

张希帆,任丽媛,谷皓东,2025. 基于长短期记忆网络的天津市高速公路路面温度预报方法研究[J]. 气象,51(12):1635-1644.
Zhang X F, Ren L Y, Gu H D, 2025. Research on pavement temperature forecasting method for Tianjin expressway based on long short-term memory network[J]. Meteor Mon, 51(12):1635-1644(in Chinese).

基于长短期记忆网络的天津市高速公路 路面温度预报方法研究^{*}

张希帆 任丽媛 谷皓东

天津市气象服务中心, 天津 300074

提 要: 基于天津市高速公路沿线交通气象站 2018—2023 年逐 10 min 实时观测资料, 使用长短期记忆网络模型预报未来 3 h 的路面温度, 评估分析了模型在极端路面温度情况下的预报效果和空间迁移适用性。结果表明: 用步长为 3 h 的实况数据作为输入, 模型预报效果最好; 模型能较为准确地预报路面温度, 预报能力随预报时效延长而下降, 平均绝对误差为 0.38~2.21℃, 均方根误差为 0.63~3.31℃, 准确率为 76.15%~99.48%; 模型能准确地预报路面极端低温发生的时间和极值, 1 h 预报的准确率控制在 90% 左右; 对于路面极端高温, 模型的 1 h 预报也能模拟出路面高温的变化趋势和极值时间; 模型具有一定的空间迁移能力, 迁移后模型预报平均准确率 70% 以上, 平均偏差不超过 3℃; 在一定范围内, 相比于迁移距离, 模型的本站预报能力对迁移后模型的预报表现有更大影响。

关键词: 高速公路, 路面温度, 长短期记忆网络, 预报模型

中图分类号: P49, P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.073001

Research on Pavement Temperature Forecasting Method for Tianjin Expressway Based on Long Short-Term Memory Network

ZHANG Xifan REN Liyuan GU Haodong

Tianjin Meteorological Service Center, Tianjin 300074

Abstract: Based on the 10 min observation data from the traffic meteorological stations along the Tianjin expressway during 2018—2023, a long short-term memory network model is used to forecast the pavement temperature in the next 3 h, and the forecasting effect and spatial transfer applicability of the model in the case of extreme pavement temperatures are evaluated and analyzed. The results show that the model forecasting effect is the best when the observation data of the time step 3 h are used as the input. The model can forecast the pavement temperature accurately, and the forecasting ability decreases with the extension of the forecast lead time, with the mean absolute error of 0.38—2.21℃, the root mean square error of 0.63—3.31℃, and the accuracy rate of 76.15%—99.48%. The model can accurately forecast the occurrence time and extreme values of extreme low temperature events on pavements, with the forecasting accuracy being about 90% for the 1 h forecast. For extreme high pavement temperature, the 1 h forecast of the model can also simulate the variation trend and the time for extreme high pavement temperature to occur. The model has a certain spatial transfer ability, and the average accuracy of the model forecast is more than 70% after the transfer, with an mean absolute deviation less than 3℃. Within a certain range, compared

^{*} 天津市气象局一般课题(202441ybxm28)资助

2024 年 12 月 25 日收稿; 2025 年 7 月 30 日收修定稿

第一作者: 张希帆, 主要从事人工智能算法在气象服务中的应用技术研究. E-mail: 342600505@qq.com

with the transfer distance, the forecasting ability of the model at its original station has a greater impact on the forecasting performance of the model after transfer.

Key words: expressway, pavement temperature, long short-term memory (LSTM) network, forecasting model

引言

路面温度预报是交通气象服务的重要组成部分,其精度直接影响高速公路的运行安全与管理效率。在极端天气条件下,路面的极端高温和低温都可能引发一系列交通安全问题,路面低温是沥青路面收缩开裂的主要原因,也是路面结冰的先决条件(董天翔等,2018;舒斯等,2019),而路面高温则会导致行驶车辆的爆胎甚至导致部分老化车辆自燃(冯蕾等,2017),进而导致交通事故频发(李迅等,2014)。因此,建立精准、高效、全面的路面温度预报模型,对于交通管理部门及时采取防范措施、保障道路安全,以及气象服务部门提升道路交通气象灾害保障服务能力、应急减灾能力都具有重要意义。

当前对于路面温度预报的方法主要有两类(秦健和孙立军,2005)。一类是传统统计方法,即利用大量的观测数据建立回归统计方程(田华等,2009;武辉芹等,2014),寻找路面温度和站点气温、辐射条件以及相关气象要素的定量关系,其模型相对简单,数据易于获取,具有较高的实际应用价值,但定量关系的建立需要大量数据支撑,且缺乏空间普适性(马宁等,2015;曲晓黎等,2010;Diefenderfer et al, 2006;黄立葵等,2005;李蕊等,2011;温华洋等,2021)。另一类是数值预报方法,其主要是以能量平衡方程和热传导公式为基础,建立数值预报模型(Barber,1957;刘熙明等,2004;孟春雷和张朝林,2012);这类方法一定程度从物理机制上揭示了气象因素和其他环境因素对路面温度的影响,但理论模型变量繁多、相关热学参数缺乏观测数据支撑,因此在气象服务中的广泛应用性受限。近年来,随着人工智能技术的快速发展,机器学习乃至深度学习方法在气象预报领域的应用逐渐受到关注,因此涌现出第三类——机器学习方法,已经有研究通过机器学习随机森林算法(王可心等,2021),或者使用神经网络(王佳和郭春燕,2017;Xu et al,2017)来预报路面温度,还有研究引入支持向量机来实现路面低温分类预警(董天翔等,2018),但仍无法实现温度的准确预报。

