· 调查报告与分析 ·

深圳市手足口病发病趋势预测：基于气象滞后效应与 LSTM 模型

江凡[1,2]，温莹[2]，宋丽霞[2]，程雁鹏[2]，陈志高[2]，张振[2]，路澉[2]，吕秋莹[1,2]

1. 南方医科大学公共卫生学院，广州 510000；
2. 深圳市疾病预防控制中心传染病预防控制所，深圳 518073
通信作者：吕秋莹，E-mail：sandylv1980@126.com；路澉，E-mail：luyan_72@163.com

【摘　要】目的 基于气象滞后效应与长短期记忆网络（LSTM）模型对广东省深圳市手足口病发病趋势进行预测，为建立更科学、精准的气象疾病风险预警系统提供方法学支撑。**方法** 收集中国疾病预防控制系统中 2015 年 1 月 1 日—2024 年 12 月 31 日深圳市 523 周的手足口病法定传染病报告卡数据，以周统计≤5 岁儿童手足口病病例 353 046 例，整合周均气温（Temp）、相对湿度（RH）、温湿指数（THI）、体感温度（AT）、风速（WS）等气象参数，通过 Spearman 秩相关分析筛选显著相关变量构建基础模型（仅病例数）、单因素模型（病例+滞后 1～3 周 Temp/RH）和复合模型（病例+滞后 1～3 周 THI/AT）3 种 LSTM 模型，以均方根误差（RMSE）、平均绝对误差（MAE）和决定系数（R^2）评估和比较模型性能。**结果** 测试集对比分析结果显示，引入气象因素的所有模型均优于基础模型（RMSE=211.109, MAE=117.654, R^2=0.942）；在单因素模型中，温度滞后 2 周（Temp-lag2 周）模型表现最佳（RMSE=179.915, MAE=108.290, R^2=0.958），相对湿度滞后 2 周（RH-lag2 周）模型在所有模型中最优（RMSE=177.457, MAE=97.873, R^2=0.959）；在复合模型中，温湿指数滞后 2 周（THI-lag2 周）模型最佳（RMSE=185.061, MAE=103.817, R^2=0.956），但仍略逊于 RH-lag2 周模型；RH-lag2 周模型在预测 2025 年前 20 周发病趋势时呈双峰结构（第 10 周与第 15 周），与 2024 年春季高峰峰型高度一致，且较 2015—2024 年平均高峰期（第 9～35 周）整体显著前移。**结论** 基于滞后 2 周 RH 构建的 LSTM 模型可有效表征湿热环境对肠道病毒存活与传播的促进作用，显著提升手足口病发病趋势预测精度。

【关键词】 手足口病；发病趋势；气象滞后效应；长短期记忆网络（LSTM）模型；预测；深圳市

Prediction of hand, foot and mouth disease incidence trends in Shenzhen based on meteorological lag effect and LSTM model

JIANG Fan[1,2], WEN Ying[2], SONG Lixia[2], CHENG Yanpeng[2], CHEN Zhigao[2], ZHANG Zhen[2], LU Yan[2], LV Qiuying[1,2] (*1. School of Public Health*, *Southern Medical University*, *Guangzhou* 510000, *China*; *2. Institute of Infectious Disease Prevention and Control*, *Shenzhen Center for Disease Control and Prevention*, *Shenzhen* 518073, *China*)
Corresponding authors: LU Yan, E-mail: luyan_72@163.com; LV Qiuying, E-mail: sandylv1980@126.com;

【Abstract】 Objective To predict the incidence trends of hand, foot and mouth disease (HFMD) in Shenzhen city, Guangdong province based on the meteorological lag effect and the long short-term memory (LSTM) model, thereby providing methodological support for establishing a more scientific and accurate meteorological disease risk early warning system. **Methods** Data from 523 weeks (January 1, 2015 to December 31, 2024) of HFMD case reports in the China Disease Control and Prevention Information System were collected. A total of 353 046 HFMD cases in children aged ≤5 years were aggregated weekly. Meteorological parameters, including average weekly temperature (Temp), relative humidity (RH), temperature-humidity index (THI), apparent temperature (AT), and wind speed (WS), were integrated. Significant correlated variables were screened by Spearman rank correlation analysis to construct three types of LSTM models: a baseline model (case count only), single-factor models (case count + Temp/RH lagged 1–3 weeks), and composite models (case count + THI/AT lagged 1–3 weeks). Model performance was evaluated and compared via the root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and coefficient of determination (R^2). **Results** Comparative analysis on the test set showed that all the models incorporating meteorological factors outperformed the baseline model (RMSE = 211.109, MAE = 117.654, R^2 = 0.942). Among the single-factor models, the model with Temp lagged by 2 weeks (Temp-lag2) performed best (RMSE = 179.915, MAE = 108.290, R^2 = 0.958), and the model with RH lagged by 2 weeks (RH-lag2) was optimal among all the models (RMSE = 177.457, MAE = 97.873, R^2 = 0.959). Among the composite models, the model with THI lagged by 2 weeks (THI-lag2) performed best (RMSE = 185.061, MAE = 103.817, R^2 = 0.956) but was slightly inferior to the RH-lag2 model. The RH-lag2 model predicted a bimodal pattern (peaks at weeks 10

