不同地区气温中位数均为 0°C 以下,青海地区最低,约为 -8°C 左右,京津和陕甘地区气温中位数在 $-6\sim-4^{\circ}\text{C}$ 。各地区气温第 25%~75% 分位数范围也均处于 0°C 以下,但气温最高值均高于 0°C ,最高达 6°C 左右。除了 3 号站外,地表温度的分布与气温较为相似,中位数及第 25%~75% 分位数范围也位于 0°C 以下,青海地区最低。与气温相比,路面低温情况下,对应地表温度的范围较小,温度最高值也均位于 0°C 以下,意味着地表温度对路面低温具有更好的指示意义。从相对湿度的分布来看,路面温度低于 0°C 时,除 4 号站相对湿度中位数接近 80% 外,其他各交通气象站大气相对湿度中位数一般在 40%~60%。

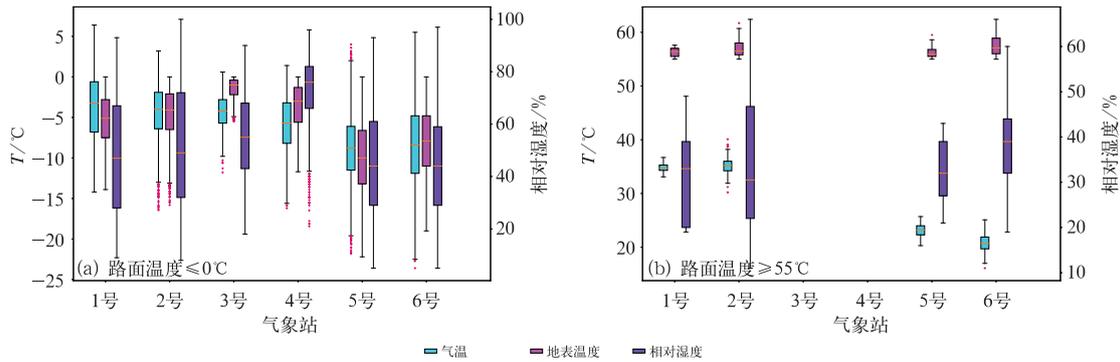
对于路面高温(图 4b),3 号站和 4 号站无高于 55°C 的观测样本,1 号站、2 号站、5 号站和 6 号站的路面高温样本数分别为 23、102、41 和 89 个。在路面高温情况下,气温及地表温度的变化范围较小,且两者的区分度更加明显。京津和青海地区表现出明显的区域差异。京津地区气温一般达到 35°C 左右时,路面温度可以达到 55°C ,而青海地区气温较低



注: SSI-W: 冬季地面太阳短波辐射, SSI-S: 夏季地面太阳短波辐射, ULR-W: 冬季地表上行长波辐射, ULR-S: 夏季地表上行长波辐射, DLR-W: 冬季地表下行长波辐射, DLR-S: 夏季地表下行长波辐射。

图 3 2018—2020 年各交通气象站路面温度与辐射通量相关关系

Fig. 3 The correlation between the road surface temperature and the surface radiation flux at transportation weather stations during 2018—2020



注: 箱线图中触须的上、下两端分别为样本中的最大值和最小值, 箱体上、下分别为样本的第 75% 和第 25% 分位数, 中间为中位数。

图 4 2018—2020 年各交通气象站 (a) 路面低温 ($\leq 0^{\circ}\text{C}$) 和 (b) 路面高温 ($\geq 55^{\circ}\text{C}$) 时气温、地表温度、相对湿度箱线图

Fig. 4 Box plots of the air temperature, surface temperature, and relative humidity for (a) low ($\leq 0^{\circ}\text{C}$) and (b) high ($\geq 55^{\circ}\text{C}$) road temperatures at transportation weather stations during 2018—2020

($20\sim 25^{\circ}\text{C}$) 时, 公路表面也能达到 55°C 以上的高温, 反映出路气耦合特征的地区差异。在路面高温情况下, 地表温度中位数和第 75% 分位数均为 $55\sim 60^{\circ}\text{C}$, 地区差异不明显。从相对湿度的分布来看, 路面高温情况下湿度值较低温情况偏低, 中位数一般在 40% 以下, 相对湿度第 25%~75% 分位数范围为 $20\%\sim 50\%$ 。

4 路面温度建模与效果分析

根据以上分析, 路面温度与道路环境气象因素之间存在较好的相关关系, 但在不同地区、不同季节、不同时段表现出不一样的特征, 表明受地理因素及局地环境条件的影响, 路面温度存在着多样化的

变化特征与影响机制,应分地区、季节、时段开展路面温度的精细化建模,以提高路面温度分析的精准度。以下使用线性回归、随机森林、深度神经网络三种方法,针对六个交通气象观测站点分别进行建模分析。

4.1 模型参数选取与调优

首先基于 2018—2020 年逐小时资料,开展路面模型构建与调优,获取最优模型参数。对于线性回归模型,基于给定的数据建立线性回归方程。对于随机森林方法,决策树数目及决策树最大深度对随机森林结果影响较大,因此,在指定检验指标的前提下,通过调整决策树数目及决策树最大深度实现模型的最优化。一般情况下,较大的决策树数目及较深的决策树深度计算结果较好,但计算量会变大。因此,需要在决策树范围、深度和计算量这些因素上取平衡。分别选取决策树数目为 5、10、15、20,决策树最大深度为 1~20,选定均方根误差(RMSE)为指标开展模型调优。图 5 以三个交通气象站(1 号站、3 号站、6 号站)冬季和夏季的 02 时为例,给出了决策树数目和决策树最大深度对模型结果的影响。

