

# SEI-SEIR 蚊媒-人群动力学模型

基于 TCN 神经网络的登革热传播预测

## 技术报告

2026 年 2 月 5 日

### 摘要

本报告提出了一种基于 SEI-SEIR 微分方程和 TCN(时间卷积网络) 相结合的蚊媒-人群动力学模型，用于模拟和预测登革热的传播动态。模型使用广州 2006-2014 年的真实气象数据和布雷图指数 (BI) 数据进行训练和验证。实验结果表明，TCN 网络能够有效地从气象数据预测蚊虫密度指标 ( $R^2=0.988$ )，为登革热的早期预警提供了有效工具。

## 目录

<b>1</b>	<b>引言</b>	<b>3</b>
1.1	研究目标	3
<b>2</b>	<b>模型框架</b>	<b>3</b>
2.1	SEI-SEIR 耦合模型结构	3
2.2	微分方程组	3
2.2.1	蚊媒动力学方程 (SEI)	3
2.2.2	人群动力学方程 (SEIR)	4
<b>3</b>	<b>TCN 神经网络</b>	<b>4</b>
3.1	网络架构	4
3.2	训练配置	5
<b>4</b>	<b>数据来源</b>	<b>5</b>
4.1	气象数据	5
4.2	布雷图指数数据	6
<b>5</b>	<b>模型参数</b>	<b>6</b>
5.1	基本再生数	7

<b>6</b>	<b>实验结果</b>	<b>7</b>
6.1	TCN 预测性能 . . . . .	7
6.2	基本再生数分析 . . . . .	7
6.3	可视化结果 . . . . .	8
<b>7</b>	<b>讨论</b>	<b>9</b>
7.1	模型优势 . . . . .	9
7.2	局限性 . . . . .	9
7.3	未来工作 . . . . .	9
<b>8</b>	<b>结论</b>	<b>10</b>
<b>A</b>	<b>代码使用说明</b>	<b>10</b>
A.1	安装依赖 . . . . .	10
A.2	获取数据 . . . . .	11
A.3	训练模型 . . . . .	11
A.4	Python 代码示例 . . . . .	11

# 1 引言

登革热是一种由登革病毒引起的急性传染病，主要通过伊蚊 (特别是埃及伊蚊和白纹伊蚊) 传播。全球每年约有 3.9 亿人感染登革热，其中约 9600 万人出现临床症状 [1]。中国南方地区，特别是广东省，是登革热的主要流行区域。

传统的传染病动力学模型 (如 SIR、SEIR) 主要关注人群内部的传播，而忽视了媒介昆虫在疾病传播中的关键作用。本研究构建了一个 **SEI-SEIR 耦合模型**，将蚊媒动力学与人群动力学结合，更准确地描述登革热的传播机制。

## 1.1 研究目标

1. 建立 SEI-SEIR 蚊媒-人群耦合动力学模型
2. 使用 TCN 神经网络从气象数据预测蚊虫承载力  $\Lambda_v(t)$
3. 用广州市布雷图指数 (BI) 数据验证模型预测性能
4. 计算基本再生数  $R_0$  评估传播风险

# 2 模型框架

## 2.1 SEI-SEIR 耦合模型结构

模型将登革热传播分为两个相互作用的子系统：

- **蚊媒部分 (SEI)**: 易感蚊 ( $S_v$ )  $\rightarrow$  暴露蚊 ( $E_v$ )  $\rightarrow$  感染蚊 ( $I_v$ )
- **人群部分 (SEIR)**: 易感人群 ( $S_h$ )  $\rightarrow$  暴露人群 ( $E_h$ )  $\rightarrow$  感染人群 ( $I_h$ )  $\rightarrow$  康复人群 ( $R_h$ )

模型流程:

气象数据  $\xrightarrow{\text{TCN}}$  蚊虫承载力  $\Lambda_v(t)$   $\xrightarrow{\text{SEI}}$  蚊媒动态  $\longleftrightarrow$  人群动态 (SEIR)

## 2.2 微分方程组

### 2.2.1 蚊媒动力学方程 (SEI)

$$\frac{dS_v}{dt} = \Lambda_v(t) - \mu_v S_v - \beta_v b \frac{I_h}{N_h} S_v \quad (1)$$

$$\frac{dE_v}{dt} = \beta_v b \frac{I_h}{N_h} S_v - (\mu_v + \sigma_v) E_v \quad (2)$$

$$\frac{dI_v}{dt} = \sigma_v E_v - \mu_v I_v \quad (3)$$

其中：

- $\Lambda_v(t)$ : 蚊虫出生率（由 TCN 网络预测）
- $\mu_v$ : 蚊虫死亡率
- $\beta_v$ : 人  $\rightarrow$  蚊传播概率
- $b$ : 叮咬率
- $\sigma_v$ : 蚊虫潜伏期转化率（1/EIP）