循环神经网络(RNN)及其改进模型——长短期记忆网络(LSTM),在处理时序数据方面有优越性,被广泛应用于自然语言处理、金融预测以及气象预报等多个领域(张荣等,2018)。常规机器学习方法,如集成学习中的随机森林和梯度提升方法(XGBoost)等在部分任务中表现良好,而 LSTM 作为一种成熟的深度学习方法,在参数结构和层级设计上更为精细,显示出较强的抗干扰和泛化能力(Gupta et al,2021;Li et al,2023)。在路面温度预报这一特定场景中,LSTM 模型对输入数据参数的要求相对简便,能够基于基础观测数据进行建模,从而提升模型的普适性和实际应用能力;不仅保留了传统统计方法易于数据获取的优点,还能有效捕捉时间序列中的非线性关系和长期依赖特性(Tabrizi et al, 2021),这对于涉及多变量耦合和复杂动态变化的路面温度预报尤其关键,也一定程度继承了数值预报方法在处理复杂气象规律方面的能力(Caruana and Niculescu-Mizil,2006;LeCun et al,2015)。本文通过针对性的数据建模优化,可深化和拓宽 LSTM 在路面温度预报中的应用,强化其在实践中的适应性及精准性。

此外,当前对于路面温度预报模型的研究,多单独针对极端高温或低温等路面特殊状况提供预报,缺乏适用性较强的通用模型——在能做好日常路面温度预报的同时提高路面极端温度预报效果;同时,路面温度的变化受气象要素、地表特性以及交通条件等多种因素影响,具有复杂性和区域性,而传统统计方法建立的模型缺乏空间上的迁移适用能力,数值预报方法则服务应用能力相对较弱。

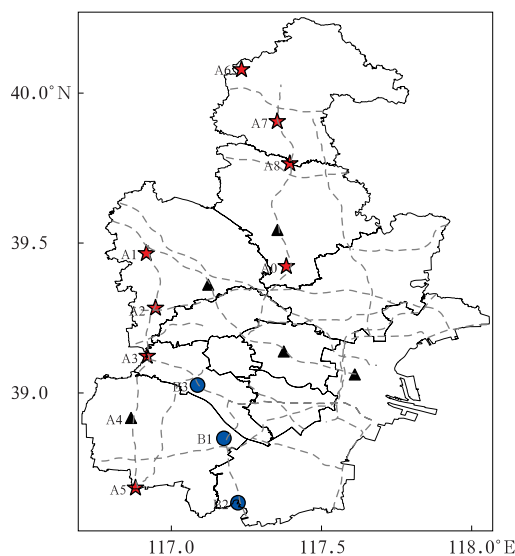
基于此,本文结合 2018—2023 年天津市高速公路沿线交通气象站的逐 10 min 观测数据,以 LSTM 模型为核心,设计并构建了一个多输入、多输出的路面温度短期预报模型,实现对未来 3 h 逐 10 min 的路面温度预报。研究中综合考虑了不同时间步长输入对模型预报性能的影响,选取最优方案进行模型训练与验证。同时,对模型的极端高低温预报能力及空间迁移适用性进行了系统评估,以期为高速公路气象服务提供更加精准、有效、全面的气象服务。本文的研究结果不仅可为提升路面温度预报的准确

性提供一种有效方法,也可深度学习模型在交通气象领域的应用探索提供重要参考,并为后续进一步研发极端天气道路风险预警服务产品,形成极端天气情景下的交通安全风险等级指标提供技术支持。

1 资料与方法

1.1 研究资料

本文所用研究资料来自于天津高速公路沿线的交通气象站观测数据。天津市内共有 16 个交通气象站点(文中对站名、站号均做了脱密处理),位置见图 1,站点观测要素包括气温、能见度、路面温度、相对湿度、降水量、风速、风向和云量共 8 个,资料长度为 2018 年 1 月 1 日至 2023 年 12 月 31 日,资料时间分辨率为逐 10 min。对数据进行时间一致性、内部一致性、空间一致性等方面的检查,由于部分站点的数据缺失过于严重,最终选择武清某店西站(A1)、武清某港西站(A2)、武清某站(A3)、静海某站(A5)、蓟州某站(A6)、蓟州某收费站站(A7)、宝坻某北站(A8)和宝坻某站(A0),共 8 个站用于建立和验证模型(图 1 红色五角星)。选择了数据相对完整的静海某收费站站(B1)、大港某收费站站(B2)、西青某收费站站(B3),共 3 个站用于后续的空间适



注:灰色虚线为高速路网,红色五角为用于建立和验证模型的站点,蓝色圆点为用于空间适用性检验的站点,黑色三角为其余站点。

图 1 天津市高速公路交通气象站分布

Fig. 1 Distribution of traffic meteorological stations along Tianjin expressway

用性检验(图 1 蓝色圆点)。本文对使用的所有数据均进行了质量控制,剔除了异常值,对缺失数据量不多的时段进行了邻近线性插值插补。全文时间均为北京时。

1.2 研究方法

1.2.1 LSTM 模型设计

LSTM 是一种改进型 RNN,其有效解决了 RNN 中存在的长期依赖问题,并一定程度上缓解了训练长序列时出现的梯度消失问题(米前川等, 2022)。本文基于 LSTM 所建立的高速公路路面温度预报模型由输入层、LSTM 层、全连接层和输出层组成。模型采用 tanh 函数作为激活函数,采用 adam 优化器作为优化算法,采取学习率衰减的方式来避免过拟合,初始学习率为 0.01,衰减率为 0.01。通过网格搜索,当验证集误差接近训练集误差并趋于稳定时,认为模型结果最优。以高质量观测数据为基础,通过多次寻优试验,确定了模型效果最优的超参数:隐藏层数为 1,隐藏层神经元数为 64,训练批次大小为 32,迭代次数为 200。数据集划分方面,本文将 2018—2021 年数据作为训练集,2022 年数据作为验证集,2023 年数据作为测试集,测试集数据完全不参与模型训练,确保用于模型评估时的准确性。

本研究对于多步预报输出采取多输入、多输出预报策略。模型的训练和预报均基于滚动窗口进行有监督学习。综合考虑路面温度的短时预报需求和实际预报效果,选择未来 3 h 的路面温度作为预报目标。

