

# 季节性流感传播动力学建模与防控策略优化研究

张翻红\*

甘肃医学院 甘肃平凉

**【摘要】**针对季节性流感防控中行为干预难以量化的问题,本文提出了一个 SVEIR 传染病动力学模型体系,整合了疫苗接种、动态防控措施和公众行为反馈机制,以研究季节性流感的传播规律。通过引入时变参数,模型准确刻画了流感的季节性特征。理论分析表明:当基本再生数  $\mathcal{R}_0 < 1$  时,无病平衡点局部渐近稳定。基于甘肃省 2012-2023 年流感数据的验证显示,模型预测与实际流行趋势高度一致。研究成果为流感防控策略的制定提供了重要的理论依据和实践指导。为政府部门设计“平急结合”防控体系提供量化工具。

**【关键词】**季节性流感;疫苗接种;动态防控;行为干预;参数拟合

**【收稿日期】**2025 年 6 月 22 日

**【出刊日期】**2025 年 7 月 25 日

**【DOI】**10.12208/j.ijcr.20250331

## Modeling the transmission dynamics of seasonal influenza and optimization of prevention and control strategies

Fanhong Zhang\*

Gansu Medical College, Pingliang, Gansu

**【Abstract】**To address the challenge of quantifying behavioral interventions in seasonal influenza control, this study proposes an SVEIR infectious disease dynamics modeling framework that integrates vaccination, dynamic prevention measures, and public behavioral feedback mechanisms to investigate the transmission patterns of seasonal influenza. By incorporating time-varying parameters, the model accurately captures the seasonal characteristics of influenza. Theoretical analysis demonstrates that the disease-free equilibrium is locally asymptotically stable when the basic reproduction number  $\mathcal{R}_0 < 1$ . Validation using influenza surveillance data from Gansu Province (2012-2023) shows strong agreement between model predictions and actual epidemic trends. The research provides important theoretical foundations and practical guidance for formulating influenza control strategies, offering government agencies a quantitative tool for designing a "routine-emergency integrated" prevention and control system.

**【Keywords】**Seasonal influenza; Vaccination; Dynamic prevention and control; Behavioral intervention; Parameter fitting

### 1 引言

#### 1.1 研究背景

季节性流感通过飞沫传播,每年导致全球数百万人感染。传统流行病学模型常忽略人类行为对传播的动态影响,如疫苗接种决策和感染者自我隔离意愿<sup>[1-2]</sup>。本文基于 COVID-19 行为模型框架,构建包含易感者(S)、接种者(V)、潜伏者(E)、感染者(I)、恢复者(R)的 SVEIR 模型,探讨行为与流感传播的交互作用<sup>[3-4]</sup>。基于甘肃省季节性流感数据(每日报告病例数和累计死亡人数)和疫苗接种数据<sup>[5]</sup>,对所提出的

多尺度模型进行校准。我们的建模结果表明,行为变化与流感传播动力学之间的反馈回路在诱导多个流行波中起着至关重要的作用。研究发现,季节性流感的长期高流行或持续恶化可能会促使几乎所有种群改变其行为并保持已改变的行为。然而,随着流行病的发展,行为改变的影响逐渐消失。这表明,不仅要有持续的,而且要有有效的行为改变,以避免随后的流行病浪潮。此外,我们的模型也提示了维持有效改变的重要性,为了防止非药物干预的放松,需要快速和大规模的疫苗接种,以避免未来的流行病浪潮。

\*通讯作者:张翻红

## 1.2 流感模型

Huo 等人<sup>[6]</sup>基于甘肃省季节性流感的每日病例报告及死亡病例数据, 构建了融入疫苗接种策略的流感动力学模型。研究发现, 提升流感疫苗接种覆盖率可作为防范甘肃省季节性流感暴发的有效途径, 具体模型如下:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = \Lambda + qR - \beta_1(t)S(\theta I_C + I_N) - cS + \sigma V - dS, \\ \frac{dV}{dt} = cS - \beta_2(t)V(\theta I_C + I_N) - \sigma V - dV, \\ \frac{dE}{dt} = \beta_1(t)S(\theta I_C + I_N) + \beta_2(t)V(\theta I_C + I_N) - \rho E - dE, \\ \frac{dI_N}{dt} = (1 - \delta)\rho E - \gamma_2 I_N - k I_N - d I_N, \\ \frac{dI_C}{dt} = \delta\rho E - \gamma_1 I_C - k I_C - d I_C, \\ \frac{dR}{dt} = \gamma_1 I_C + \gamma_2 I_N - qR - dR. \end{cases} \quad (1.1)$$

