

基于流行病毒传播的城市韧性评估及动态预测

吕航, 曹黎侠, 秦思彤, 杨潞然

西安工业大学基础学院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年8月23日; 录用日期: 2024年9月17日; 发布日期: 2024年9月24日

摘要

本文在韧性评估相关理论的基础上, 基于流行病毒传播的SIR模型, 构建突发公共卫生事件下的城市流行病毒传播韧性评估模型, 从生态韧性、环境韧性、公共管理韧性3个方面进行研究, 通过Pearson相关性分析、聚类分析以及综合评价法, 对影响生态韧性、环境韧性以及公共管理韧性中的六个二级指标进行聚类以及权重赋值, 比较二级指标对一级指标的影响力大小来判断影响城市预防流行病毒传播的因素有哪些。最后构建了疫苗接种率与患病率之间的非线性回归模型, 探究疫苗接种率对患病率的影响模式, 论证了提高易感人群的疫苗接种率可以有效降低人群中患传染病的概率。实证研究表明, 本文的城市韧性评估模型是有效可行的。

关键词

韧性城市, Pearson相关, 聚类分析, 非线性回归分析

Evaluation and Dynamic Forecasting of Urban Resilience Based on Epidemic Viruses Spreading

Hang Lyu, Lixia Cao, Sitong Qin, Luran Yang

School of Sciences, Xi'an Technological University, Xi'an Shaanxi

Received: Aug. 23rd, 2024; accepted: Sep. 17th, 2024; published: Sep. 24th, 2024

Abstract

Based on the theory of resilience evaluation and the SIR model of epidemic virus spreading, a model for evaluating urban epidemic virus resilience under public health emergencies has been developed, which focuses on three key aspects: ecological resilience, environmental resilience, and public management resilience. Pearson correlation analysis, cluster analysis, and a comprehensive evaluation

method were employed to cluster and weight six secondary indexes affecting ecological resilience, environmental resilience, and public management resilience. These indexes were then compared to the influence of primary indexes to determine which factors affect the prevention of the spread of epidemic viruses in the city. A nonlinear regression model was constructed to investigate the influence of vaccination rate on disease rate. The results argue that an increase in the vaccination rate of susceptible individuals can effectively reduce the probability of infectious diseases among the population. Empirical studies have indicated the validity and feasibility of the evaluation model of resilience to prevent epidemic spreading presented in this paper.

Keywords

Resilient City, Pearson Correlation, Cluster Analysis, Nonlinear Regression Analysis

Copyright © 2024 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

当前全球范围内, 突发公共卫生事件已经成为影响城市经济发展与安全的最大风险之一, 流行病毒对城市的影响日益凸显, 因此建设韧性城市已成为城市可持续发展的新范式。这一构想不仅是“十四五”规划的明确要求, 更代表了城市管理者对城市建设新要求和新标准的认知升级。传统的工业文明下, 城市建设往往采取集中化、大型化和中心控制模式, 导致城市系统性脆弱。而韧性城市则致力于培养城市在逆境中承受、适应和迅速恢复的能力, 着重强调城市适应不确定性的能力。对抗这些危机, 具备高城市预防流行病毒传播的韧性的城市, 将能够快速从危机中恢复, 并且对城市的经济发展产生较小的影响。

1973年, 加拿大生态学家霍林首次将韧性思想应用到系统生态学中[1], 之后韧性城市出现了能力恢复说、扰动说、系统说和适应能力说的代表性观点。城市韧性作为一种诠释人与环境相互作用机制的创新途径, 其多学科融合和可持续发展目标的研究范式为韧性研究提供了更加灵活的研究视角和更多多样性的应对手段[2]。张恒[3]等人(2024)以苏皖地区8个典型城市为研究对象, 通过熵值法和GA-BP神经网络模型得出城市综合韧性水平, 为苏皖地区城市空间安全韧性发展提供基础数据支撑与对策建议。陈丹[4]等人(2024)从抵抗、吸收和恢复等方面构建了城市轨道交通网络韧性指标体系。张雅宁[5]等人(2024)从多尺度把握韧性短板, 以街道为基本研究单元, 采集空间数据和统计数据, 构建时空动态评估模型, 以此探究传染病背景下城市韧性因素作用机制和时空变化。Carramiñana D [6]等人(2024)引入了一种新的混合模拟框架来降低决策风险, 有效地提高了城市韧性。Sadia Afrin [7]等人(2021)介绍了智慧和韧性城市设计和政策的实施, 以识别疾病传播。