1.2.2 模型输入数据

在机器学习相关领域中,输入数据的预处理以及选择是十分重要的一环。处理后的数据决定了模型在数据中可挖掘的规律多少,最优的模型即保留最多规律并最大程度还原数据特征的模型(Bishop, 2006;Goodfellow et al, 2016)。本文将月、日、时引入特征变量以在数据特征中加入季节变化规律,同时结合实际气象服务应用需求,将除路面温度外的 7 个观测要素数据输入步长划分为 1、3、6、12、24 h 共 5 种方案,探究在应用中模型预报效果最佳的输入步长。使用数据进行模型训练之前,考虑到各个特征要素量纲、单位差距较大,为有效提高模型拟合效率,提高模型学习效果,对训练集数据统一采取归一化处理,并以训练集归一化尺度处理验证集和测试集数据,保证模型输出数据的真实有效和模型评估指标的准确易读。

1.2.3 模型评估指标

为了对模型预报效果进行检验,本文采用平均绝对误差、均方根误差和预报准确率,共 3 个指标来进行模型评估。其中,预报准确率为预报值与观测值差值的绝对值不大于 3°C 的次数与总次数的比值,准确率越高表示模型预报效果越好(熊国玉等, 2024)。

2 结果分析

2.1 模型预报能力评估

2.1.1 不同输入步长模型预报能力评估

使用 1、3、6、12、24 h 共 5 种不同输入步长构建的模型对 2023 年 A1、A2、A3、A5、A6、A7、A8、A0 共 8 个交通气象站的路面温度进行模拟预报,对每个输入方案所有预报时效的评估指标绘制箱线图(图 2),用以直观比较不同输入步长的模型预报效果。总体来说模型效果比较稳定,各评估指标对不

同方案均表现出了一致的优劣特征,结果表明,3 h 输入步长的模型预报性能表现最佳,其平均绝对误差为 $0.38\sim 2.21^{\circ}\text{C}$,均方根误差为 $0.63\sim 3.31^{\circ}\text{C}$,准确率为 $76.15\%\sim 99.48\%$;24 h 的输入时间步长方案预报性能表现最差,其平均绝对误差为 $0.58\sim 2.56^{\circ}\text{C}$,均方根误差为 $0.91\sim 3.61^{\circ}\text{C}$,准确率为 $69.98\%\sim 98.97\%$ 。从模型预报效果并非随着输入步长的增加单调变化可以看出,过多地增加输入时间步长并不会有效增加模型预报性能,但是输入时间步长过少也会降低模型的拟合稳定度,使用合适的时间步长输入在有利于实际操作和减少模型训练时间的同时,也有利于建立预报性能更优的模型。基于这一结果,本文后续将采用预报性能最佳的 3 h 输入步长模型继续进行研究讨论,后文所提及的模型均为此类。

2.1.2 不同站点模型预报能力评估

为了进一步评估不同站点的模型预报能力,对比 8 个交通气象站模型 2023 年的模拟预报结果(图 3)。不同交通气象站的模型表现出较为一致的预报性

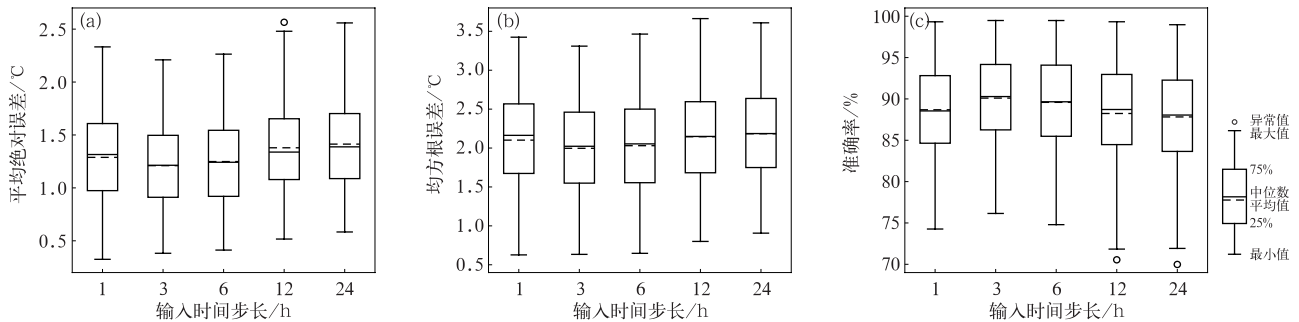


图 2 不同输入时间步长模型对 2023 年路面温度的预报能力评估

(a) 平均绝对误差, (b) 均方根误差, (c) 准确率

Fig. 2 Evaluation of forecasting performance of models with different input time steps for the pavement temperature in 2023

(a) mean absolute error, (b) root mean square error, (c) accuracy

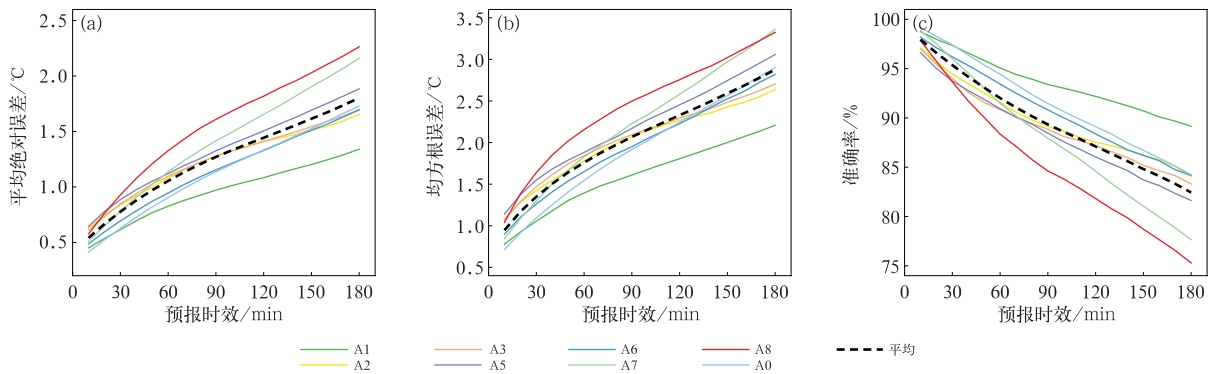


图 3 2023 年 8 个交通气象站模型预报能力评估

(a) 平均绝对误差, (b) 均方根误差, (c) 准确率

Fig. 3 Evaluation of forecasting performance of eight traffic meteorological station models in 2023