开放获取：CC BY-NC-ND 4.0　DOI：10.11847/zgggws1147394
基金项目：深圳市科技计划（基础研究）（JCY20200109150715644）
第一作者：江凡（1999—），硕士在读，研究方向：传染病预防与控制。
收稿日期：2025-03-12　修回日期：2025-10-10　录用日期：2026-01-19
利益冲突：不存在　伦理审查：已获取　出版授权：全体作者已与编辑部签署作者贡献声明及版权转让协议

and 15) for the HFMD incidence trends in the first 20 weeks of 2025, which closely matched the spring peak pattern of 2024 and showed a significant overall shift forward compared to the average peak period (weeks 9–35) from 2015 to 2024. **Conclusions** The LSTM model constructed based on RH lagged by 2 weeks effectively characterizes the promoting effects of a hot and humid environment on the survival and transmission of enteroviruses, significantly improving the prediction accuracy of HFMD incidence trends.

【Keywords】 hand, foot and mouth disease; incidence trend; meteorological lag effect; long short-term memory model; prediction; Shenzhen city

手足口病是由肠道病毒引起的急性肠道传染病，常见于<5 岁儿童，临床症状主要表现为手、足、口部红色丘疹，传染性强[1]，可通过粪口、飞沫及密切接触传播[2]。主要流行毒株为肠道病毒 71 型（enterovirus71, EV71）、柯萨奇病毒 A16 型（coxsackievirusA16, CA16）和柯萨奇病毒 A6 型（coxsackievirusA6, CVA6）[3]，广东省深圳市 2008—2020 年平均发病率为 312.25/10 万[4]，自 2016 年 8 月 EV71 疫苗推广后，流行优势株逐渐由 EV71 转为 CA16 和 CVA6，但因不同型别间缺乏交叉保护，发病率仍呈上升趋势。深圳市属沿海亚热带季风气候，全年高温高湿，适合肠道病毒生存繁殖，流行强度高，且具有明显季节性，2015—2019 年发病呈双峰分布（第 9～35 周和 36～47 周），与广州市峰期一致[5]，在托幼机构等人群密集地易引发聚集性疫情。国内外研究表明手足口病发病与温度（temperature, Temp）和相对湿度（relative humidity, RH）等气象因素存在非线性及滞后效应，如“J 形”“U 形”关联[6]。长短期记忆网络（long short-term Memory, LSTM）是特殊的循环神经网络，能捕捉复杂非线性时间序列特征，已用于多种传染病预测[7]，但有关结合气象因素开展手足口病周发病趋势预测的研究较少。本研究基于中国疾病预防控制系统 2015 年 1 月 1 日—2024 年 12 月 31 日深圳市 523 周≤5 岁手足口病法定报告病例数据，结合同期深圳市气象中心监测的周平均 Temp、RH 和风速（wind speed, WS）等资料构建融合气象滞后效应的 LSTM 预测模型，旨在揭示气象因子对手足口病传播的时滞影响及其在发病预测中的作用，为亚热带城市建立气象疾病风险预警体系、合理配置公共卫生资源提供科学依据。结果报告如下。

1 资料与方法

1.1 资料来源 收集中国疾病预防控制系统 2015 年 1 月 1 日—2024 年 12 月 31 日深圳市手足口病法定传染病报告卡中的相关数据，内容包括性别、年龄、职业类型、发病时间和疾病诊断等。根据《国际疾病与相关健康问题统计分类第十版（The International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems 10th Revision, ICD-10）》[8]，手足口病编码为 B08.400。同期周平均 Temp、RH 和 WS 等气象因素监测数据来源于深圳市气象数据中心。本研究经深圳市疾病预防控制中心伦理委员会审查批准（批号：深疾伦字〔2020〕第 002A 号）。