在此, 将总人口划分为六个仓室, 分别为:  $S(t)$ ,  $V(t)$ ,  $E(t)$ ,  $I_N(t)$ ,  $I_C(t)$  和  $R(t)$ , 其中:  $S(t)$  代表易感人群、 $V(t)$  代表已接种疫苗人群、 $E(t)$  代表潜伏感染人群、 $I_N(t)$  表示未被甘肃省卫健委按月通报的病例数、 $I_C(t)$  表示被甘肃省卫健委按月通报的病例数;  $R(t)$  代表康复人群。  $t$  时刻的总人口数量为:

$$N(t) = S(t) + V(t) + E(t) + I_N(t) + I_C(t) + R(t).$$

从参数的生物学意义可知: 所有参数均为正值, 且是以  $T$  为周期的周期函数, 具体定义如下表 1.1 所示。

## 1.3 模型拟合

基于经典 SVEIR 模型 (1.1) 的数值模拟结果如图 1.1 所示。

从模型拟合结果来看, 2012 年至 2020 年初的模拟数据与实际观测值吻合度较高, 表明模型在常规流行病学条件下具有良好的预测能力。然而, 2020 年以后的模拟结果与真实数据出现了显著偏离。这一差异主要源于以下关键因素。

2019 年底新冠肺炎疫情的全球大流行彻底改变了公共卫生环境。为防控 COVID-19 传播, 各国普遍采取了包括强制佩戴口罩、保持社交距离、加强手部卫生等非药物干预措施<sup>[7-8]</sup>。这些措施在有效抑制新冠病毒传播的同时, 也大幅降低了流感等呼吸道传染病的传播风险——通过减少人群接触频率、阻断飞沫传播途径等方式, 客观上造成了流感传播链的断裂。

具体而言: 全民口罩佩戴使流感病毒通过飞沫传播的效率显著下降; 社交距离政策直接减少了人群接触机会。

表 1.1 模型 (1.1) 参数的生物意义

参数	描述 (单位)
$\Lambda$	易感个体的种群招募率 (月)
$q$	患病个体的恢复率 (月)
$\beta_1(t)$	易感个体与感染个体之间的直接传播率 (无)
$\beta_2(t)$	接种人群与感染人群之间的直接传播率 (无)
$\theta$	报道的受感染个体传播率的修正因子 (无)
$c$	疫苗接种率 (月)
$\sigma$	疫苗接种失效率 (月)
$d$	人口的自然死亡率 (月)
$\rho$	单位时间内疾病发生的发展速率 (月)
$k$	未报道的感染者的治疗率 (月)
$\delta$	甘肃省卫健委每月通报的受感染个体比例 (无)
$\gamma_1$	报道的受感染个体的恢复率 (月)
$\gamma_2$	未报道的受感染个体的恢复率 (月)