(a) mean absolute error, (b) root mean square error, (c) accuracy

能,随着预报时效的增加,平均绝对误差和均方根误差均增加,预报准确率也下降。在预报时效小于 30 min 时,不同站点的模型预报性能差距较小;随着预报时效的增加,从 60 min 预报时效开始,各站点模型的预报性能衰减明显,同时模型之间的差异开始显现。交通气象站 A1 的预报模型表现出最佳的预报能力,其平均绝对误差为 $0.38 \sim 1.34^{\circ}\text{C}$,均方根误差为 $0.63 \sim 2.20^{\circ}\text{C}$,准确率为 $89.04\% \sim 99.25\%$;交通气象站 A8 模型的预报表现最差,其平均绝对误差为 $0.53 \sim 2.21^{\circ}\text{C}$,均方根误差为 $1.00 \sim 3.31^{\circ}\text{C}$,准确率为 $76.15\% \sim 98.06\%$ 。

为深入检验预报效果,选取表现最佳的 A1 预报模型和表现最差的 A8 预报模型,对 1、2、3 h 预报进行分析(图 4)。2023 年交通气象站 A1 路面温度在大部分时间为 $-3 \sim 39^{\circ}\text{C}$,最低可达 -20°C ,最高可达 64°C ,交通气象站 A8 路面温度在大部分时间为 $-4 \sim 35^{\circ}\text{C}$,最低可达 -19°C ,最高可达 63°C 。从决定系数(R^2)来看,A1 的拟合效果明显均优于 A8,其中 A1 的 3 h 预报仍优于 A8 的 1 h 预报。从

散点分布来看,A1 的整体分布较 A8 更加集中于 1:1 线,说明其误差更小,模型预报结果更准确,与前文预报能力评估结论一致。单独来看,A1 模型预报效果的散点分布具有上宽下窄的明显特征(图 4a~4c),其分布随着温度上升而更分散,这说明模型预报效果随温度升高而降低;同时,散点在高温预报时向拟合线的预报值一侧倾斜,说明预报值较观测值偏大。A8 模型预报效果的散点分布同样具有上宽下窄的特征(图 4d~4f),但是散点的倾斜性不明显,即预报偏差方向没有显著规律。

总的来说,A1 模型整体表现出预报值偏高的特征,两个模型的预报效果都随预报温度上升而降低。高温预报效果偏差的部分原因是由于高温样本相对较少,导致模型在学习训练过程中对高温情形拟合不足,影响其预报准确性。A1 模型显著优于 A8 模型可能和地理因素有关,A8 位于蓟州山区附近,海拔较高,路面温度的变化波动更剧烈(邢志军等,2020),提高了模型预报难度。

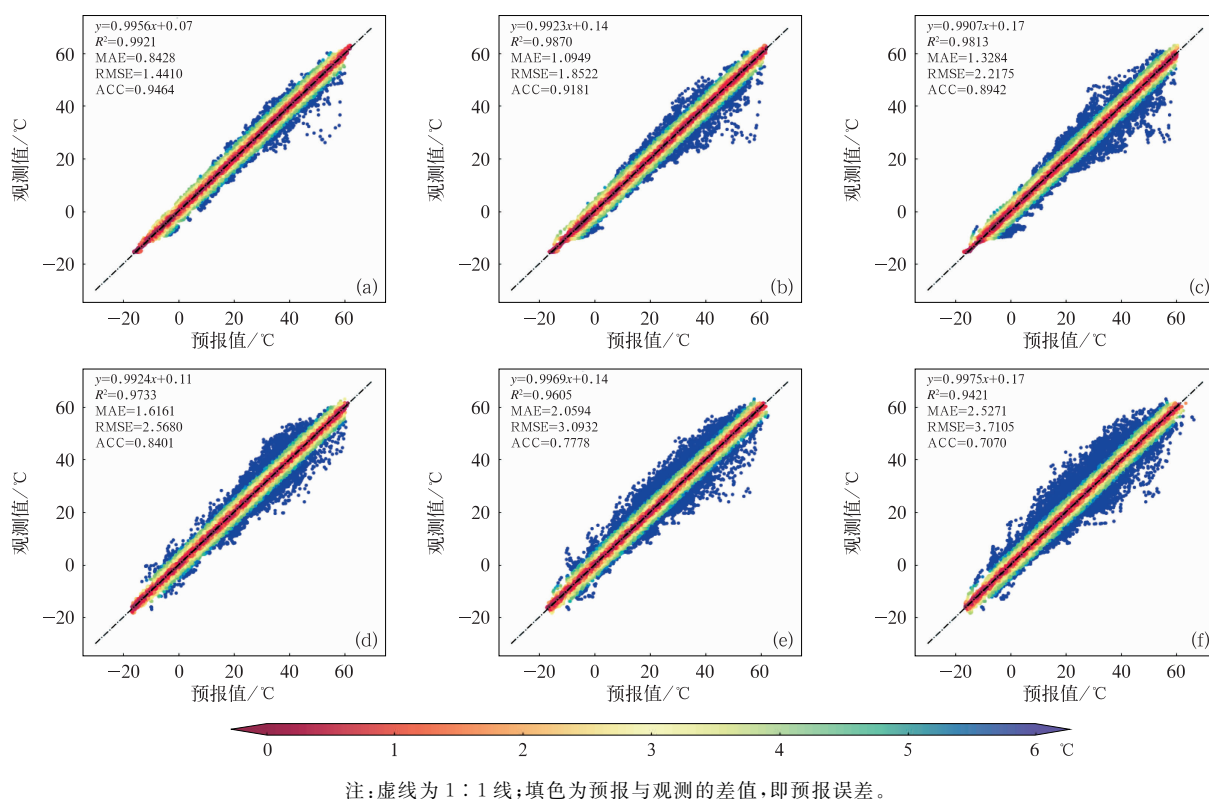


图 4 2023 年交通气象站(a~c)A1 和(d~f)A8 模型预报值与观测值散点分布
(a,d)1 h 预报,(b,e)2 h 预报,(c,f)3 h 预报

