

台南登革热时空传播及气象驱动的贝叶斯模型*

刘利利^{1,2}, 康晓敏³, 李雅芝⁴, 陈靖⁵

1. 山西大学复杂系统数学技术山西省重点实验室, 山西 太原 030006
2. 山西大学复杂系统研究所, 山西 太原 030006
3. 山西大学数学与统计学院, 山西 太原 030006
4. 黔南民族师范学院数学与统计学院, 贵州 都匀 558000
5. 山西省疾病预防控制中心, 山西 太原 030012

摘要: 2023年台南市遭受严重的登革热疫情, 其传播受到复杂的环境因素影响。分析台南市登革热传播的时空特征, 并厘清影响其传播的关键气候因子, 可为本地化的疫情监测及科学防控提供参考依据。本研究使用标准差椭圆、莫兰指数、相关性分析、多重共线性诊断以及贝叶斯时空模型, 对2023年1—12月台南市的月登革热病例数据和气象记录进行了分析。研究发现, 台南市2023年全年病例数时间上呈现“上升-高峰-下降”的变化趋势, 空间上表现为“散发-随机-聚集-消退”的模式。各气候因子的相对风险排序依次为降雨日数>平均气温>最大瞬间风速>降雨量>日照时数, 不同区域登革热发病风险差异显著, 东区、永康区、安平区、北区为高风险区; 降雨日数与平均气温是影响登革热传播的关键气候因子。

关键词: 登革热; 气候因子; 时空统计方法; 空间自相关; 贝叶斯时空模型; 台南

中图分类号: R181 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(XXXX)XX-0001-10

Bayesian modeling of meteorological drivers of spatiotemporal dengue transmission in Tainan

Liu Lili^{1,2}, Kang Xiaomin³, Li Yazhi⁴, Chen Jing⁵

1. Shanxi Key Laboratory for Mathematical Technology in Complex Systems, Shanxi University, Taiyuan 030006, China
2. Complex Systems Research Center, Shanxi University, Taiyuan 030006, China
3. School of Mathematics and Statistics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China
4. School of Mathematics and Statistics, Qiannan Normal University for Nationalities, Duyun 558000, China
5. Shanxi Provincial Center for Disease Control and Prevention, Taiyuan 030012, China

Abstract: In 2023, Tainan experienced a severe dengue fever epidemic, the spread of which was influenced by complex environmental factors. This study analyzes the spatiotemporal patterns of dengue fever transmission in Tainan and identifies the key meteorological drivers, aiming to provide a scientific basis for local surveillance and evidence-based prevention. Monthly dengue case data and meteorological records for Tainan from January to December 2023 were analyzed using a standard

* 收稿日期: 2026-01-26 录用日期: 2026-05-07 网络首发日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 山西省自然科学基金(202303021211003); 国家自然科学基金(12361102)

作者简介: 刘利利(1985年生), 女; 研究方向: 生物数学; E-mail: liulili03@sxu.edu.cn

通信作者: 李雅芝(1990年生), 女; 研究方向: 生物数学; E-mail: liyz@sgmtu.edu.cn;

陈靖(1979年生), 女; 研究方向: 传染病防控; E-mail: 524210737@qq.com

(李雅芝、陈靖为共同通信作者)



ZR20260035

deviational ellipse analysis, Moran's I , correlation analysis, multicollinearity diagnostics, and a Bayesian spatiotemporal model. The findings reveal a clear temporal pattern of "increase-peak-decline" in case numbers for the full year of 2023. Spatially, the epidemic evolved through four stages: sporadic occurrence, random distribution, clustering, and eventual dissipation. The relative risks of meteorological factors followed the order: number of rainy days > average temperature > maximum instantaneous wind speed > rainfall > sunshine duration. The risk of dengue infection varied significantly across districts, with high risk concentrated in the East, Yongkang, Anping, and North Districts. The number of rainy days and average temperature were identified as the most critical meteorological drivers. The study provides evidence that targeted interventions focusing on high-risk districts, combined with meteorological early warning systems, can effectively support dengue control.

Key words: dengue fever; meteorological factors; spatiotemporal statistical method; spatial autocorrelation analysis; Bayesian spatiotemporal model; Tainan

登革热作为一种典型的蚊媒传染病,由携带登革病毒的埃及伊蚊(*Aedes aegypti*)和白纹伊蚊(*A. albopictus*)叮咬传播。感染登革病毒后,一般会经历3~4 d的潜伏期,其间会产生如突发高热(39~40 °C)、剧烈头痛、肌肉和关节疼痛等典型症状(World Health Organization, 2024)。登革热的传播受温度、湿度、降雨等气候因素的影响,高温环境会加快登革病毒在蚊子体内的增殖,延长其活动时间;而降雨形成的积水区域,则为蚊子繁殖提供了理想场所(武丹等,2022),提高其孵化率,增加其密度,间接增加蚊子的吸血频率。鉴于此,深入研究影响登革热传播的关键气候因子,有助于揭示登革热在气候变化影响下的扩散趋势,为公共卫生部门开展长期规划与资源调配提供一定依据。

近年来,地理信息系统(GIS)和贝叶斯时空模型已成为研究登革热流行病学的重要分析工具。通过使用GIS和贝叶斯时空模型等方法,多项研究均发现降雨、温度、湿度和蚊虫密度是影响登革热传播的关键气候因子,并且多种因素的交互作用会增加登革热的传播风险(李云峰等,2021;陈业滨等,2016)。同时,有研究发现相比无气候因子的预测模型,考虑气候因子的模型准确性更高(敖琳璐等,2020),且气温和降雨量是登革热病例数出现波动的核心驱动因子(Martínez-Bello et al., 2017)。此外,研究发现珠江三角洲与韩江三角洲是广东省登革热的高危区域(樊景春等,2013)。尽管已开展了丰富的与登革热传播气候因子相关的研究,但现有研究多侧重单一时间或空间维度分析,针对登革热高暴发年份的单区域精细时空解剖仍较为有限,未能全面了解疫情暴发期的时空动态规律与关键驱动机制,因此难以系统揭示登革热疫情演变的动态规律。