1.2 统计分析

1.2.1 LSTM 模型 LSTM 网络作为循环神经网络（Recurrent Neural Network，RNN）的一种衍生模型，独特的记忆单元和精巧的门控机制使其能对时间序列信息有效捕捉。LSTM 通过其内部结构有效规避了传统 RNN 在长期时间序列学习中遇到的梯度消失或梯度爆炸问题[9]，适用于复杂时间序列的预测，具体公式为[10]：遗忘门：$f_t=\sigma(W_f\cdot[C_{t-1},h_{t-1},x_t]+b_f$；输入门：$i_i=\sigma(W_i\cdot[C_{t-1},h_{t-1},x_t]+b_i$；输出门：$o_t=\sigma(W_o\cdot[C_{t-1},h_{t-1},x_t]+b_o)$；单元输入：$\widetilde{C}_t=\tanh(W_o\cdot[h_{t-1},x_t]+b_t)$；单元输出：$C_t=f_t\times C_{t-1}+(1-f_t)\times\widetilde{C}_t$；隐藏层输出：$h_t=o_t\times\tanh(C_t)$。其中，$W$为权重，$b$为偏置项，$\sigma$是 Sigmoid 激活函数。长期记忆$C_{t-1}$、上一个隐藏状态输出$h_{t-1}$和当前输入$x_t$共同作用产生新的长期记忆$C_t$与新隐藏状态输出$h_t$，实现预测。在此之间，遗忘门通过利用权重$W_f$与 sigmoid 激活函数确定需要遗忘多少信息，输出门利用tanh激活函数为新的长期记忆创建新输入$\widetilde{C}_t$与隐藏状态输出h_t，该输出可被传递到下一个隐藏状态或输出神经元以实现预测。

1.2.2 数据处理

1.2.2.1 气象数据选择 手足口病病毒在湿热环境中的存活时间延长[11]，此外 WS 可影响飞沫传播[12]，因此选择周平均 Temp、RH 和 WS 作为单因素模型因素。为了防止数据驱动的变量筛选可能引发的过拟合问题，本研究也采用复合气象指标来构建 LSTM 模型。使用 Temp、RH、WS 计算复合气象指标温湿指数（temperature-humidity index, THI）和体表温度（apparent temperature, AT）。（1）THI：是综合考虑温度与湿度对人体或动物舒适度影响的指标。

$$\mathrm{THI}=(1.8\times\mathrm{Temp}+32)-(0.55-0.55\times\mathrm{RH}\times0.01)\times(1.8\times\mathrm{Temp}-26) \quad (1)$$

（2）AT：综合考虑了气温、相对湿度和风速对人体感受温度的影响。

$$\mathrm{AT}=\mathrm{Temp}+0.33\times\left(\frac{\mathrm{RH}}{100}\right)\times6.105\times\exp\left(\frac{17.27\times\mathrm{Temp}}{237.7+\mathrm{Temp}}\right)-\mathrm{WS}\times0.7 \quad (2)$$

1.2.2.2 数据整理　本研究根据手足口病在儿童群体中的流行病学分布特征确定病例纳入标准。基于 2013—2022 年传染病监测数据，≤5 岁年龄组占确诊病例总数的 93.65%[13]，因此将研究对象限定于≤5 岁的儿童群体。基于 ISO 8601 周历规范以周一为周起始日[14]，整理和统计每周发病数与周气象数据指标。对 2 组数据进行时间维度匹配处理，形成覆盖 10 个完整流行病学年度的完整时间序列数据集。

1.2.2.3 LSTM 模型建立（图 1）　以每周发病数作为一个时间序列，时间序列长度为 523 周，结合流行病学特征即手足口病潜伏期的 3～5 d 与气象滞后效应构建出 3 种共 13 个模型：基础模型：仅使用周发病数；单因素气象模型：发病数+滞后 1～3 周 Temp/RH；复合气象模型：发病数+滞后 1～3 周 THI/AT，数据拆分遵循 90% 训练集（前 471 周）、10% 测试集（后 52 周）原则，采用 Standard Scaler 进行标准化处理，通过滑动窗口法将序列转换为监督学习格式，定义历史窗口长度为 4，即输入前 4 个时间步的输入变量特征，输出下一时间步的周发病数，隐藏层通过超参数搜索确定（32、64、128、256），支持多层堆叠（1～3 层），层间采用 20% Dropout 防止过拟合，通过 Adam 优化器最小化测试集 MSE 确定最优配置，早停机制监控 300 训练轮次（图 1）。筛选最优模型进行 2025 年前 20 周发病预测，未来的气象因素采用历史同期 4 周均值填充，避免引入额外预测误差。评价指标使用平均绝对误差（mean absolute error, MAE）、均方根误差（root mean squared error, RMSE）和决定系数（coefficient of determination, R^2）。RMSE 和 MAE 值越小，R^2 值越接近 1，模型效果越好。