Fig. 4 Scatter distribution of observation and forecast of traffic meteorological stations (a—c) A1 and (d—f) A8 models in 2023
(a, d) 1 h forecast, (b, e) 2 h forecast, (c, f) 3 h forecast

2.2 极端低温和极端高温路面状况下模型预报能力评估

2.2.1 低温和高温路面状况下的各站点模型预报能力评估

在服务实践中,交通管理部门极为关注路面的极端低温和极端高温情况,因此针对极端温度的预报效果也广泛受到关注。本文参考中国气象局公共气象服务中心和公安部交通管理科学研究所(2024)联合起草的《高速公路交通安全管控天气风险预警等级》(QX/T729—2024),定义路面温度低于 0℃时为低温,路面温度高于 40℃时为高温,两者均会对交通运行产生不利影响,提高致灾可能。基于此,本文对 2023 年 A1、A2、A3、A5、A6、A7、A8、A0 共 8 个交通气象站点低于 0℃和高于 40℃的样本进行模

型预报准确率评估(表 1)。

由表 1 可见,低温状态下,1、2、3 h 预报的平均准确率分别为 93.21%、84.80%、76.34%;参考 ECMWF 模式在提前 1~3 h 的低温预报准确率(85%~90%;Zhang et al,2021),考虑到路面极端低温预报的难度,模型预报表现相对不错。高温状态下各模型预报效果普遍较低温差,1、2、3 h 预报的平均准确率分别为 80.98%、53.39%、37.81%,随预报时效延长模型预报能力衰减较大,且模型之间差距起伏较大;由于路面处于极端高温时温度变化迅速且敏感(杜镀和陈家豪,2020),同时学习样本偏少,导致模型模拟能力不足。总的来说,极端温度相对正常温度下的预报效果有明显下降,低温状态下的模型表现优于高温状态,高温状态下的模型预报参考价值主要在 1 h 时效以内的预报。

表 1 2023 年低温和高温路面状况下的模型预报准确率

Table 1 Accuracy of the model forecasts under low and high pavement temperature conditions

路面状况	预报时效	预报准确率/%							
		A1	A2	A3	A5	A6	A7	A8	A0
低温(<0℃)	1 h	94.58	89.63	92.69	91.09	95.32	96.77	91.65	93.96
	2 h	87.30	84.05	84.05	83.35	88.25	87.09	81.60	82.67
	3 h	78.12	77.27	74.83	75.45	83.21	77.54	72.79	71.51
高温(>40℃)	1 h	85.04	82.51	78.47	77.99	81.15	84.54	70.37	87.74
	2 h	57.97	55.72	42.68	52.23	57.58	57.59	41.44	61.92
	3 h	43.34	39.77	27.06	34.02	42.69	42.76	27.41	45.40

2.2.2 路面极端低温和极端高温个例的模型预报能力评估

为了进一步验证模型对路面极端温度的预报效果,本文从测试集中挑选无缺测数据且出现符合 2.2.1 节阈值规定温度的个例进行预报效果评估。考虑数据完整度和质量控制情况,最终筛选 A2 和 A0 交通气象站模型进行个例评估。极端低温个例

为 2023 年 1 月 23 日 12 时至 24 日 12 时,当日无降水,A2 和 A0 的平均最低气温分别为 -12.3℃、-13.1℃,路面温度最低分别为 -15.8℃、-16.6℃;极端高温个例为 2023 年 5 月 14 日 00 时至 15 日 00 时,当日无降水,A2 和 A0 的平均最高气温分别为 35.4℃、34.5℃,路面温度最高分别为 54.7℃、52.4℃。评估效果具体见表 2。

表 2 2023 年路面极端低温和极端高温个例的交通气象站模型评估

Table 2 Evaluation on traffic meteorological stations A2 and A0 models in extreme low

and high pavement temperature cases

个例	交通气象站	1 h 时效		2 h 时效		3 h 时效	
		平均绝对误差/℃	准确率/%	平均绝对误差/℃	准确率/%	平均绝对误差/℃	准确率/%
极端低温	A2	1.24	88.89	1.16	93.06	1.36	91.67
	A0	0.88	96.53	0.93	95.14	1.18	95.83
极端高温	A2	1.22	88.19	1.62	81.25	2.15	72.22
	A0	0.67	100.00	0.88	98.61	1.47	86.81

极端低温个例预报效果如图 5 所示。2023 年 1 月 23 日 16 时开始,路面温度持续降低,17 时开始

两站路面温度均低于 0℃,24 日 08 时前后达到最低。1 h 预报,A0 的模型预报效果较好,A2 准确率

较差,低于 90%;随着预报时效的延长,A0 模型预报效果略有下降,但变化不大,均稳定于 95%以上,其中 2 h 预报效果还略低于 3 h 预报,但平均绝对误差值仍然随预报时效延长而增大;另外,A2 模型的预报效果随预报时效的延长不仅不下降反而出现上升,2 h、3 h 预报的准确率均提升至 90%以上,平均绝对误差值也是 2 h 预报最低,但总体差距不大。考虑这种情况的出现是由于个例具有一定特殊性,在一定准确率内,平均绝对误差对于预报效果的评估更加具有指导性,整体上仍符合对模型的预报预期。此外,通过预报值和观测值的对比(图 5)可以看出,A2 模型 1 h 预报对于最低温度的出现时间略有提前,2 h 和 3 h 预报对于极端低温出现的时间和大小预报更好;A0 模型对温度持续下降阶段的前半段预报波动较大,但在接近极端低温出现时预报逐渐稳定,并能很好地预报出极端温度的大小及出现时间。总的来说,模型可以较为准确地预报出路面温度下降的拐点、下降过程趋势以及最低温度的出现时间和大小,虽然在温度下降前的温度高值时段(23 日 12—15 时)预报效果不太一致,但偏差值基

