

猪场尼帕病毒传播的动力学建模与 多措施防控评估

李文慧, 王 帅

长春理工大学数学与统计学院, 吉林 长春

收稿日期: 2025年12月16日; 录用日期: 2026年1月9日; 发布日期: 2026年1月19日

摘 要

尼帕病毒(NiV)在猪场中的传播构成重大公共卫生威胁。本研究建立SEAIRS-SEI人猪耦合模型, 通过理论分析和数值模拟评估三种控制措施的效果。结果表明: 当基本再生数 R_0 小于1时疫情可控, 当 R_0 大于1时可能暴发疫情; 单一措施效果有限, 而工人防护(ϵ)、有效治疗(ϕ)和猪群扑杀(ξ)三措施协同可将 R_0 降至0.63, 实现有效防控。本研究为尼帕病毒防控提供了重要理论依据。

关键词

尼帕病毒, SEAIRS-SEI模型, 基本再生数, 全局渐近稳定性, 防控策略

Modeling the Transmission Dynamics and Evaluating Intervention Strategies for Nipah Virus in Pig Farms

Wenhui Li, Shuai Wang

School of Mathematics and Statistics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: December 16, 2025; accepted: January 9, 2026; published: January 19, 2026

Abstract

Nipah Virus (NiV) transmission in pig farms poses a significant public health threat. This study establishes a coupled human-pig SEAIRS-SEI model to assess the effectiveness of three control measures through theoretical analysis and numerical simulations. The results indicate that an outbreak is controllable when the basic reproduction number (R_0) is less than 1, but may escalate if R_0 exceeds 1. While individual measures show limited efficacy, the combined implementation of

worker protection (ε), effective treatment (φ), and pig culling (ξ) can synergistically reduce R_0 to 0.63, thereby achieving effective containment. This research provides an important theoretical foundation for the prevention and control of Nipah Virus outbreaks.

Keywords

Nipah Virus, SEAIRS-SEI Model, Basic Reproduction Number, Global Asymptotic Stability, Prevention and Control Strategies

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

人畜共患病在全球范围内持续加剧, 对公共卫生与经济构成严重威胁。尼帕病毒作为一种高致死性人畜共患病[1][2], 自 1998 年在马来西亚被首次发现以来, 已造成重大人员伤亡和经济损失[3][4]。该病毒以果蝠为自然宿主, 通过“蝙蝠-猪-人”的传播链在养殖场中扩散。猪[5]作为关键中间宿主, 感染后呈现从无症状携带到急性症状的异质性表现[6][7], 而猪场工人因密切接触成为高危人群。人类感染后病情危重, 且存在显著的无症状传播[8][9], 极大地增加了疫情防控的复杂性。

尽管尼帕病毒危害严重, 但针对其传播动力学的数学建模研究仍相对有限。现有研究多基于经典仓室模型[10][11], 或在多宿主传播机制[12][13]、最优控制策略[14][15]等方面进行了探索。基于此, 本研究受 Das [16]等人工作的启发, 本文提出一个 SEAIRS-SEI 人-猪耦合模型, 来模拟尼帕病毒在猪场中传播的动态过程, 具体假设如下:

(1) 接触感染猪只的养殖场工人, 因尼帕病毒潜伏期可能进入无症状感染阶段: 在此阶段, 工人可在出现发热、头痛等临床症状及住院治疗前, 通过飞沫或接触将病毒传播给同事或家属。

(2) 猪与人的交叉感染率遵循饱和和发病形式: 随着猪群感染规模扩大, 生物安全措施(如强化个人防护装备、增加环境消毒频次)会抑制人猪间有效接触率持续上升, 使人感染风险呈现饱和和增长态势。饱和和发病率函数的引入旨在反映现实猪场中随着感染猪数量上升, 工人防护意识与措施会相应增强, 从而使得感染率增长趋于平缓, 而非无限上升, 这与实际生物安全行为响应相符。

(3) 假设采用“外购仔猪场内育肥”模式, 仅聚焦 6 月龄以下、症状明显的猪只: 因猪群处于育成阶段, 暂不考虑与市场供应相关的对外出售。

(4) 对猪群实施区域化管理: 若某区域出现感染猪只, 该区域内所有猪只将被扑杀。该假设体现的是规模化猪场在疫情暴发初期采取的“精准清除”策略, 虽理想化, 但符合当前国际推荐的疫病根除原则。

目前, 尚无可用于防控尼帕病毒感染的特异性疫苗。基于既往控制尼帕病毒传染病爆发的经验教训[17][18], 本研究引入以下三种关键参数: 一是工人防护措施有效率 ε , 用于量化防护服以及预防知识宣传等措施降低工人感染风险的实际效果; 二是针对 I 阶段的有效治疗率 ϕ , 表示通过住院或“利巴韦林”药物治疗, 使感染者的病情有所改善; 三是猪群扑杀响应速率 ξ , 即某区域发现感染猪时, 该区域猪群被快速且全面扑杀, 体现扑杀策略在阻断猪群间病毒传播过程中响应的及时性。

2. 模型建立

假设尼帕病毒在一个猪场里传播, 遵循 SEAIRS-SEI 人-猪耦合传播, 我们只考虑猪到人的传播, 忽

略人到猪的传播。多数尼帕病毒疫情中, 猪作为中间宿主, 病毒传播主要方向为猪→人, 而人→猪传播的证据较少且影响有限[13]。传播舱室图如图 1 所示。

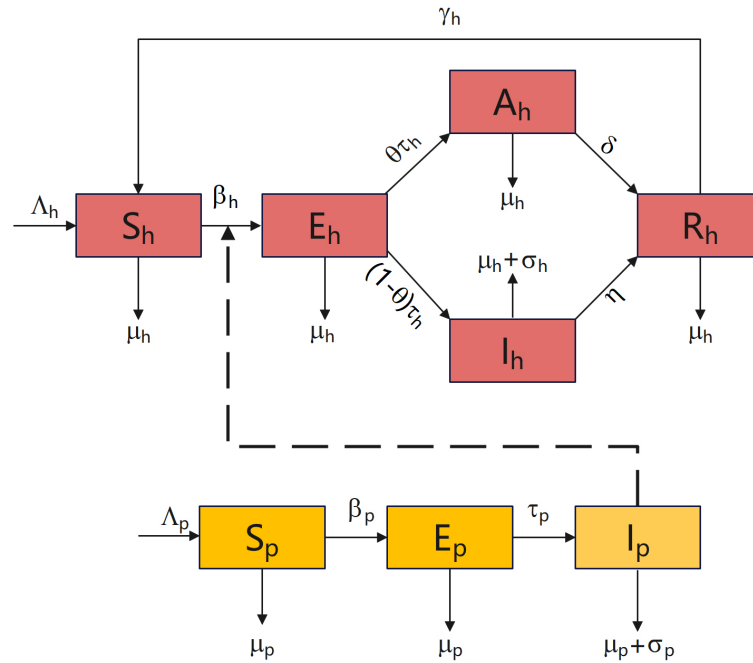


Figure 1. The compartmental diagram of the transmission model for NiV
图 1. 尼帕病毒传播舱室图