本文在传统韧性评估理论的基础上, 创新性地引入了基于SIR模型的城市流行病毒传播韧性评估模型, 结合流行病学模型与韧性研究, 实现了对城市在突发公共卫生事件下的综合评估。这一评估框架涵盖了生态韧性、环境韧性和公共管理韧性, 使对城市韧性的理解更加全面。此外, 本文引入了疫苗接种率与患病率之间的非线性回归模型, 为公共卫生干预措施提供了理论支持。这些独特与创新之处使得本文的评估模型在流行病毒传播防控中具备了较高的科学性、系统性和实用性, 为未来公共卫生管理提供了有力的支持。

2. 城市传染病的SIR模型

目前, 主要的传染病模型有SI, SIS, SIR与SEIR模型。一般来说, 主要的流行病毒传染病的患者

在治愈后免疫力很强,在被治愈后,就成为不会轻易被感染的健康人,与 SIR 模型当中的 R 人群(Removed)相对应。基于此,本部分建立基于 SIR (Susceptible-Infectious-Removed)的城市传染病模型。SIR 模型由以下非线性微分方程组给出[8]

$$\begin{cases} s'(t) = -\beta s(t)i(t) \\ i'(t) = \beta s(t)i(t) - \gamma i(t) \\ r'(t) = \gamma i(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中有 $s(t)+i(t)+r(t)=1$, $s(t)$ 表示易感染者, $i(t)$ 表示感染者, $r(t)$ 表示治愈者(也称移除者), 参数 β 表示感染率, γ 表示移除率, 设 $\mathfrak{R} = \beta/\gamma$ 为感染数。

当参数 β, γ 确定后, 再给定 $s(0), i(0), r(0)$ 中的任意两个初值, 即可以求解出方程(1)。在城市传染病的研究中, 主要考虑是易感人群和感染者这两个主要群体, 即本部分将给定 $s(0), i(0)$ 与参数 β, γ , 探究城市内部传染病的传播模式。结果如图 1 所示。

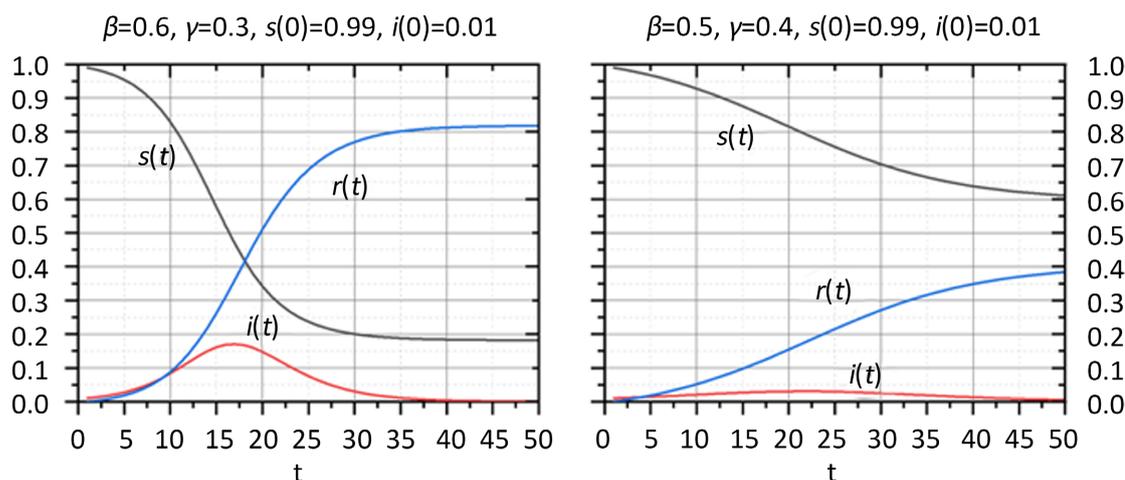


Figure 1. SIR model of the $s(t)$, $i(t)$ and $r(t)$

图 1. SIR 模型的 $s(t)$, $i(t)$, $r(t)$

根据图 1 可以看出, 感染率 β 与治愈率 γ 是影响城市内部传染病传播的重要途径, 也就是决定着城市流行病毒传播的防控韧性。城市卫生水平越高, 则感染率越小; 城市医疗水平越高, 治愈率越高。