本控制在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 以内,总体预报效果依然比较理想。

极端高温个例预报效果如图 6 所示。2023 年 5 月 14 日 06 时开始,路面温度整体持续上升,A2 温度在 08—09 时出现小幅波动,14 时前后 2 个站达到最高温,随后路面温度持续下降。1 h 预报,A0 模型预报准确率达到 100%,A2 模型预报准确率不足 90%。随着预报时效延长,两站模型预报能力均下降,其中 A0 模型预报表现不错,全时效预报准确率均在 85%以上,A2 模型则随预报时效延长下降明显,3 h 预报准确率不足 75%,但平均绝对误差仍控制在 3°C 以内。从预报值和观测值的对比可以看出(图 6),在正常温度区间,模型预报效果比较出色,在所有预报时效均可以对温度趋势和大小做出不错的预报;但当温度高于 40°C 后,模型预报能力明显下降,预报值整体偏小,且偏差随预报时效的增加而增大,其中 A2 模型表现更为明显;当温度回落至正常区间后,模型预报效果再次上升。总体来说,模型在极端高温个例上的预报表现高于预期,1 h 预报具有较高的参考价值,2 h 和 3 h 预报也能较好地提前预测升温趋势,虽然不同站点模型对路面极

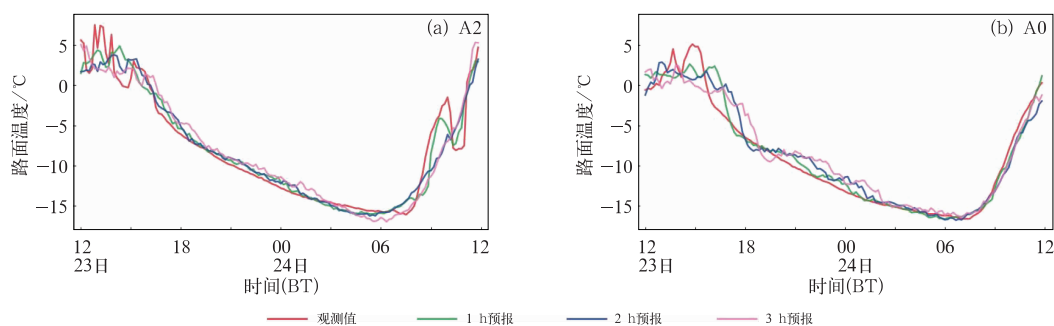


图 5 2023 年 1 月 23—24 日(a)A2 和(b)A0 交通气象站极端低温个例的路面温度观测值与模型预报值

Fig. 5 Comparison between observation and model forecasts of extreme low pavement temperatures of traffic meteorological stations (a) A2 and (b) A0 in 23–24 January 2023

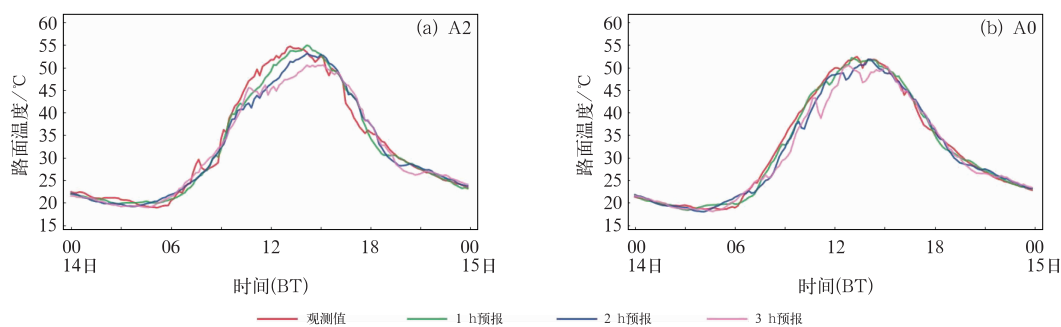


图 6 2023 年 5 月 14—15 日(a)A2 和(b)A0 交通气象站极端高温个例的路面温度观测值与模型预报值

Fig. 6 Comparison between observation and model forecasts of extreme high pavement temperatures of traffic meteorological stations (a) A2 and (b) A0 in 14–15 May 2023

端高温大小的预报仍然存在一定偏差。后续可考虑分析不同站点预报值的偏差规律,通过偏差订正提高预报准确率。

综上所述,模型对于路面极端低温的预报能力要高于极端高温,主要体现在对极端温度的出现时间和极值大小的预报均更优,但两者的模型预报结论都对交通管理和安全决策具有较好的气象应用参考价值。

2.3 模型空间迁移应用能力评估

本文从已经建立的交通气象站模型中选取 A1(预报表现最佳)、A8(预报表现最差)、A3 和 A5(距离迁移预报站点最近)共 4 个交通气象站模型,对未建立模型的 3 个交通气象站(B1、B2、B3)进行路面温度预报,以验证已建站点模型的空间迁移应用能力。测试建立异地交通气象站模型能否解决数据完整性较差的气象站路面温度预报问题,缺测数据插补问题以及无路面温度要素站点路段的预报问题。

预报效果如表 3 所示,整体预报效果相比本站预报均有明显下降,3 h 预报中部分站点模型的迁移预报平均绝对误差超过 3℃,准确率低于 70%。具体来说,本站模型表现最佳的 A1 模型预报能力