多次测试结果显示,当决策树数目从 5 增加到 20,模拟路面温度和真实路面温度的 RMSE 逐渐减小;当决策树最大深度增加到 5 以后,模拟路面温度和真实路面温度的 RMSE 没有明显变化。因此,当决策树数目超过 20,决策树深度超过 5 时,所选技术参数均是合理的。综合考虑模型精度和计算量,在最终的随机森林模型构建中,设定决策树数目参数范围:[30,50,70,90,100],决策树最大深度参数范围:[10,50,70,80],选定 RMSE 为检验指标,通过程序自动寻找最优参数,并用于 2021 年逐小时路面温度的模拟与效果检验。

训练集和测试集的大小对训练结果也有一定的影响。本文分别计算了训练集和测试集合比例为 3:1、4:1 以及 5:1 情形下,决策树数目分别为 5 和 10,最大决策树深度为 10 情形下,不同站点不同季节和时刻的路面温度 RMSE 计算结果。对于绝大多数情形,在给定训练和测试数据的比例为 4:1 时,得到的结果最优(图略)。因此,后续的随机森林训练与测试数据的比例均按 4:1 给出。

对于深度神经网络模型,网络结构选择十分重要,即网络深度、每层网络的宽度(神经元个数)以及

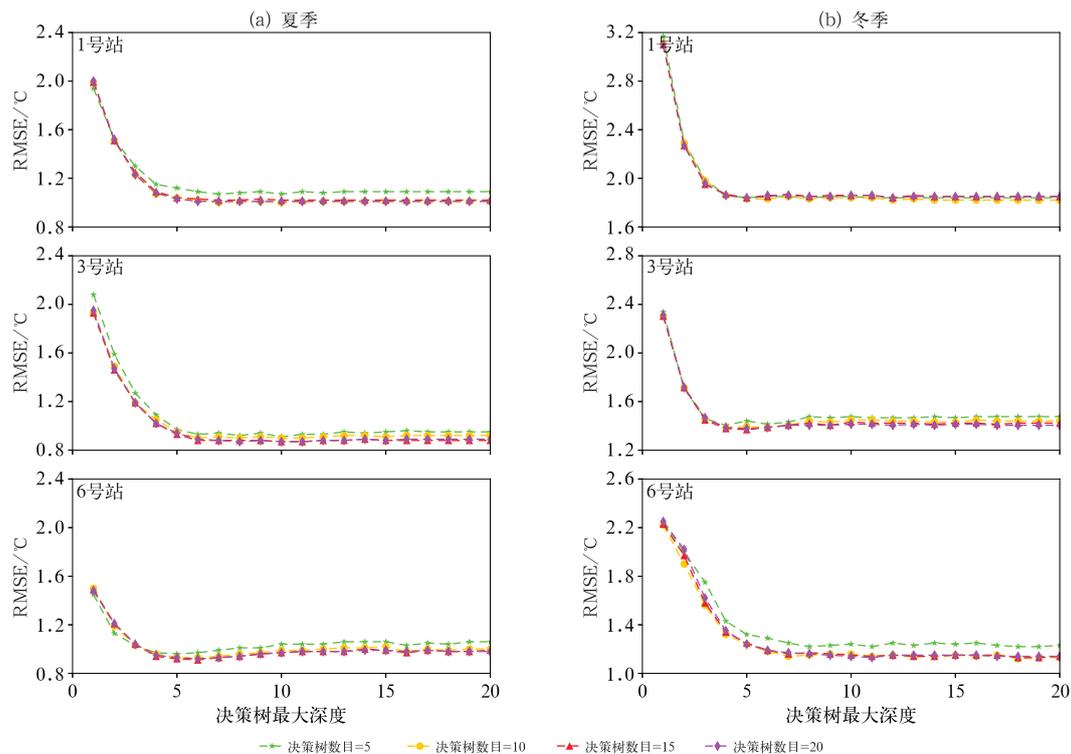


图 5 2018—2020 年(a)夏季和(b)冬季 02 时各交通气象站基于随机森林方法的路面温度实况模型中不同参数的影响
Fig. 5 The influence of parameters on the performance of random forest method for real-time road surface temperature model at transportation weather stations at 02:00 BT in (a) summer and (b) winter during 2018—2020