研究得到[9], 当 $\mathfrak{R}s(0) > 1$ 时, $i(t)$ 先减后增, 可以视为一种新型传染病开始在城市当中蔓延; 而当 $\mathfrak{R}s(0) \leq 1$, $i(t)$ 单调递减, 则视为这种新型传染病并没有蔓延开来。事实上, 在一种新型传染病在城市内部扩散时, $i(0), r(0)$ 都很小, $s(0)$ 很接近 1。所以理论上, 控制新型传染病蔓延只需要控制 $\mathfrak{R} < 1$ 。

进一步, Sanae El Attouga [10]等人对传统的 SIR 模型进行了改良, 在易感人群中引入了疫苗接种者, 更好地模拟了城市内部复杂的流行病毒传播的过程, 进一步佐证了本部分分析。

3. 城市韧性评估模型

3.1. 韧性评估模型的建立

随着城市流行病毒成为常态化, 城市防控压力骤增。城市作为一个复杂的社会系统, 流行病毒防控韧性具有吸收外界扰动, 通过学习和再组织恢复原状态或重组状态的能力。本文根据 SIR 模型和城市复杂结构, 采用评价指标体系法、相关分析法与综合决策法相结合, 对城市流行病毒防控韧性总体水平进行评估。本文的评估指标体系包含生态韧性、公共管理韧性和环境卫生韧性三个维度, 其具体内涵如表 1 所示。

Table 1. Resilience dimensions of the indicators
表 1. 各指标的韧性内涵

韧性类型	内涵
生态韧性	指系统受到扰动时系统应对外部动荡的能力。
公共管理韧性	主要强调人在城市公共安全系统中的作用，重点关注社会的稳定与安全。
环境韧性	指城市系统的稳定性以及对流行病毒、生活污染的承载力。

根据对城市流行病传播预防韧性内涵的理解，建立流行病传播预防韧性评估网状指标体系，其内容如图 2 所示。该体系中，各子系统的韧性都与表中 11 个指标相关，同时这些方案部分相互影响，彼此间不完全独立。

本研究将以中国中西部某典型省会城市 A 市为研究对象，根据 A 市统计局统计年鉴和 A 市卫生健康委员会官网信息数据，结合查阅文献，专家访谈，以及调查问卷，通过对数据处理、整理与综合，得到 A 市 2013~2022 十年间方案层的 11 个指标在韧性系统中的样本观测评估值，将数据归一化处理，得表 2；得到 A 市 2013~2022 年间流行病毒传染病患病率，见表 3。

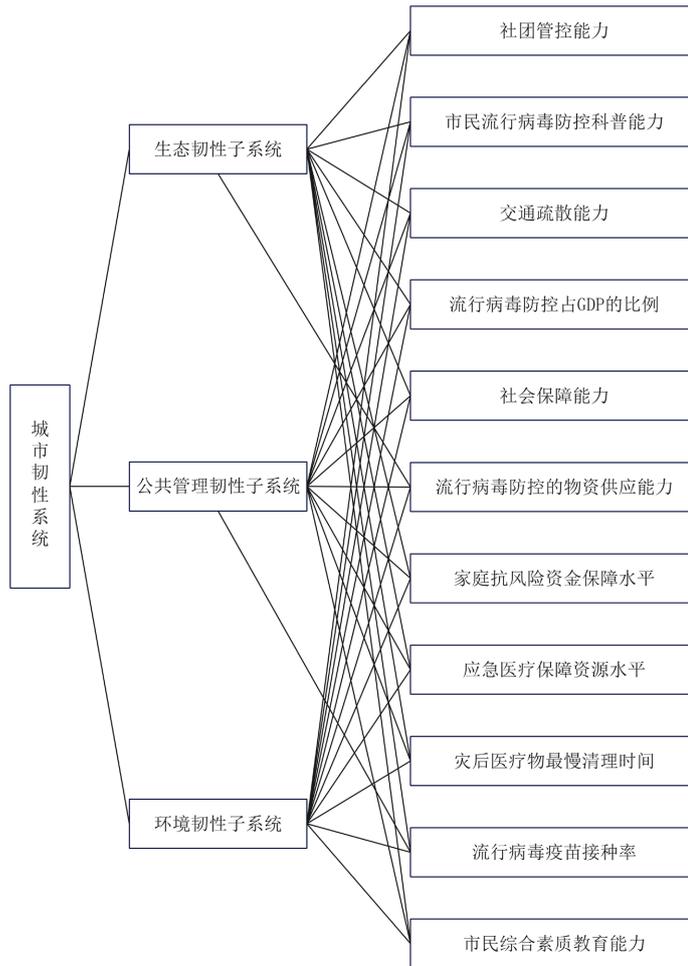


Figure 2. Web-based index system for evaluation of resilience to urban epidemic spreading prevention
图 2. 城市流行病传播预防韧性评估网状指标体系