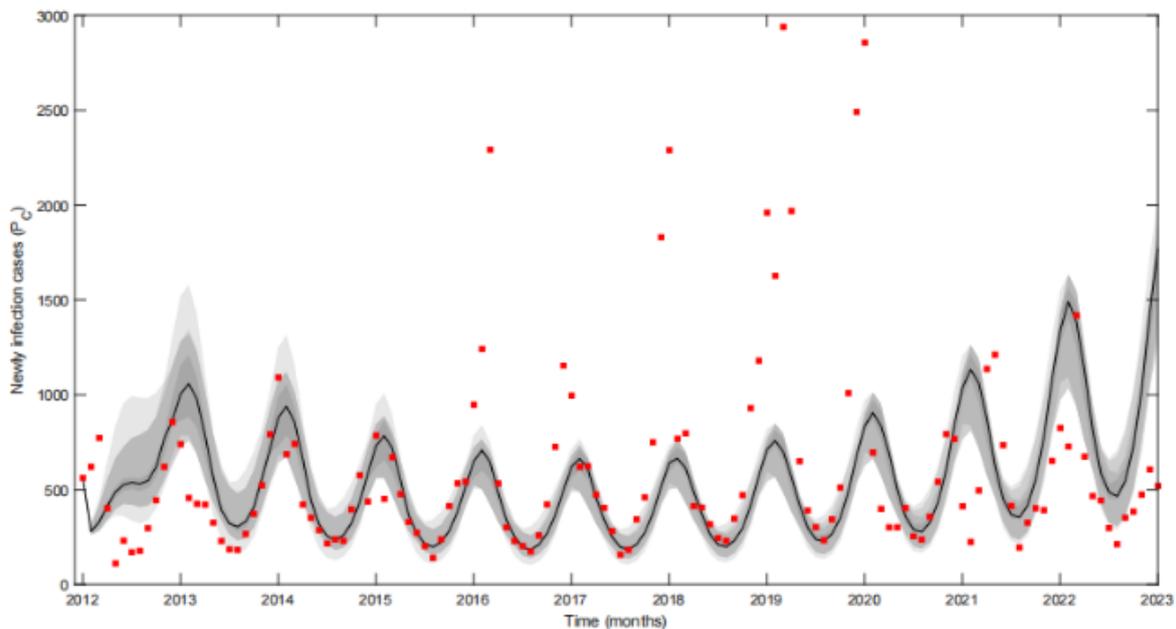


图 1.1 2012 年 1 月至 2022 年 12 月报道的新增病例数的拟合结果. 实心黑线表示拟合数据, 红点表示实际数据

这些未纳入原模型的突发公共卫生干预措施, 导致传统流感传播动力学发生结构性改变, 从而造成 2020 年后模拟结果的显著偏差。该现象突显了重大公共卫生事件对传染病传播模式的深远影响, 也提示未来建模需考虑突发干预措施参数化表征。

在原始模型 (1.1) 的研究基础上, 现对人口总数的

动态特征进行重新考量, 将其定义为随时间变化的函数  $N(t)$ 。此次建模调整的核心在于, 不再对染病个体是否已被官方报道进行分类讨论。从实际公共卫生数据采集的角度来看, 未被报告的感染病例数据往往因监测体系的局限性而难以直接获取。基于这一现实约束, 现构建如下各个仓室之间的人口流动如图 1.2 所示。