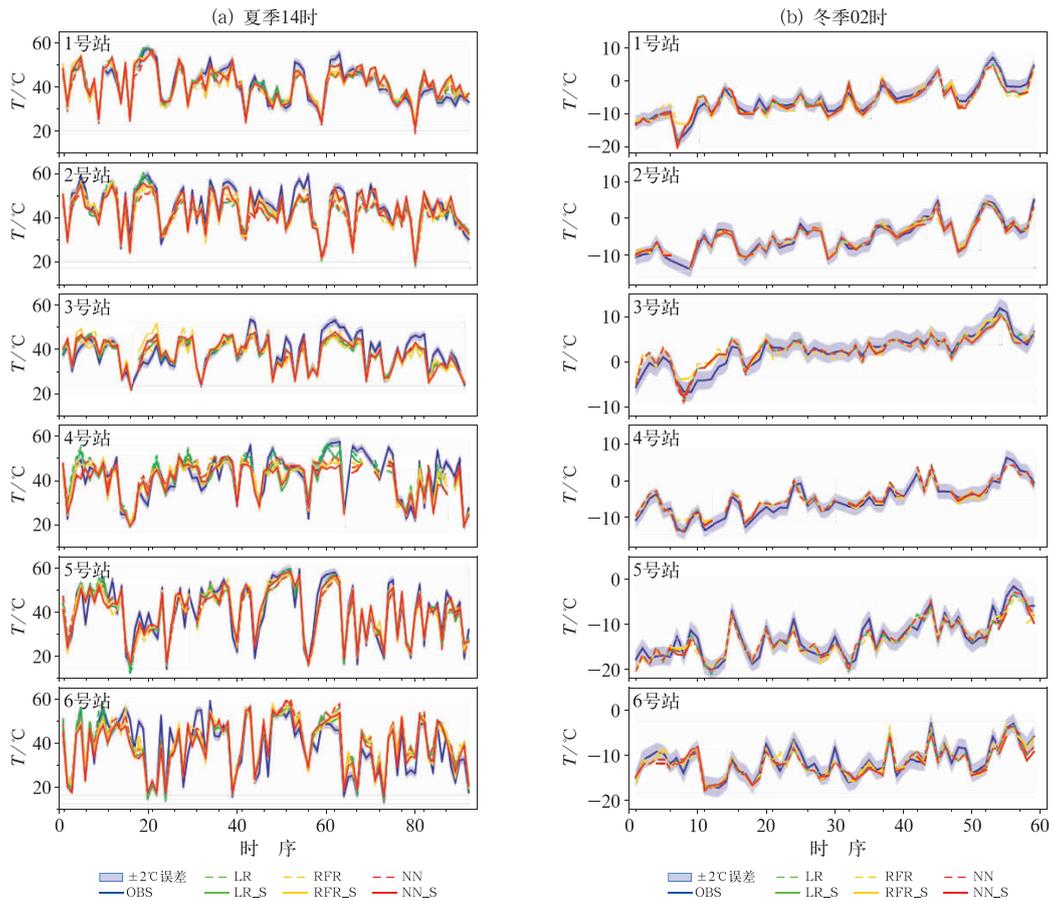
激活函数的选择对神经网络影响较大。选择较深和较大宽度的神经网络拟合效果会更好,但带来更多需要优化的网络参数,增加神经网络结果优化的难度。因此,在调试神经网络时候,通常是在确定网络结构后,再进行其他参数的调优。本文通过数据试算发现网络结构增加为 6×100 个网络后,模型效果变化不太明显,因此选择隐藏层为 6 层,每层 100 个神经元,激活函数为 \tanh 。对于学习率参数的选择,较大的学习率意味着较大的优化速度,但随着迭代优化次数的增加,损失函数减少,导致网络收敛效果变差。较小的学习率会导致收敛速度过慢,计算量偏大。通过试算发现变化学习率比确定学习率能够更加稳定地达到模型最优效果,因此,本文采

用变学习率策略,即初始时刻选取较大的学习率,随着迭代次数的增加逐步减少学习率,既保证了收敛速度也保证了精度。

4.2 建模效果分析

基于 4.1 节训练的模型及参数,使用 2021 年逐小时观测资料开展路面温度实况模型效果检验。对于每一个整点时刻,如果有有效卫星资料,则使用融合卫星资料的模型。为了掌握使用不同方法的模型性能以及使用卫星资料的效果,以下对比了不同方法,以及使用卫星资料前后的路面温度结果。

公路交通气象服务中重点关注路面高低温的影响,图 6 给出 2021 年冬季(1—2 月)逐日 02 时和夏



注:OBS:实测值;LR/LR_S:基于线性回归方法不使用/使用卫星资料构建的路面温度实况模型,RFR/RFR_S:基于随机森林方法不使用/使用卫星资料构建的路面温度实况模型,NN/NN_S:基于深度神经网络方法不使用/使用卫星资料构建的路面温度实况模型。

图 6 基于本站 2018—2020 年观测资料使用不同方法建模得到的 2021 年(a)夏季逐日 14 时和 (b)冬季逐日 02 时路面温度模拟值与实测值

Fig. 6 The variations of observed and simulated road surface temperature values at (a) 14:00 BT in summer and (b) 02:00 BT in winter of 2021 by using different models based on the observation data from local transportation weather station during 2018—2020