假设猪到人的感染率是饱和发病率, 形式为 $\lambda = \frac{\beta_{ph} I_p(t)}{1 + a I_p(t)} S_h(t)$, 其中 β_{ph} 是感染的猪到易感人的传播率, $\frac{1}{1 + a I_p(t)}$ 表示由感染猪的数量的增加, 人的防护措施引起的饱和效应, a 为饱和常数。

$$\begin{aligned}
 \frac{dS_h}{dt} &= \Lambda_h - \frac{\beta_{ph} I_p(t)}{1 + \alpha I_p(t)} S_h(t) - \beta_h I_h(t) S_h(t) - \alpha_h A_h(t) S_h(t) - \mu_h S_h(t) + \gamma_h R_h(t), \\
 \frac{dE_h}{dt} &= \frac{\beta_{ph} I_p(t)}{1 + \alpha I_p(t)} S_h(t) + \beta_h I_h(t) S_h(t) + \alpha_h A_h(t) S_h(t) - (\tau_h + \mu_h) E_h(t), \\
 \frac{dA_h}{dt} &= \theta \tau_h E_h(t) - (\delta + \mu_h) A_h(t), \\
 \frac{dI_h}{dt} &= (1 - \theta) \tau_h E_h(t) - (\eta + \sigma_h + \mu_h) I_h(t), \\
 \frac{dR_h}{dt} &= \delta A_h(t) + \eta I_h(t) - (\gamma_h + \mu_h) R_h(t), \\
 \frac{dS_p}{dt} &= \Lambda_p - \beta_p I_p(t) S_p(t) - \mu_p S_p(t), \\
 \frac{dE_p}{dt} &= \beta_p I_p(t) S_p(t) - \tau_p E_p(t), \\
 \frac{dI_p}{dt} &= \tau_p E_p(t) - \sigma_h I_p(t).
 \end{aligned} \tag{1}$$

Λ_h 代表猪场工人的招募率, Λ_p 代表猪场的猪仔采购。 μ_h 代表猪场工人的辞职率或退出率, μ_p 代表猪场猪仔的自然死亡率, σ_h 代表猪场工人感染尼帕病毒的致死率, σ_p 代表猪场中的猪仔因病致死率。 β_h, β_p 分别代表猪场的易感工人和易感猪的感染率, α_h 代表猪场的易感工人被无症状感染的感染率, 处于暴露阶段的农场工人分别以 θ 和 $1-\theta$ 的比率, 以 τ_h 的转换率进入 A_h 和 I_h 。处于无症状感染阶段和有症状感染阶段的农场工人分别以 δ, η 的恢复率进入 R_h , 恢复的人会以 γ_h 的免疫失效率再次变得易感。

根据以上讨论, 模型参数的综合总结见表 1。猪场的尼帕病毒人一猪耦合的数学模型为系统(1)

Table 1. System definition of parameters
表 1. 参数说明

参数	a 含义
Λ	猪场工人招募率
Λ_p	猪场猪仔采购数
μ_h	猪场工人的辞职率或退出率
μ_p	猪场猪仔自然死亡率
σ_h, σ_p	猪场工人和猪仔感染尼帕病毒的致死率
β_h, β_p	猪场有症状的工人和猪对易感工人和猪的传播率
β_{ph}	猪场中感染的猪仔到易感工人的交叉感染率
α_h	猪场中无症状工人对易感工人的传播率
θ	猪场中处于潜伏期的工人进入下一阶段的比率
τ_h	猪场中处于潜伏期的工人进入下一阶段的转换率
δ	猪场中无症状工人的恢复率
η	猪场中有症状工人的恢复率
$1/\gamma_h$	猪场中工人的平均免疫期
a	饱和常数
ε	工人防护率
ϕ	有效治疗率
ξ	猪群扑杀响应速率

初始条件如下:

$$\begin{aligned} S_h(0) &= S_{h0}, E_h(0) = E_{h0}, A_h(0) = A_{h0}, I_h(0) = I_{h0}, R_h(0) = R_{h0}, \\ S_p(0) &= S_{p0}, E_p(0) = E_{p0}, I_p(0) = I_{p0}. \end{aligned} \tag{2}$$

农场中的工人总数和猪总数分别为

$$N_h = S_h + E_h + A_h + I_h + R_h, \tag{3}$$

$$N_p = S_p + E_p + I_p. \tag{4}$$

接下来引入三种不同的控制参数 ε 、 ϕ 、 ξ , 基本方程更新为(5)

$$\begin{aligned}
\frac{dS_h}{dt} &= \Lambda_h - \frac{\beta_{ph}(1-\varepsilon)I_p(t)}{1+\alpha I_p(t)} S_h(t) - \beta_h I_h(t)(1-\varepsilon) S_h(t) - \alpha_h A_h(t)(1-\varepsilon) S_h(t) - \mu_h S_h(t) + \gamma_h R_h(t), \\
\frac{dE_h}{dt} &= \frac{\beta_{ph}(1-\varepsilon)I_p(t)}{1+\alpha I_p(t)} S_h(t) + \beta_h I_h(t)(1-\varepsilon) S_h(t) + \alpha_h A_h(t)(1-\varepsilon) S_h(t) - (\tau_h + \mu_h) E_h(t), \\
\frac{dA_h}{dt} &= \theta \tau_h E_h(t) - (\delta + \mu_h) A_h(t), \\
\frac{dI_h}{dt} &= (1-\theta) \tau_h E_h(t) - (\eta + \sigma_h + \mu_h + \phi) I_h(t), \\
\frac{dR_h}{dt} &= \delta A_h(t) + (\eta + \phi) I_h(t) - (\gamma_h + \mu_h) R_h(t), \\
\frac{dS_p}{dt} &= \Lambda_p - \beta_p I_p(t) S_p(t) - (\mu_p + \xi) S_p(t), \\
\frac{dE_p}{dt} &= \beta_p I_p(t) S_p(t) - (\mu_p + \tau_p + \xi) E_p(t), \\
\frac{dI_p}{dt} &= \tau_p E_p(t) - (\mu_p + \sigma_p + \xi) I_p(t).
\end{aligned} \tag{5}$$

初始条件是在 $t=0$ 时刻。

3. 基本理论

3.1. 非负性与有界性

对于系统(3), 满足初始条件 $X(0) \geq 0$ 的解 $X(t)$, 在所有 $t > 0$ 时均保持非负, 其中

$$X(t) = (S_h(0), E_h(0), A_h(0), I_h(0), R_h(0), S_p(0), E_p(0), I_p(0)). \tag{6}$$

根据(1)和(2), 分别对猪场中的工人和猪的总数量的表达式求导、化简, 可以得到当 $t \rightarrow \infty$,

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} N_h(t) \leq \frac{\Lambda_h}{\mu_h}, \tag{7}$$

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} N_p(t) \leq \frac{\Lambda_p}{\mu_p + \xi}, \tag{8}$$

即人和猪总数有界。则得到系统(5)的最大正不变集为

$$\Omega = \{(S, E, A, I, R, S_p, E_p, I_p) \in R_+^5 \times R_+^3 : 0 < N \leq \Lambda/\mu, 0 < N_p \leq \Lambda_p/(\mu_p + \xi)\}. \tag{9}$$

接下来, 我们将在 Ω 中研究系统(5)的解的动力学行为。

3.2. 基本再生数

系统(5)的无病平衡点为

$$Q_0 = \left(\frac{\Lambda_h}{\mu_h}, 0, 0, 0, 0, \frac{\Lambda_p}{\mu_p + \xi}, 0, 0 \right). \tag{10}$$

根据下一代矩阵法[19]求出系统(5)基本再生数的表达式为:

$$R_0 = \max(R_0^h, R_0^p). \tag{11}$$

其中

$$R_0^h = \frac{\tau_h \Lambda_h (1-\varepsilon) [\theta \alpha_h (\eta + \sigma_h + \mu_h + \phi) + \beta_h (1-\theta) (\delta + \mu_h)]}{\mu_h (\tau_h + \mu_h) (\delta + \mu_h) (\eta + \sigma_h + \mu_h + \phi)}. \quad (12)$$

$$R_0^p = \frac{\tau_p \Lambda_p \beta_p}{(\mu_p + \xi) (\tau_p + \mu_p + \xi) (\sigma_p + \mu_p + \xi)}. \quad (13)$$

由上述的表达式可以看出, 基本再生数 R_0 与交叉感染率 β_{ph} 无关。

3.3. 地方病平衡点的存在性

定理 3.1: 当 $R_0^p > 1$ 时, 系统(5)存在地方病平衡点 $Q^* (S^*, E^*, A^*, I^*, R^*, S_p^*, E_p^*, I_p^*)$ 。

证明: 令系统(5)的右端为 0, 如果存在地方病平衡 Q^* , 则有以下方程组成立:

$$\begin{aligned} \Lambda_h - \frac{\beta_{ph}(1-\varepsilon)I_p^*}{1+\alpha I_p^*} S_h^* - \beta_h I_h^* (1-\varepsilon) S_h^* - \alpha_h A_h^* (1-\varepsilon) S_h^* - \mu_h S_h^* + \gamma_h R_h^* &= 0, \\ \frac{\beta_{ph}(1-\varepsilon)I_p^*}{1+\alpha I_h^*} S_h^* + \beta_h I_h^* (1-\varepsilon) S_h^* + \alpha_h A_h^* (1-\varepsilon) S_h^* - (\tau_h + \mu_h) E_h^* &= 0, \\ \theta \tau_h E_h^* - (\delta + \mu_h) A_h^* &= 0, \\ (1-\theta) \tau_h E_h^* - (\eta + \sigma_h + \mu_h + \phi) I_h^* &= 0, \\ \delta A_h^* + (\eta + \phi) I_h^* - (\gamma_h + \mu_h) R_h^* &= 0, \\ \Lambda_p - \beta_p I_p^* S_p^* - (\mu_p + \xi) S_p^* &= 0, \\ \beta_p I_p^* S_p^* - (\tau_p + \mu_p + \xi) E_p^* &= 0, \\ \tau_p E_p^* - (\mu_p + \sigma_p + \xi) I_p^* &= 0, \end{aligned} \quad (14)$$

利用上述表达式以及变量之间的相互关系可得

$$S_p^* = \frac{\Lambda_p}{\beta_p I_p^* + \mu_p + \xi}, \quad E_p^* = \frac{\beta_p I_p^* S_p^*}{\tau_p + \mu_p + \xi}, \quad I_p^* = \frac{\tau_p \beta_p \Lambda_p - (\mu_p + \xi) (\mu_p + \sigma_p + \xi) (\tau_p + \mu_p + \xi)}{\beta_p (\tau_p + \mu_p + \xi) (\mu_p + \sigma_p + \xi)}. \quad (15)$$

根据 $R_0^p > 1$, 则有

$$\tau_p \Lambda_p \beta_p > (\mu_p + \xi) (\tau_p + \mu_p + \xi) (\sigma_p + \mu_p + \xi). \quad (16)$$

根据式(16)可以判断出 $I_p^* > 0$, $S_p^* > 0$, $E_p^* > 0$ 。再看关于猪场工人部分的方程组, 可得

$$A_h^* = \frac{\theta \tau_h E_h^*}{\delta + \mu_h}, \quad I_h^* = \frac{(1-\theta) \tau_h E_h^*}{\eta + \sigma_h + \mu_h + \phi}, \quad R_h^* = \frac{\delta A_h^* + (\eta + \phi) I_h^*}{\gamma_h + \mu_h}. \quad (17)$$

经过变换, 可以得到关于 E_h^* 的一元二次方程, 我们将其记为

$$P(E_h^*) = a E_h^{*2} + b E_h^* + c = 0. \quad (18)$$

其中系数为

$$a = \tau_h \left[\frac{\beta_h (1-\varepsilon) (1-\theta)}{\eta + \sigma_h + \mu_h + \phi} + \frac{\alpha_h (1-\varepsilon) \theta}{\delta + \mu_h} \right], \quad (19)$$

$$b = \frac{\beta_{ph}(1-\varepsilon)I_p^*}{1+\alpha I_p^*} \tau_h + \mu_h + \mu_h(\tau_h + \mu_h) - \gamma_h \cdot \frac{\tau_h [\delta \theta (\eta + \sigma_h + \mu_h + \phi) + (\eta + \phi)(1-\theta)(\delta + \mu_h)]}{(\gamma_h + \mu_h)(\delta + \mu_h)(\eta + \sigma_h + \mu_h + \phi)}, \quad (20)$$

$$c = -\Lambda_h(\tau_h + \mu_h). \quad (21)$$

因为 $a > 0$, $c < 0$, 且 $\Delta = b^2 - 4ac > 0$, 故该一元二次方程存在唯一正根。即证得

$$E_h^* > 0, S_h^* > 0, A_h^* > 0, I_h^* > 0, R_h^* > 0, \quad (22)$$

故系统(5)的地方病平衡点存在。

3.4. 无病平衡点的局部渐近稳定性

定理 3.2: $R_0^h < 1$, $R_0^p < 1$ 时, 系统(5)的无病平衡点 Q_0 局部渐近稳定; $R_0^h > 1$, $R_0^p > 1$ 时, Q_0 不稳定。

证明: 定义系统(5)在无病平衡点 $Q_0\left(\frac{\Lambda}{\mu}, 0, 0, 0, 0, \frac{\Lambda_p}{\mu_p + \xi}, 0, 0\right)$ 处的 Jacobian 为

$$J(Q_0) = \begin{pmatrix} A & B \\ 0 & C \end{pmatrix},$$

因此求矩阵 J 的特征值转换成了求矩阵 A 和 C 的特征值。

$$A = \begin{pmatrix} -\mu_h & 0 & -\alpha_h(1-\varepsilon)\frac{\Lambda_h}{\mu_h} & -\beta_h(1-\varepsilon)\frac{\Lambda_h}{\mu_h} & \gamma_h \\ 0 & -(\tau_h + \mu_h) & \alpha_h(1-\varepsilon)\frac{\Lambda_h}{\mu_h} & \beta_h(1-\varepsilon)\frac{\Lambda_h}{\mu_h} & 0 \\ 0 & \theta\tau_h & -(\delta + \mu_h) & 0 & 0 \\ 0 & (1-\theta)\tau_h & 0 & -(\eta + \sigma_h + \mu_h + \phi) & 0 \\ 0 & 0 & \delta & \eta + \phi & -(\gamma_h + \mu_h) \end{pmatrix}.$$

显然矩阵 A 的两个特征值为

$$\lambda_1 = -\mu_h < 0, \quad (23)$$

$$\lambda_2 = -(\gamma_h + \mu_h) < 0, \quad (24)$$

因此只需要判断以下矩阵 D 的特征值实部的符号。

$$D = \begin{pmatrix} -(\tau_h + \mu_h) & \alpha_h(1-\varepsilon)\frac{\Lambda_h}{\mu_h} & \beta_h(1-\varepsilon)\frac{\Lambda_h}{\mu_h} \\ \theta\tau_h & -(\delta + \mu_h) & 0 \\ (1-\theta)\tau_h & 0 & -(\eta + \sigma_h + \mu_h + \phi) \end{pmatrix}.$$

矩阵 D 的特征多项式为

$$f(\lambda) = \lambda^3 + a_2\lambda^2 + a_1\lambda + a_0. \quad (25)$$

根据 Routh-Hurwitz 判据[20], $f(\lambda)$ 具有负实根当且仅当 $a_2 > 0$, $a_0 > 0$, $a_2a_1 - a_0 > 0$ 。我们定义

$$X = \tau_h + \mu_h, Y = \delta + \mu_h, Z = \eta + \sigma_h + \mu_h + \phi. \quad (26)$$

那么就会有

$$a_2 = (\tau_h + \mu_h) + (\delta + \mu_h) + (\eta + \sigma_h + \mu_h + \phi) = X + Y + Z > 0. \quad (27)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= (\tau_h + \mu_h)(\eta + \sigma_h + \mu_h + \phi) + (\delta + \mu_h)(\eta + \sigma_h + \mu_h + \phi) + (\tau_h + \mu_h)(\delta + \mu_h) \\ &\quad - \frac{\tau_h \Lambda_h (1-\varepsilon) \theta \alpha_h}{\mu_h} - \frac{\tau_h \Lambda_h (1-\varepsilon) \beta_h (1-\theta)}{\mu_h} \\ &= XZ + YZ + XY - \frac{\tau_h \Lambda_h (1-\varepsilon) \theta \alpha_h}{\mu_h} - \frac{\tau_h \Lambda_h (1-\varepsilon) \beta_h (1-\theta)}{\mu_h}. \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} a_0 &= (\tau_h + \mu_h)(\delta + \mu_h)(\eta + \sigma_h + \mu_h + \phi) - \frac{\tau_h \Lambda_h (1-\varepsilon) [\theta \alpha_h (\eta + \sigma_h + \mu_h + \phi) + \beta_h (1-\theta) (\delta + \mu_h)]}{\mu_h} \\ &= XYZ - Z \frac{\tau_h \Lambda_h (1-\varepsilon) \theta \alpha_h}{\mu_h} - Y \frac{\tau_h \Lambda_h (1-\varepsilon) \beta_h (1-\theta)}{\mu_h} = XYZ (1 - R_0^h). \end{aligned} \quad (29)$$

当 $R_0^h < 1$, $a_0 > 0$,

$$\begin{aligned} a_2 a_1 - a_0 &= (X + Y + Z) \left[XZ + YZ + XY - \frac{\tau_h \Lambda_h (1-\varepsilon) \theta \alpha_h}{\mu_h} - \frac{\tau_h \Lambda_h (1-\varepsilon) \beta_h (1-\theta)}{\mu_h} \right] - XYZ (1 - R_0^h) \\ &= (X + Y + Z) (XZ + YZ + XY) - (X + Y + Z) \left(\frac{\tau_h \Lambda_h (1-\varepsilon) \theta \alpha_h}{\mu_h} + \frac{\tau_h \Lambda_h (1-\varepsilon) \beta_h (1-\theta)}{\mu_h} \right) \\ &\quad - XYZ (1 - R_0^h) \\ &> (X + Y + Z) (XZ + YZ + XY) - (X + Y + Z) (XY + XZ) - XYZ (1 - R_0^h) \\ &= (Y + Z) YZ + XYZ R_0^h > 0. \end{aligned} \quad (30)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\beta_{ph} (1-\varepsilon) \frac{\Lambda_h}{\mu_h} \\ 0 & 0 & \beta_{ph} (1-\varepsilon) \frac{\Lambda_h}{\mu_h} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} -(\mu_p + \xi) & 0 & -\beta_p \frac{\Lambda_p}{\mu_p + \xi} \\ 0 & -(\mu_p + \tau_p + \xi) & \beta_p \frac{\Lambda_p}{\mu_p + \xi} \\ 0 & \tau_p & -(\mu_p + \sigma_p + \xi) \end{pmatrix}.$$

矩阵 C 的特征值为

$$\lambda_3 = -(\mu_p + \xi) < 0, \quad (31)$$

$$\lambda_4 = -(2\mu_p + \tau_p + \sigma_p + 2\xi) - \sqrt{(2\mu_p + \tau_p + \sigma_p + 2\xi)^2 - 4(\tau_p + \mu_p + \xi)(\sigma_p + \mu_p + \xi)(1 - R_0^p)} < 0, \quad (32)$$

$$\lambda_5 = -(2\mu_p + \tau_p + \sigma_p + 2\xi) + \sqrt{(2\mu_p + \tau_p + \sigma_p + 2\xi)^2 - 4(\tau_p + \mu_p + \xi)(\sigma_p + \mu_p + \xi)(1 - R_0^p)} < 0, \quad (33)$$

若 $R_0^p < 1$, 则特征根 λ_4 和 λ_5 的实部为负, 则系统(5)的无病平衡点的局部渐近稳定性得证。

3.5. 无病平衡点的全局渐近稳定性

定理 3.3: 当 $R_0^h < 1$, $R_0^p < 1$ 时, 系统(5)的无病平衡点 Q_0 全局渐近稳定。

证明: 类似文献[21]的证明方法来证明无病平衡点的全局渐近稳定性。将系统(5)中的感染类变量 $(E_h, A_h, I_h, E_p, I_p)$ 的动力学方程分离出来, 忽略恢复和易感类的动态, 构造一个线性系统作为系统的上界, 已经证明, 上述系统所有变量初始非负, 解保持非负, 且有界。我们可以知道饱和项的上界

$$\frac{\beta_{ph}(1-\varepsilon)I_p}{1+\alpha I_p} \leq \beta_{ph}(1-\varepsilon)I_p \quad (\alpha \geq 0), \quad (34)$$

则感染类动力学上限系统如下

$$\begin{aligned} \frac{dE_h}{dt} &= \beta_{ph}(1-\varepsilon)\frac{\Lambda_h}{\mu_h}I_p + \beta_h(1-\varepsilon)\frac{\Lambda_h}{\mu_h}I_h + \alpha_h(1-\varepsilon)\frac{\Lambda_h}{\mu_h}A_h - (\tau_h + \mu_h)E_h, \\ \frac{dA_h}{dt} &= \theta\tau_hE_h - (\delta + \mu_h)A_h, \\ \frac{dI_h}{dt} &= (1-\theta)\tau_hE_h - (\eta + \sigma_h + \mu_h + \phi)I_h, \\ \frac{dE_p}{dt} &= \beta_pI_p\frac{\Lambda_p}{\mu_p + \xi} - (\mu_p + \tau_p + \xi)E_p, \\ \frac{dI_p}{dt} &= \tau_pE_p - (\mu_p + \sigma_p + \xi)I_p. \end{aligned} \quad (35)$$

我们令

$$\bar{u} = [E_h, A_h, I_h, E_p, I_p]^T, \quad (36)$$

线性化系统可以记为

$$\frac{d\bar{u}}{dt} = K\bar{u}, \quad (37)$$

$$K = F - V. \quad (38)$$

根据文献[22]中定理 2 的证明, 如果

$$R_0 = \rho(FV^{-1}) < 1, \quad (39)$$

那么则会有

$$s(F - V) < 0, \quad (40)$$

因此系统(35)的任意正解均满足

$$\lim_{t \rightarrow \infty} u(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} E_h = \lim_{t \rightarrow \infty} A_h = \lim_{t \rightarrow \infty} I_h = \lim_{t \rightarrow \infty} E_p = \lim_{t \rightarrow \infty} I_p = 0. \quad (41)$$

因为原系统(5)的变量都是非负的, 可由比较定理[23]知, (5)的感染类变量同样趋于零, 易感类趋于 N_h, N_p , 即满足式(7)、(8)、(41)。综上, 当 $R_0^h < 1$, $R_0^p < 1$ 时, 系统(5)从任意初始状态出发的解均收敛于无病平衡点 Q_0 , 故该平衡点是全局渐近稳定的。

3.6. 对控制参数 ε 、 ϕ 、 ξ 进行求偏导

在本节中, 对控制参数 ε (工人防护效率)、 ϕ (有效治疗率)和 ξ (猪群扑杀响应速率)进行求偏导分析, 以探究其对基本再生数 R_0 的影响。具体推导如下:

$$\frac{\partial R_0^h}{\partial \varepsilon} = \frac{-\tau_h \Lambda_h [\theta \alpha_h (\eta + \sigma_h + \mu_h + \phi) + \beta_h (1 - \theta) (\delta + \mu_h)]}{\mu_h (\tau_h + \mu_h) (\delta + \mu_h) (\eta + \sigma_h + \mu_h + \phi)} \leq 0, \quad (42)$$

$$\frac{\partial R_0^h}{\partial \phi} = \frac{-\tau_h \Lambda_h (1 - \varepsilon) [\theta \alpha_h (\eta + \sigma_h + \mu_h) + \beta_h (1 - \theta) (\delta + \mu_h)]}{\mu_h (\tau_h + \mu_h) (\delta + \mu_h) (\eta + \sigma_h + \mu_h + \phi)^2} \leq 0, \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_0^p}{\partial \xi} &= \frac{-\tau_p \Lambda_p \beta_p [(\tau_p + \mu_p + \xi)(\sigma_p + \mu_p + \xi) + (\mu_p + \xi)(\sigma_p + \mu_p + \xi)]}{(\mu_p + \xi)^2 (\tau_p + \mu_p + \xi)^2 (\sigma_p + \mu_p + \xi)^2} \\ &\quad + \frac{-\tau_p \Lambda_p \beta_p [(\mu_p + \xi)(\tau_p + \mu_p + \xi)]}{(\mu_p + \xi)^2 (\tau_p + \mu_p + \xi)^2 (\sigma_p + \mu_p + \xi)^2} \\ &\leq 0. \end{aligned} \quad (44)$$

由上述表达式可以看出三种控制措施对 R_0 都有积极的影响, 当这些控制参数在合理范围内提升时, 均可降低基本再生数 R_0 , 进而有效抑制尼帕病毒的传播, 为实际防控策略的制定提供了理论依据。

4. 数值模拟

为验证理论结果并评估控制策略的有效性, 我们进行了数值模拟。模拟基于一个猪场的合理参数设定, 分析了三种控制措施(工人防护、有效治疗、猪群扑杀反应速率)的单一、组合及综合运用对尼帕病毒传播动态的影响。为了模拟三种控制措施的七种不同组合(干预措施 A-G, 见表 2)对感染群体的影响, 我们将初始条件设置为: $S_h(0)=100$, $E_h(0)=12$, $A_h(0)=5$, $I_h(0)=3$, $R_h(0)=0$, $S_p(0)=1000$, $E_p(0)=30$, $I_p(0)=9$ 。所有控制参数的取值范围均为 $\varepsilon, \phi, \xi \in [0, 1]$ 。根据相关数据以及合理假设, 数值模拟是在以下参数值下进行的: $\Lambda_h=2$, $\mu_h=0.02$, $\tau_h=0.13$, $\alpha_h=0.01$, $\delta=0.4$, $\gamma_h=0.15$, $\beta_{ph}=0.01$, $\beta_h=0.03$, $a=0.3$, $\theta=0.6$, $\eta=0.5$, $\sigma_h=0.06$, $\Lambda_p=6$, $\mu_p=0.06$, $\beta_p=0.02$, $\tau_p=0.11$, $\sigma_p=0.4$ 。

图 2 和图 3 展示了三种控制措施七种不同的组合在 ε, ϕ, ξ 分别取 0、0.1、0.4 和 0.7 的情况下, 感染群体的变化情况。此外, 表 2 详细列出了每种干预策略对再生数 R_0 的影响, 进一步说明了不同控制措施对疫情传播的抑制效果。

Table 2. The impact of intervention measures A-G on the basic reproduction number R_0

表 2. 干预措施 A-G 对基本再生数 R_0 的影响

控制水平	控制名称	控制参数值	基本再生数 R_0 值
只有一种控制措施	$A: \varepsilon(\phi = \xi = 0)$	0.10	2.78
		0.40	2.78
		0.70	2.78
	$B: \phi(\varepsilon = \xi = 0)$	0.10	2.82
		0.40	2.78
		0.70	2.78
	$C: \xi(\varepsilon = \phi = 0)$	0.10	3.09
		0.40	3.09
		0.70	3.09

续表

两种控制措施相结合	$D: \varepsilon = \phi (\xi = 0)$	0.10	2.81
		0.40	2.81
		0.70	2.81
	$E: \phi = \xi (\varepsilon = 0)$	0.10	2.82
		0.40	2.36
		0.70	2.11
	$F: \varepsilon = \xi (\phi = 0)$	0.10	2.78
		0.40	1.85
		0.70	0.92
三种控制措施同时使用	$G: \varepsilon = \phi = \xi$	0.00	3.09
		0.10	2.54
		0.40	1.41
		0.70	0.63

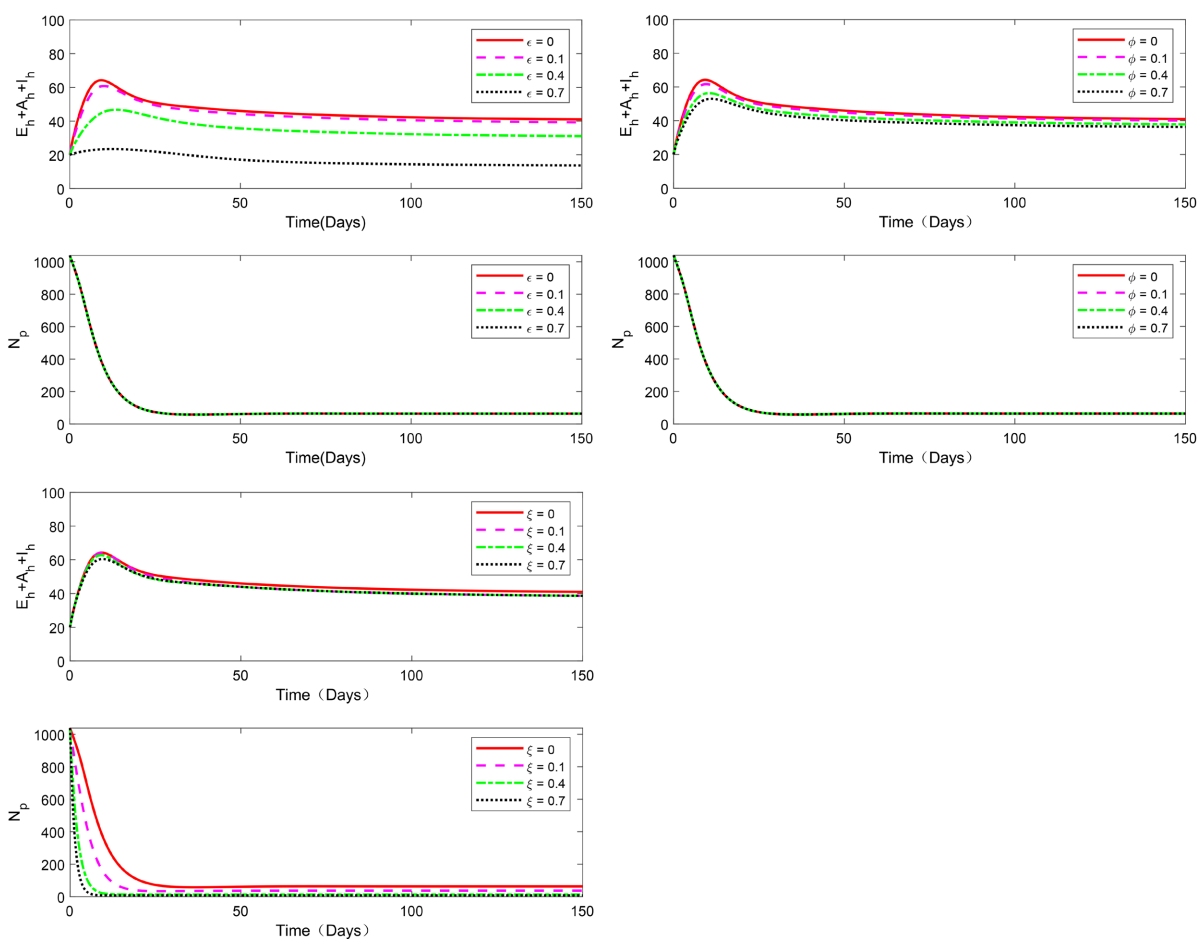


Figure 2. The impact of a single control measure on NiV transmission

图 2. 只有一种控制措施对 NiV 传播的影响

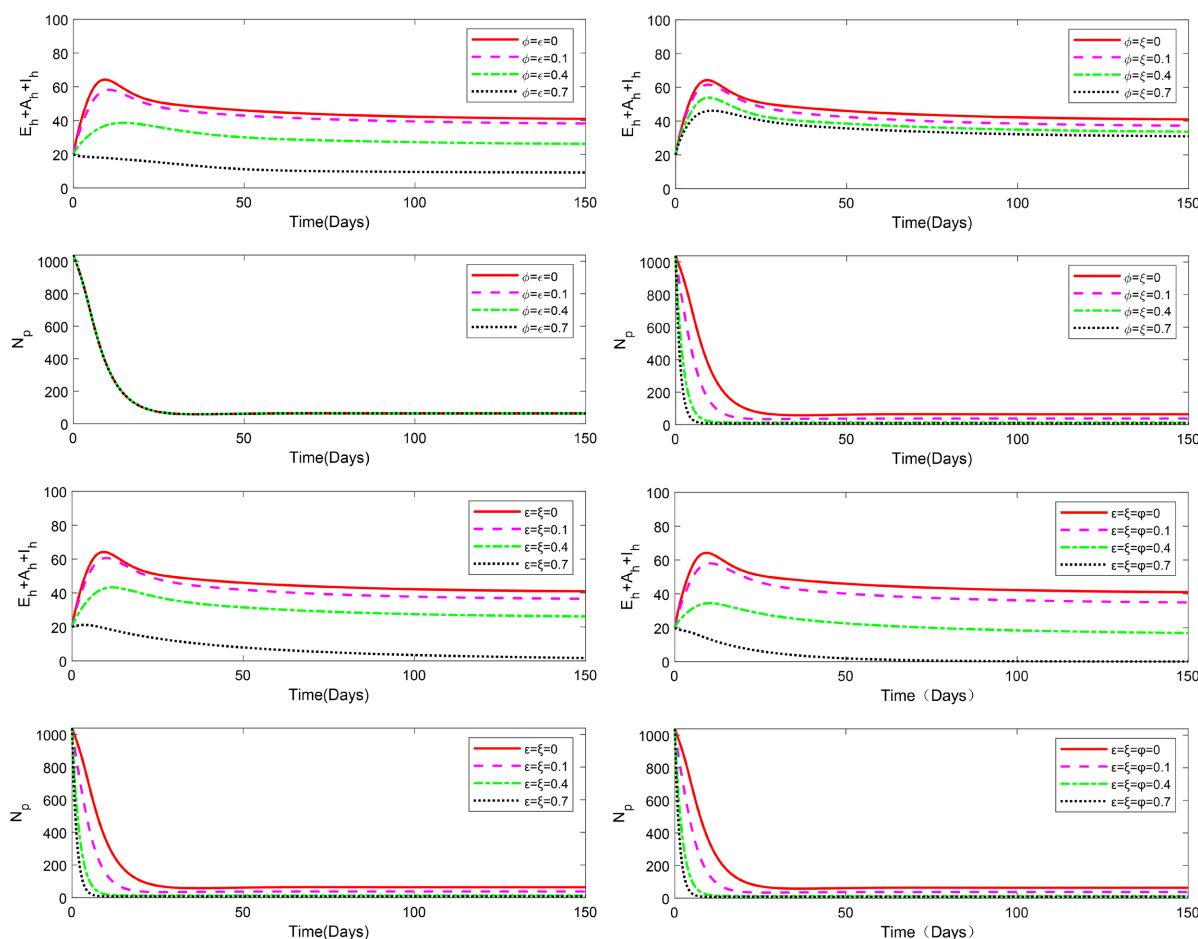


Figure 3. The impact of different combinations of two control measures and the simultaneous implementation of all three measures on NiV transmission

图 3. 两种控制措施的不同组合以及三种措施同时控制对 NiV 传播的影响

结果显示, 在无干预措施的情况下, 计算得出的基本再生数 R_0 约为 3.09, 疫情会爆发并持续。模拟结果通过图进行了可视化展示, 展示了不同干预措施的不同取值对尼帕病毒传播的动态影响。单一控制措施虽能略微降低 R_0 或减少感染人数, 但效果有限, 无法单独将 R_0 降至阈值 1 以下。两种措施组合使用能取得更好效果, 例如当工人防护效率 $\varepsilon = 0.7$ 且猪群扑杀响应速率 $\xi = 0.7$ 时, R_0 降至 0.92, 小于 1, 可实现疫情控制。最优策略是三种措施协同实施, 可显著降低基本再生数 R_0 , 如 $\varepsilon = \phi = \xi = 0.7$ 时, R_0 显著降至 0.63, 并能有效压低感染峰值、缩短疫情持续时间。

5. 总结与讨论

本章通过构建 SEAIRS-SEI 人猪耦合动力学模型, 系统模拟解析了尼帕病毒在猪场中的传播机制及防控策略。理论分析表明, 系统稳定性由基本再生数 R_0 主导: 当 $R_0 < 1$ 时无病平衡点全局稳定, 而 $R_0 > 1$ 时疫情可能持续存在并扩散显著(无干预时 $R_0 \approx 3.09$)。数值模拟进一步揭示, 单一控制措施(如工人防护率 ε)对 R_0 的抑制有限(降至 2.78), 但三措施协同($\varepsilon = \phi = \xi = 0.7$)可显著降低 R_0 至 0.63, 有效缩短疫情周期并减少感染峰值。

与现有研究对比, 本模型的 R_0 估值处于已报道范围的高位, 这主要源于对无症状感染环节和饱和和接触率的显式考虑, 提示忽略这些因素可能低估疫情风险。然而, “所有措施最大化”的理想结论面临现

实约束。高强度防护成本高昂, 快速扑杀造成重大经济损失, 高效治疗依赖充足医疗资源。因此, 我们提出一个更务实、分阶段的优化策略思路: 在资源常态配置期, 应优先投资于提升猪场整体生物安全水平(这体现为提高饱和和常数 λ 所表征的防护响应强度)与维持基础人员防护(保持一定的 ε)。当疫情早期被侦测到时, 应急响应的核心必须转向优先保障快速扑杀(力求实现较高的 ζ)与实施最高级别的人员防护, 而对病例的治疗资源(ϕ)则应采取集中使用的原则。本研究的模拟表明, 扑杀措施(ζ)在与其它措施协同降低 R_0 时效果尤为显著(参见表 2 及图 3)。这意味着, 在实践中, 一个侧重于快速扑杀与稳固基础防护的策略组合, 在理论上具有将 R_0 压制到阈值以下的潜力。这为在资源约束下, 制定“以快速清除动物端传染源为核心, 强化人员端基础隔离防护”的应急方案提供了理论依据和优先级参考。

未来研究需进一步拓展模型的多尺度特性, 可以考虑一是纳入病毒变异、环境介质(如蝙蝠排泄物污染)及猪场外部流动(如生猪交易)的影响, 或是结合 COVID-19 防控经验[24][25], 探索将环境拭子检测与血清学筛查纳入无症状感染者监测体系, 量化其对降低 R_0 的贡献。此外, 值得注意的是, 本文仅关注了小月龄猪(4 周龄至 6 月龄)的感染特性, 而大猪的感染情况未被纳入研究。大猪在养殖周期中可能表现出不同的传播模式和感染特征, 其在病毒传播链中的作用仍需进一步探讨。随着全球养殖集约化与生态交互的加剧, 此类多学科交叉研究将为防范人畜共患病大流行提供关键科学支撑, 同时为政策制定者提供兼顾公共卫生安全与经济可持续性的决策工具。

参考文献

- [1] Goh, K.J., Tan, C.T., Chew, N.K., Tan, P.S.K., Kamarulzaman, A., Sarji, S.A., *et al.* (2000) Clinical Features of Nipah Virus Encephalitis among Pig Farmers in Malaysia. *New England Journal of Medicine*, **342**, 1229-1235. <https://doi.org/10.1056/nejm200004273421701>
- [2] Hsu, V.P., Hossain, M.J., Parashar, U.D., Ali, M.M., Ksiazek, T.G., Kuzmin, I., *et al.* (2004) Nipah Virus Encephalitis Reemergence, Bangladesh. *Emerging Infectious Diseases*, **10**, 2082-2087. <https://doi.org/10.3201/eid1012.040701>
- [3] Chua, K.B., Bellini, W.J., Rota, P.A., Harcourt, B.H., Tamin, A., Lam, S.K., *et al.* (2000) Nipah Virus: A Recently Emergent Deadly Paramyxovirus. *Science*, **288**, 1432-1435. <https://doi.org/10.1126/science.288.5470.1432>
- [4] Goh, G.K., Dunker, A.K., Foster, J.A. and Uversky, V.N. (2020) Nipah Shell Disorder, Modes of Infection, and Virulence. *Microbial Pathogenesis*, **141**, Article 103976. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2020.103976>
- [5] Halpin, K., Young, P.L., Field, H.E. and Mackenzie, J.S. (2000) Isolation of Hendra Virus from Pteropid Bats: A Natural Reservoir of Hendra Virus. *Journal of General Virology*, **81**, 1927-1932. <https://doi.org/10.1099/0022-1317-81-8-1927>
- [6] Yob, J.M., Field, H., Rashdi, A.M., Morrissey, C., van der Heide, B., Rota, P., *et al.* (2001) Nipah Virus Infection in Bats (Order Chiroptera) in Peninsular Malaysia. *Emerging Infectious Diseases*, **7**, 439-441. <https://doi.org/10.3201/eid0703.017312>
- [7] Aditi, and Shariff, M. (2019) Nipah Virus Infection: A Review. *Epidemiology and Infection*, **147**, e95. <https://doi.org/10.1017/s0950268819000086>
- [8] Shete, A.M., Radhakrishnan, C., Pardeshi, P.G., Yadav, P.D., Jain, R., Sahay, R.R., *et al.* (2021) Antibody Response in Symptomatic & Asymptomatic Nipah Virus Cases from Kerala, India. *Indian Journal of Medical Research*, **154**, 533-535. https://doi.org/10.4103/ijmr.ijmr_4388_20
- [9] Ramachandran, R., Jose, M.S., Sahay, R.R. and Shete, A. (2022) Sero-Prevalence of Nipah Antibodies among Close Contacts of the Index Case during 2019 Ernakulam Outbreak. *Journal of Family Medicine and Primary Care*, **11**, 2479-2482. https://doi.org/10.4103/jfmpe.jfmpe_1731_21
- [10] Sultana, J. and N. Podder, C. (2016) Mathematical Analysis of Nipah Virus Infections Using Optimal Control Theory. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, **4**, 1099-1111. <https://doi.org/10.4236/jamp.2016.46114>
- [11] Mondal, M.K., Hanif, M. and Biswas, M.H.A. (2017) A Mathematical Analysis for Controlling the Spread of Nipah Virus Infection. *International Journal of Modelling and Simulation*, **37**, 185-197. <https://doi.org/10.1080/02286203.2017.1320820>
- [12] Agarwal, P. and Singh, R. (2020) Modelling of Transmission Dynamics of Nipah Virus (NIV): A Fractional Order Approach. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **547**, Article 124243. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.124243>
- [13] Barua, S. and Dénes, A. (2023) Global Dynamics of a Compartmental Model for the Spread of Nipah Virus. *Heliyon*, **9**,

- e19682. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19682>
- [14] Biswas, M.H.A. (2012) Model and Control Strategy of the Deadly Nipah Virus (NIV) Infections in Bangladesh. *Research Reviews in Biosciences*, **6**, 370-377.
 - [15] Biswas, M.H.A. (2014) Optimal Control of Nipah Virus (NIV) Infections: A Bangladesh Scenario. *Journal of Pure and Applied Mathematics: Advances and Applications*, **12**, 77-104.
 - [16] Das, S., Das, P. and Das, P. (2020) Control of Nipah Virus Outbreak in Commercial Pig-Farm with Biosecurity and Culling. *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*, **15**, Article 64. <https://doi.org/10.1051/mmnp/2020047>
 - [17] Looi, L.M. and Chua, K.B. (2007) Lessons from the Nipah Virus Outbreak in Malaysia. *Malaysian Journal of Pathology*, **29**, 63-67.
 - [18] Orosco, F. (2023) Advancing the Frontiers: Revolutionary Control and Prevention Paradigms against Nipah Virus. *Open Veterinary Journal*, **13**, 1056-1070. <https://doi.org/10.5455/ovj.2023.v13.i9.1>
 - [19] Diekmann, O., Heesterbeek, J.A.P. and Roberts, M.G. (2009) The Construction of Next-Generation Matrices for Compartmental Epidemic Models. *Journal of The Royal Society Interface*, **7**, 873-885. <https://doi.org/10.1098/rsif.2009.0386>
 - [20] Murray, J.D. (2007) *Mathematical Biology: I. An Introduction* (Vol. 17). Springer Science and Business Media.
 - [21] Phaijoo, G. and Gurung, D. (2017) Mathematical Model of Dengue Disease Transmission Dynamics with Control Measures. *Journal of Advances in Mathematics and Computer Science*, **23**, 1-12. <https://doi.org/10.9734/jamcs/2017/33955>
 - [22] van den Driessche, P. and Watmough, J. (2002) Reproduction Numbers and Sub-Threshold Endemic Equilibria for Compartmental Models of Disease Transmission. *Mathematical Biosciences*, **180**, 29-48. [https://doi.org/10.1016/s0025-5564\(02\)00108-6](https://doi.org/10.1016/s0025-5564(02)00108-6)
 - [23] Smith, H.L. and Waltman, P. (1995) *The Theory of the Chemostat: Dynamics of Microbial Competition*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511530043>
 - [24] Wang, X., Tan, L., Wang, X., Liu, W., Lu, Y., Cheng, L., *et al.* (2020) Comparison of Nasopharyngeal and Oropharyngeal Swabs for SARS-CoV-2 Detection in 353 Patients Received Tests with Both Specimens Simultaneously. *International Journal of Infectious Diseases*, **94**, 107-109. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.04.023>
 - [25] Hellewell, J., Russell, T.W., Beale, R., Kelly, G., Houlihan, C., Nastouli, E., *et al.* (2021) Estimating the Effectiveness of Routine Asymptomatic PCR Testing at Different Frequencies for the Detection of SARS-CoV-2 Infections. *BMC Medicine*, **19**, Article No. 106. <https://doi.org/10.1186/s12916-021-01982-x>