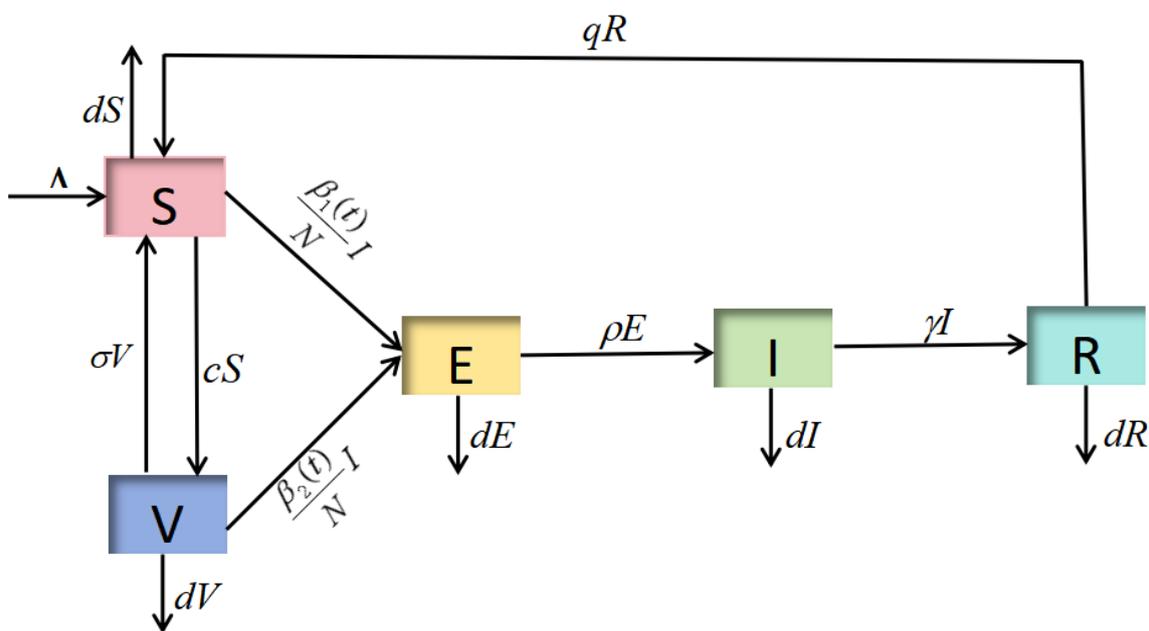


图 1.2 系统 (1.2) 的流程图

由图 1.2 的系统流程图容易得到微分方程组 (1.2):

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = \Lambda + qR - \frac{\beta_1(t)I}{N}S - cS + \sigma V - dS, \\ \frac{dV}{dt} = cS - \frac{\beta_2(t)I}{N}V - \sigma V - dV, \\ \frac{dE}{dt} = \frac{\beta_1(t)I}{N}S + \frac{\beta_2(t)I}{N}V - \rho E - dE, \\ \frac{dI}{dt} = \rho E - \gamma I - dI, \\ \frac{dR}{dt} = \gamma I - qR - dR. \end{cases} \quad (1.2)$$

该模型着重强调人口总数与疾病传播过程的耦合关系, 通过弱化对病例报告状态的区分, 转而聚焦于感染群体的整体动态演变。在数据可及性层面, 这种处理方式更贴合流行病学调查中“未报道病例数据缺失”的客观情况, 能够通过整合现有监测数据(如确诊病例、疑似病例等), 构建更具实操性的传播动力学框架。模型的参数设定与变量关系将在后续分析中结合具体疾病特征进一步细化, 以实现理论建模与现实数据的有机衔接。

### 1.4 行为改变动力学

为体现“行为干预影响传播(接种决策)”, 新增“行为决策模块”: 用“防控措施强度  $u(t)$ ”统一量化社交距离、口罩佩戴、宣传教育等干预手段(降低有效接触率); 用“接种意愿系数  $\psi(t)$ ”反映公众对疫苗的接受度(影响接种率  $c$  的动态调整)。

扩展后完整模型及参数如系统 (1.3) 和表 1.2 所示。

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = \Lambda + qR - \frac{\beta_1(t)(1-\tau u(t))}{N}IS - c(t)S + \sigma V - dS, \\ \frac{dV}{dt} = c(t)S - \frac{\beta_2(t)(1-\tau u(t))}{N}IV - \sigma V - dV, \\ \frac{dE}{dt} = \frac{\beta_1(t)(1-\tau u(t))}{N}IS + \frac{\beta_2(t)(1-\tau u(t))}{N}IV - \rho E - dE, \\ \frac{dI}{dt} = \rho E - \gamma I - dI, \\ \frac{dR}{dt} = \gamma I - qR - dR, \\ \frac{du}{dt} = k_1 \left( \frac{I}{N} - \theta \right) (1-u) u \quad (\text{措施强度动态调整}), \\ \frac{d\psi}{dt} = k_2 \left( \frac{I}{N} - \varphi \right) (1-\psi) \psi \quad (\text{接种意愿动态调整}), \\ c(t) = c_0 \psi(t) \quad (\text{接种率由意愿系数调节}). \end{cases} \quad (1.3)$$

表 1.2 干预相关参数

参数	描述 (生物意义)
$u(t)$	防控措施强度 ( $0 \leq u(t) \leq 1$ , $u = 0$ 表示无干预, $u = 1$ 表示严格防控)
$\psi(t)$	接种意愿系数 ( $\psi(t)$ 越高, 接种率 $c$ 越高, $\psi(t) \in [0, 1]$ )
$\tau$	防控措施对接触率的抑制系数 ( $\tau > 0$ , 强度越高, 实际接触率越低)
$c_0$	最大接种率 ( $0 \leq c_0 \leq 1$ )