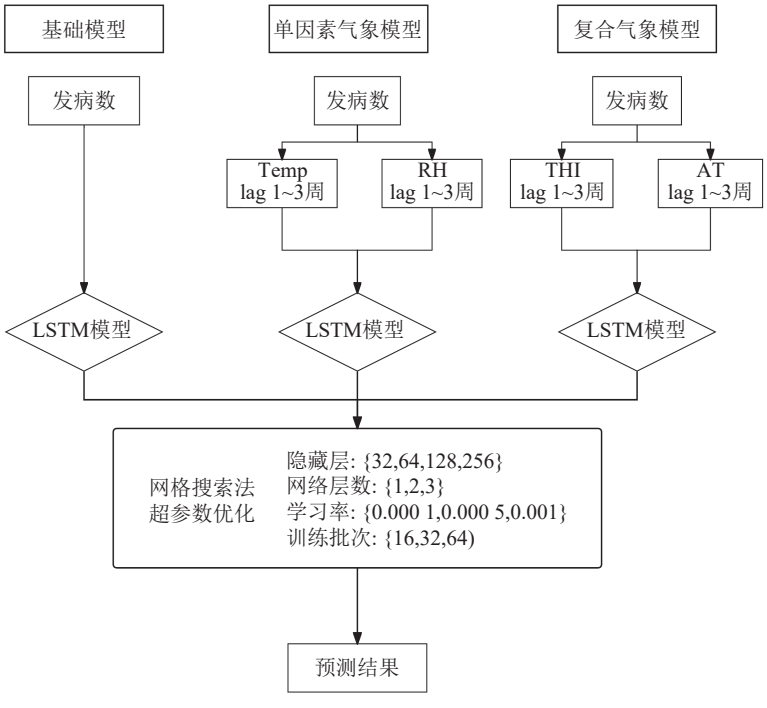


图 1　建模流程图

Fig. 1　Modeling flowchart

1.2.2.4 统计软件　应用 Python 3.8 软件进行统计分析，对周发病数与 5 项气象参数（Temp、RH、WS、THI、AT）开展双变量 Spearman 秩相关分析，评估各气象变量与发病数之间的关联强度，基于 TensorFlow 和 Keras 软件包构建 LSTM 模型,检验水准为双侧检验 α=0.05。

2 结　果

2.1 深圳市 2015—2024 年≤5 岁儿童手足口病周平均发病数和气象因素基本特征（表 1、图 2）　深圳市 2015—2024 年共报告≤5 岁手足口病新发病例 353 046 例，周平均发病数为（675.04±1 089.81）例。其中，男童 211 054 例（59.78%），女童 141 992 例（40.22%）；0～3 岁 222 376 例（62.99%），4～5 岁 130 670 例（37.01%）；幼托机构儿童 95 575 例（27.07%），散居儿童 257 471 例（72.93%）。深圳市 2015—2024 年周平均 Temp 和 RH 均存在明显的季节性波动，THI 夏季最高，AT 与 Temp 变化趋势一致，WS 总体保持在较低水平；手足口病发病数在 2015—2019 年每年呈典型的双峰流行特征（9～35 周和 36～47 周），而 2020—2024 年的流行模式则转变为单峰分布（13～33 周）（图 2）。

表 1　深圳市 2015—2024 年≤5 岁儿童手足口病周平均发病数和气象因素基本特征

Table 1　Basic characteristics of weekly average incidence of hand, foot and mouth disease and meteorological factors in children aged ≤5 years in Shenzhen city, 2015–2024

项目	分类	$\bar{x} \pm s$	Min	P_{25}	P_{50}	P_{75}	Max
手足口病周发病数/例	总体	675.04±1 089.81	0.00	79.00	338.00	900.50	10 308.00
	男童	403.54±656.85	0.00	47.50	200.00	532.00	6 302.00
	女童	271.50±433.56	0.00	31.50	140.00	363.50	4 030.00
	0～3岁	518.15±691.38	0.00	47.25	239.50	579.00	4 231.00
	4～5岁	156.89±228.29	0.00	22.00	97.00	248.75	1 793.00
气象因素	Temp/℃	23.73±4.96	8.20	19.62	24.61	28.20	31.17
	RH/%	75.83±9.56	34.57	70.21	77.86	82.79	94.43
	WS/(m/s)	1.83±0.43	0.90	1.53	1.76	2.01	4.69
	THI	72.65±8.01	48.72	65.99	73.48	80.34	83.87
	AT/℃	30.17±7.46	8.57	24.11	30.69	37.38	41.03