据报道,2023年台湾地区遭遇了近10年最为严重的登革热疫情,共报告登革热确诊病例26 701例,其中台南市确诊病例高达21 560例,成为此次登革热疫情的聚集区域,对当地家庭和社会造成极大的医疗和经济负担。为分析气候因子如何影响此次台南市登革热传播,本研究以台南市为研究对象,系统分析2023年该地区登革热疫情的时空传播特征,识别疫情暴发的关键气候因子;结合病例及气象数据,构建贝叶斯时空模型,识别并深入分析台南市各关键气候因子对登革热传播的相对发病风险。研究结果可为台南市登革热防控提供参考依据,帮助卫生部门在高风险时段和区域精准投放防控资源,指导学校和社区等人群集中地在雨后关键时期及时清除蚊虫孳生源,避免疫情扩散。

1 材料与方法

1.1 研究区域

台南市位于台湾地区西南部,地处120.21°E, 22.99°N,东临台湾山脉,西濒台湾海峡,北界嘉南平原,南接高雄市,共包括中西区、东区、安南区、永康区等37个市辖区。

1.2 资料来源

本研究数据来源网站在中国大陆地区访问时存在一定网络延迟或不稳定性;为确保数据完整性,采集工作在数据源服务器所处网络环境下完成。

1.2.1 登革热数据 台南市登革热病例数据来源于传染病统计数据查询系统,该网站提供了台南市各市辖区2023年1—12月登革热确诊病例及境外移入病例数(<https://nidss.cdc.gov.tw/nndss/disease?id=061>)。根据各地区累计确诊病例数,将研究区域划分为5个风险类(表1)。

表1 2023年台南登革热风险区域等级划分¹⁾

Table 1 Classification of dengue fever risk areas in Tainan, 2023

风险等级	风险描述	病例数(设定范围)/人	包含区域
一类	低风险区	0~66	北门区、将军区、七股区、学甲区、西港区、安定区、新市区、下营区、盐水区、后壁区、新营区、柳营区、六甲区、官田区、大内区、山上区、左镇区、龙崎区、南化区、玉井区、楠西区、东山区、白河区
二类	较低风险区	67~182	佳里区、麻豆区、善化区、新化区
三类	中风险区	183~803	安平区、仁德区、归仁区、关庙区
四类	较高风险区	804~1 515	—
五类	高风险区	1 516~4 336	安南区、北区、中西区、南区、东区、永康区

1)“—”表示无数据。

1.2.2 气象数据 基于台湾地区气象专责机构官网,收集到2023年1—12月台南测站每月气象数据,包括平均气温、降雨量、最大10-min风速、最大

瞬间风速、相对湿度、气压、降雨日数、日照时数8项数据(<https://www.cwa.gov.tw/V8/C/C/Statistics/monthlydata.html>),具体数值见表2。

表2 2023年台南气候因子数据

Table 2 Meteorological factors in Tainan, 2023

月份	平均气温/ °C	降雨量/ mm	最大10-min风速/ (m·s ⁻¹)	最大瞬间风速/ (m·s ⁻¹)	相对湿度 /%	气压/ hPa	降雨日数/ d	日照时数/ h
1	18.0	0.5	11.9	21.9	76.0	1 016.0	1.0	209.8
2	18.9	0.0	7.9	14.6	75.0	1 015.3	0.0	195.7
3	21.6	0.0	7.9	13.8	70.0	1 013.8	0.0	274.6
4	25.3	1.0	8.4	13.5	73.0	1 009.3	2.0	221.7
5	27.4	28.5	9.1	13.4	74.0	1 007.1	8.0	190.7
6	29.4	179.5	10.1	17.1	77.0	1 005.1	11.0	208.6
7	29.8	264.0	13.6	27.3	76.0	1 004.5	14.0	221.6
8	29.0	410.0	9.0	16.5	81.0	1 002.4	15.0	151.0
9	28.7	394.0	12.5	21.8	79.0	1 005.4	11.0	177.3
10	27.1	17.0	14.0	29.9	74.0	1 010.1	2.0	186.0
11	24.1	0.0	9.4	16.2	68.0	1 014.6	0.0	246.2
12	20.7	15.0	8.1	15.6	73.0	1 016.3	3.0	153.9

1.3 研究方法

1.3.1 标准差椭圆分析 标准差椭圆(SDE, standard deviational ellipse)分析是一种空间统计分析方法(又称方向分布工具),通过计算一组空间数据的平均中心以及x、y坐标的标准差,生成一个椭圆来描述数据的空间分布特征。椭圆中心代表疾病传播的重心,长轴和短轴方向分别代表要素空间分布主趋势方向和次趋势方向,长轴和短轴长度分别表征要素空间分布在主趋势方向和次趋势方向偏离重心的程度,扁率等于长短轴之差与长轴长度的比值,体现要素空间分布形态(周莹等,2025)。相关操作借助ArcGIS 10.8完成。