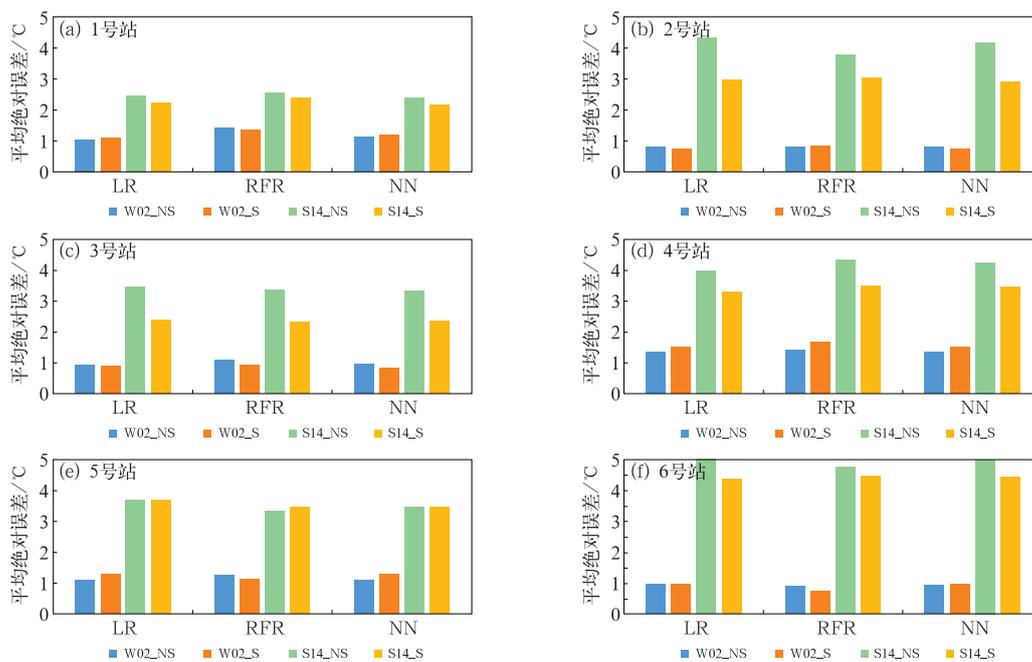
季(6—8月)逐日 14 时使用不同方法建模得到的路面温度模拟值与实测值的变化曲线。由图可见,各方法均可以较好地模拟出夏季逐日路面高温(14 时)以及冬季逐日路面低温(02 时)的变化趋势。冬季的模拟效果明显优于夏季,误差基本在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 内。总体上,各方法得到的结果差异不太大,个别时段随机森林方法表现出比线性回归和深度神经网络方法更大的误差。从夏季模拟值与实测值的对比来看,部分时段各方法均表现出高温低估、低温高估的特点。多个高温时刻,线性回归表现出比随机森林、深度神经网络更明显的优势。多数情况下,加入卫星反演地表辐射产品后,夏季路面温度实况分析结果更接近观测值;而冬季使用卫星反演地表辐射产品前后的路面温度实况分析效果差异不大。

图 7 给出不同方法计算得到的 2021 年冬季 02 时和夏季 14 时平均路面温度误差结果。该图进一步显示,三种方法总体上差异不大。冬季夜间路面温度实况模型误差一般在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 左右,其中 2 号站、

3 号站以及 6 号站冬季 02 时平均路面温度误差低于 1°C 。对于 2 号站,线性回归和深度神经网络方法效果最优,误差为 0.79°C 左右,使用卫星资料后的模型误差略有降低,为 0.74°C 左右。对于 3 号站,线性回归和深度神经网络方法效果也为最优,误差为 0.95°C 左右,基于深度神经网络方法的路面温度实况模型中加入卫星资料后误差降低较线性回归方法更明显。对于 6 号站,随机森林方法效果最优,为 0.92°C ,使用卫星资料后误差降低至 0.76°C 。夏季 14 时路面温度实况模型误差比冬季明显偏大,平原地区站点一般在 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$,海拔较高站点误差为 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ 。总体上,夏季多数情况下使用卫星资料后路面温度实况模型误差降低,降低的幅度比冬季明显。

4.3 模型空间泛化能力分析

在实际应用中,需要将具有观测站点的路面温度实况模型拓展至无交通路面观测路段。为分析模型



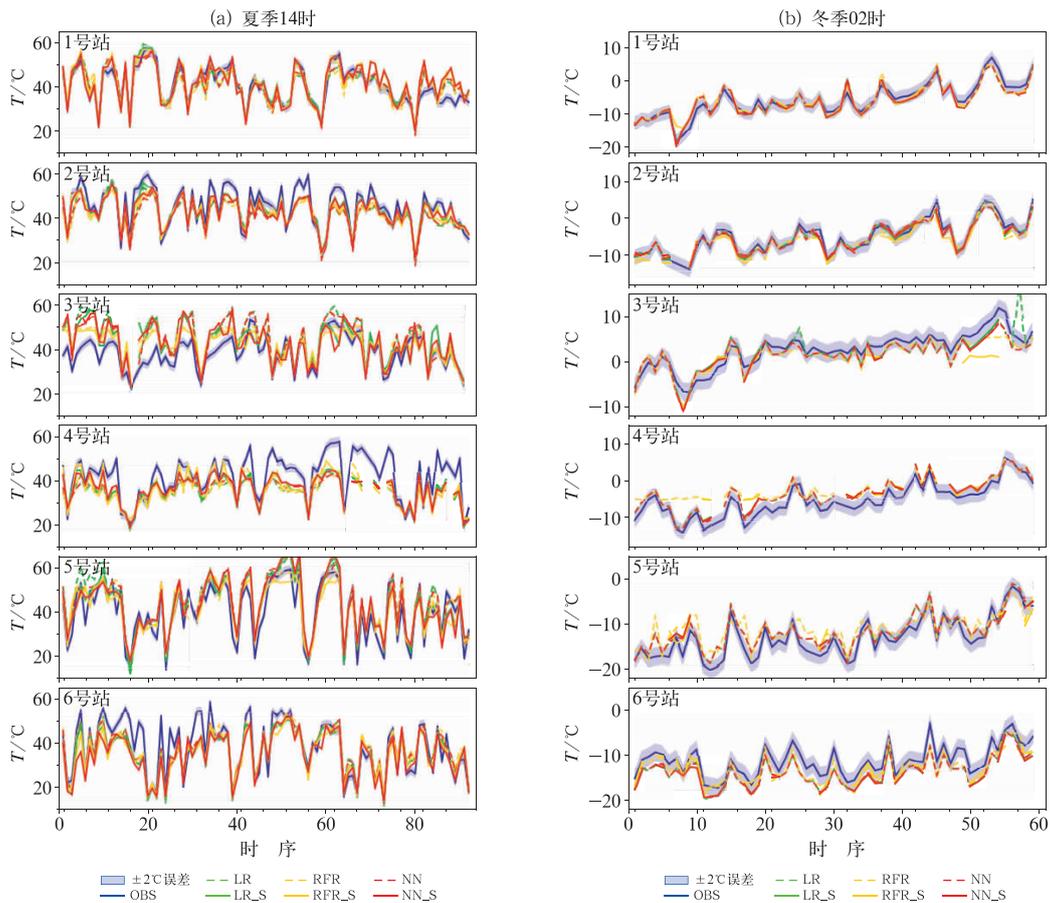
注:LR:线性回归方法,RFR:随机森林方法,NN:深度神经网络方法;W02_NS/W02_S:冬季 02 时不使用/使用卫星资料的模型,S14_NS/S14_S:夏季 14 时不使用/使用卫星资料的模型。