在迁移后仍然要高于表现最差的 A8 模型,但相比距离预报站点更近的 A3 模型和 A5 模型并没有明显优势。1 h 预报,A1 模型迁移至 B1 和 B2 站点的预报表现和 A3 模型、A5 模型相近,在 B3 站点的预报表现则明显更优;2 h 和 3 h 预报,A1 模型迁移至 B1 和 B2 站点的预报表现出现大幅下降,显著弱于 A3 模型、A5 模型,但在 B3 站点依然具有更好的预报能力,平均绝对误差均小于 2℃,2 h 预报准确率超过 A3 模型、A5 模型约 10 个百分点,3 h 预报准确率超过 A3 模型、A5 模型约 8 个百分点。另外,A3 模型和 A5 模型在所有站点的迁移预报中均表现出相近的性能。从 3 个预报站点与模型站的相对位置(图 1)来看,B3 站点在 3 个预报站点中距离 A1 模型站点最近,但 A3 才是和 B3 距离最近的模型站点。

综上所述,结合参考站点位置分布以及测试站与模型站之间的距离(表 3),可认为已建模型具有一定的空间迁移应用能力,本站预报表现越好的模型迁移后具有越好的预报能力,模型的迁移预报效果与迁移的距离有关,迁移距离不宜过远,在一定的迁移范围内,模型的本站预报表现对迁移预报的影响要大于距离的影响。

表 3 路面温度预报模型空间迁移应用效果评估

Table 3 Evaluation on the spatial transfer application effect of pavement temperature prediction models								
测试站	模型站	测试站与模型站距离/km	1 h 时效		2 h 时效		3 h 时效	
			平均绝对误差/℃	准确率/%	平均绝对误差/℃	准确率/%	平均绝对误差/℃	准确率/%
B1	A1	72	1.57	84.00	2.36	73.26	3.03	65.20
	A8	104	2.23	78.82	3.42	68.77	4.28	61.85
	A3	38	1.50	85.42	2.27	76.37	2.78	70.62
	A5	31	1.49	85.42	2.16	78.10	2.74	72.11
B2	A1	96	1.32	88.15	1.93	79.79	2.45	72.45
	A8	127	1.91	79.76	2.87	69.89	3.50	64.97
	A3	60	1.33	87.89	1.96	80.97	2.39	76.12
	A5	30	1.31	87.72	1.86	81.05	2.44	74.97
B3	A1	51	0.97	94.42	1.45	87.47	1.95	78.95
	A8	86	1.45	89.57	2.63	79.35	3.29	73.07
	A3	18	1.17	91.26	2.11	76.92	2.69	70.03
	A5	42	1.21	90.86	2.12	77.24	2.87	70.35

3 结论与讨论

本文先建立 LSTM 模型,通过对比多时间步长输入,选取最优的模型输入时间步长,预报未来 3 h 逐 10 min 的路面温度,并对预报结果进行检验评估,深入分析路面极端低温和极端高温状态的预报

效果,并验证已建模型的空间适用性,得到如下结论:

(1)基于 LSTM 建立的未来 3 h 逐 10 min 路面温度预报模型,当以 3 h 观测数据作为输入时,预报效果最优。各个站点的预报模型表现基本一致,预报效果随预报时效延长而下降,1~3 h 预报的平均绝对误差范围为 0.38~2.21℃,均方根误差范围为

0.63~3.31℃,准确率范围为76.15%~99.48%。

(2)模型的低温预报能力表现不错,能够准确预报出路面温度下降的时刻、下降趋势、最低温度大小及发生时间,1 h预报的准确率控制在90%左右。模型的高温预报能力相对低温较弱,随着预报时效的增加,偏差增大较多,但仍能够对高温上升趋势、极值时间提供可用的预报信息,在40℃及以上的高温路面状态下存在预报值偏小的情况,后续可考虑通过订正提高预报准确率。

(3)模型预报的空间适用性方面。使用已经建立的模型,预报未建立模型的交通气象站点路面温度,1、2、3 h预报的平均准确率分别在85%以上、77%以上、70%以上,预报值平均误差不超过±3℃,可以认为模型具有一定的空间迁移应用能力。本站建立模型的预报表现越好,迁移后的预报能力越强;模型迁移的距离越近,迁移后预报效果越好;在一定的迁移范围内,模型的本站预报表现对迁移预报影响要大于距离影响,但受限于交通站点的稀疏性,该迁移范围的具体距离还有待进一步细化研究,这也是后续模型研究完善的方向。

本文所构建的模型,在保证模型通用性、能够较为准确地预报正常路面温度的同时,提供了不错的极端路面温度预报表现,同时具备了一定的极端低温和极端高温预报能力。不针对低温或者高温单一情况特殊建模,有助于提高模型的实际应用价值,能够在正常进行多时效预报的同时,保证路面极端温度的可预报性。同时,模型还考虑了已建模型的空间迁移能力,扩展模型的迁移应用范围,有助于解决实际气象服务工作中遇到站点数据、要素缺失的问题。但模型对于极端路面温度尤其是极端高温的预报效果还有很大的改进空间,后续为进一步改善极端路面温度的预报效果,将尝试增加极端温度样本数据,以提高模型的极端温度敏感性。

参考文献

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).

杜钹,陈家豪,2020.持续极端高温天气下沥青路面温度特性分析[J].公路,65(8):23-26. Du D, Chen J H, 2020. Temperature characterization of asphalt pavements under continuous extreme

high temperature weather[J]. Highway, 65(8):23-26(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).

黄立葵,贾璐,万剑平,等,2005.沥青路面温度状况的统计分析[J].公路工程,30(3):8-9, 57. Huang L K, Jia L, Wan J P, et al, 2005. Statistical analysis of asphalt pavement temperature profile[J]. Highway Eng, 30(3):8-9, 57(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,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. Li X, Gan L, Ding D P, et al, 2014. Research on forecast of traffic weather safety index for Jingjintang Highway[J]. Meteor Mon, 40(4):466-472(in Chinese).