其中:  $\frac{\beta(t)}{N}(1-\tau u(t))$  表示“防控措施降低有效接触”(如戴口罩使  $\beta$  实际作用减弱)。 $\tau u(t)$  表示防控措施, 如戴口罩, 保持社交距离等,  $\tau$  是措施有效性系数。 $\frac{\beta_2(t)(1-\tau u(t))}{N}IV$  表示接种者被感染者感染的速率, 通常  $\beta_2(t) < \beta_1(t)$  表示疫苗部分有效。

防控措施强度  $u(t)$  描述了社会层面实施防控手段(如社交距离管控、口罩佩戴要求、公共场所消杀等)的严格程度, 其变化率由疫情感染比例与预设阈值的关系驱动, 具体逻辑如下:

阈值设定与触发条件: 设定感染比例阈值  $\theta$ , 它是

基于公共卫生专家对疾病传播风险的评估确定的临界值。当实际计算得到的感染比例  $\frac{I(t)}{N}$  为大于该阈值, 即  $\frac{I(t)}{N} > \theta$  时, 意味着疫情传播风险超出了社会可接受的“常规”范围。此时, 公众会因对感染风险的担忧, 主动调整自身行为配合防控(如自觉减少聚集、更严格佩戴口罩); 政府也会基于公共卫生监测数据, 启动或升级防控政策(如发布管控通告、增加核酸检测频次), 共同推动防控措施强度  $u(t)$  上升, 数学上表现为  $\frac{du}{dt} > 0$ 。

反向调整机制: 当感染比例  $\frac{I(t)}{N} \leq \theta$  时, 说明疫情处于相对可控、传播风险较低的状态。从公众角度,

长期严格防控带来的生活不便(如出行受限、社交减少)和社会经济成本(如企业停工、经济下滑)逐渐凸显,会产生放松防控的诉求;政府也会结合疫情形势,优化防控策略,适度降低防控严格程度,使得防控措施强度  $u(t)$  下降,即  $\frac{du}{dt} < 0$ 。

为定量描述上述过程,可构建如下简化的防控措施强度动态方程:  $\frac{du}{dt} = k_1(\frac{I}{N} - \theta)f(u)$  其中,  $k_1 > 0$  是防控措施强度的调整速率系数,反映社会对疫情变化的响应速度,  $k_1$  越大,防控强度随疫情变化的调整越迅速;  $f(u)$  是对防控强度调整幅度的约束函数,考虑到防控措施强度  $u$  本身有实际边界(如  $0 \leq u \leq 1$ ,  $u = 0$ ) 表示无防控,  $u = 1$  表示最严格防控),通常可设  $f(u) = 1 - u$  (当  $u$  较小时,调整空间大,调整幅度受当前强度限制小)或采用 Logistic 函数形式,保证  $u$  始终在合理区间内变化。

接种意愿动态方程  $\frac{d\psi}{dt}$

接种意愿  $\psi(t)$  体现了公众对流感疫苗接种的主动接受程度,其变化率  $\frac{d\psi}{dt}$  同样由感染比例与另一阈值的对比决定,深入解析如下:

阈值意义与行为触发:定义接种意愿阈值  $\phi$ ,它综合考量了疫苗接种的成本收益(如接种的时间成本、疫苗保护效力、潜在不良反应等)以及公众对疾病危害的认知。当感染比例  $\frac{I(t)}{N} > \phi$  时,公众直观感受到流感传播的现实威胁,对感染后可能出现的健康风险(如重症、死亡,尤其是针对高危人群)和社会生活影响(如因病缺勤、隔离)的担忧加剧。此时,出于自我保护和降低感染概率的动机,公众主动接种疫苗的意愿会增强,表现为接种意愿  $\psi(t)$  上升,即  $\frac{d\psi}{dt} > 0$ 。

意愿回落情形:当感染比例  $\frac{I(t)}{N} < \phi$  时,流行病带来的直接威胁降低。一方面,部分公众可能因遗忘、侥幸心理,或认为接种疫苗的收益(避免感染)在低风险环境下不显著,而降低对接种的关注;另一方面,疫苗接种存在的短期不良反应(如接种部位疼痛、低热)等因素,也会使一些人在疫情压力减小时,不再优先选择接种。这些因素共同导致接种意愿  $\psi(t)$  下降,即