图 7 基于本站 2018—2020 年观测资料使用不同方法建模拟合的 2021 年夏季 14 时和冬季 02 时路面温度平均绝对误差

Fig. 7 The average absolute errors of road surface temperature at 14:00 BT in summer and 02:00 BT in winter of 2021 simulated by using different real-time road surface temperature models on the data from local transportation weather station during 2018—2020

在空间上的泛化能力,开展同一气候区域不同交通气象站点间的交叉验证分析,如对于京津地区,将 2 号站 2018—2020 年逐小时数据构建的路面模型应用至 1 号站,开展 1 号站 2021 年逐小时路面温度实况分析效果测试;将 1 号站 2018—2020 年逐小时数据构建的路面模型应用至 2 号站,开展 2 号站 2021 年逐小时路面温度实况分析效果测试。从图 8 可以看出,对于冬季,京津地区两个交通气象站(两站距离为 100 km 左右)使用邻近站模型计算的路面温度值与实际观测值也较为接近,与使用本站模型得到的结果总体差异不大,路面温度误差基本都在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内。其他四个站点使用相同气候区域邻

近交通气象站模型计算的路面温度与实际观测值的相关性仍较好,但路面温度与京津地区相比误差较大,存在一定的系统性偏差,如 3 号站和 6 号站总体上表现出系统性偏低,4 号站和 5 号站总体上表现出系统性偏高,可能是由于陕甘地区以及青海地区海拔高度较高,地形更为复杂,路面温度变化特征局地性较强,路面模型地区适用性相对较差。另外,可能跟同一气候区域内两个交通气象站相距较远(两站距离分别为 301 km 和 191 km 左右)有关。从 3 号站、4 号站、5 号站各模型性能对比来看,基于线性回归和深度神经网络方法的模型结果较为相似,与随机森林方法相比更接近实际观测值;随机森林



注:OBS:实测值;LR/LR_S:基于线性回归方法不使用/使用卫星资料构建的路面温度实况模型,RFR/RFR_S:基于随机森林方法不使用/使用卫星资料构建的路面温度实况模型,NN/NN_S:基于深度神经网络方法不使用/使用卫星资料构建的路面温度实况模型。

图 8 基于邻近站 2018—2020 年观测资料使用不同方法建模得到的各交通气象站 2021 年 (a)夏季逐日 14 时和(b)冬季逐日 02 时路面温度模拟值与实测值

Fig. 8 The variations of observed and simulated road surface temperature values at (a) 14:00 BT in summer and (b) 02:00 BT in winter of 2021 by using different models based on the observation data from nearby transportation weather station during 2018—2020

方法在某些时段表现出较大的偏差,但 6 号站的结果显示随机森林方法更优。以上六个交通气象站的结果均显示,使用卫星反演地表辐射产品后对冬季路面温度实况分析的效果无明显改善。

对于夏季,使用同一气候区域相邻站模型计算得到的路面温度与实际观测值之间的相关系数仍较高,通过了显著性水平为 0.001 的 t 检验。但与本站模型相比,2 号、3 号、4 号和 6 号站部分高温时段路面温度误差较大。不同方法之间的差异不明显,在不同站点,不同时段的效果不稳定。使用卫星反演地表辐射产品推算的夏季日最高路面温度在多数情况下是正效果。