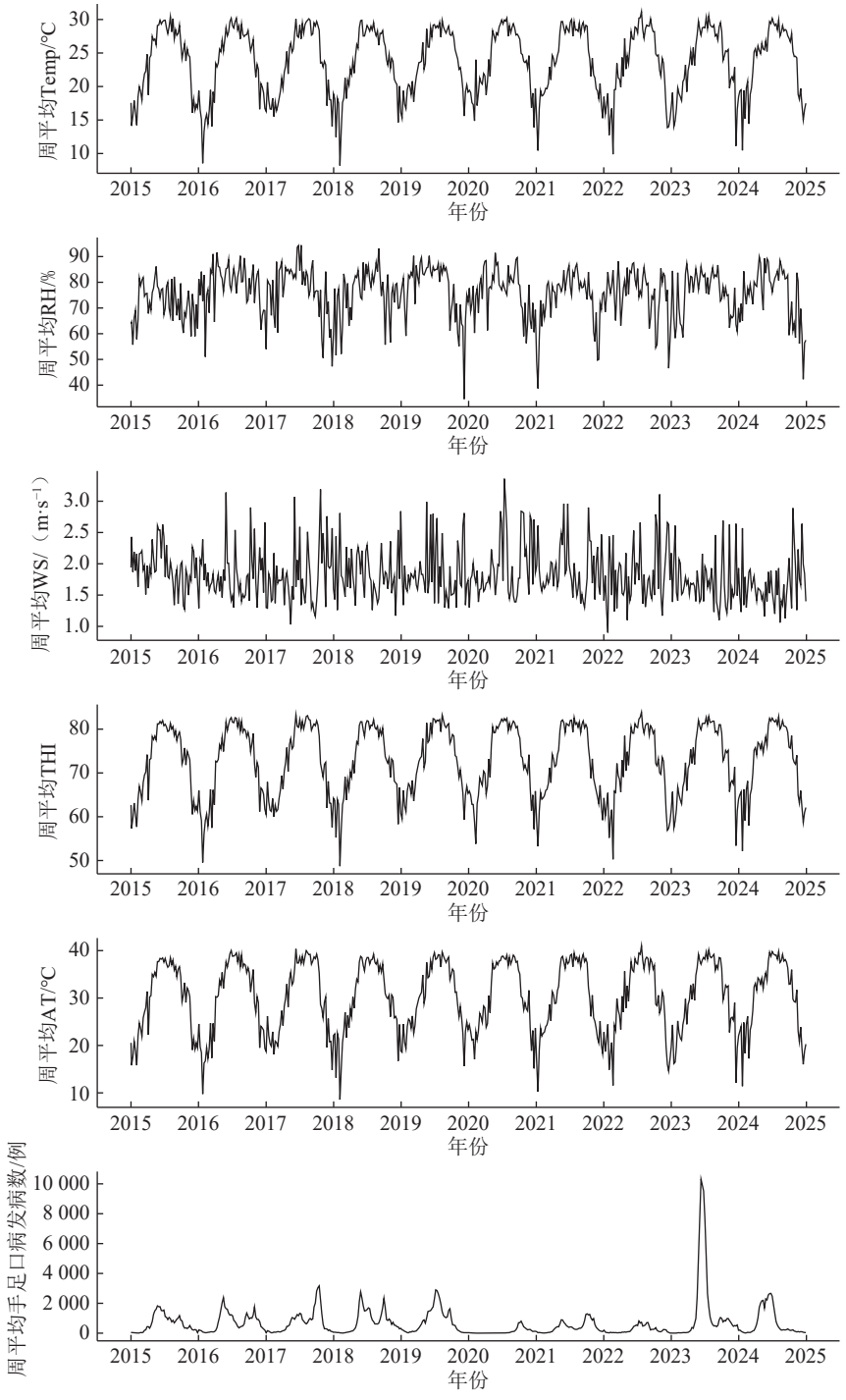


图 2　深圳市 2015—2024 年周平均气象因素及手足口病发病数趋势图

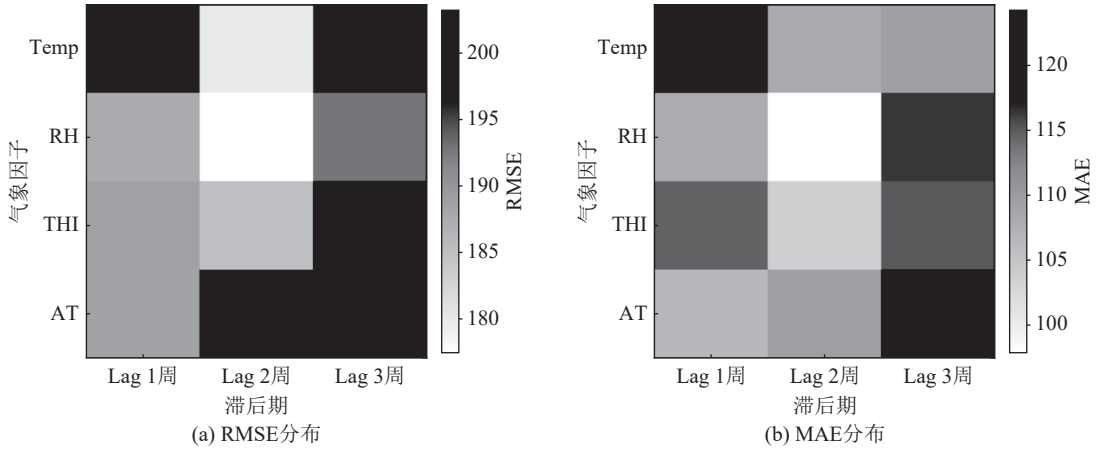
Fig. 2　Trends of weekly average meteorological factors and the number of hand, foot and mouth disease cases in Shenzhen city, 2015–2024

2.2　深圳市 2015—2024 年气象因素与≤5 岁儿童手足口病周发病数相关性分析　Spearman 相关性分析结果显示，周平均 Temp、RH、THI 和 AT 均与深圳市≤5 岁儿童手足口病周平均发病数呈正相关（r=0.641、0.266、0.636、0.632，均 P<0.001）。

2.3　深圳市 2025 年≤5 岁儿童手足口病周发病数预测（表 2、图 3～4）　以基础模型为参照，所有添加气象因素的模型均优于该模型。Temp 单因素模型中滞后 2 周（Temp-lag2 周）效果最优，较基础模型 RMSE 下降 31.194，MAE 下降 9.364，R^2 提升 0.016；RH 单因素模型中也是滞后 2 周（RH-lag2 周）效果最优，较基础模型 RMSE 下降 33.652，MAE 下降 19.781，R^2 提升 0.017，但湿度模型优于温度模型。THI 复合气象模型中滞后 2 周（THI-lag2 周）效果最优，较基础模型 RMSE 下降 26.048，MAE 下降 13.837，R^2 提升 0.014；AT 复合气象模型中滞后 1 周（AT-lag1 周）效果最优，较基础模型 RMSE 下降 22.529，MAE 下降 11.013，R^2 提升 0.012，但二者均未超过基础气象最优模型（RH-lag2 周）。各模型测试集上预测结果具体见表 2。综合 RMSE、MAE 和 R^2 指标选择较优模型（图 3），最终选择 Temp-lag2 周、RH-lag2 周和 THI-lag2 周与基础模型对 2025 年前 20 周发病趋势进行预测，结果如图 4 所示，4 个模型均能较好地捕捉到 2024 年手足口病发病趋势，而添加了气象因素的模型提高了在预测发病高峰时的精确度；基础模型与 Temp-lag2 周模型在预测 2025 年前 20 周手足口病发病趋势时呈单相上升趋势，未出现典型春季高峰，但 Temp-lag2 周模型的上升趋势高于基础模型；RH-lag2 周模型呈现双峰分布（第 10 周与第 15 周），峰型与 2024 年历史曲线高度相似，THI-lag2 周模型为单峰结构于第 8 周达峰；气象模型的预测峰值集中于第 6～14 周，较 2015—2024 年均值第 9～35 周显著前移。

表 2　各模型在测试集上预测结果对比
Table 2　Comparison of prediction results from various models on the test set

模型	分类	RMSE	MAE	R^2值
基础模型		211.109	117.654	0.942
单因素气象模型	Temp-lag1周	201.366	124.251	0.948
	Temp-lag2周	179.915	108.290	0.958
	Temp-lag3周	198.247	109.551	0.949
	RH-lag1周	187.578	108.094	0.954
	RH-lag2周	177.457	97.873	0.959
	RH-lag3周	192.759	116.391	0.952
复合气象模型	THI-lag1周	188.818	114.580	0.954
	THI-lag2周	185.061	103.817	0.956
	THI-lag3周	203.225	115.100	0.947
	AT-lag1周	188.580	106.641	0.954
	AT-lag2周	202.828	109.633	0.947
	AT-lag3周	198.942	122.623	0.949



(a) RMSE分布　(b) MAE分布

图 3　模型评价指标
Fig. 3　Model evaluation metrics

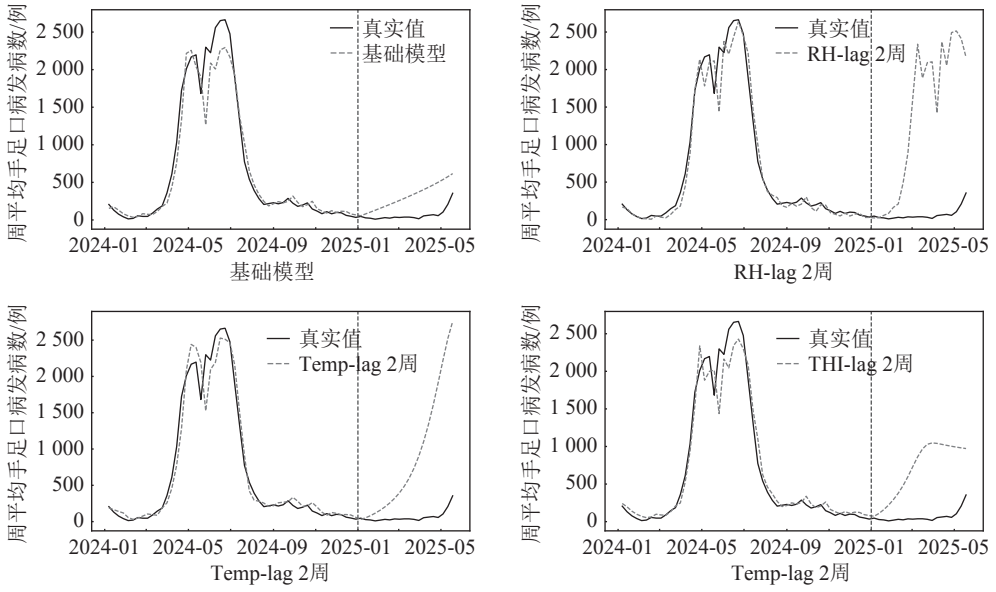


图 4　模型预测结果对比

Fig. 4　Comparison of model prediction results

3 讨　论

深圳市地处中国南海之滨，河流多，为亚热带海洋性季风气候，每年春季（2—4 月）为“回南天”，且夏季高温多雨，空气湿度较大，该时间段与深圳市手足口病流行季基本重合，提示手足口病流行很可能与 Temp 和 RH 相关。本研究结果显示，深圳市 2015—2024 年≤5 岁儿童手足口病周平均发病数与周平均 Temp 和 RH 均呈正相关（r=0.641 和 0.266，均 P<0.001），与多项研究[15–16]结果一致，提示温湿条件是影响手足口病传播的重要环境因素。本研究结果还显示，深圳市≤5 岁儿童手足口病在 2015—2019 年发病高峰呈双峰分布，发病趋势与其他亚热带沿海城市相似[17]，2020—2024 年只有 1 个发病高峰，与福建省 2009—2022 年的研究结果一致[18]。

新加坡的一项研究发现，手足口病风险与 Temp 和降雨量均存在非线性和阈值效应，当最高气温>32 ℃ 时发病风险显著增加，而降雨量过大反而可能降低风险，且以 1～2 周滞后效应最为显著[19]，这与本研究观察到的温湿度正相关以及 lag2 周模型最佳的结果一致；马来西亚全国数据显示，流行高度同步但季节性不规则，气象因素作用有限，而学校放假与人口行为因素影响更大[20]；日本的研究则发现，Temp 与手足口病发病风险呈倒 V 型关系，中高温时发病风险上升，极端高温反而抑制其传播[21]。以上国外研究进一步证实了手足口病与气象因素之间的非线性与滞后关系，同时也强调了人群免疫和行为模式在不同气候带下的差异作用，与本研究中深圳市的研究结果具有较强的可比性。

本研究中，LSTM 模型在考虑滞后效应时，其表现优于自回归积分滑动平均模型（autoregressive integrated moving average, ARIMA）和季节性差分自回归滑动平均模型（seasonal autoregressive integrated moving average, SARIMA）等传统时间序列模型。除 AT 外，其余因子均呈现 lag2 周>lag1 周>lag3 周的规律，其中 RH-lag2 周模型预测效果最佳，此结果与手足口病潜伏期（3～5 d）及病毒在物体表面存活时间（7～10 d）[22]高度一致，体现了模型结果的生物学合理性。Temp-lag2 周模型虽仅次于 RH-lag2 周模型，但预测误差主要集中在高温区间。已有研究表明，Temp 与手足口病的关系并非线性，而更可能呈现倒 V 型或阈值效应，即在中高温范围内风险升高，但在极端高温下因儿童户外活动减少或病毒生存条件受限而导致风险下降[21, 23–24]，因此高温区间的误差集中是预期现象也与国际研究结论相符。而 THI-lag2 周模型虽在复合模型中表现最优，但并未超越单因素气象模型，提示温湿度简单线性组合可能存在信息损失，难以完整反映不同气象因子的异质性作用。

综上所述，本研究基于气象滞后效应和 LSTM 模型，采用深圳市 2015—2019 年气象因素和≤5 岁儿童手足口病周报告数据对未来周发病趋势进行短期预测，不仅考虑到气象因素对当前周次手足口病发病趋势的影响，还考虑到气象因素滞后作用，为手足口病进入流行周期后深圳市医疗卫生服务应对就诊病例快速增加发出预警、居民风险指数发布及时评估建立科学的技术支撑。但结果仍存在一定的局限性，如本研究采用历史气象均值进行未来值填充，未能考虑气候变化趋势对预测结果的影响，也未考虑疫苗接种覆盖率动

态变化对传播链的阻断作用。因此，未来可结合气候模型的气象趋势预测和实时更新的疫苗接种覆盖率，并采用多模型融合与滚动更新的方式，以更精准捕捉气候变化和免疫干预的影响，从而提升手足口病短期预测的准确性。

数据可用性声明　本研究的手足口病发病数据来源于中国疾病预防控制中心的公开数据库，数据可公开获取与使用，访问地址：https://10.249.6.18:8881/cdc/login。本研究所用气象数据由深圳市气象局提供，该数据受版权协议保护，需经授权方可使用，读者可联系该机构申请访问（地址：https://weather.sz.gov.cn），本文中的所有分析、观点和结论仅代表作者立场，不代表深圳市气象局和中国疾病预防控制中心的意见或政策。

参考文献

[1] 吕秋莹, 曹彬, 陈志高, 等. 2016—2020 年深圳市传染病类突发公共卫生事件流行特征分析 [J]. 医学动物防制, 2022, 38(5): 440-443, 447.

[2] Nayak G, Bhuyan S K, Bhuyan R, et al. Global emergence of Enterovirus 71: a systematic review[J]. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 2022, 11(1): 78.

[3] 李小平, 吴亦栋, 周俊, 等. 柯萨奇病毒 A 组 16 型病毒株 VP1 基因序列测定及进化分析研究 [J]. 中国全科医学, 2018, 21(5): 546-550.

[4] 梁兆毅, 孟君, 张艳炜, 等. 深圳市 2008—2020 年手足口病流行特征及 EV71 疫苗接种对其发病率影响 [J]. 中国公共卫生, 2023, 39(2): 249-252.

[5] 李云峰, 钟苑芳, 邓惠云. 2010 年—2019 年广东沙井手足口病流行特征分析 [J]. 江苏卫生事业管理, 2021, 32(2): 266-268.

[6] Guo Z J, Wang Y, Li Y S, et al. Impact of meteorological factors on the incidence of hand-foot-mouth disease in Yangzhou from 2017 to 2022: a time series study[J]. Frontiers in Public Health, 2023, 11: 1278516.

[7] Nadda W, Boonchieng W, Boonchieng E. Influenza, dengue and common cold detection using LSTM with fully connected neural network and keywords selection[J]. BioData Mining, 2022, 15(1): 5.

[8] 北京协和医院, 世界卫生组织国际分类家族合作中心. 疾病和有关健康问题的国际统计分类第十次修订本 [M]. 董景五, 译. 2 版. 北京: 人民卫生出版社, 2008.

[9] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long short-term memory[J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735-1780.

[10] 王松, 张野, 吴亚东. 网络拓扑结构可视化方法研究与发展 [J]. 网络与信息安全学报, 2018, 4(2): 2018014.

[11] 孟浩蓉, 赵庆龙, 黄飙, 等. 广东省、安徽省和吉林省体感温度与手足口病发病的关系及其空间异质性分析 [J]. 中华流行病学杂志, 2021, 42(3): 520-526.

[12] Hu Y H, Peng S Y, Su B J, et al. Laboratory studies on the infectivity of human respiratory viruses: experimental conditions, detections, and resistance to the atmospheric environment[J]. Fundamental Research, 2024, 4(3): 471-483.

[13] 张儒豪, 光旭, 何逸飞, 等. 2013—2022 年广东省深圳市手足口病流行特征和病原学分析 [J]. 疾病监测, 2024, 39(10): 1263-1269.

[14] ISO. Date and time — Representations for information interchange — Part 1: basic rules: ISO 8601-1: 2019[M]. Geneva: ISO, 2019.

[15] 程超, 郑笑十, 潘佳丽, 等. 沈阳地区手足口病流行病学与气象关系探讨 [J]. 中国小儿急救医学, 2021, 28(3): 241-243.

[16] 唐娜, 董洋洋, 马建, 等. 手足口病发病与气象因素相关性的 meta 分析 [J]. 环境与健康杂志, 2021, 38(4): 294-299.

[17] 余婉玲, 吴兆伦, 陈志军, 等. 珠海市斗门区 2013—2022 年手足口病流行病学特征分析 [J]. 中国当代医药, 2023, 30(34): 137-139, 144.

[18] 詹美蓉, 谢忠杭, 蔡少健, 等. 2009—2022 年福建省手足口病变化趋势及时空聚集性分析 [J]. 中国公共卫生, 2024, 40(9): 1040-1044.

[19] Hii Y L, Rocklöv J, Ng N. Short term effects of weather on hand, foot and mouth disease[J]. PLoS One, 2011, 6(2): e16796.

[20] Cox V M, Jahis R, Abu Bakar R S, et al. Spatio-temporal dynamics of hand, foot and mouth disease in Malaysia, 2009–2019[J]. PLoS Neglected Tropical Diseases, 2025, 19(6): e0013174.

[21] Sumi A, Toyoda S, Kanou K, et al. Association between meteorological factors and reported cases of hand, foot, and mouth disease from 2000 to 2015 in Japan[J]. Epidemiology and Infection, 2017, 145(14): 2896-2911.

[22] Rzeżutka A, Cook N. Survival of human enteric viruses in the environment and food[J]. FEMS Microbiology Reviews, 2004, 28(4): 441-453.

[23] Zander K K, Mathew S, Carter S. Behavioural (mal) adaptation to extreme heat in Australia: implications for health and wellbeing[J]. Urban Climate, 2024, 53: 101772.

[24] Chen B H, Sumi A, Toyoda S, et al. Time series analysis of reported cases of hand, foot, and mouth disease from 2010 to 2013 in Wuhan, China[J]. BMC Infectious Diseases, 2015, 15(1): 495.