$\frac{d\psi}{dt} < 0$ 。

类似防控措施强度动态方程,可构建接种意愿的动态变化模型:  $\frac{d\psi}{dt} = k_1(\frac{I}{N} - \phi)g(\psi)$  这里,  $k_1$  是接种意愿的调整速率系数,反映公众对接种态度随疫情变化的转变速度;  $g(\psi)$  是接种意愿调整的约束函数,考虑到接种意愿  $\psi$  的实际范围( $0 \leq \psi \leq 1$ ,  $\psi = 0$  表示无接种意愿,  $\psi = 1$  表示全民愿意接种),常设置为  $g(\psi) = 1 - \psi$  等形式,确保  $\psi$  变化符合现实逻辑,不会出现超出合理范围的极端值。

行为动态方程的综合作用:防控措施强度动态方程  $\frac{du}{dt}$  和接种意愿动态方程  $\frac{d\psi}{dt}$  共同构成了流感传播模型中的行为干预模块。它们将人类行为与疾病传播过程紧密关联,形成“疫情发展→行为调整→疫情变化”的反馈回路:疫情扩散使感染比例上升,触发防控加强和接种意愿提升;防控措施强度增加和接种人群扩大,又会改变疾病的传播条件(如有效感染率降低、易感人群减少),反过来影响疫情的发展趋势。通过这样的机制,模型能够更真实地模拟现实中流感传播的复杂过程,为评估不同防控策略(如阈值设定、宣传引导对公众行为的影响)和疫苗接种计划的效果,提供更贴近实际的的分析工具<sup>[3]</sup>。还可引入更多影响行为的因素(如媒体宣传、疫苗信任度、经济补偿等),使行为动态方程的刻画更加精准全面。

## 2 动力学行为

在动力学行为研究中,基本再生数  $\mathfrak{R}_0$  与稳定性分析是核心指标,其中  $\mathfrak{R}_0$  量化系统中一个初始单元平均能引发的后续单元数,决定疾病能否持续演化,  $\mathfrak{R}_0 > 1$  时形成地方病,  $\mathfrak{R}_0 < 1$  时疾病消亡,而稳定性分析则通过判定平衡点在扰动下的保持能力,揭示系统演化的终极趋势,二者结合可完整刻画系统从初始传播到长期平衡的动态特征。

### 2.1 无病平衡点

无病平衡点  $P^0$ ,当流行病未暴发( $I = 0, E = 0$ ),各仓室稳态为:无病平衡点 1:

$$P^1 = (S_0, V_0, E_0, I_0, R_0, u_0, \psi_0) = (\frac{\Lambda}{d}, 0, 0, 0, 0, 0, 0),$$

表示未对疾病进行干预和接种;无病平衡点 2:

$$P^2 = (S_0, V_0, E_0, I_0, R_0, u_0, \psi_0) = (\frac{\Lambda}{d}, 0, 0, 0, 0, 1, 0),$$

表示未对疾病进行接种且保持最大程度干预；无病平衡点 3，表示未对疾病进行干预且保持最大程度的疫苗接种：

$$P_0^4 = (S_0, V_0, E_0, I_0, R_0, u_0, \psi_0) = \left( \frac{\Lambda(\sigma + d)}{d(\sigma + d + c_0\psi_0)}, \frac{c_0\psi_0\Lambda}{d(\sigma + d + c_0\psi_0)}, 0, 0, 0, u_0, \psi_0 \right).$$

## 2.2 基本再生数

在传染病动力学研究体系中，基本再生数  $\mathfrak{R}_0$  作为关键量化指标，通过测算在完全易感人群中单个初始感染者所能引发的平均二代病例数，为评估疾病流行风险提供重要依据：

当  $\mathfrak{R}_0$  突破临界值 1 时，疫情存在持续扩散趋势；反之则呈衰减态势。鉴于其对疾病传播态势研判的核心价值，本节将基于周期系统 (2.1) 展开深度分析，通过构建数学模型并进行严谨推导，最终获取该系统下的基本再生数数值解，为后续动力学行为研究奠定基础。通过下一代矩阵法计算（反映“无干预+无行为响应”时的传播潜力）：传播率矩阵  $F$  与转移率矩阵  $V$  分别为：

$$F = \begin{pmatrix} 0 & \frac{\beta_1(1-\tau u_0)}{N}S_0 + \frac{\beta_2(1-\tau u_0)}{N}V_0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad V = \begin{pmatrix} \rho + d & 0 \\ -\rho & \gamma + d \end{pmatrix}$$