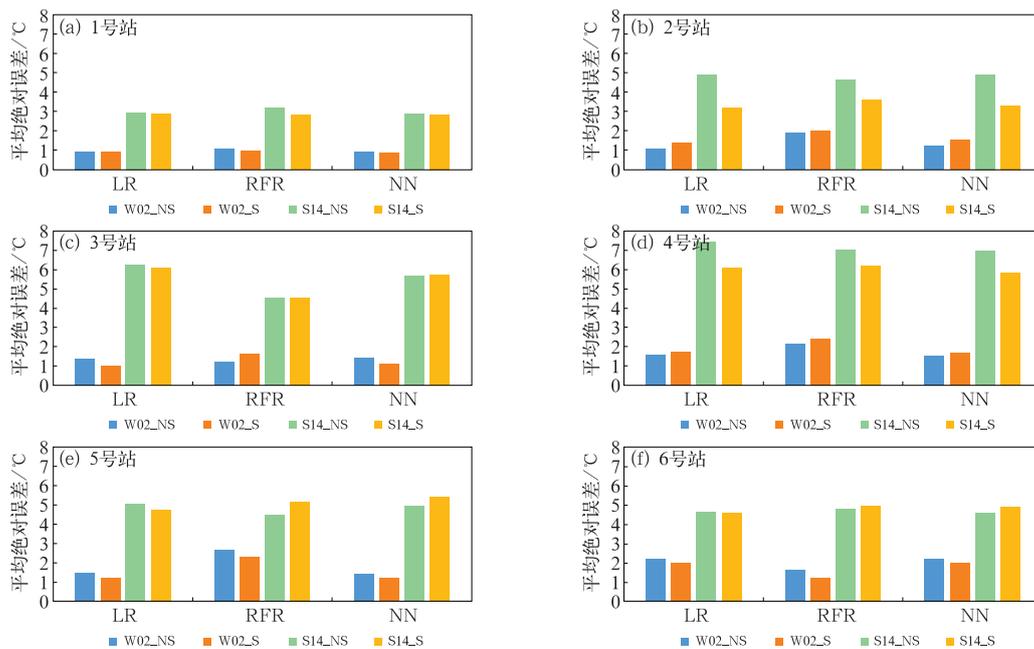
图 9 进一步给出使用同一气候区域邻近站模型得到的路面温度绝对误差分布。总体上,路面温度绝对误差仍表现为冬季较小,夏季较大,京津地区两个站点误差低于其他海拔较高地区的站点。与图 7 相比,使用同一气候区域相邻站模型计算得到的路面温度,除了 1 号站冬季时段误差表现为减小外,其他各站点路面温度误差均表现为不同程度的增大,

京津地区两个站点三种方法平均的路面温度绝对误差分别增加 0.15℃和 0.65℃,陕甘地区两个站点分别增加 1.45℃和 1.59℃,青海地区两个站点分别增加 0.49℃和 0.99℃。

5 结 论

目前我国交通气象路面要素观测站点稀少成为制约交通气象监测预报预警服务的重要因素。为实现无路面温度观测路段的交通气象服务,本文综合使用交通气象台站观测资料、中国气象局陆面数据同化系统地表温度产品、中国逐小时降水实时融合实况分析产品,以及 FY-4A 反演地表辐射产品,研究了京津、陕甘、青海三个区域公路路面温度的变化特征以及主要影响因素,并采用三种方法,构建了公路路面温度实况模型,开展了模型效果检验以及模型的空间泛化能力分析。主要结论如下:

(1)公路路面温度变化存在明显的区域特征。高海拔地区路面温度平均值显著低于平原地区,冬



注:LR:线性回归方法,RFR:随机森林方法,NN:神经网络方法;W02_NS/W02_S:冬季 02 时不使用/使用卫星资料的模型,S14_NS/S14_S:夏季 14 时不使用/使用卫星资料的模型。

图 9 基于临近站 2018—2020 年观测资料使用不同方法建模拟合的各交通气象站 2021 年夏季 14 时和冬季 02 时路面温度平均绝对误差

Fig. 9 The average absolute errors of road surface temperature at 14:00 BT in summer and 02:00 BT in winter of 2021 at each transportation weather station simulated by using different real-time road surface temperature models on the data from nearby transportation weather station during 2018—2020

季白天和夜间路面温度平均值均低于 0°C 。与平原地区相比,高海拔地区路面温度变率更大,尤其是白天时段。

(2)路面温度与道路环境气象因子之间存在显著的相关关系,但在不同地区、不同季节、不同时段表现出不一样的细节特征。总体上路面温度与气温之间的相关系数最高,且相关关系呈现夜间时段高、白天时段降低的特点。夏季及冬季白天,高相对湿度对公路路面温度主要表现为显著降温作用,冬季夜间具有增温作用;同时该时段,CMPAS 小时降水量与路面温度也呈现负相关,较多的降水导致地面蒸发量增加,地表温度降低。冬季夜间时段,路面温度与降水量之间呈现弱的负相关。公路路面温度与风速之间的关系区域特征更加明显,主要取决于当地气流来源的冷热属性和干湿属性。

(3)CLDAS V2.0 对公路路面温度具有重要指示意义。路面低温($\leq 0^{\circ}\text{C}$)情况下,CLDAS V2.0 分析地表温度均位于 0°C 以下。路面高温($\geq 55^{\circ}\text{C}$)情况下,CLDAS V2.0 地表温度的变化范围也比较集中,温度中位数和第 75%分位数均为 $55\sim 60^{\circ}\text{C}$ 。

(4)FY-4A 反演地表辐射通量与公路路面温度也具有显著的相关关系,且相关关系具有明显的区域和季节差异。路面温度与卫星反演地表长波辐射通量的相关系数,冬季高于夏季,京津地区高于陕甘和青海地区。多数情况下,路面温度与卫星反演地表短波辐射通量之间的相关关系夏季好于冬季,中午时段好于其他时段。