1.3.2 莫兰指数分析 莫兰指数是一种衡量空间自相关性的统计指标,通过计算空间数据的自相关系数来判断观测值在地理空间上是否存在聚集或分散的趋势。莫兰指数分为全局莫兰指数(Global Moran's I)和局部莫兰指数(Local Moran's I)。全局莫兰指数可用于分析整体上的空间自相关性,而局部莫兰指数可识别特定区域及其邻域的空间关联模式(Waldhör,1996;徐维超,2012)。相关操作借助ArcGIS 10.8完成。

1.3.3 相关性分析 Spearman相关系数是一种衡量变量依赖性的非参数统计指标,利用单调方程评价2个统计量之间相关性的强度和方向。该方法基

于变量等级变换后的等级数据排序计算秩次差异,适用于单调非线性关系的相关性分析(朱钰等,2020)。相关操作借助 R 4.3.3 完成。

1.3.4 多重共线性分析 多重共线性是指线性回归模型中,2个或多个解释变量之间存在高度相关关系。当自变量之间存在多重共线性时,会影响回归模型的稳定性和可靠性,进而降低模型估计的准确性。方差膨胀因子(VIF, variance inflation factor)是检验变量间多重共线性的常用方法(潘花等,2024),本研究将借助 VIF 来检测多重共线性,指标定义如下:

$$V_i = \frac{1}{1 - R_i^2},$$

其中 V_i 为自变量 i 对应的 VIF 值, R_i^2 是自变量 i 在回归模型中的决定系数。判断依据为,当 $0 < V_i \leq 5$ 时,变量 i 与其他变量无多重共线性;当 $5 < V_i \leq 10$ 时,有较弱的多重共线性;当 $10 < V_i \leq 100$ 时,有较强的多重共线性;当 $V_i > 100$ 时,有显著的多重共线性。通过手动剔除 VIF 值最高的变量,不断更新 VIF 值,直到所有变量的 VIF 值均小于 10,从而消除各个变量间的多重共线性。相关操作借助 R 4.3.3 完成。

1.3.5 贝叶斯时空模型 贝叶斯时空模型是以贝叶斯统计理论为基础,为分析具有时空特性资料的空间主效应、时间主效应或时空交互效应而建立的一类统计模型。模型中将所有未知参数均看作随机变量,利用先验分布进行描述,对风险进行估算时可借助邻近时空信息,较好地解决复杂空间和时间结构中的异质性问题(陈思秋等,2020; Jang et al., 2007)。

本研究采用贝叶斯时空模型分析气候因子对登革热发病风险的影响。将区域 i 在时间 t 的发病人数用 Y_{it} 表示,并假设 Y_{it} 服从泊松分布,则 $\lambda_{it} = E_{it}\theta_{it}$,其中 λ_{it} 代表 Y_{it} 的实际发病人数, E_{it} 代表 Y_{it} 的预期发病人数, θ_{it} 代表 Y_{it} 的发病相对风险(RR, relative risk),即 λ_{it}/E_{it} ,用于衡量实际发病数与预期发病数之间的偏差程度。贝叶斯时空模型的基本表达式如下:

$$\log(\theta_{it}) = \alpha_0 + \sum \beta_k X_{itk} + \mu_i + \vartheta_i + \gamma_t + \varnothing_{it},$$

其中 α_0 为截距项, β_k 为气象因素 X_{itk} 的固定效应系数, μ_i 与 ϑ_i 分别为空间结构效应与空间非结构效应, γ_t 为时间随机效应, \varnothing_{it} 为时空交互效应。先验分布设定如下:固定效应 α_0 采用正态分布 $N(0, 10^4)$ 无信息先验,固定效应 β_k 采用正态分布 $N(0, 10^2)$ 弱

信息先验; μ_i 采用条件自回归先验, ϑ_i 采用正态分布, γ_t 采用一阶随机游走先验。该先验体系既能反映空间邻近性与时间连续性,又可避免过度约束。

相关操作借助 R 语言完成,使用 brms 包(版本 v 2.21.0)调用 Stan 引擎实现贝叶斯建模,运行过程中设置 4 条马尔可夫链,每条链迭代 6 000 次(预烧 2 000 次)。模型运行完成后,将进行收敛性诊断和模型评估,其中采用 Gelman-Rubin 统计量(\hat{R} , 非常接近 1)和有效样本量(占比越大越好)进行收敛性诊断,采用后验预测检验与留一法交叉验证综合评估模型的拟合效果。

2 结果与分析

2.1 流行趋势分析

2.1.1 时间分布 鉴于 2023 年第 1 至第 22 周,台南市各地区确诊病例数较少,因此仅绘制了第 23 至第 52 周的登革热确诊病例数变化趋势(图 1)。病例数整体呈现“上升-高峰-下降”的变化趋势。随着气候因素的变化,登革热传播媒介处于活跃期,第 34 至第 39 周病例数显著增加,并在第 39 周达到最高峰,周病例数新增高达 2 343 例。

2.1.2 空间分布 图 2 和表 3 展示了台南市 2023 年 6—12 月各区病例数标准差椭圆分析的结果。不同月份椭圆的周长与面积呈现递增趋势(图 2),表明随时间变化,台南市登革热病例在地理空间上的分布范围不断扩大,涉及的区域数量逐渐增多。对比表 3 中数据发现,6—12 月 x 轴中心坐标数值整体略有下降,说明病例集中区域在东西方向上略有向西偏移的趋势; y 轴中心坐标数值逐渐增大,表明病例集中区域在南北方向上呈向北偏移的趋势。这种中心位置的偏移意味着病例高发核心区域在台南市地理空间上发生了改变,如 6—12 月椭圆中心位置由东区逐步向北区和永康区偏移。综上所述,2023 年 6—12 月台南市登革热病例在空间分布上呈现出范围扩大、中心偏移、离散度增加以及分布方向多变的特征。

2.1.3 空间自相关 通过全局莫兰指数(I)分析,得到台南市 2023 年逐月登革热病例的空间自相关分析结果(表 4),揭示了登革热空间分布的动态演化规律。1 月 $I < 0$ ($P < 0.05$),表明 1 月登革热病例在空间上分布较为分散,无明显聚集现象。2—5 月 I 总体接近 0 ($P > 0.05$),表明 2—5 月的病例分布趋于随机波动模式,且在空间分布上无明显的聚集或分散趋势。6—10 月 $I > 0$ ($P < 0.05$),表明病例分

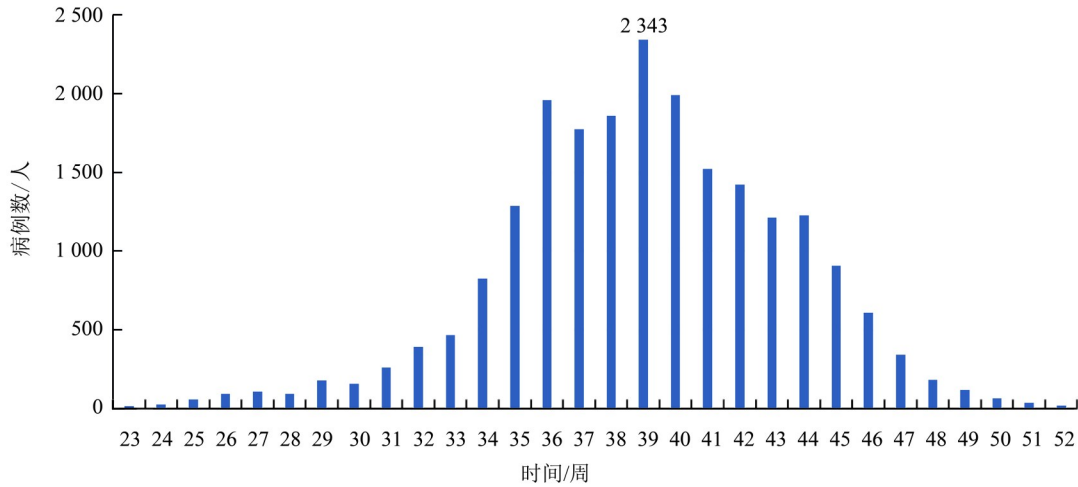


图1 台南2023年第23至第52周登革热周病例数

Fig. 1 Weekly number of dengue fever cases in Tainan from week 23 to week 52, 2023

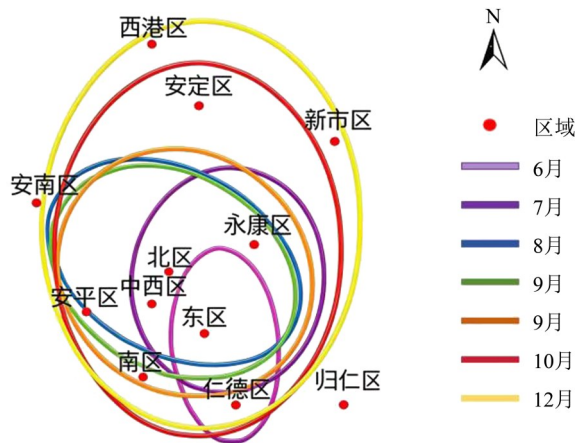


图2 标准椭圆差图

Fig. 2 Standard ellipse difference plot

布开始呈现显著的空间聚集模式,并且数值逐渐增大,这可能与气候因子(如降雨量增加)有关。11—12月 $I > 0$ ($P < 0.05$),但数值明显下降,表明病例分布呈现逐步消退的模式。综上所述,登革热空间分布呈显著的“分散→随机→聚集→消退”4阶段

模式。

2.2 气候因子分析

2023年1—12月,台南市降雨量和降雨日数整体呈现先上升再下降的趋势,且均在8月达到峰值(表2),而相对湿度、气压、日照时数、最大10-min风速、最大瞬间风速、气温变化均相差不大;6—9月,气温、相对湿度明显高于其他月,而气压则低于其他月。结合登革热病例数变化趋势(图1)可知,登革热在6—9月为传播上升期,因此气候因子可能影响登革热传播。

2.3 相关性分析

借助R软件中的“ggplot2”和“ggdendro”包,图3展示了台南市2023年1—12月各气候因子与登革热确诊病例数的相关性。各气候因子对登革热病例数的影响程度强弱不同,数值越大表示影响越强,因此得到各气候因子相关性依次为降雨量=最大10-min风速>平均气温=最大瞬间风速>降雨日数>日照时数>气压>相对湿度。其中,病例数

表3 标准差椭圆参数

Table 3 Standard deviational ellipse parameters

月份	周长/m	面积/m ²	x轴中心坐标	y轴中心坐标	x轴标准距离/m	y轴标准距离/m
6	0.247	0.004	120.236°E	22.965°N	0.026	0.051
7	0.333	0.009	120.237°E	22.999°N	0.047	0.058
8	0.362	0.010	120.210°E	23.008°N	0.067	0.047
9	0.363	0.010	120.210°E	23.002°N	0.065	0.050
10	0.399	0.013	120.216°E	23.002°N	0.060	0.067
11	0.529	0.021	120.222°E	23.014°N	0.071	0.096
12	0.581	0.026	120.224°E	23.027°N	0.078	0.105

表4 台南市登革热病例空间自相关特征
Table 4 Spatial autocorrelation characteristics of dengue fever cases in Tainan

月份	全局莫兰指数(I)	Z值	P值
1	-0.096	-2.142	0.032
2	-0.021	0.206	0.837
3	-0.164	-1.359	0.174
4	-0.031	-0.089	0.929
5	-0.050	-0.709	0.479
6	0.227	3.260	0.001
7	0.304	3.488	0.001
8	0.440	4.469	0.000
9	0.832	7.889	0.000
10	1.065	10.049	0.000
11	0.838	6.670	0.000
12	0.345	4.586	0.000

与降雨量、最大 10-min 风速、平均气温、最大瞬间风速、降雨日数呈中等程度正相关,这表明风速和雨量增加可能促进登革热传播;病例数与气压和日照时数呈负相关,表明气压升高和日照时间增长可能抑制登革热发生;且病例数与相对湿度之间为正相关性但影响较弱。此外,部分气候因子间存在强相关性,降雨量与降雨日数呈极强正相关($r = 0.98$),平均气温与气压呈极强负相关($r = -0.94$)。这些强相关性反映了气候因子间固有的物理联系,降雨量与降雨日数共同表征降水特征,气温与气压受热力学平衡制约。然而,这种强相关性可能引发变量间的多重共线性,影响模型估计的稳定性。

2.4 多重共线性分析

为消除气候因子变量间的多重共线性,本研究采用 VIF 法进行逐步筛选。初始纳入平均气温、雨量、最大 10-min 风速、最大瞬间风速、相对湿度、气压、降雨日数、日照时数共 8 个气象变量。计算 VIF 值后,剔除 VIF 值最高的变量,如此重复计算,直至所有变量的 $VIF \leq 10$ 或仅剩关键变量。

具体逐步剔除过程如下:1)使用初始 8 个变量计算 VIF 后,发现气压 $VIF=88.405$ (最高),剔除;2)使用剩下的 7 个变量计算 VIF 后,发现最大 10-min 风速 $VIF=17.776$ (最高),剔除;3)剩余 6 个变量中,除降雨日数外,其他 5 个均满足 $VIF < 10$,多重共线性消除。此时降雨日数的 $VIF=10.04$,略高于常规阈值,但在后续分析过程中仍予以保留,主要

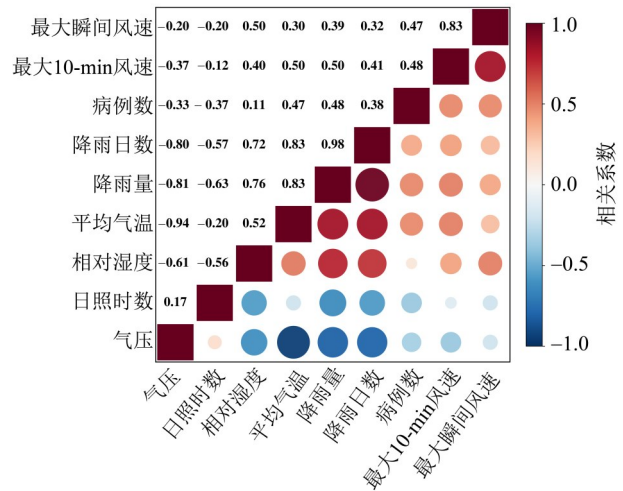


图3 登革热与气候因子的相关性

Fig. 3 Correlation analysis between dengue fever and meteorological factors

原因如下:1)降雨是登革热传播的关键驱动因素,且降雨日数与雨量高度相关,二者反映相似的生物学过程,因此,降雨日数与登革热传播媒介蚊子的密度具有紧密关联,若被剔除可能损失重要信息;2)VIF 仅略高于阈值,属于弱共线性,保留该变量对后续模型估计结果的影响有限;3)接下来进行的贝叶斯建模采用正则化先验,可进一步削弱共线性影响。

6 个变量的方差膨胀因子结果见表 5。其中,相对湿度对登革热病例数的影响不具有统计学意义($P=0.678 > 0.05$),故剔除该因素。因此,最终纳入后续模型分析的气候因子变量有 5 个,分别为平均气温、降雨量、最大瞬间风速、降雨日数、日照时数。

表5 方差膨胀因子结果

Table 5 Variance inflation factor results

气候因子	P值	VIF值
平均气温	0.025	4.280
降雨量	0.007	6.069
最大瞬间风速	0.047	1.223
相对湿度	0.678	5.560
降雨日数	0.006	10.040
日照时数	0.076	1.956

2.5 贝叶斯时空模型

本研究设置了 4 条马尔可夫链,使用 4 个核心并行计算来提高计算效率,并且使每条链迭代 4 000 次用于调整采样器的适应度,避免采样过程中出现发散情况。模型收敛性诊断采用 R-hat 与有效样本

量占比进行判定, $R\text{-hat}$ 值范围为 1.00~1.02, 有效样本量占比均大于 0.1, 满足模型收敛标准, 参数估计结果可靠。收敛性通过后, 采用后验预测检验 (PPC) 与留一法交叉验证 (LOO-CV) 对模型的拟合效果进行综合评估。结果显示, 后验预测 P 值为 0.42, 接近 0.5, 提示模型拟合值与实际观测病例数的差异无统计学意义, 拟合效果良好; 留一法交叉验证 LOO 信息准则 (LOO-IC) 为 1 246.38, 标准误差为 35.72, 交叉验证误差较小, 因此模型具备稳定的预测能力。

本研究使用通过收敛诊断和符合拟合优度的贝叶斯时空模型计算得到台南市 37 个区登革热发病的 95% 可信区间 (95%CI) (表 6); 其中, 表 7 根据自然断点法, 将表 6 中各区域的登革热发病空间相对风险进行了分级划分。各气候因子的 RR 及