容易得到：

$$V^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\rho + d} & 0 \\ \frac{\rho}{(\rho + d)(\gamma + d)} & \frac{1}{\gamma + d} \end{pmatrix}$$

则：

$$FV^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{\rho(\beta_1(1-\tau u_0)S_0 + \beta_2(1-\tau u_0)V_0)}{N(\rho + d)(\gamma + d)} & \frac{\beta_1(1-\tau u_0)S_0 + \beta_2(1-\tau u_0)V_0}{N(\gamma + d)} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

基本再生数  $\mathfrak{R}_0 = \rho(FV^{-1})$ ，展开后简化为：

$$\mathfrak{R}_0 = \frac{\rho(1-\tau u_0)}{(\rho + d)(\gamma + d)} \cdot \left( \beta_1 \frac{S_0}{N} + \beta_2 \frac{V_0}{N} \right).$$

无病平衡点  $P_0$

$$P_0^3 = (S_0, V_0, E_0, I_0, R_0, u_0, \psi_0) = \left( \frac{\Lambda}{d}, 0, 0, 0, 0, 0, 1 \right),$$

无病平衡点 4：

定理：当基本再生数  $\mathfrak{R}_0 < 1$ ，无病平衡点局部渐进稳定，流行病消亡；当  $\mathfrak{R}_0 > 1$  时，无病平衡点不稳定。

证明：在无病平衡点处对感染系统进行线性化，得到 Jacobian 矩阵的感染子块：

$$J_{\text{感染}} = F - V = \begin{pmatrix} -(\rho + d) & \frac{\beta_1(1-\tau u_0)S_0 + \beta_2(1-\tau u_0)V_0}{N} \\ \rho & -(\gamma + d) \end{pmatrix}$$

其中  $F$  为感染矩阵， $V$  是转移矩阵，特征方程为  $\det(J_{\text{感染}} - \lambda I) = 0$ 。即：

$$\lambda^2 + (\rho + d + \gamma + d)\lambda + (\rho + d)(\gamma + d) - \rho \frac{\beta_1 S_0 + \beta_2 V_0}{N} (1 - \tau u_0) = 0.$$

由 Routh-Hurwitz 判据易知：若常数项  $(\rho + d)(\gamma + d)(1 - \mathfrak{R}_0) > 0$ ，则所有特征值实部为负。

即当  $\mathfrak{R}_0 < 1$  时，无病平衡点局部渐进稳定。当  $\mathfrak{R}_0 > 1$  条件不成立，至少有一个特征值实部为正，此时无病平衡点不稳定，形成地方病。

## 2.3 数值模拟

本节以甘肃省 2012 年 1 月至 2022 年 12 月的流感月度监测数据及死亡统计信息<sup>[5,6]</sup>作为分析基础，采用 Markov Chain Monte Carlo 算法对系统 (1.3) 中的未知参数实施优化估计。