Table 2. Resilience index data in city A (2013~2022)**表 2.** A 市 2013~2022 韧性指标数据

	社团管 控能力	市民防疫 科普能力	交通疏 散能力 (N)	流行病毒 防控占 GDP 的比例	社会保 障能力	流行病毒防 控的物资 供应能力	家庭抗风 险资金保 障水平	应急医疗 保障资源 水平	灾后医疗 物资最慢 清理时间 (N)	流行病毒 疫苗接种 率	市民综合素 质教育能力
2013	0.0795	0.1221	0.0985	0.0523	0.0809	0.0748	0.0559	0.0851	0.0819	0.0196	0.0982
2014	0.0874	0.1117	0.0913	0.0613	0.0790	0.0774	0.0697	0.0851	0.0804	0.0219	0.0829
2015	0.0882	0.1176	0.0940	0.0726	0.0771	0.0751	0.0797	0.0894	0.0801	0.0264	0.1268
2016	0.0898	0.1127	0.0976	0.0763	0.0768	0.0758	0.0877	0.0885	0.0782	0.0242	0.0936
2017	0.1000	0.1082	0.0946	0.0916	0.0749	0.0851	0.0940	0.0997	0.0884	0.0219	0.1024
2018	0.1045	0.1031	0.0871	0.0966	0.0804	0.0970	0.1045	0.1039	0.1114	0.0385	0.1118
2019	0.1106	0.0891	0.0765	0.0956	0.0880	0.0970	0.1128	0.1088	0.0912	0.0347	0.0831
2020	0.1121	0.0931	0.1252	0.1214	0.1490	0.1289	0.1119	0.1088	0.1509	0.1684	0.1160
2021	0.1117	0.0635	0.0987	0.1558	0.1544	0.1388	0.1326	0.1136	0.1157	0.2787	0.0752
2022	0.1161	0.0789	0.1365	0.1764	0.1395	0.1502	0.1514	0.1172	0.1218	0.3656	0.1100

*N = Negative.

Table 3. Prevalence of epidemic diseases in City A (2013~2022)**表 3.** A 市 2013~2022 流行病毒传染病患病

年份	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
患病人群占比	6.62%	6.41%	6.40%	6.57%	6.79%	6.90%	7.48%	5.47%	5.60%	3.02%

由于这 11 个指标在流行病毒传播前、流行病毒传播中、流行病毒传播后都会对准则层有一定影响力，在本文中采用以下的算法实现图 1 中网状指标树状化以及系统韧性评估：

Step 1: 根据表 1 的数据，对 11 个指标与一般流行病毒传染病患病率之间的 Pearson 相关性判定，筛选出有相关性的变量，用于降低维数；

Step 2: 用变量聚类法，将降为后的指标分成三类，并判定生态韧性系统、公共管理韧性系统和环境韧性系统与降维后的指标体系之间的相关性；

Step 3: 根据步骤二的结果，查看是否这三个子系统有公共的指标，如果无，已经实现将网状指标体系树状化，转入步骤四；如果有，根据相关度的比值，将其划为多个指标，按权值比例划分到个子系统中，最终实现网状指标树状化；

Step 4: 根据步骤三建立的树状指标体系，运用专家调查法结合每个指标对应的 Pearson 相关系数加权计算出三个子韧性系统十年间的韧性指数；

Step 5: 根据专家评分运用综合加权法，建立系统的韧性评估模型。

3.2. 韧性评估模型的求解

首先，对表 1 的数据与一般流行病毒传染病患病率进行 Pearson 相关分析，分析各项数据与患病率之间的相关性，若 p 值满足 $p < 0.05$ ，则认为强相关。数据分析的结果如表 4 所示。

结果表明，流行病传播预防韧性系统与交通疏散能力、流行病毒防控支出占 GDP 比重、社会保障能力、流行病毒防控物资的供应能力、家庭抗风险资金保障水平和流行病毒疫苗接种率六个指标成强相关性，与社团管控能力、市民防疫科普能力、应急医疗保障资源水平、灾后医疗物最慢清理时间、市民综

合素质教育能力这五个指标成弱相关，在下一步的评估中不予考虑。

Table 4. Results of the correlation analysis
表 4. 相关性分析结果

样本 1	样本 2	相关	p 的 95% 置信区间	p 值
患病率	社团管控能力	-0.472	(-0.849, 0.225)	0.169
患病率	市民防疫科普能力	-0.516	(-0.169, 0.865)	0.127
患病率	交通疏散能力	-0.911	(-0.979, -0.661)	0
患病率	流行病毒防控占 GDP 的比例	-0.773	(-0.944, -0.280)	0.009
患病率	社会保障能力	-0.711	(-0.926, -0.147)	0.021
患病率	流行病毒防控的物资供应能力	-0.773	(-0.943, -0.278)	0.009
患病率	家庭抗风险资金保障水平	-0.65	(-0.908, -0.034)	0.042
患病率	应急医疗保障资源水平	-0.525	(-0.868, 0.157)	0.12
患病率	灾后医疗物最慢清理时间	-0.556	(-0.878, 0.113)	0.095
患病率	流行病毒疫苗接种率	-0.895	(-0.975, -0.608)	0
患病率	市民综合素质教育能力	-0.227	(-0.750, 0.470)	0.528

这样，与韧性评估相关的指标就被降维至 6 个，再对这 6 个指标进行聚类分析，将其分成三类，并分析其与 3 个韧性子系统之间的相关性。聚类结果如下树状图 3 所示。

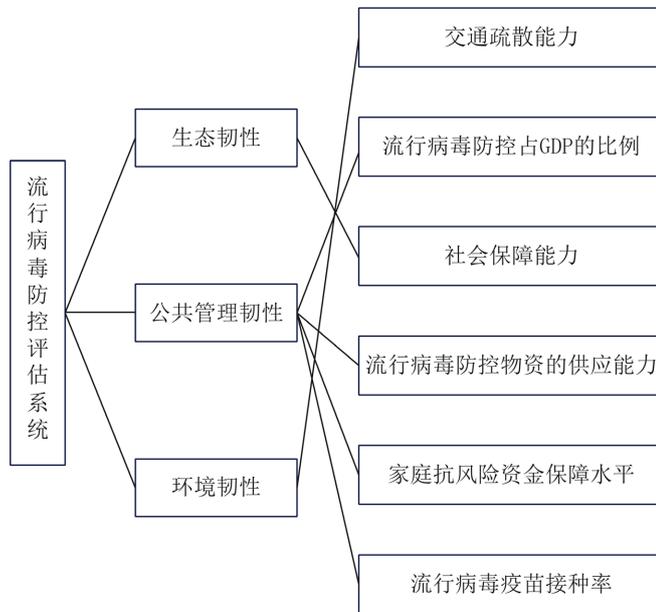


Figure 3. Tree-based index system for resilience evaluation example of a figure caption

图 3. 树状化的韧性评估指标体系

其中，这六个韧性评估相关指标的内涵如下表 5:

Table 5. The connotation of each resilience assessment index factor**表 5.** 各韧性评估指标因素的内涵

因素	内涵
交通疏散能力	指在给定时间内能通过的最大车流，其受交通的物理特性和紧急情况下车流特征影响。
流行病毒防控占 GDP 的比例	指一个国家或地区在防控流行病毒方面投入的财政资源占其国内生产总值的百分比。
社会保障能力	指一个国家或地区提供社会保障服务和支持的能力。
流行病毒防控物资的供应能力	指在面对流行病毒或疫情时，一个国家、地区或组织能够有效地生产、采购、储备和分配防控物资的能力。
家庭抗风险资金保障水平	指家庭在面对突发事件或经济困难时，能够依靠的经济资源和储备的能力。
流行病毒疫苗接种率	指在特定人群中，已接种特定流行病毒疫苗的比例。

将这 3 个韧性子系统的指标值记作 $D_j, (j=1,2,3)$ ，分别代表环境韧性系统，公共管理韧性系统和生态韧性系统，并将 6 个韧性指标分别对应其归属韧性子系统按图 4 顺序记作 A_{ij} ，其中 j 表示其归属的韧性子系统，每个韧性指标归一化后的 Pearson 相关系数为 p_{ij} ，则韧性子系统的指标值为

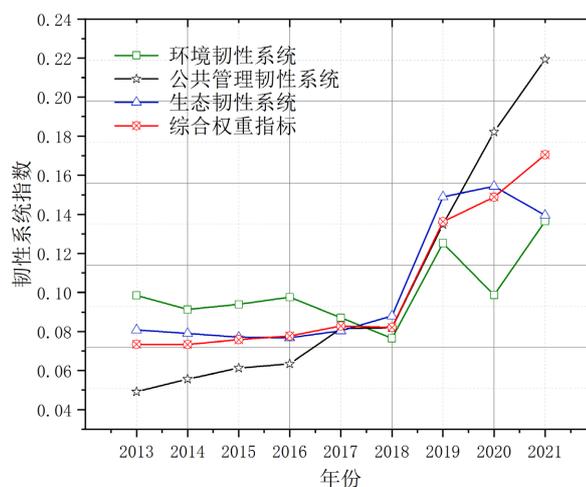
$$D_j = \frac{\sum_{i=1}^k A_{ij} p_{ij}}{\sum_{i=1}^k p_{ij}} \quad (2)$$

其中 k 表示第 j 个韧性子系统中韧性指标的格数。

然后，按照专家评分以 $[w_1, w_2, w_3] = [0.3, 0.4, 0.3]$ 对每个韧性子系统进行加权计算，得出防控韧性综合指标

$$D = [w_1, w_2, w_3] \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

最后，公式(3)中的要根据系统当前运营的状态，由专家给出评价值 $[w_1, w_2, w_3]$ 。本文仅根据 A 市 2013~2022 十年来的相关数据，对 A 市十年间防控韧性进行综合分析，见图 4：

**Figure 4.** Map of weighted trends in urban epidemic virus prevention and control resilience indexes**图 4.** 城市流行病毒防控韧性指标加权趋势图

3.3. 城市韧性评估结果分析

1、生态韧性在 2013~2018 年中都处于一个较为稳定的状态，它在 2018~2019 年的时候呈现出一个上升的趋势，生态韧性有了明显的大幅度提升，在 2019~2022 年实现了平衡点的移动，总体韧性水平提高。

2、公共管理韧性，是近十年中流行病毒防控韧性评估值波动最大的系统，其韧性系统指数一直持上升状态，从 2018 年到 2022 年可以观察到公共管理韧性系统指数实现了质的飞跃，说明 A 市在这方面应对比较有效。

3、环境韧性在近十年中处于一个较为稳定有细小波动的状态，2013~2016 年环境韧性处于一个稳定状态，2016~2018 年环境韧性受到重创开始下滑，2018~2019 年随着流行病毒防控经验的积累开始回升，在 2016 年和 2020 年位于系统的平衡点，但 2020 年的平衡点，是系统在流行病毒传播高潮期后重组的提升。

4、综合权重指标 2018 年之后一直呈上升趋势，介于三种系统之间，说明了 A 市在近五年流行病毒传播防控政策有显著效果，在 2013~2018 年系统处于稳定状态有细小提升，但在 2018 年之后实现了巨大提升。

此外，从 6 个韧性指标的权值分析，依次逐步减小。可见，流行病毒防控的物资供应能力、流行病毒防控占 GDP 的比例、交通疏散能力、流行病毒疫苗接种率是韧性提升的重要指标。因此，提升城市抗击流行病毒韧性的关键在于这四个重要指标。

4. 城市传染病防控韧性的动态预测

科学研究已经表明，当一些细菌或病毒(抗原)侵入到我们体内时，我们的身体会产生一种对抗它们的物质(抗体)。事实证明，接种疫苗能够预防和控制传染病的发生、流行，是对抗传染病最简单、可靠的方式。并且由上述防控韧性模型可以看出，疫苗接种率是影响 A 市防控韧性的重要因素。

4.1. 患病率与疫苗接种率的回归模型

基于防控韧性模型的研究，本部分通过建立疫苗接种率与患病率之间的回归模型，探究人群中疫苗接种率的高低与一般流行病毒传染病患病率之间的关系，从而为研究提高城市防控韧性提出合理、可靠的对策。A 市 2013~2021 年间疫苗接种率与患病率如表 6 所示。考虑对样本采取线性回归，计算其误差平方和 $R^2 = 0.59$ ，拟合效果不佳，故本研究考虑使用非线性回归进行拟合，选取了四类大致符合上述散点图分布的非线性拟合函数，分别是指数类、对数类、分式函数类以及幂函数类。通过 Origin 软件进行拟合，分析拟合后的 Reduced Chi-Square 值和调整后 R-Square 值确定最佳拟合函数，结果如表 7 所示。

Table 6. Vaccination and prevalence data for City A (2013~2021)

表 6. A 市 2013~2021 年间疫苗接种率与患病率数据

年份	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
疫苗接种率	0.26%	0.29%	0.35%	0.32%	0.29%	0.51%	0.46%	2.23%	3.69%
患病率	6.62%	6.41%	6.40%	6.57%	6.79%	6.90%	7.48%	5.47%	5.60%

Table 7. Data for the four types of fitted functions

表 7. 四类拟合函数数据汇总表

模型	方程	a	b	Reduced Chi-Sqr	调整后 R 平方
指数类	$y = a(1 - e^{-bx})$	0.06471 ± 0.00222	506436.48994 ± 0	4.44E-05	0.14286
分式函数类	$y = x / (a + bx - (a + b)x^2)$	-0.00783 ± 0.00404	17.53608 ± 1.16628	3.28E-05	0.15614
对数类	$y = a \ln(-b \ln x)$	0.02201 ± 0.00722	3.70442 ± 3.58086	1.91E-05	0.50896
幂函数类	$y = ax^b$	0.04366 ± 0.00657	-0.07523 ± 0.02796	2.05E-05	0.47064

通过表中数据可以得知,指数类和分式函数类由于 R-Square 值相比于对数类和幂函数类更接近 0, 于是不考虑使用这两类拟合模型。考虑到对数类和幂函数类 R-Square 值与 Reduce Chi-Square 值相近, 但从模型简易程度上分析, 幂函数类的方程比对数类方程较为简单, 基于此, 本部分使用幂函数对疫苗接种率和患病率建立回归模型, 如图 5 所示。

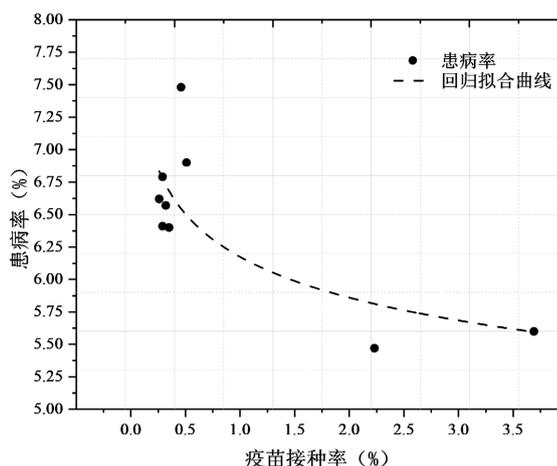


Figure 5. Fitting of vaccination to prevalence
图 5. 疫苗接种率与患病率的拟合图

考虑对该幂函数回归模型进行失拟检验, 检验本文选择的模型的可靠性, 结果如表 8 所示。

Table 8. Result of lack-of-fit test
表 8. 失拟检验结果

来源	自由度	SS	MS	F	P
误差	7	0.0001438	0.0000205		
失拟	6	0.0001366	0.0000228	3.15	0.406
纯误差	1	0.0000072	0.0000072		

其中, $p > 0.05$, 则可以认为模型的拟合效果是可靠的。再对拟合结果进行残差分析, 分析结果如图 6 所示。

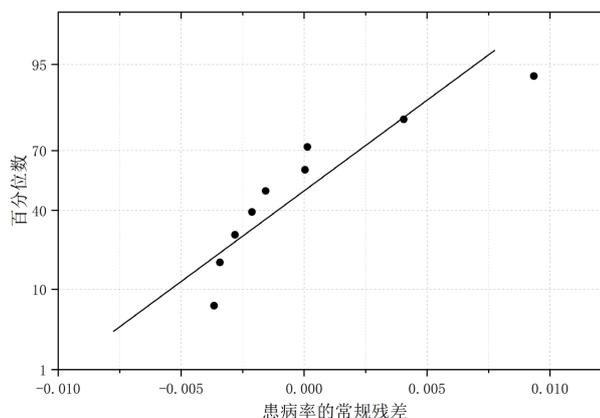


Figure 6. Plot of residual analysis of prevalence
图 6. 患病率的残差分析图

由图 6 可知, 残差值均可以看作在以 0 参考线的上下随机且均匀地散布, 可以认为模型数据拟合得较好。于是, 根据表 6 结果, 可以得到患病率与疫苗接种率之间的回归方程为

$$\hat{Y} = \frac{0.043316}{\hat{X}^{0.0752329}} \quad (4)$$

4.2. 结果分析

通过回归模型可以看出, 随着疫苗接种率的增加, 患病率先是大幅度下降, 再缓慢下降, 这表明提高易感人群的疫苗接种率可以有效降低人群当中患传染病的概率。基于此, 为提高流感疫苗接种覆盖水平, 建议政府采取循序渐进的策略, 积极主动宣传, 推动多方共付机制的发展, 探索多种筹资方式下的接种服务供给模式, 扩大筹资来源, 提高接种疫苗费用的报销比例, 提升疫苗的保障水平, 努力实现各地区流行病毒疫苗的供需平衡, 使得更多的易感人群接种疫苗, 从而提高城市的防控韧性。并且, 幂函数存在渐近线, 因此随着疫苗接种率的提高, 患病率始终会维持在某一数值之上, 所以政府无需大幅度提高居民的疫苗接种率, 可以优先提高易感人群的疫苗接种率。经济发达的省市可以将疫苗接种率提高到 15%, 这样流行病毒的患病率可以降低至 5% 以下; 稍欠发达的地方可以努力将疫苗接种率提高到 5%, 这样流行病毒的患病率可以降低至 5.5% 以下。

5. 结论

本研究借助于 A 市流行病毒的相关数据, 建立了城市流行病毒期传播的网络模型和城市流行病毒传播的 SIR 模型, 指出了预防流行病毒的脆弱点;

搭建城市流行病毒防控韧性评估体系, 建立了预防流行病毒韧性评估的网状指标体系, 运用变量聚类法对韧性评估体系实现降维和树状化的方法研究, 建立了基于变量聚类法的 A 市预防病毒韧性评估的测度, 并对模型进行了求解, 得出了 A 市预防病毒韧性的最高点;

提升城市韧性对于减少疾病传播和保护居民生命财产具有重要现实意义。通过本文研究, 分别给出了可能提高城市韧性的方法以及提升疫苗接种率的相关可行政策, 进一步提高城市在面对突发重大风险和挑战时的治理效能, 确保城市在危机期间的社会治理稳定, 推动城市社会治理水平的提升, 将城市韧性理论应用于实践, 能够在流行病爆发时有效减轻影响, 提高应对复杂公共卫生事件的能力。这种增强的韧性不仅有助于提升城市社区在常态化防控中的作用, 还能在未来面对各种突发公共卫生风险时, 最大限度地降低损失。

参考文献

- [1] Holling, C.S. (1973) Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **4**, 1-23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- [2] 赵雪雁. 地理学视角的可持续生计研究: 现状、问题与领域[J]. *地理研究*, 2017, 36(10): 1859-1872.
- [3] 张恒, 王浩宇, 常江. 基于 GA-BP 神经网络的城市韧性时空演进分析[J]. *山西大同大学学报(自然科学版)*, 2024, 40(2): 71-77.
- [4] 陈丹, 钟玉刚, 李宣睿, 等. 城市轨道交通系统韧性指标体系构建及综合评价[J/OL]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1824.U.20240409.1311.054.html>, 2024-04-23.
- [5] 张雅宁, 司鸽. 城市综合韧性能力时空动态评估模型: 以传染病为例[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(10): 39-45.
- [6] Carramiñana, D., Bernardos, A.M., Besada, J.A. and Casar, J.R. (2024) Towards Resilient Cities: A Hybrid Simulation Framework for Risk Mitigation through Data-Driven Decision Making. *Simulation Modelling Practice and Theory*, **133**, Article 102924. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2024.102924>
- [7] Afrin, S., Chowdhury, F.J. and Rahman, M.M. (2021) COVID-19 Pandemic: Rethinking Strategies for Resilient Urban Design, Perceptions, and Planning. *Frontiers in Sustainable Cities*, **3**, Article 668263.

<https://doi.org/10.3389/frsc.2021.668263>

- [8] Frank, R., Giordano, W.P. and Horton, F.S.B. 数学建模[M]. 第5版. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [9] 姜启源, 谢金星, 叶俊. 数学模型[M]. 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [10] Attouga, E.S. and Khalifi, E.M. (2024) Note on a Susceptible-Infectious-Recovered Epidemic Model with the Heterogeneity in Susceptibility. *Chaos, Solitons and Fractals: The Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, and Nonequilibrium and Complex Phenomena*, **184**, Article 115041.