95%CI 见表 8。

由表 6、表 7 可知, 东区、永康区、安平区、北区为高风险区域, 需强化蚊虫防控、环境整治及监测预警; 佳里区、南区等 8 个区域为较高风险区域, 也应重点关注; 归仁区、西港区等 11 个区域风险适中, 安定区、山上区等 10 个区域风险较低, 南化区、学甲区、盐水区、白河区风险最低, 但仍需做好基础防控。由表 8 可知, 不同气候因子对台南市登革热传播的影响方向均为正相关, 且各气候因子的相对风险排序依次为降雨日数 > 平均气温 > 最大瞬间风速 > 降雨量 > 日照时数, 其中降雨日数与平均气温的 95%CI 均不包含 1, 因此降雨日数与平均气温是影响台南市登革热传播的关键气候因子。

表 6 台南市登革热发病空间相对风险分布

Table 6 Spatial relative risk distribution of dengue fever incidence in Tainan

区域	RR(95%CI)	区域	RR(95%CI)
安定区	0.595(0.179, 1.409)	南化区	0.346(0.035, 0.757)
安南区	1.878(0.141, 77.950)	南区	2.062(0.260, 67.620)
安平区	3.487(1.766, 17.840)	楠西区	0.405(0.025, 1.233)
白河区	0.184(0.001, 1.256)	七股区	0.400(0.118, 1.106)
北门区	0.838(0.077, 4.578)	仁德区	1.941(0.788, 18.960)
北区	2.925(0.749, 65.940)	山上区	0.587(0.021, 3.911)
大内区	0.702(0.038, 4.393)	善化区	0.808(0.223, 2.558)
东区	4.276(0.734, 103.470)	西港区	1.170(0.265, 4.176)
东山区	0.460(0.021, 7.191)	下营区	0.784(0.059, 4.600)
关庙区	1.007(0.126, 12.860)	新化区	1.590(0.942, 3.628)
官田区	0.502(0.057, 0.737)	新市区	1.101(0.401, 1.827)
归仁区	1.188(0.198, 11.530)	新营区	1.406(0.356, 8.478)
后壁区	0.428(0.004, 3.839)	学甲区	0.327(0.069, 1.142)
佳里区	2.278(0.710, 8.648)	盐水区	0.295(0.052, 1.111)
将军区	0.724(0.082, 1.303)	永康区	4.050(0.371, 78.360)
柳营区	0.498(0.036, 1.295)	玉井区	0.481(0.020, 1.416)
六甲区	0.412(0.020, 1.448)	中西区	1.540(0.266, 36.010)
龙崎区	0.952(0.161, 3.302)	左镇区	0.922(0.088, 6.616)
麻豆区	1.754(0.725, 7.075)		

3 讨论

3.1 登革热传播与气候因子的关系

本研究主要对 2023 年台南市的登革热疫情和气象数据进行分析, 发现全年登革热疫情主要呈现

出 1 月病例比较分散, 2—5 月出现随机性波动, 6—10 月形成聚集模式, 11—12 月逐步消退的变化特征。1 月气温较低, 蚊子出生率较低, 故登革热传播效率较低; 2—5 月, 随着气温逐渐升高, 蚊子出生率上升, 登革病毒传播的可能性增加, 此时需要开始

表 7 台南市登革热发病空间相对风险分级划分

Table 7 Classification of spatial relative risk levels for dengue fever incidence in Tainan

风险等级	风险描述	RR 范围	包含区域
一类	低风险	0.184~0.346	南化区、学甲区、盐水区、白河区
二类	较低风险	0.347~0.595	安定区、山上区、官田区、柳营区、玉井区、东山区、后壁区、六甲区、楠西区、七股区
三类	中风险	0.596~1.188	归仁区、西港区、新市区、关庙区、龙崎区、左镇区、北门区、善化区、下营区、将军区、大内区
四类	较高风险	1.189~2.278	佳里区、南区、仁德区、安南区、麻豆区、新化区、中西区、新营区
五类	高风险	2.279~4.276	东区、永康区、安平区、北区

表 8 各气候因子的 RR 及 95%CI

Table 8 RR and 95%CI of each meteorological factor

气候因子	RR	95%CI
降雨日数	1.561	(1.212, 1.980)
平均气温	1.039	(1.001, 1.062)
最大瞬间风速	1.011	(0.973, 1.056)
日照时数	0.990	(0.965, 1.029)
降雨量	1.000	(0.971, 1.045)

介入防控;6—10月,气温高且环境潮湿,蚊子出生率达到峰值,降雨增加了蚊子的孳生地,对于一些特定的社区特别是在老旧城区,合适的气候加上人口流动且密度高,最终导致多个地方同时出现疫情,说明前期的聚集性疫情未得到有效控制,登革病毒容易成功传播并形成聚集;11—12月,气温逐渐降低,蚊子活跃性下降,全域疫情逐步消退。因此,在登革病毒传播聚集形成前开展早期干预,在防止登革热传播过程中的作用至关重要。

台南市不同区域暴发登革热的风险具有显著差异,东区、永康区、安平区、北区4个区域的风险偏高。北区主要为老旧建筑并且人口密集,蚊子孳生环境不易清理,且人流量大也可能加速疫情扩散。东区主要是校园和住宅区,存在大量的容器积水,也容易孳生蚊虫。永康区主要以建筑工地为主,工业容器也非常适合蚊虫孳生。而安平区作为港口区域,废弃容器偏多,部分观光区的人工景观等都可能成为蚊子繁殖的理想地。

各气候因子对登革热感染病例的影响程度依次为降雨日数>平均气温>最大瞬间风速>降雨量>日照时数。而降雨日数和平均气温是2个最为关键的因素,其主要通过影响蚊子的活动与繁殖达到影响登革热传播的目的。气温在25~32℃时,有利于蚊子叮咬吸血和病毒在蚊子体内复制,而低于25℃

时会抑制蚊子的活跃程度与病毒增殖能力;而降雨可能造成积水,为蚊子提供繁殖场所从而增加其密度,但暴雨又可能冲刷积水而减少其孳生环境,如果雨后积水未被及时清理,更容易造成蚊虫数量反弹,进而增加登革热传播风险。这与已有研究发现温度变化影响蚊虫的繁殖和活动,在一定程度上导致登革热传播风险增加的结果一致(葛文鑫等,2019)。此外,高温、降雨增加与登革热病例数的增加也呈现出显著相关性(Annan et al., 2023)。

3.2 风速与登革热病例数呈正相关的原因

本研究发现,最大10-min风速与登革热病例数呈中等程度正相关,且影响强度与降雨量相近,该结果与部分研究提出的风速具有保护作用的结论不一致(Gui et al., 2022; Xiang et al., 2017)。结合研究区域特征与数据特点,出现上述差异的原因如下:1)台南市特殊的地理位置和气象条件导致风与降雨存在强协同作用。台南市地处台湾西南部,为台风与热带气旋影响较大的区域,研究期间出现的较大风速多与强降雨、雷暴天气同步出现。尽管大风在一定程度上会降低伊蚊飞行与叮咬效率,但风雨叠加会大幅增加容器、地表与建筑死角等积水范围与存留时间,为登革热媒介蚊子的繁殖提供更有利条件。本研究收集到的月度汇总数据中,降雨带来的蚊虫孳生优势占主导,最终表现为风速与确诊病例数呈正相关。2)时间聚合尺度带来结果偏差。本研究使用月度气象累计数据开展分析,而风速对蚊虫活动的抑制作用多体现在小时、日或周等短时间尺度。以月度均值进行统计时,短时大风的抑制效应被平滑弱化,难以在模型中体现,因此与基于高频观测数据的研究结论之间存在差异。3)空间混杂因素可能干扰关联结果。台南市沿海、港口及人口密集建成区往往风速更高,而这些区域同时也是登革热高发区域,人口流动大、环境复杂、蚊虫孳生地更难清理。在未完全控制人口密度、建筑环

境、防控强度等因素的情况下,易出现风速与病例数之间的虚假正向关联。4)风速指标选取不同带来结论差异。本研究选用最大 10-min 风速,侧重反映极端风况;而多数认为风速为保护因素的研究多采用日均风速(Gui et al.,2022;郭钜旋等,2017)。最大 10-min 风速更易与台风、强对流等极端天气绑定,其伴随的降雨效应更突出,因此更易呈现与病例数正相关的特点。

本研究观测到的风速与确诊病例数之间具有正相关性的结论仍存在一定局限性,其生物学机制与真实效应尚需进一步验证。后续可采用逐日或逐时气象数据,结合分布滞后非线性模型等方法,更精细化地研究平均风速与最大风速的不同效应,并纳入社会经济、人口、环境等多源变量,以精准评估风速对登革热传播的独立作用与滞后效应,从而提高结论的可靠性。

3.3 气候因子的滞后效应

登革热传播存在气候因子滞后效应,已有研究采用分布式滞后非线性模型分析了 2015—2024 年的登革热确诊病例与气候因子间的关联,发现随着时间累积,最低温度对登革热传播风险的影响逐渐增强,并且在滞后 5 个月后达到峰值;滞后 0 至 2 个月,降雨因素对登革热传播风险的影响最大;滞后 12 个月,风速仍呈现强关联(Polrob et al., 2025)。因此,仅分析同期气象病例关联,可能低估或高估某些气候因子的真实效应。但受限于 2023 年单年度数据的时间长度(仅 12 个月),无法稳健地估计各气候因子的多个滞后阶数,本研究尚未纳入滞后分析,文中所揭示的关联可理解为同期或近期的统计关联。

3.4 防控建议

基于上述发现,针对台南市的登革热防控,提出以下建议:1)实施时空精准防控,明确核心区域与干预时间窗口。将东区、永康区、安平区、北区划定为登革热核心防控区域,安南区、佳里区、麻豆区、新营区、中西区、南区、仁德区、新化区列为重点监测区域。每年 4—5 月疫情上升前期开展前置防控,核心防控区每月开展 2 次全域孳生地清理,重点排查建筑工地、老旧小区、校园、公园及港口周边废弃容器等易积水场所。6—10 月为疫情高发阶段,将清理频次提高至每周 1 次地毯式排查,并相应增加成蚊消杀强度,优先保障高风险区域、关键时段的防控资源投入。2)建立气象-疫情联动预警机