(5)使用 2021 年资料开展的路面温度实况模型独立性检验表明,不同方法均可以较好地模拟出夏季路面高温以及冬季路面低温的逐日变化。冬季路面温度误差明显低于夏季,基本在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 内,夜间误差为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 左右。对于夏季部分时段,各方法均表现出高温低估、低温高估的特点。基于各方法的模型结果总体差异不大,多个高温时刻线性回归方法表现出比随机森林、深度神经网络更明显的优势。卫星反演地表辐射产品的应用对夏季路面高温模拟的效果有显著提升作用。

(6)使用同一气候区域邻近交通气象站资料构建的路面温度实况模型,仍能较好地模拟出夏季路面高温和冬季路面低温的逐日变化,各站点路面温度误差均表现出不同程度的增加,其中京津地区路面温度误差增加幅度最小。不同方法构建的模型结果差异不大。

参考文献

- 卞光辉,袁成松,周曾奎,等,2010. 高速公路交通气象条件等级:QX/T 111—2010[S]. 北京:气象出版社. Bian G H, Yuan C S, Zhou Z K, et al, 2010. Grade of weather conditions for freeway transportation: QX/T 111—2010[S]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 陈鹤,蔡荣辉,陈静静,等,2022. 基于深度学习方法的气温预报技术应用与评估[J]. 气象, 48(11): 1373-1383. Chen H, Cai R H, Chen J J, et al, 2022. Application and evaluation of temperature forecast based on deep learning method[J]. Meteor Mon, 48(11): 1373-1383(in Chinese).
- 董天翔,包云轩,袁成松,等,2018. 三种统计预报模型在江苏省道路低温预警中的应用[J]. 气象科技, 46(4): 773-784. Dong T X, Bao Y X, Yuan C S, et al, 2018. Application of three statistical forecast models in early warning of low-temperature on road surface in Jiangsu and their comparison[J]. Meteor Sci Technol, 46(4): 773-784(in Chinese).
- 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).
- 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).
- 韩秀珍,李三妹,窦芳丽,2012. 气象卫星遥感地表温度推算近地表气温方法研究[J]. 气象学报, 70(5): 1107-1118. Han X Z, Li S M, Dou F L, 2012. Study of obtaining high resolution near-surface atmosphere temperature by using the land surface temperature from meteorological satellite data[J]. Acta Meteor Sin, 70(5): 1107-1118(in Chinese).
- 黄佳威,王永前,吴小娟,2024. 顾及地形差异的高速公路结冰预报模型研究[J]. 大气科学, 48(4): 1499-1510. Huang J W, Wang Y Q, Wu X J, 2024. Research on expressway icing-prediction model considering terrain differences[J]. Chin J Atmos Sci, 48(4): 1499-1510(in Chinese).
- 黄骄文,蔡荣辉,姚蓉,等,2021. 深度学习网络在降水相态判识和预报中的应用[J]. 气象, 47(3): 317-326. Huang J W, Cai R H, Yao R, et al, 2021. Application of deep learning method to discrimination and forecasting of precipitation type[J]. Meteor Mon, 47(3): 317-326(in Chinese).
- 蒋薇,刘芸芸,陈鹏,等,2021. 利用深度神经网络和先兆信号的江苏夏季降水客观预测方法[J]. 气象学报, 79(6): 1035-1048. Jiang W, Liu Y Y, Chen P, et al, 2021. Prediction of summer precipitation in Jiangsu Province based on precursory factors: a deep neural network approach[J]. Acta Meteor Sin, 79(6): 1035-1048(in Chinese).
- 梁进秋,申彦波,胡丽琴,等,2020. FY-4A 地表太阳入射辐射产品在山西高原的适用性研究[J]. 气象, 46(12): 1575-1585. Liang J

- Q, Shen Y B, Hu L Q, et al, 2020. Applicability of FY-4A surface solar irradiance products in the Loess Plateau of Shanxi[J]. Meteor Mon, 46(12): 1575-1585(in Chinese).
- 刘霞, 王春林, 景元书, 等, 2011. 4 种城市下垫面地表温度年变化特征及其模拟分析[J]. 热带气象学报, 27(3): 373-378. Liu X, Wang C L, Jing Y S, et al, 2011. Study on annual variation and simulation of temperature in four urban underlying surfaces[J]. J Trop Meteor, 27(3): 373-378(in Chinese).
- 罗潇, 廖春华, 谢睿恒, 等, 2023. 基于热谱地图技术的湖南省冬季路面温度特征分析[J]. 湖南交通高科技, 49(1): 60-64. Luo X, Liao C H, Xie R H, et al, 2023. Analysis of winter pavement temperature characteristics in Hunan Province based on thermal spectrum map technology[J]. Hunan Commun Sci Technol, 49(1): 60-64(in Chinese).
- 闵敏, 吴晓, 2020. 从 FY-4A 卫星遥感数据和 GFS 资料估算全天空状况下的地表长波辐射通量[J]. 气象, 46(3): 336-345. Min M, Wu X, 2020. Estimating surface longwave radiation flux under all-sky condition from FY-4A and GFS data[J]. Meteor Mon, 46(3): 336-345(in Chinese).
- 南刚强, 陈明轩, 秦睿, 等, 2021. 基于雷达组合反射率拼图和深度学习的中尺度对流系统识别、追踪与分类方法[J]. 气象学报, 79(6): 1002-1021. Nan G Q, Chen M X, Qin R, et al, 2021. Identification, tracking and classification method of mesoscale convective system based on radar composite reflectivity mosaic and deep learning[J]. Acta Meteor Sin, 79(6): 1002-1021(in Chinese).
- 潘昉, 谷军霞, 师春香, 等, 2022. 中国北方冬季降水的多源资料产品评估和融合优化[J]. 气象学报, 80(6): 953-966. Pan Y, Gu J X, Shi C X, et al, 2022. Assessment and merged optimization of multi-source winter precipitation products over northern China[J]. Acta Meteor Sin, 80(6): 953-966(in Chinese).
- 潘昉, 谷军霞, 宇婧婧, 等, 2018. 中国区域高分辨率多源降水观测产品的融合方法试验[J]. 气象学报, 76(5): 755-766. Pan Y, Gu J X, Yu J J, et al, 2018. Test of merging methods for multi-source observed precipitation products at high resolution over China[J]. Acta Meteor Sin, 76(5): 755-766(in Chinese).
- 彭莲, 高建平, 张续光, 2012. 基于热谱地图技术的高速公路气象传感器选址研究[J]. 西部交通科技, (5): 1-4, 48. Peng L, Gao J P, Zhang X G, 2012. Site selection study of expressway weather sensor based on thermal map technology[J]. Western China Commun Sci Technol, (5): 1-4, 48(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): 19-23. Qin J, Sun L J, 2005. Overview of temperature estimation methods for asphalt pavement abroad[J]. J China For Highway, 25(6): 19-23(in Chinese).
- 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. Qu X L, Wu H Q, Zhang Y H, et al, 2010. Characteristics of road surface temperature on Jingshi Freeway and the establishment of its forecast model[J]. J Arid Meteor, 28(3): 352-357(in Chinese).
- 汤筠筠, 包左军, 李长城, 等, 2008. 基站式道路气象站布设原理和方法[J]. 公路, 53(8): 186-191. Tang J J, Bao Z J, Li C C, et al, 2008. Disposal principles and methods of base road weather site[J]. Highway, 53(8): 186-191(in Chinese).
- 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. Tian H, Wu H, Zhao L N, et al, 2009. Characteristics and statistical model of road surface temperature on Huning Expressway[J]. J Appl Meteor Sci, 20(6): 737-744(in Chinese).
- 王丹, 王建鹏, 党超琪, 等, 2023. CLDAS 实况产品在陕西气温网格预报检验与订正中的应用[J]. 气象, 49(8): 946-957. Wang D, Wang J P, Dang C Q, et al, 2023. Application of CLDAS in test and correction of grid temperature forecast in Shaanxi Province[J]. Meteor Mon, 49(8): 946-957(in Chinese).
- 王可心, 包云轩, 朱承瑛, 等, 2021. 随机森林回归法在冬季路面温度预报中的应用[J]. 气象, 47(1): 82-93. Wang K X, Bao Y X, Zhu C Y, et al, 2021. Forecasts of road surface temperature in winter based on random forests regression[J]. Meteor Mon, 47(1): 82-93(in Chinese).
- 吴晓, 2014. 从 FY-4 静止气象卫星估算晴空地表下行长波辐射通量的反演模式[J]. 气候与环境研究, 19(3): 362-370. Wu X, 2014. Retrieval model for estimating clear-sky downward longwave radiation at the surface from the FY-4 geostationary satellite[J]. Climatic Environ Res, 19(3): 362-370(in Chinese).
- 吴晓, 闵敏, 董立新, 2018. 从 Himawari08 卫星估算晴空地表长波辐射及其日变化特征初探[J]. 气候与环境研究, 23(1): 37-46. Wu X, Min M, Dong L X, 2018. Estimation and diurnal variation analysis of clear-sky surface longwave radiation fluxes from Himawari08 satellite[J]. Climatic Environ Res, 23(1): 37-46(in Chinese).
- 熊国玉, 祖繁, 包云轩, 等, 2024. 基于 LSTM 和先验知识的高速公路路面温度预报[J]. 应用气象学报, 35(1): 68-79. Xiong G Y, Zu F, Bao Y X, et al, 2024. Expressway pavement temperature forecast based on LSTM and prior knowledge[J]. J Appl Meteor Sci, 35(1): 68-79(in Chinese).
- 徐丽娜, 申彦波, 李忠, 等, 2021. 基于概率密度匹配方法的 FY-4A 地表入射太阳辐射订正[J]. 高原气象, 40(4): 932-942. Xu L N, Shen Y B, Li Z, et al, 2021. Correction of FY-4A surface solar irradiance based on probability density function matching method[J]. Plateau Meteor, 40(4): 932-942(in Chinese).
- Shao J, Lister P J, 1995. Data filtering for thermal mapping of road surface temperatures[J]. Meteor Appl, 2(2): 131-135.
- Shao J, Lister P J, Hart G D, et al, 1996. Thermal mapping: reliability and repeatability[J]. Meteor Appl, 3(4): 325-330.
- Sugrue J G, Thornes J E, Osborne R D, 1983. Thermal mapping of road surface temperatures[J]. Phys Technol, 14: 212-213.
- Wang C H, Jia B X, Zhou J P, et al, 2022. Retrieval of road surface (bridge deck) temperature near 0°C based on random forest model[J]. Atmosphere, 13(9): 1491.

(本文责编:何晓欢)