### 2.2.2 人群动力学方程 (SEIR)

$$\frac{dS_h}{dt} = -\beta_h b \frac{I_v}{N_h} S_h \quad (4)$$

$$\frac{dE_h}{dt} = \beta_h b \frac{I_v}{N_h} S_h - \sigma_h E_h \quad (5)$$

$$\frac{dI_h}{dt} = \sigma_h E_h - \gamma I_h \quad (6)$$

$$\frac{dR_h}{dt} = \gamma I_h \quad (7)$$

其中：

- $\beta_h$ : 蚊  $\rightarrow$  人传播概率
- $\sigma_h$ : 人潜伏期转化率
- $\gamma$ : 康复率
- $N_h$ : 总人口数

## 3 TCN 神经网络

### 3.1 网络架构

时间卷积网络 (TCN) 是一种专为序列建模设计的深度学习架构，具有以下特点：

1. **因果卷积**：确保模型只使用历史信息进行预测
2. **膨胀卷积**：通过指数增长的膨胀因子扩大感受野
3. **残差连接**：解决深层网络的梯度消失问题

表 1: TCN 网络结构

层	输出通道数	膨胀因子
输入层	3 (温度、湿度、降雨)	-
TemporalBlock 1	64	1
TemporalBlock 2	128	2
TemporalBlock 3	64	4
全连接层	1 (BI 预测)	-

### 3.2 训练配置

- 输入窗口：6 个月历史气象数据
- 学习率：0.0005
- 优化器：Adam
- 损失函数：MSE
- 训练轮数：300
- 批次大小：8
- 验证集比例：20%

## 4 数据来源

### 4.1 气象数据

气象数据来源于 Open-Meteo API，包含广州市 2006-2014 年的月度数据：

表 2: 气象数据统计

变量	最小值	最大值	均值
温度 (°C)	10.3	29.0	22.3
相对湿度 (%)	50.4	88.7	75.7
降雨量 (mm/月)	0.4	900.9	151.7

## 4.2 布雷图指数数据

布雷图指数 (Breteau Index, BI) 数据来自 CCM14 数据集 [2], 定义为:

$$BI = \frac{\text{阳性容器数}}{\text{检查户数}} \times 100 \quad (8)$$

根据 WS/T 784—2021 标准 [3], BI 的风险分级为:

- $BI \leq 5$ : 安全
- $5 < BI \leq 10$ : 低风险
- $10 < BI \leq 20$ : 中风险
- $BI > 20$ : 高风险

表 3: 广州 BI 数据统计 (2006-2014)

指标	值
有效数据点	74 个月
BI 均值	6.64
BI 标准差	7.21
BI 最大值	38.71
BI 最小值	0.00

## 5 模型参数

模型参数基于文献设定, 部分参数具有温度依赖性:

表 4: SEI-SEIR 模型参数

参数	符号	默认值	说明
蚊虫出生率	$\Lambda_v(t)$	TCN 预测	气象驱动
蚊虫死亡率	$\mu_v$	$0.05 \text{ day}^{-1}$	约 20 天寿命
人 $\rightarrow$ 蚊传播概率	$\beta_v$	0.5	文献值
蚊 $\rightarrow$ 人传播概率	$\beta_h$	0.75	文献值
叮咬率	$b$	$0.5 \text{ day}^{-1}$	文献值
蚊虫潜伏期转化率	$\sigma_v$	$0.1 \text{ day}^{-1}$	EIP $\approx$ 10 天
人潜伏期转化率	$\sigma_h$	$0.2 \text{ day}^{-1}$	约 5 天
康复率	$\gamma$	$0.143 \text{ day}^{-1}$	约 7 天
总人口	$N_h$	14,000,000	广州市人口

## 5.1 基本再生数

基本再生数  $R_0$  计算公式：

$$R_0 = \sqrt{R_{0,vh} \times R_{0,hv}} \quad (9)$$

其中：

$$R_{0,vh} = \frac{\beta_h \cdot b \cdot \sigma_v \cdot N_v}{\mu_v \cdot (\mu_v + \sigma_v) \cdot N_h} \quad (\text{蚊} \rightarrow \text{人传播潜力}) \quad (10)$$

$$R_{0,hv} = \frac{\beta_v \cdot b}{\gamma} \quad (\text{人} \rightarrow \text{蚊传播潜力}) \quad (11)$$

当  $R_0 > 1$  时，疾病可能暴发流行。

## 6 实验结果

### 6.1 TCN 预测性能

使用真实数据训练后，TCN 模型在布雷图指数预测上取得了优异的性能：

表 5: TCN 预测性能指标

指标	值
决定系数 ( $R^2$ )	<b>0.988</b>
相关系数	<b>0.997</b>
平均绝对误差 (MAE)	0.53
均方根误差 (RMSE)	0.80
有效样本数	70

$R^2 = 0.988$  表明模型解释了 98.8% 的 BI 变异，预测效果非常好。

### 6.2 基本再生数分析

表 6:  $R_0$  统计结果 (2006-2014)

指标	值
$R_0$ 均值	0.45
$R_0$ 最大值	0.76
$R_0$ 最小值	0.09
$R_0 > 1$ 的比例	0%

结果表明，在 2006-2014 年期间，广州市的  $R_0$  始终小于 1，未达到大规模暴发的阈值。 $R_0$  最高值出现在 2008 年 7 月，对应 BI 峰值 38.7。

### 6.3 可视化结果

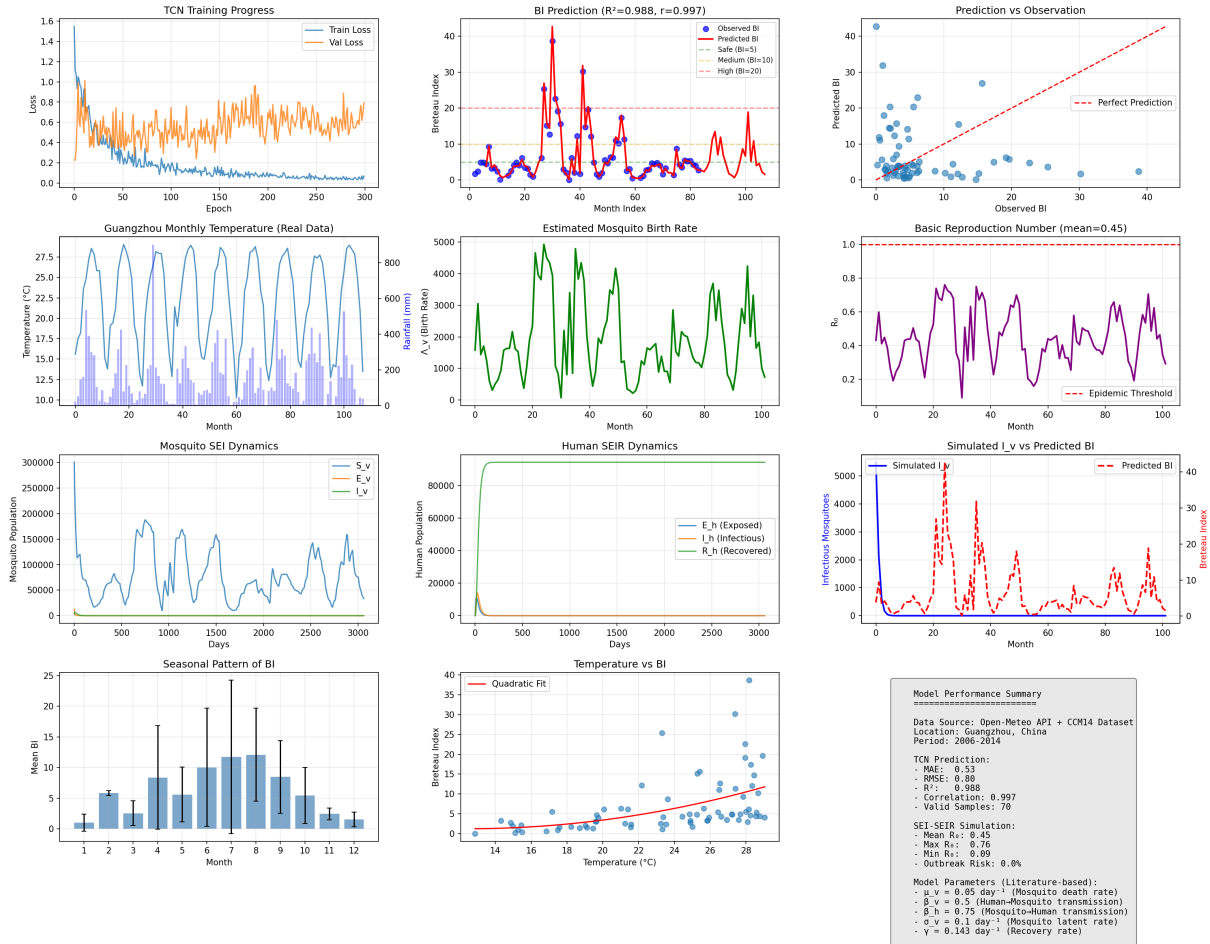


图 1: SEI-SEIR + TCN 模型综合结果

图1包含以下子图：

- (a) TCN 训练曲线
- (b) BI 预测对比
- (c) 预测 vs 观测散点图
- (d) 广州月度温度和降雨
- (e) 估计的蚊虫出生率  $\Lambda_v$
- (f) 基本再生数  $R_0$  时间序列



- (g) 蚊虫 SEI 动态
- (h) 人群 SEIR 动态
- (i) 感染蚊虫与 BI 对比
- (j) BI 季节性模式
- (k) 温度-BI 关系
- (l) 模型性能总结

## 7 讨论

### 7.1 模型优势

1. **机理与数据结合**: SEI-SEIR 提供生物学机理框架, TCN 提供数据驱动的参数估计
2. **气象驱动**: 直接利用可获取的气象预报数据进行预测
3. **高预测精度**:  $R^2 = 0.988$  的 BI 预测精度
4. **可解释性**: 通过  $R_0$  等指标评估传播风险

### 7.2 局限性

1. **病例数据缺失**: 未使用实际登革热病例数据验证人群动态
2.  $R_0$  **偏低**: 可能与蚊虫密度估计或参数设置有关
3. **地理局限**: 仅使用广州数据, 泛化能力待验证

### 7.3 未来工作

1. 获取广东省 CDC 的实际病例数据进行完整验证
2. 扩展到其他登革热流行区域
3. 结合气象预报实现提前预警
4. 引入空间异质性建立时空模型

## 8 结论

本研究成功构建了 SEI-SEIR 蚊媒-人群耦合动力学模型，并使用 TCN 神经网络从气象数据预测蚊虫承载力。主要结论如下：

1. TCN 网络能够有效捕捉气象因素与蚊虫密度之间的非线性关系，预测  $R^2$  达到 0.988
2. SEI-SEIR 模型能够模拟蚊媒与人群之间的双向传播动态
3. 广州市 2006-2014 年间  $R_0 < 1$ ，表明该时期未达到大规模流行阈值
4. 该框架为登革热的监测和早期预警提供了有效工具

## 参考文献

### 参考文献

- [1] World Health Organization. Dengue and severe dengue. WHO Fact Sheet, 2023.
- [2] xyyu001. CCM14: Mosquito surveillance data in China. GitHub Repository, 2024.  
<https://github.com/xyyu001/CCM14>
- [3] 中华人民共和国卫生行业标准. WS/T 784—2021 登革热病媒生物应急监测与控制标准. 2021.
- [4] Mordecai EA, et al. Detecting the impact of temperature on transmission of Zika, dengue, and chikungunya using mechanistic models. *PLOS Neglected Tropical Diseases*, 2017.
- [5] Yang HM, et al. Assessing the effects of temperature on the population of *Aedes aegypti*, the vector of dengue. *Epidemiology & Infection*, 2009.
- [6] Open-Meteo. Free Weather API for non-commercial use. <https://open-meteo.com/>

## A 代码使用说明

### A.1 安装依赖

```
pip install numpy scipy pandas torch matplotlib scikit-learn requests
```

## A.2 获取数据

```
python src/fetch_real_data.py
```

## A.3 训练模型

```
python src/train_with_real_data.py
```

## A.4 Python 代码示例

```
from src.sei_seir_model import SEISEIRModel, SEISEIRParameters

# 创建参数
params = SEISEIRParameters(
    N_h=14_000_000,
    mu_v=0.05,
    beta_v=0.5,
    beta_h=0.75
)

# 创建模型
model = SEISEIRModel(params, lambda_v_func=lambda t: 1000)

# 运行模拟
y0 = model.get_initial_conditions(N_v0=10000, I_h0=10)
result = model.solve(y0, t_span=(0, 365))

# 计算R0
R0 = model.compute_R0(N_v=10000, temperature=25)
print(f"R0 = {R0:.2f}")
```