制,设置可量化预警阈值。依据本研究确定的降雨日数与平均气温 2 项关键因子,建立双因子触发预警标准。若未来 2 周平均气温高于 28 °C 且降雨日数超过 3 d,则启动蓝色预警;若平均气温高于 29 °C 且降雨日数超过 5 d,则升级为黄色预警。预警发布后,核心防控区立即开展入户告知、积水排查与应急消杀工作,实现气象变化、预警响应与防控行动同步关联。3)推进社区为主的长效治理,落实具体可操作措施。以社区为单位执行雨后必清制度,要求每次降雨结束后 7 d 内,完成阳台、楼道、庭院、绿化带及地下管井等区域积水容器的全面清理。在老旧小区、城中村推广使用防蚊地漏、密闭储水装置,优化排水系统。在校园、施工工地、港口等重点场所设置固定监测点位,每周开展伊蚊密度监测。将孳生地清理工作纳入社区网格化管理,明确网格员、物业服务人员与居民的各自职责,形成常态化、可监督、可考核的防控闭环。4)强化高风险场所分类管控。针对东区校园与居民区、永康区建筑工地、安平区港口及观光区域、北区老旧城区分别制定专项管控措施。校园重点清理花盆托盘、饮水机接水盘等小型积水;工地对建筑材料进行全覆盖防护,规范现场排水系统;港口及时清运各类废弃容器,消除潜在孳生环境;老旧城区统一组织公共区域消杀作业,实现分区施策、分类管理、精准防控。

4 结 论

本研究对台南市 2023 年的登革热确诊病例数和同期的气候因子数据进行了系统分析,主要探究了登革热疫情的时空演变特征和关键气象驱动影响因素。本研究发现,2023 年确诊病例数呈现典型的单峰型变化趋势,并经历“散发-随机-聚集-消退”的时间演变过程;气候因子方面,降雨日数和平均气温是影响登革热传播的 2 个关键气候因子,通过显著影响蚊虫的活跃度与孳生,进而影响登革病毒在人群中的传播;空间相对风险分析发现,台南市各区域登革热的发病风险具有明显的空间异质性,其中北区、东区、永康区和安平区为高风险区域。本研究结果一方面揭示了登革热的时空传播模式,另一方面评估了各气候因子对登革热传播影响的相对重要性,并识别了登革热传播的关键气候驱动因子,可为台南市制定差异化、精准化的登革热监测、预警及干预策略提供一定的科学依据。

参考文献:

- 敖琳珺, 张昱勤, 许欢, 等, 2020. 评估气象对广东省登革热时空预测模型的贡献[J]. 现代预防医学, 47(16): 2899-2903.
- 陈思秋, 孙立梅, 马文军, 等, 2020. 基于贝叶斯时空模型广州市手足口病精细时空尺度下发病影响因素分析[J]. 中国公共卫生, 36(8): 1171-1176.
- 陈业滨, 李卫红, 黄玉兴, 等, 2016. 广州市登革热时空传播特征及影响因素[J]. 热带地理, 36(5): 767-775.
- 樊景春, 林华亮, 吴海霞, 等, 2013. 广东省 2006—2011 年登革热时空分布特征[J]. 中国媒介生物学及控制杂志, 24(5): 389-391.
- 葛文鑫, 靳珂珂, 孙丽娜, 等, 2019. 登革热流行与不同气象因素相关性研究进展[J]. 中国媒介生物学及控制杂志, 30(4): 367-370+378.
- 郭钜旋, 张晓, 刘青连, 等, 2017. 广州市海珠区登革热发病与气象因素相关性研究[J]. 热带医学杂志, 17(8): 1090-1092+1129.
- 李云峰, 林良强, 张韶华, 等, 2021. 基于 GIS 的深圳市登革热的时空流行特征和风险影响因素研究[J]. 中华卫生杀虫药械, 27(6): 531-535.
- 潘花, 仇海全, 车金星, 2024. 基于多元线性回归的数学建模成绩预测研究[J]. 南昌工程学院学报, 43(4): 94-100.
- 武丹, 郭志明, 2022. 一类 *Wolbachia* 氏菌在蚊群传播数学模型的全局动力学[J]. 中山大学学报(自然科学版中英文), 61(5): 133-143.
- 徐维超, 2012. 相关系数研究综述[J]. 广东工业大学学报, 29(3): 12-17.
- 周莹, 祁钰湘, 张萌, 等, 2025. 2015—2023 年广东省老年人登革热本地疫情流行特征及变化趋势[J]. 中华流行病学杂志, 46(12): 2137-2144.
- 朱钰, 郑屹然, 尹默, 2020. 统计学意义下的多重共线性检验方法[J]. 统计与决策, 36(7): 34-36.
- Annan E, Bukhari M H, Treviño J, et al, 2023. The ecological determinants of severe dengue: A Bayesian inferential model[J]. Ecol Inform, 74: 101986.
- Gui H, Gwee S, Koh J, et al, 2022. Weather factors associated with reduced risk of dengue transmission in an urbanized tropical city [J]. Int J Environ Res Public Heal, 19(1): 339.
- Jang M J, Lee Y, Lawson A B, et al, 2007. A comparison of the hierarchical likelihood and Bayesian approaches to spatial epidemiological modelling[J]. Environmetrics, 18(7): 809-821.
- Martínez-Bello D A, López-Quílez A, Torres-Prieto A, 2017. Bayesian dynamic modeling of time series of dengue disease case counts [J]. PLoS Negl Trop Dis, 11(7): e0005696.
- Polrob W, La-up A, 2025. Nonlinear and lagged effects of climate variability on dengue incidence in an urban megacity: A distributed lag non-linear model (DLNM) based study in Bangkok, Thailand [J]. BMC Public Heal, 25(1): 4024.
- Waldhör T, 1996. The spatial autocorrelation coefficient moran's *I* under heteroscedasticity [J]. Statist Med, 15(79): 887-892.
- World Health Organization, 2024. Dengue and severe dengue [EB/OL]. (2024-12) [2026-01-26]. https://www.who.int/health-topics/dengue-and-severe-dengue#tab=tab_1.
- Xiang J, Hansen A, Liu Q, et al, 2017. Association between dengue fever incidence and meteorological factors in Guangzhou, China, 2005-2014 [J]. Environ Res, 153: 17-26.

(责任编辑 江 睿)