刘照明,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. Liu X M, Yu Y C, Lei G L, et al, 2004. Using radiant balance theory to calculate concrete road-surface temperature in summer[J]. J Appl Meteor Sci, 15(5):623-628(in Chinese).

马宁,程雅茹,武万里,等,2015.福银高速公路宁夏段夏季路面最高温度变化分析及预报模型建立[J].宁夏大学学报(自然科学版),36(4):392-399. Ma N, Cheng Y R, Wu W L, et al, 2015. Analysis on the variation of road surface highest temperature on Ningxia section of Fu-Yin Freeway in the summer and the establishment of its forecast model[J]. J Ningxia Univ (Nat Sci Ed), 36(4):392-399(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).

米前川,高西宁,李玥,等,2022.深度学习方法在干旱预测中的应用[J].应用气象学报,33(1):104-114. Mi Q C, Gao X N, Li Y, et al, 2022. Application of deep learning method to drought prediction[J]. J Appl Meteor Sci, 33(1):104-114(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. Summary of temperature prediction methods of asphalt pavement in foreign countries[J]. J China Foreign 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).
- 舒斯,熊守权,陈英英,等,2019.湖北省高速公路道路结冰预警模型[J].气象,45(11):1589-1599. Shu S, Xiong S Q, Chen Y Y, et al, 2019. Warning model of road surface icing of expressway in Hubei Province[J]. Meteor Mon, 45(11):1589-1599(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).
- 王佳,郭春燕,2017. G6 高速内蒙段冬季公路路面温度变化特征以及预报模型[C]//第 34 届中国气象学会年会 S11 创新驱动智慧气象服务——第七届气象服务发展论坛论文集. 郑州:中国气象学会:351-356. Wang J, Guo C Y, 2017. Characteristics and prediction model of road surface temperature in winter in Inner Mongolia section of G6 Expressway[C]. Meteorological Service Development Forum. Zhengzhou: Chinese Meteorological Society:351-356(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).
- 温华洋,朱华亮,马文周,等,2021. 基于 Bayes 判别法的结冰现象资料序列订正[J]. 气象,47(9):1113-1121. Wen H Y, Zhu H L, Ma W Z, et al, 2021. Data sequence correction of icing weather phenomena based on Bayes discriminant method[J]. Meteor Mon, 47(9):1113-1121(in Chinese).
- 武辉芹,马翠平,杨荣芳,等,2014. 河北省高速公路路面温度变化特征及预报模型[J]. 干旱气象,32(4):665-670, 676. Wu H Q, Ma C P, Yang R F, et al, 2014. Variation characteristics of road surface temperature on highway of Hebei Province and its prediction model[J]. J Arid Meteor, 32(4):665-670, 676(in Chinese).
- 邢志军,牛宇乾,张昱,等,2020. 西藏高原地区高速公路路面温度空间特征分析[J]. 山东交通科技, (5):77-78. Xing Z J, Niu Y Q, Zhang Y, et al, 2020. Study on the spatial characteristics of expressway pavement temperature in Tibet Plateau[J]. Shandong Transp Technol, (5):77-78(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).
- 张荣,李伟平,莫同,2018. 深度学习研究综述[J]. 信息与控制, 47(4):385-397, 410. Zhang R, Li W P, Mo T, 2018. Review of deep learning[J]. Inform Control, 47(4):385-397, 410(in Chinese).
- 中国气象局公共气象服务中心,公安部交通管理科学研究所,2024. 高速公路交通安全管控天气风险预警等级:QX/T 729—2024[S]. 北京:中国气象局. CMA Public Meteorological Service Centre, Traffic Management Research Institute of the Ministry of Public Security, 2024. Weather risk early warning level for expressway traffic safety control: QX/T 729—2024[S]. Beijing: China Meteorological Administration(in Chinese).
- Barber E S, 1957. Calculation of maximum pavement temperatures from weather reports[J]. Highway Res Board Bull, (168):1-8.
- Bishop C M, 2006. Pattern Recognition and Machine Learning[M]. New York:Springer.
- Caruana R, Niculescu-Mizil A, 2006. An empirical comparison of supervised learning algorithms[C]//Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning. Pittsburgh: ACM: 161-168.
- CMA Public Meteorological Service Centre, Traffic Management Research Institute of the Ministry of Public Security. Weather Risk Early Warning Level for Expressway Traffic Safety Control: QX/T 729—2024[S]. Beijing: China Meteorological Administration, 2024.
- Diefenderfer B K, Al-Qadi I L, Diefenderfer S D, 2006. Model to predict pavement temperature profile: development and validation [J]. J Transp Eng, 132(2):162-167.
- Goodfellow I, Bengio Y, Courville A, 2016. Deep Learning[M]. Cambridge: MIT Press.
- Gupta R, Srivastava D, Sahu M, et al, 2021. Artificial intelligence to deep learning: machine intelligence approach for drug discovery [J]. Mol Divers, 25(3):1315-1360.
- LeCun Y, Bengio Y, Hinton G, 2015. Deep learning[J]. Nature, 521(7553):436-444.
- Li J C, Zhou L L, Song L T, 2023. Attention-ordering LSTM for financial time series forecasting[C]//2023 7th International Conference on Electrical, Mechanical and Computer Engineering (ICEMCE). Xi'an: IEEE:990-994.
- Tabrizi S E, Xiao K, van Griensven Thé J, et al, 2021. Hourly road pavement surface temperature forecasting using deep learning models[J]. J Hydrol, 603:126877.
- Xu B, Dan H C, Li L, 2017. Temperature prediction model of asphalt pavement in cold regions based on an improved BP neural network[J]. Appl Therm Eng, 120:568-580.
- Zhang K Y, Li J, Zhu Z W, et al, 2021. Implications from subseasonal prediction skills of the prolonged heavy snow event over southern China in early 2008[J]. Adv Atmos Sci, 38(11):1873-1888.

(本文责编:戴洋)