通过将理论模型与真实数据进行匹配，系统剖析流感传播动力学特征。经参数校准后，模型拟合结果如下图 2.1 所示。

图 1.1 与图 2.1 的模拟结果对比显示，传统 SVEIR 模型对流感传播数据的拟合效果欠佳，而引入防控措施强度和接种意愿动态的改进模型显著提升了拟合精度。

这一改进不仅更准确地刻画了流感传播动态，更证实了人类行为因素在传染病建模中的关键作用，为建立更可靠的流行病预测模型提供了重要依据。

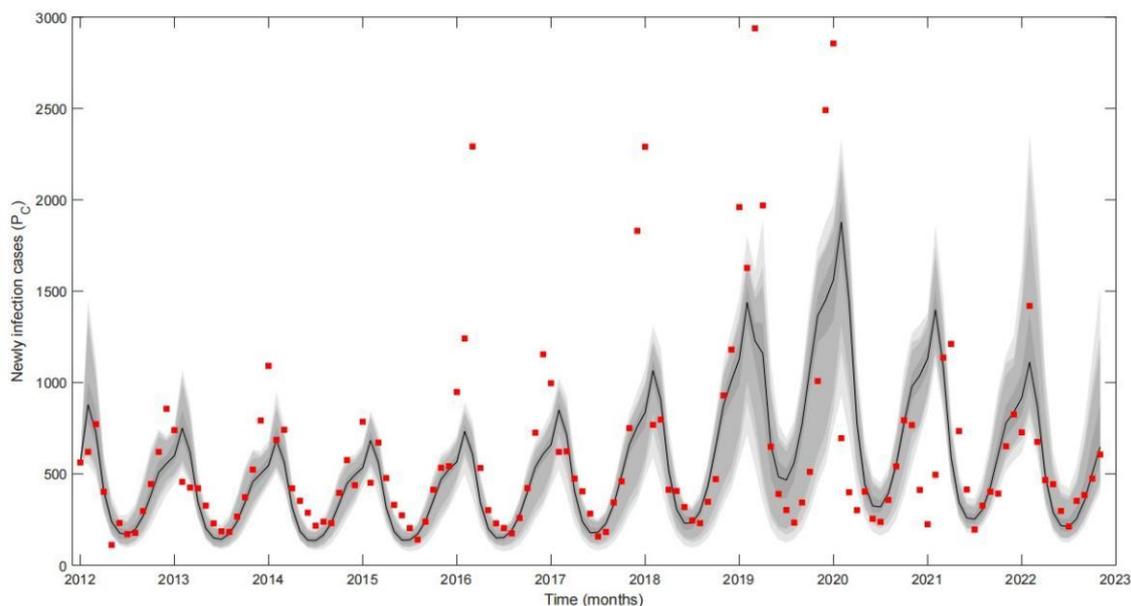


图 2.1 2012 年 1 月至 2022 年 12 月报道的新增病例数的拟合结果. 实心黑线表示拟合数据, 红点表示实际数据

本文通过理论分析与数据验证表明, 动态行为干预模型能更准确地预测流感流行趋势, 尤其在疫情阈值触发防控措施升级或接种意愿波动时表现出显著优势。具体应用建议包括:

当感染比例超过预设风险阈值 (如  $\frac{I}{N} > \theta$ ) 时,

自动启动强化干预 (如公共场所限流), 以降低传播率;

通过实时监测感染数据, 结合媒体宣传提升公众接种意愿系数  $\psi$ , 缩短疫苗覆盖率达标时间; 基于模型预测的流行峰值和规模, 可提前调配医疗资源 (如抗病毒药物、床位)。这些策略为政府部门设计‘平急结合’的流感防控体系提供了量化工具, 展现了数学模型从理论创新到政策落地的转化潜力。

### 参考文献

- [1] S. L. Jing, H. F. Huo, H. Xiang, Modeling the effects of meteorological factors and unreported cases on seasonal influenza outbreaks in Gansu province, China[J], Bulletin of Mathematical Biology, 2020.
- [2] Haifeng H, Fanhong Z, Hong X. Spatiotemporal dynamics for impulsive eco-epidemiological model with Crowley-Martin type functional response[J]. Mathematical biosciences and engineering : MBE, 2022.
- [3] Augusto Folashade B., et al., To isolate or not to isolate: the impact of changing behavior on COVID-19 transmission. [J]. BMC Public Health 2022.
- [4] P. Poletti, B. et al., Spontaneous behavioural changes in response to epidemics[J]. Journal of Theoretical Biology, 2009.
- [5] 甘肃省疾病预防控制中心, 疫情通报, <http://www.gscdc.net/> (2025).
- [6] H. F. Huo, K. D. Cao, H. Xiang, Modelling the effects of the vaccination on seasonal influenza in Gansu, China[J], Journal of Applied Analysis and Computation, 2022.
- [7] P. Poletti, M. Ajelli, S. Merler, Risk perception and effectiveness of uncoordinated behavioral responses in an emerging epidemic[J], Mathematical Biosciences, 2012.
- [8] P. Jentsch, M. Anand, C. T. Bauch, Prioritising COVID-19 vaccination in changing social and epidemiological landscapes[J], The Lancet Infectious Diseases, 2020.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心 (OAJRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS