

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2025.02.004

# 人口流动与媒体宣传对病毒传播的影响研究<sup>①</sup>

马英红, 李然, 刘伦

(山东师范大学商学院, 济南 250014)

**摘要:** 流行性病毒的传播严重影响着人类的生命健康和社会经济的发展。如何控制病毒传播是社会各界共同关注的问题。在与刚过去的一场流行病传播的斗争中, 人们通过宣传普及病毒知识和防护措施、精准调控人口流动, 有效地遏制了病毒传播, 保障了人类生命安全。本研究梳理了病毒传播的相关数据, 将病毒传播发展过程划分为三个阶段, 充分考虑密切接触者和潜伏者作为病毒传播的重要环节, 扩展经典的病毒传播状态转移模式, 探讨人口流动、媒体宣传对病毒传播的影响机制, 提出了出行管控和媒体宣传联合作用的病毒传播动力学方程。从数值仿真和拟合角度证明了适度的媒体宣传和人口流动管控有利于快速降低病毒传播的影响。

**关键词:** 病毒传播; 数据分析; 动力学方程; 控制策略

**中图分类号:** C931    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1007-9807(2025)02-0050-14

## 0 引言

近年来的流行性病毒传播引发了世界范围的大流行病<sup>[1]</sup>, 对人类健康和社会经济造成了巨大的破坏。在遏制病毒传播的工作中发现: 及时发布病毒传播的最新动态, 引导民众正确认知病毒并科学防范<sup>[2, 3]</sup>, 精准管控病毒感染地区人口流动<sup>[4, 5]</sup>等措施都能有效控制感染人群与易感染人群的接触机会, 降低病毒传播的速度和范围<sup>[6]</sup>。

研究发现宣传病毒相关知识会降低传播范围<sup>[7, 8]</sup>, 尤其是病毒大规模传播期间, 有关病毒传播的新闻宣传会直接影响民众获知信息的时效性和真实性<sup>[9]</sup>, 加强宣传可以更有效地控制传播范围<sup>[10, 11]</sup>。另外, 加大对病毒影响的宣传力度, 可以提高民众的情感共鸣和互助意识, 积极配合消灭病毒传播<sup>[12]</sup>, 让民众了解病毒的传播和发病情况, 可以提高民众主动防范意识, 比如, 自主隔离、主动戴口罩、勤洗手等措施<sup>[13]</sup>, 从而切

断感染者的传播途径<sup>[14]</sup>。

另外, 人口流动也是影响病毒传播的重要因素<sup>[15, 16]</sup>。研究发现, 限制人口出行、严控临床病人等措施可以有效地阻断病毒传播<sup>[3]</sup>, 快速降低病毒传播范围<sup>[17]</sup>。事实证明, 人口流动管控措施能够降低病毒感染范围<sup>[18]</sup>。有学者用数据模拟病毒感染初期, 若是病毒发生地不采取严控出行措施, 一个月内就可能使700万人感染, 是实际感染人数的67倍之多<sup>[19]</sup>。另外, 人口流动还能加速易感人群的发病率和死亡率<sup>[20]</sup>。控制人口流动确实能有效降低传染病的传播范围和传染人数<sup>[21]</sup>。

上述研究大多是从理论层面将媒体宣传或人口流动作为单个影响因素进行研究<sup>[11]</sup>、或以数值仿真人口流动与病毒传播的相关性等方面探讨<sup>[14, 22]</sup>。因其缺少实际数据支撑两个因素的联合共同作用, 使得单个控制策略具有一定的片面性。比如, 宣传病毒知识在短期内对防范病毒传

① 收稿日期: 2021-11-10; 修订日期: 2024-08-11。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72171136); 山东省高等学校青创团队计划项目(2022RW066)。

作者简介: 马英红(1971—), 女, 山东淄博人, 博士, 教授, 博士生导师。Email: yinghongma71@163.com

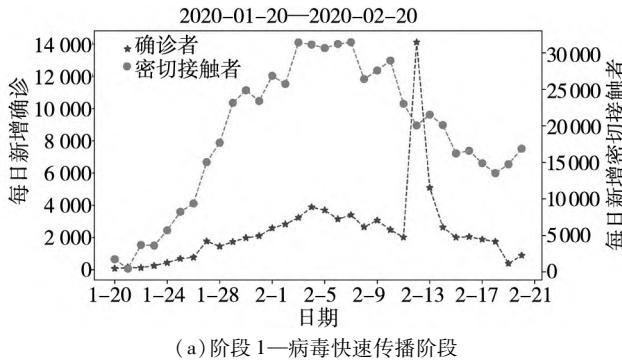
播收效良好,但长期效果不稳定,不利于病毒传播的常态化防控治理<sup>[22]</sup>.因此,本研究融合多维异质实际数据,包括病毒传播、人口流动以及媒体宣传等数据,并按照确诊者的规模将病毒传播划分为三个发展阶段.在数据基础上,定义宣传力度、人口流动指数和人口流动调节因子等参数,将密接者界定为易感人群中的一类特殊群体,扩展了病毒传播状态转移模式,构建了联合宣传力度和人口流动调节因子的病毒传播动力学模型.分析媒体宣传和人口流动两种宏观因素在病毒传播过程中的联合影响作用,利用数值仿真和实际数据拟合等方法,揭示了适度的宣传力度和人口流动管控措施可以快速减缓病毒传播,并能长期维持低水平的传播范围.

## 1 数据分析

数据选取时间窗口自2020年1月20日—2021年7月31日,由三部分组成:一是病毒传播数据,分别从中国疾病预防控制中心网站<sup>②</sup>和国家卫生健康委员会网站<sup>③</sup>采集(简称卫健委);二是人口流动数据,来自中国交通运输部发布的相关数据<sup>④</sup>;三是媒体宣传相关数据,取自中央政府网站、人民日报和新华社等<sup>⑤</sup>国内427家报纸和媒体平台.

### 1.1 病毒传播数据

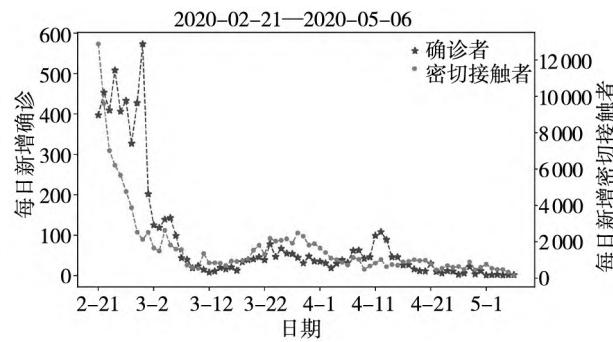
病毒传播数据取自321个城市自2020年



(a)阶段1—病毒快速传播阶段

1月20日—2021年7月31日期间每日确诊人数(新增确诊、现存确诊、累计确诊以及无症状感染者)、治愈人数(新增治愈、累计治愈)、密切接触者人数(新增密切接触者、累计密切接触者)等.图1展示了每日新增密接人数和确诊人数随时间的变化情况,分别用右侧和左侧纵轴表示.数据显示,密接人数远多于确诊者,而且前者峰值早于后者.

根据病毒传播的情况,本研究将传播过程划分为三个阶段,分别如图1所示.图1(a)表示病毒快速传播阶段,从2020年1月20日—2020年2月20日,两条曲线的峰值存在5 d~9 d的延迟.图中在2020年2月12日的确诊者有一个异常高点,14 109人,并在次日快速降至之前的两千人左右.这是因为卫健委在2020年2月5日重新界定并扩大了病毒感染范围,累计之前漏报的确诊者、密接者人数,致使该时间确诊人数异常值.在病毒传播初期,国家采取了强有力的出行管控措施,如“封城”、延长假期、严格控制出行等;图1(b)是病毒传播速度减缓阶段,从2020年2月21日—2020年5月6日,每日新增确诊人数快速下降,而密接者也持续下降.各地区逐步取消出行限制,国家做出了统筹病毒传播防控和复工复产的重大决策;图1(c)是进入常态化管理病毒传播阶段,从2020年5月7日—2021年7月31日,期间病毒传播先后经历了5次较大规模的起伏,日增确诊病例都在50人以内,病毒感染规模远低于前两个阶段.



(b)阶段2—传播速度减缓阶段

图1 病毒传播的三个阶段

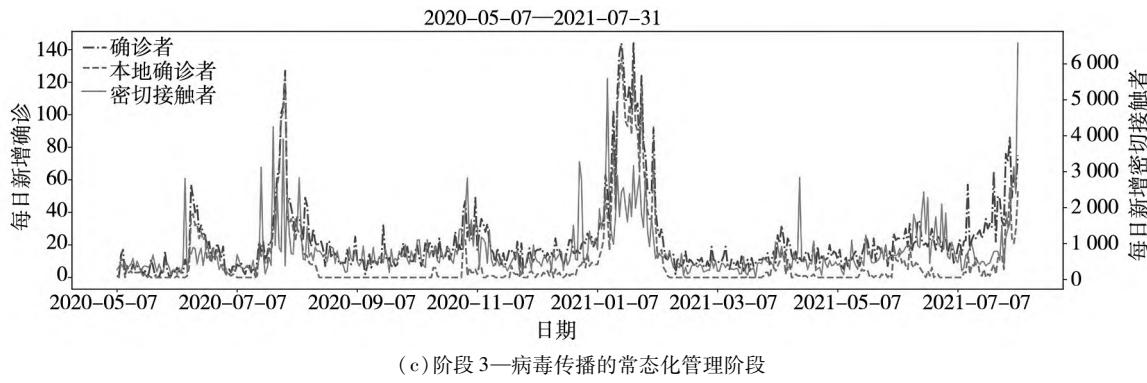
Fig. 1 Three stages of the virus diffusion

② www.chinacdc.cn

③ www.nhc.gov.cn

④ www.mot.gov.cn

⑤ www.gov.cn, paper.people.com.cn, xinhuanet.com



续图 1

Fig. 1 Continues

## 1.2 人口流动数据

人口流动影响病毒跨区域传播<sup>[20]</sup>. 为量化病毒传播与人口流动的关系, 本研究以 2019 年的全国人口流动数据为基准, 分析 2020 年 1 月—2021 年 7 月期间人口流动数据. 本研究定义人口流动总量是采用公路 ( $H$ )、铁路 ( $R$ )、民航 ( $A$ )、水路 ( $W$ ) 等交通运输方式的人口之和, 记为  $M$ . 以月为时间单位, 记第  $i$  年第  $t$  月公路、铁路、民航以及水路旅客运输量分别是  $H_i(t)$ 、 $R_i(t)$ 、 $A_i(t)$ 、 $W_i(t)$ , 单位时间的人口流动总量  $M_i(t) = H_i(t) + R_i(t) + A_i(t) + W_i(t)$ , 其中  $i$  表示 2019 年、2020 年、2021 年,  $t$  表示从 1 月 ~ 12 月. 图 2 纵轴展示了  $M_i(2019)$  和  $M_i(2020)$  同期人口流动数据的对比. 显然, 2020 年同期人口流动量远小于 2019 年, 尤其是 2 月春节期间的差异更明显. 另外, 聚焦大中型城市内部的人口流动数据, 如图 3(a) 和图 3(b) 分别展示国内 10 个大型城市市内公共交通和 7 个省的公路运输客运情况. 数据进一步显示, 2019 年每个月的人口流动总量无论是在城市内部还是省际流动都远

超过 2020 年对应的规模. 这是为防止病毒传播范围扩大, 国家采取非必要不出行、居家隔离等管控措施, 跨区域人口流动减少, 尤其是为防止春节期间民众大规模返乡过年可能引发病毒快速传播, 各地倡导就地过年的措施而出现了人口流动减少.

## 1.3 病毒传播防控政策和媒体宣传

梳理国家出台病毒传播治理政策措施和新闻报道的数量, 数据取自 2020 年 1 月 20 日—2021 年 7 月 31 日. 其中, 2020 年 3 月—2020 年 4 月有 14 项管控病毒传播的政策文件, 此后发布的相关措施都事关重大国际活动, 发文量与病毒感染确诊者数量的关系如图 4(a) 所示. 如 2020 年 11 月出台的 2 份文件分别是在第三届巴黎和平论坛和金砖国家领导人第十二次会晤期间; 2021 年 1 月的发文量小高峰是因各地发布有关就地过年、规范民众聚餐等相关规定. 新闻媒体报道是与传染病防控相关的文本材料, 共收集 10 279 篇, 数量与国家发布的病毒治理政策措施的数量趋势基本一致, 如图 4(b) 所示.

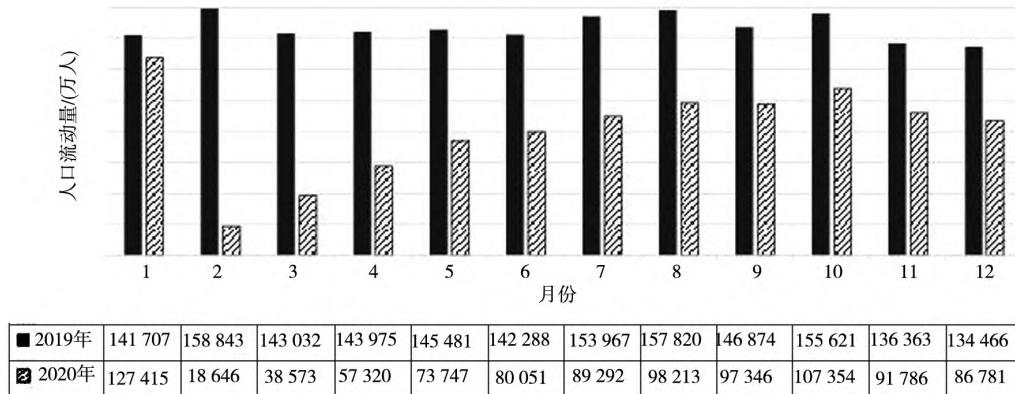


图 2 全国人口流动量

Fig. 2 Data of people travels in China

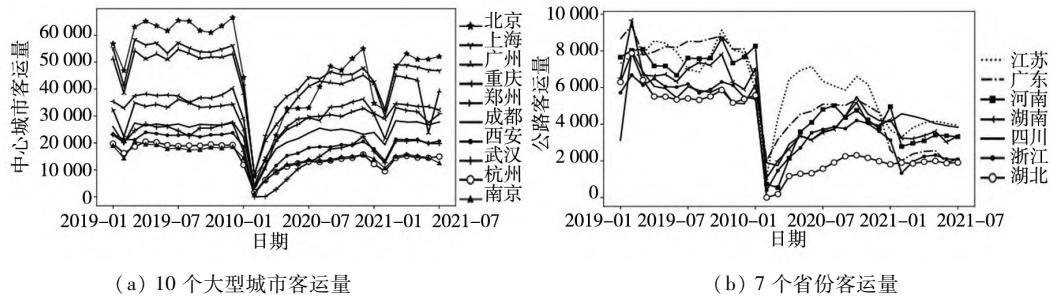


图3 10个大型城市和7个省份的客运量(单位:万)

Fig. 3 Data of people movement in 10 big cities and 7 provinces in China respectively (Unit: ten thousand)

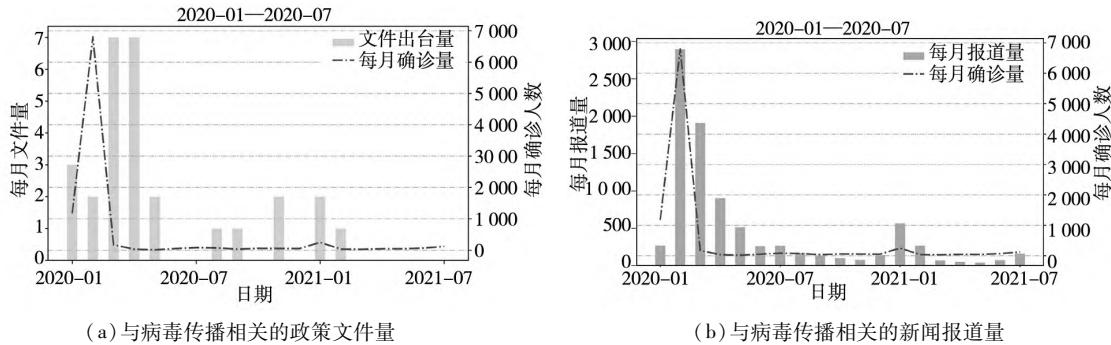


图4 政策文件、新闻报道与确诊者数量

Fig. 4 Policies and propagandas relevant to virus diffusion

为进一步分析媒体报道数量与病毒传播的关系,以天为单位细分图4(b)数据,如图5所示。图5(a)是病毒传播的第一阶段、第二阶段的日新增确诊患者与媒体报道的数量变化。新增确诊者从2020年1月—2020年2月下旬明显

下降,但媒体宣传一直保持较高的数量,直到2020年3月中旬才开始逐渐降低。图5(b)是病毒传播的常态化管理阶段,从2020年5月23日左右开始,媒体宣传量与新增确诊者量呈现一致走势。

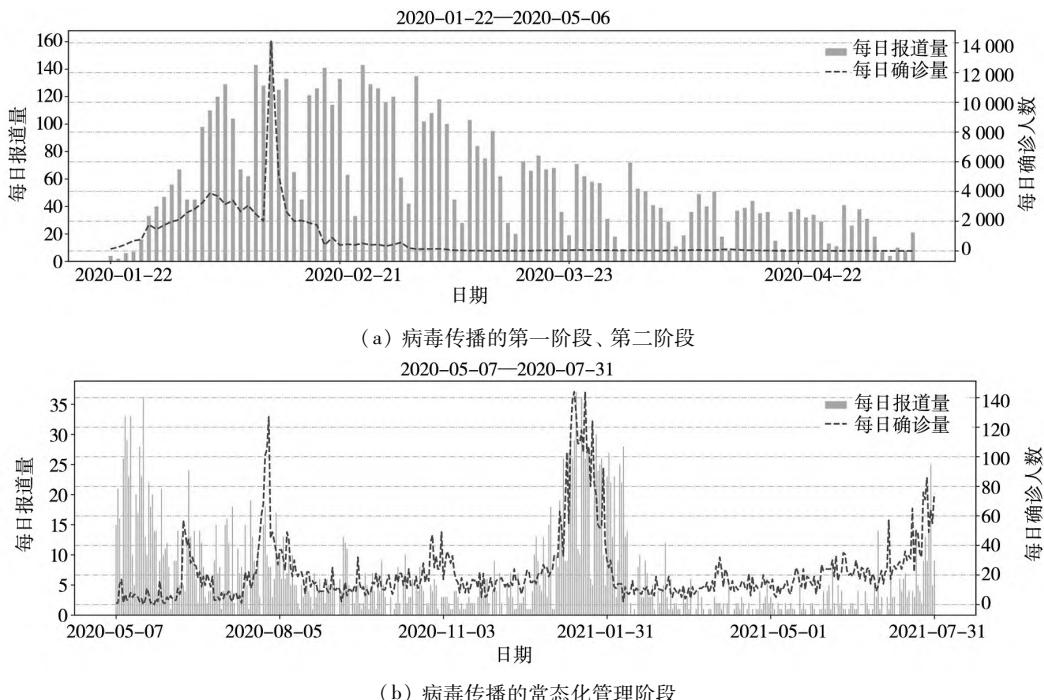


图5 媒体报道与确诊者数量

Fig. 5 The numbers of media propagandas vs infectors

## 2 病毒传播的两个宏观影响因素

经典的传播模型都是假设病毒在理想的封闭系统中扩散、演化，并寻求系统的稳定条件<sup>[23]</sup>。但现实世界并不是一个封闭的、环境稳定的系统，病毒传播一旦发生，诸多外界因素，如接种疫苗<sup>[24]</sup>、隔离感染病人<sup>[9]</sup>等都会影响病毒传播速度和扩散范围等。因此，本研究考虑媒体宣传和人口流动两个影响因素，扩展经典的 SIR 传播模型<sup>[25]</sup>，将病毒感染的密接者、潜伏者作为传播过程的新状态，定义为宣传力度和人口流动调节因子，探讨其影响病毒传播的情况。

### 2.1 密接者与确诊者的关系

人类对病毒传播媒介的认知水平是不断提高的。那些接触过病人、看似健康的个体可能是传播病毒的关键，他们被称为密接者<sup>[26]</sup>。例如，病毒传播初期，人们对病毒传播途径以及致病原因了解不多，对密接者的界定不精准可能导致病毒大规模传播。随着临床经验的积累，对密接者的认

知越来越精确。2020 年 6 月 26 日，钟南山院士重新界定了密接者：与确诊者发病前 4 天同在一个空间、一个单位、一座建筑内的人。图 1(a) 和图 1(b) 显示，密接者人数大约是确诊者的 9 倍，每日新增确诊数最多 8 000 例。而图 1(c) 显示重新界定密接者范围后，其数量大约是确诊者的 70 倍，每日新增确诊数都远低于 2 000 例。

拟合密接者和确诊者的变化关系，记第  $t$  天两者的数量分别为  $D(t)$  和  $C(t)$ 。根据图 1(a) 的确诊者与密接者实际数据，得到  $D(t) = 0.1059C(t)$ ，即约有 10.59% 的密接者转化为确诊者，拟合如图 6(a) 所示。考虑从病毒感染到确诊的时间延迟，以 3 天的潜伏期计算， $D(t+3) = 0.1041C(t)$ 。另外，根据图 1(c) 重新界定密接者范围后，拟合得  $D(t) = 0.0231C(t)$ 、 $D(t+3) = 0.0231C(t)$ ，如图 6(b) 所示。即在病毒传播第三阶段后期约有 2.31% 的密接者转为确诊者，是第一阶段的 1/5。上述数据说明严格密接者范围会降低感染者占比，即扩大密接者范围能更有效的控制病毒传播。

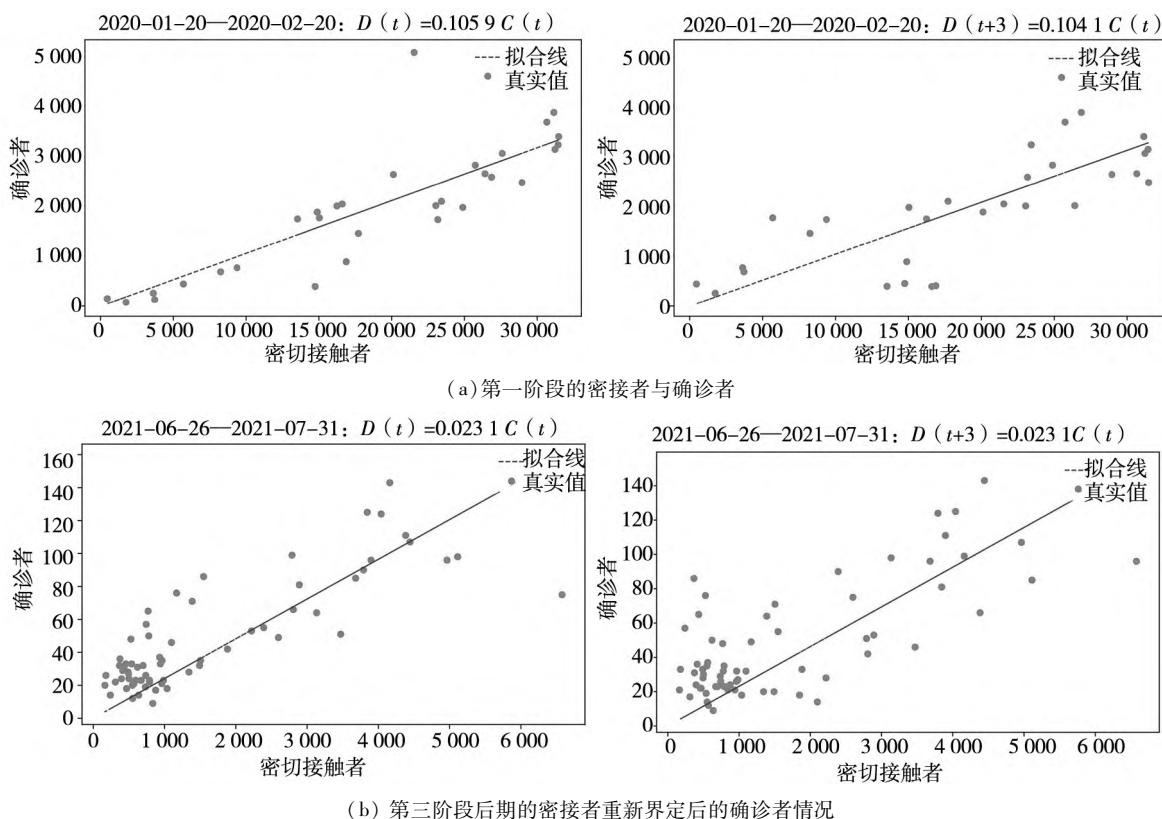


图 6 两个不同时期的确诊者与密接者的对比

Fig. 6 The comparison of infectors and close contacts between two stages

## 2.2 扩展病毒传播模式

密接者被感染但未发病或未被确诊就被称为潜伏者。有研究发现病毒传播过程中，处于潜伏期未发病或者未被确诊时，其传播能力甚至高于确诊者<sup>[17]</sup>。密接者与确诊者同等重要，是病毒传播的重要一环，应纳入病毒传播过程进行讨论；同样，处于潜伏期的密接者也应纳入人口流动的管控范围。因此，本研究将处于潜伏期的人群作为传播过程中一个独立群体、将密接者作为易感人群的一部分，并扩展 SIR 病毒传播状态转移模式。

为研究带有潜伏期和密接者两个状态的病毒传播模式，本研究作如下假设：在研究窗口期和地区，人口出生率和正常死亡率、人口总数等为常数；确诊者在康复后就认为是系统中的移除者，他们具有病毒抗体，再感染机会为零；系统中的确诊者数量远远小于人口总数；病毒传播过程包含 3 个阶段（如图 1 所示），每个阶段的病毒

潜伏期不同，且在同一个阶段内潜伏期是常数；确诊者因被隔离使其传播能力大大降低，传播概率远远小于潜伏者的传播概率。

根据以上假设，本研究将经典的 SIR 病毒传播中的 3 类状态扩展为 5 类：易感人群(S)、密接者(C)、潜伏者(E)、确诊者(D)以及移除者(R)。易感染者 S 成为潜伏者 E 和确诊者 D 的概率分别记  $\beta_E$  和  $\beta_D$ ，潜伏者成为确诊者和确诊者转化为移除者的概率分别是  $\mu$  和  $\gamma$ 。为方便讨论，本研究将上述扩展的 SIR 病毒传播模式简记为 SCEDR 模型，如图 7 所示。

假设  $N$  是病毒传播期间人口总数， $SE$  和  $SD$  分别是感染者 S 转化为潜伏者和确诊者的数量。根据经典的 SIR 病毒传播动力学，分析 SCEDR 模型所表示的病毒传播行为。式(1)表示了单位时间内各状态人群之间的转移方向、转移概率和各个状态占比等情况。

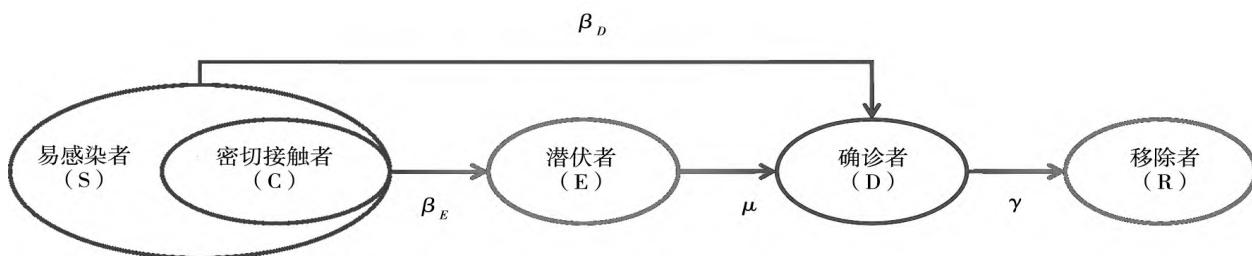


图 7 5 类病毒传播状态之间的状态转移过程

Fig. 7 5 stages of transaction process

$$\begin{aligned}
 \frac{dS}{dt} &= -\frac{\beta_E SE + \beta_D SD}{N} \\
 \frac{dE}{dt} &= \frac{\beta_E SE + \beta_D SD}{N} - \mu E \\
 \frac{dD}{dt} &= \mu E - \gamma I \\
 \frac{dR}{dt} &= \gamma I
 \end{aligned} \tag{1}$$

式(1)是 SCEDR 的动力学方程表示。

## 2.3 媒体宣传的影响

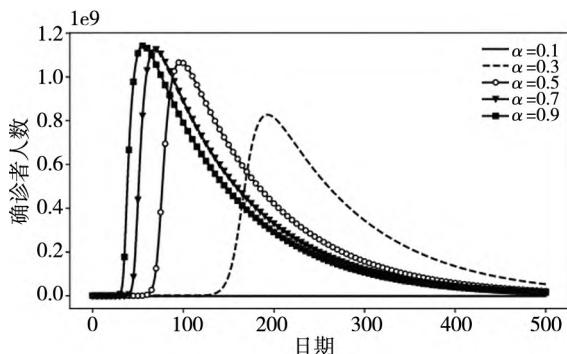
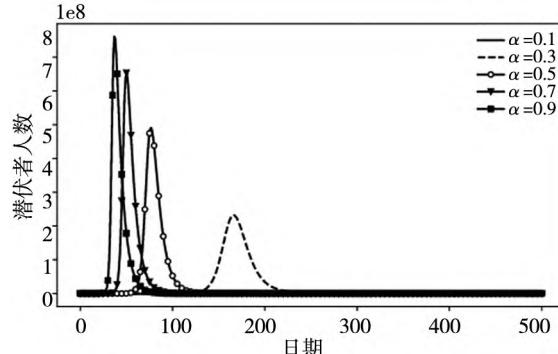
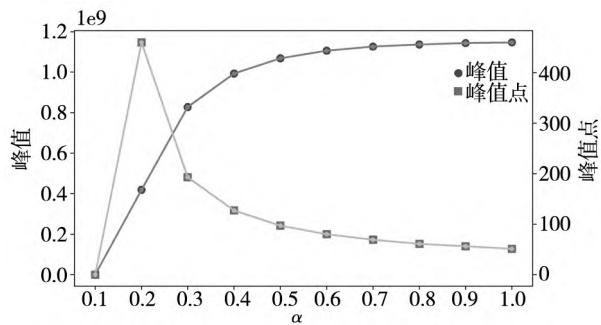
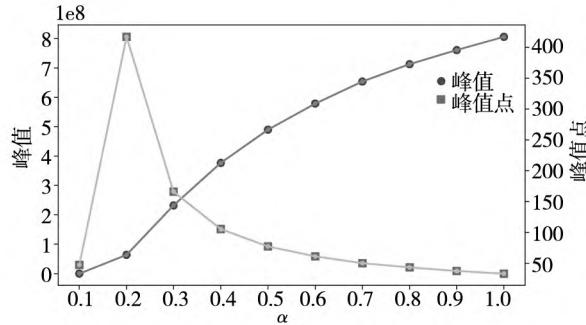
式(1)描述了在封闭系统中病毒在不同人群之间传播的量化转移关系。事实上，人们生活的社会系统不是封闭的，一旦出现流行病，人们总会采取各种可能的措施消灭或者控制病毒传播，例如，加强病毒知识的普及、防控政策的宣

传报道等。因而，式(1)无法表达现实系统中的病毒传播行为。

为进一步厘清媒体宣传对病毒传播的影响，本研究将媒体宣传作为变量引入病毒传播动力学方程。将国家和政府发布的病毒传播防控政策和媒体宣传等量化并定义为宣传力度( $\alpha$ )。具体地，宣传力度是指单位时间内媒体宣传总量减去针对病毒防控宣传量占新闻总量的比例。因此， $\alpha \in [0, 1]$ ，并且  $\alpha$  值越小，病毒相关的新闻报道占比越多，国家和社会对病毒传播关注越高；宣传报道越多，民众对病毒了解也越多，从而提高自我防护。因此，在式(1)中添加宣传力度  $\alpha$ ，如式(2)所示。下面用数值模拟分析式(2)的可行性。

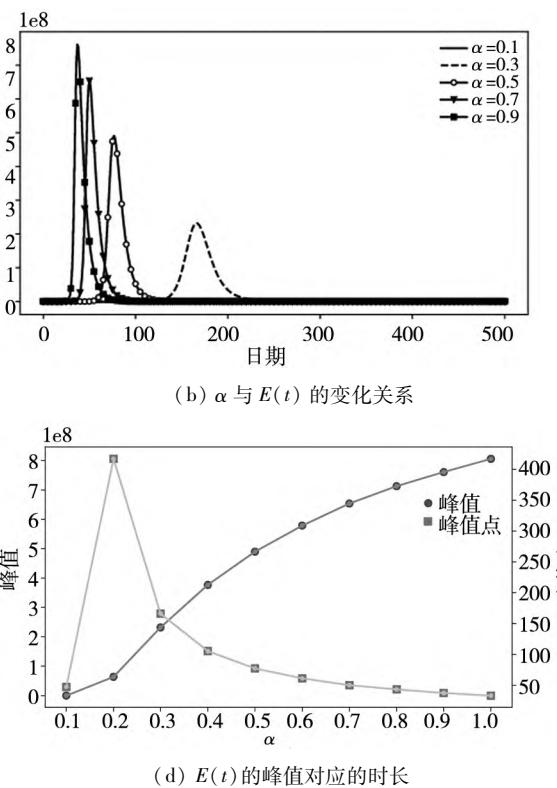
$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -\alpha \frac{\beta_E SE + \beta_D SD}{N} \\ \frac{dE}{dt} &= \alpha \frac{\beta_E SE + \beta_D SD}{N} - \mu E \\ \frac{dD}{dt} &= \mu E - \gamma I \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I \end{aligned} \quad (2)$$

分别用图 1(a) 和图 1(c) 的实际数据确定式(2)相关参数值. 病毒传播初期, 病毒传播的第一阶段, 民众对病毒的认知少, 确诊用时长, 治愈难度高. 因此, 设置较低的治愈率, 令  $\gamma = 0.01$ 、

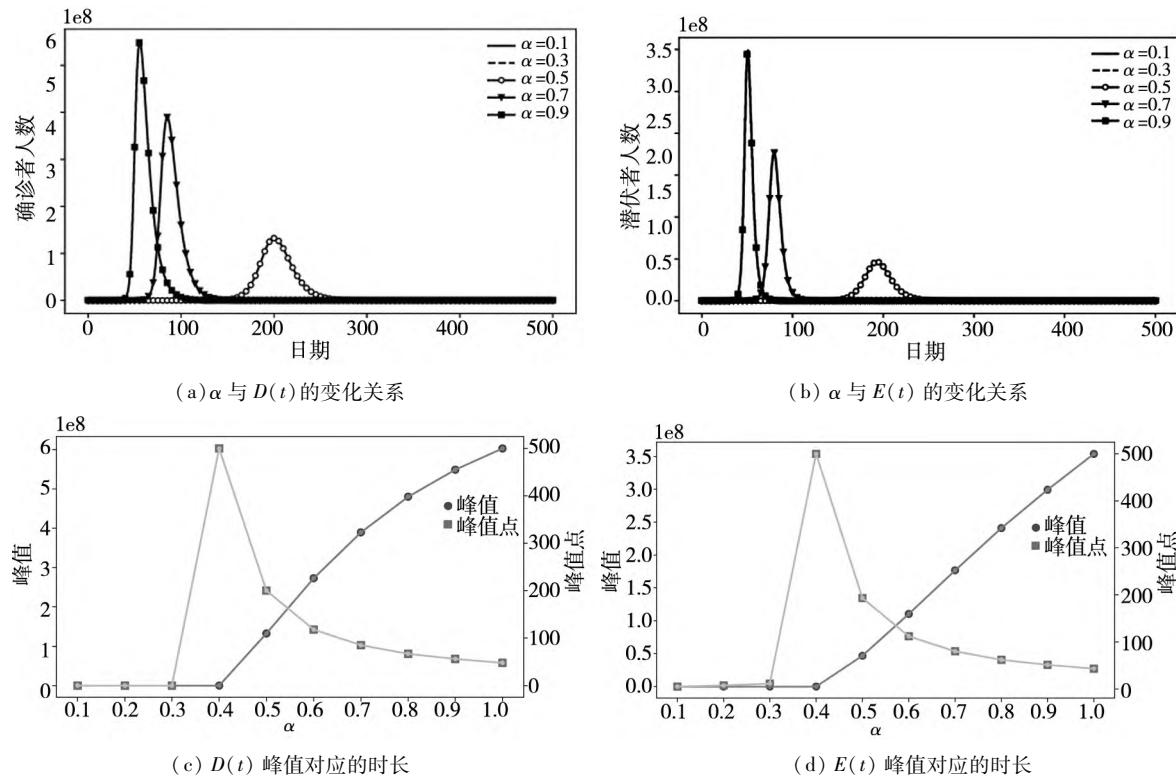
(a)  $\alpha$  与  $D(t)$  的变化关系(b)  $\alpha$  与  $E(t)$  的变化关系(c)  $D(t)$  的峰值对应的时长(d)  $E(t)$  的峰值对应的时长图 8 潜伏期 7 d,  $\gamma = 0.01$ , SCEDR 模型式(2)的数值模拟Fig. 8 Simulations of SCEDR model of formula (2) when the incubation length is 7 days and  $\gamma = 0.01$ 

分析上述不同阶段确定的参数值情况下, 式(2)的可行性. 图 8(a)和图 8(b)分别是宣传力度  $\alpha$  的变化对确诊者和潜伏者的影响. 例如,  $\alpha = 0.3$  时, 120 d 左右才出现新确诊者和潜伏者;  $\alpha = 0.5$  时, 100 d 左右就出现传播峰值. 结果显示,  $\alpha$  值越小, 也就是宣传力度越大, 确诊人数和潜伏期人数越少. 图 8(c)和 8(d)是图 8(a)和 8(b)对应的峰值以及峰值点出现的时间. 可以看出,  $\alpha$  增大, 峰值出现的时间变短. 也就是说, 新

平均潜伏期为 7 d; 另外, 由于各国对确诊者实行隔离治疗, 确诊者在治疗期间的传播能力极低, 根据 Eksin 等的研究<sup>[14]</sup>, 令  $\beta_E = 0.97$ ,  $\beta_D = 0.01 \beta_E$ . 分别将  $\alpha = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$  与上述参数值代入式(2), 计算结果如图 8 所示. 另外, 病毒传播常态化管理阶段, 即第三阶段, 对应于式(2)的参数值可用类似方法确定. 根据图 1(c)的实际数据, 这个阶段日增确诊人数较第一阶段大幅度降低, 潜伏期变短, 治愈率变高. 因此, 设置该阶段的潜伏期 2.68 d,  $\gamma = 0.1144$ . 数值模拟式(2), 结果如图 9 所示.



闻媒体宣传少, 确诊者和潜伏者会在较短的时间内达到峰值. 对比图 8(a)、图 8(b)、图 9(a)和图 9(b), 发现确诊者和潜伏者的峰值、到达峰值的时间等都有较大差异. 如第一阶段宣传力度  $\alpha$  值大于 0.2 开始传播; 而常态化(第三阶段)的宣传力度大于 0.4 开始传播, 后者峰值大约是前者的 1/10, 且到达峰值的时间更加延迟等. 通过图 8 和图 9, 验证了宣传力度  $\alpha$  对病毒传播峰值、传播时长以及传播规模等的影响.

图9 潜伏期 2.68 d、治愈率  $\gamma=0.1144$  时, SCEDR 模型式(2)的模拟结果Fig. 9 Simulations of SCEDR model of formula (2) when the incubation length is 2.68 days and  $\gamma=0.1144$ 

## 2.4 人口流动的影响

由图2和图3可知, 病毒出现前后人口流动有显著差别。因此, 本研究将探讨人口流动对病毒传播的影响。

本研究在1.2节用 $M_i(t)$ 表示单位时间全国人口流动总量。进一步量化人口流动的变化, 用 $\Delta M_i = M_i(t) - M_{i-1}(t)$ 表示当年和上一年同期人口流动数量之差。以2019年没有病毒传播干扰下每月的人口流动变化量 $\Delta M_{2019}$ 为基准, 定义 $k_i(t) = \ln |M_i(t) - M_{2019}(t) - \Delta M_{2019}|$ 为人口流动指数, 表示第*i*年与2019年同期人口流动变化的比较情况。2020年12个月的人口流动指数 $k_{2020}(t) = \{3.0904, 3.7019, 3.4805, 3.4401, 3.3592, 3.3014, 3.2752, 3.2283, 3.1853, 3.1521, 3.1495, 3.1497\}$ 。2020年下半年的值基本都小于上半年。这是因为下半年病毒防控已进入常态化管理, 人口流动增加。同样计算2021年1月—2021年7月人口流动指数得:  $k_{2021}(t) = \{3.3886, 3.560, 3.2703, 3.2961, 3.285, 3.3356, 2.3049\}$ 。 $k_{2020}(2)$ 和 $k_{2021}(2)$ 都是当年的最大值, 这是因为2月份适逢中国春节假期, 人

口流动量大,  $k$ 值较大。因此,  $k$ 可以表示人口流动的整体水平,  $k$ 越大, 人口流动越小; 反之, 人口流动越大。

另外, 病毒传播与其发生地区人口情况有关<sup>[27]</sup>。因此, SCEDR模型的人口群体应为病毒传播地区人口数量和人口流动情况。令 $\varepsilon$ 为病毒传播地区人口总量占全国人口总量的比例, 令 $\left(\frac{C+D}{\varepsilon M}\right)^k$ 为人口流动调节因子。于是, 加入人口流动调节因子的SCEDR传播模型如式(3)所示

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -\left(\frac{C+D}{\varepsilon M}\right)^k \frac{\beta_E SE + \beta_D SD}{N} \\ \frac{dE}{dt} &= \left(\frac{C+D}{\varepsilon M}\right)^k \frac{\beta_E SE + \beta_D SD}{N} - \mu E \\ \frac{dD}{dt} &= \mu E - \gamma I \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I \end{aligned} \quad (3)$$

下面证明式(3)中人口流动调节因子 $\left(\frac{C+D}{\varepsilon M}\right)^k$ 的合理性。首先确定 $\varepsilon$ 的值: 用2020年1月22日—3月31日期间累积确诊人数超过

1 000 的城市数据，包括武汉、孝感、黄冈、上海、荆州、鄂州、随州、襄阳、广州、北京以及黄石等 11 个地市，人口总和 1.04 亿，占全国人口的 7.37%，于是令  $\varepsilon = 0.0737$ 。并由  $\gamma = 0.1144$ 、

潜伏期为 2.68 d、以及密接者与确诊者比例  $C:D$  分别 9.4429、43.29、69.93；再由文献[14]中估算的  $\beta_E = 0.97$  和  $\beta_D = 0.001\beta_E$  等相关数值，代入式(3)，模拟结果如图 10(b)所示。

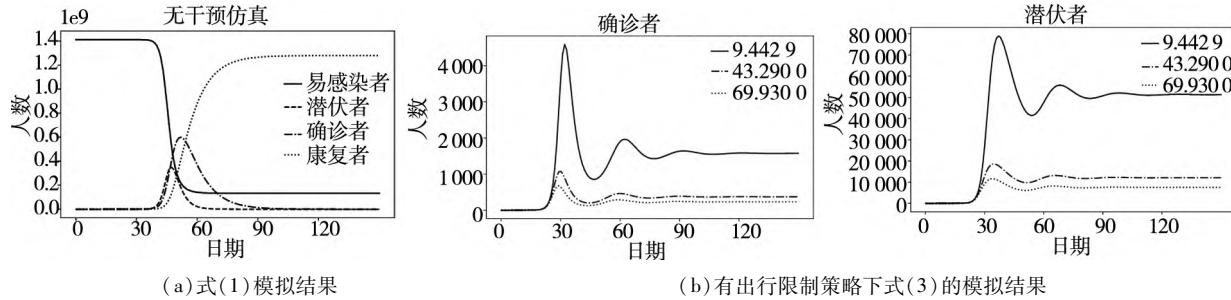


Fig. 10 Simulations on formulas (1) and (3)

对比式(3)中没有添加人口流动调节因子的病毒传播情况如图 10(a)所示。病毒传播 50 d 左右日增确诊者 6 亿；在 40 d 左右的时候，潜伏者人数达到高峰，数量仅次于确诊者人数。而图 10(b)中，无论病毒传播初期还是常态化管理阶段，确诊人数和潜伏者的人数同期都在 8 万以内，远低于同期图 10(a)的值。显然，通过对式(1)和式(3)潜伏者和确诊者的数量，人口流动调节因子可以作为病毒传播模型的控制参数。

### 3 病毒传播双策略管控模型

上述分析发现宣传力度  $\alpha$  和人口流动调节因子  $\left(\frac{C+D}{\varepsilon M}\right)^k$  分别对病毒传播都具有影响。因此，本部分将综合考虑政策宣传力度  $\alpha$  和人口流动调节两项策略对病毒传播的共同影响。本研究综合宣传力度和人口流动调节因子的病毒传播模型（简称双策略管控模型），构造动力学方程式(4)，下面证明式(4)的合理性。

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -\alpha \left(\frac{C+D}{\varepsilon M}\right)^k \frac{\beta_E SE + \beta_D SD}{N}, \\ \frac{dE}{dt} &= \alpha \left(\frac{C+D}{\varepsilon M}\right)^k \frac{\beta_E SE + \beta_D SD}{N} - \mu E, \\ \frac{dD}{dt} &= \mu E - \gamma I, \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I. \end{aligned} \quad (4)$$

### 3.1 数值模拟

用数值仿真的方法证明式(4)中的宣传力度和人口流动调节因子具有共同影响。

首先确定病毒传播式(4)的初始参数值。在病毒传播初期，人们对其了解较少，初期统计病毒感染者数量可能存在误差。比如，2020 年 1 月 24 日首次提出的无症状感染者和人传人的传播模式<sup>[28]</sup>，使得病毒传播模式得到新的认知。根据 Chan 等<sup>[28]</sup>提出的每位感染者平均感染 3.87 人、Weitz 等<sup>[22]</sup>推断的病毒平均传染周期 23.5 d 以及自 2019 年 12 月 1 日出现第一例发病患者<sup>[29]</sup>到 2020 年 1 月 19 日采取管控措施之前 50 d 内的感染人数，结合叶沿林等人的估算方法<sup>[30]</sup>，推断实际约有  $\left(1 + \frac{3.87}{23.5}\right)^{50} \approx 2043$  人被感染，再加上 2020 年 1 月 20 日公布的累计确诊 291 人、潜伏者 1752 人，得到潜伏者和确诊者初始值分别是  $E = 1752$ 、 $D = 2334$ 。再由潜伏期 2.68 d，得转化率  $\mu = 0.3731$ ， $N =$  全国 14 亿总人口。

确定病毒传播过程参数值。根据前面 2.4 节数据计算，取  $\beta_E = 0.97$ ， $\gamma = 0.1144$ 。确诊者和潜伏者的传播概率分别设置为  $\beta_D = 0.1\beta_E$ 、 $\beta_D = 0.01\beta_E$ ，密接者和确诊者比例  $C:D$  分别设置为 9.4429、43.29、69.93。另外，人口流动指数  $k$  由 2.4 节给出，传播时间窗口是 2020 年 1 月 20 日—2020 年 4 月 28 日共计 100 d，分别取  $\alpha = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$  仿真病毒传播，结果如图 11 所示。

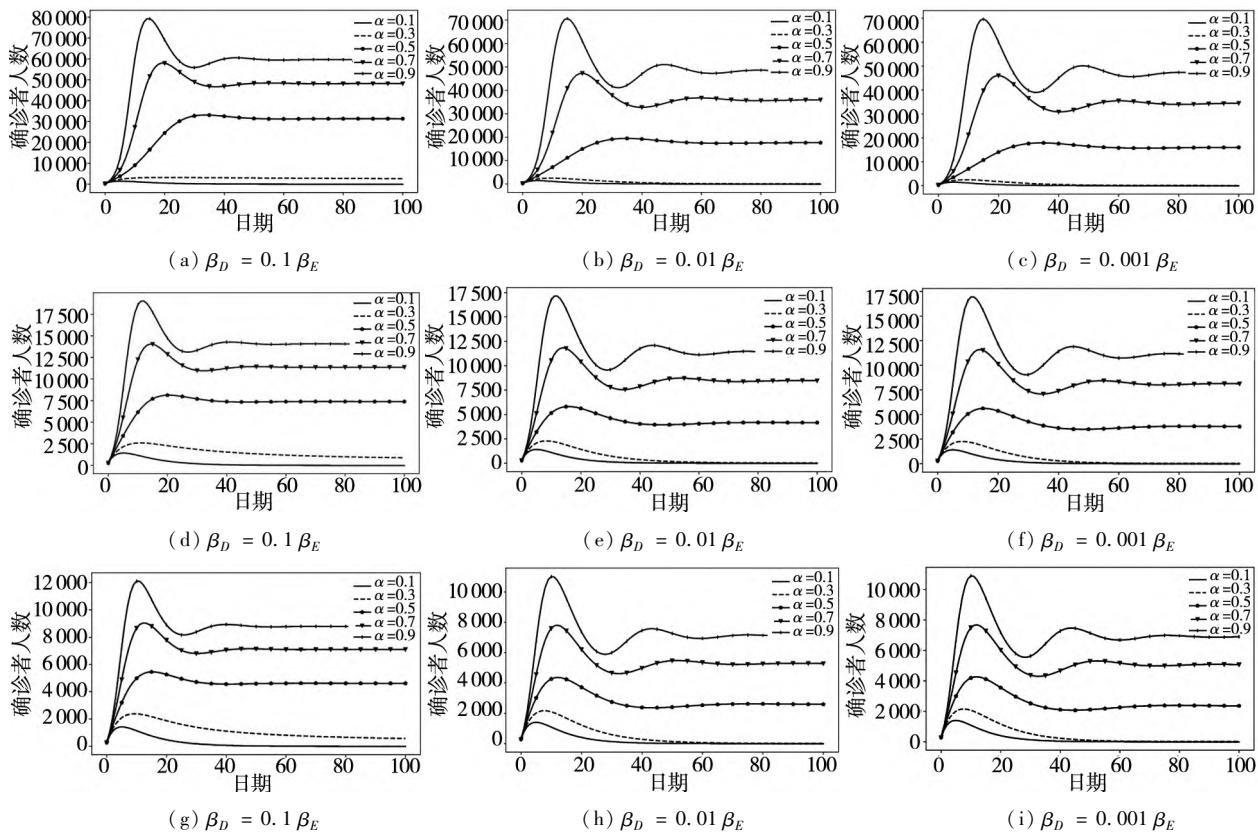


图 11 式(4)的拟合结果,时长自 2020 年 1 月 20 日—2020 年 4 月 28 日。三行图中的 C:D 分别是 9.4429、43.29、69.93。

Fig. 11 Simulations on formula (4) from 20 Jan to 28 Apr in 2020, the ratios of C to D in three lines are 9.4429, 43.29, 69.93, respectively

图 11(a)、图 11(b)、图 11(c)显示,在密接者与确诊者比例数不变的情况下,随着确诊者和密接者的传播率逐渐降低,对应的确诊者的峰值不断降低;在具有相同的宣传力度时,确诊者传播率较高时导致传染者较多. 图 11(g)、图 11(h)、图 11(i)显示加强人口流动管控措施,也就是调节因子变大时,确诊者峰值迅速下降,而且峰值远小于对应于图 11(a)~图 11(c)同期峰值. 类似地,纵向对比三组图,不难看出,随着对密接者更严格的界定,确诊者峰值随之降低;对应着相同宣传力度时,病毒传播达到稳定所需时间基本一致.

总体上,图 11 显示病毒传播在 15 d 左右进入传播高峰期,并且在 20 d 左右下降;当媒体宣传和新闻报道量占比不高时,也就是  $\alpha$  取较大值时,病毒传播大约 60 d 以后才逐渐进入稳定,并出现较大震荡;当宣传力度  $\alpha$  取值较小或者对密接者的界定更加宽泛,病毒传播会快速降低进入平稳状态.

上述模拟分析说明,在病毒传播初期,出台控制病毒传播的政策文件要求和加强新闻媒体宣传报道、加强地市之间的人口流动管控等措施都是可行的.

### 3.2 拟合现实数据

根据图 1 给出的数据拟合式(4). 选择 2020 年 1 月 20 日—2020 年 4 月 28 日共计 100 d 内病毒传播的实际数据,该时间窗口基本包含了病毒传播的第一阶段和第二阶段,拟合结果见图 12. 右列三个图是左列分别对应着添加 3 d 延迟的结果,图中带五角星的折线是实际新增确诊人数.

由图 1 病毒传播实际数据知道,2020 年 2 月 12 日的确诊值是漏报数据的累计值,对应于图 12 在第 24 天的数据. 因此,本研究用第 23 天和第 25 天的均值作为第 24 天的正常值. 选取图 12 中与实际确诊人数最为接近的曲线和参数. 以图 12(c)右图为为例,  $\alpha = 0.4$ 、 $\beta_D = 0.1 \beta_E$  的曲线与真实病毒传播 10 天左右的数据更接近,尤其是在第 15 天的峰值.  $\alpha = 0.4$ 、 $\beta_D = 0.1 \beta_E$  表示新

闻报道中有 60% 的与病毒传播有关、潜伏者中有 10% 转化为确诊者。这与实际情况比较吻合：2020 年 1 月 20 日—2020 年 2 月初这段时间，病毒开始传播，民众对病毒了解较少，国家防控政策和媒体宣传报道的不够精准，确诊者也没有实行严格的隔离，其传播能力和潜伏者的传播能力都比较强；在病毒传播的第 24 天后，实际数据与  $\alpha = 0.3, \beta_D = 0.01\beta_E$  和  $\alpha = 0.3, \beta_D = 0.001\beta_E$  两条曲线几乎重合。这是因为国家不仅增加了媒体宣传，较第 10 天的时候增加了 10% 的宣传数量，还加强了对确诊者的隔离措施，使得确诊者的传播能力降低为 0.1%，有效降低了其传播能力。同样，图 12(c) 和图 12(b) 的左图也有相似的结论。

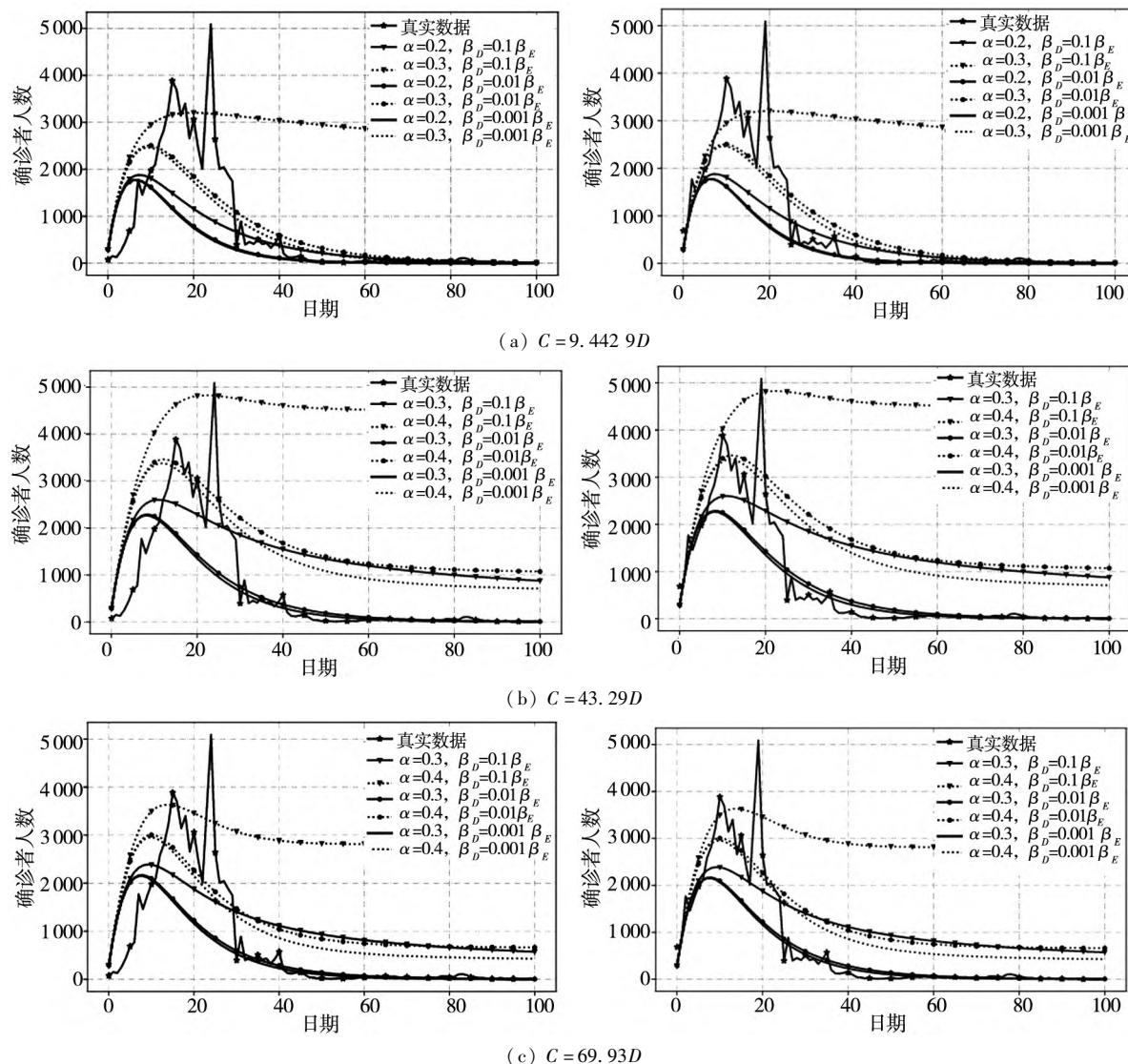


图 12 式(4)的数值拟合与真实数据对比  
Fig. 12 Comparisons of numerical simulations of formula (4) with empirical data

从图 12 中还可以看出，在  $\alpha = 0.2, \beta_D = 0.001\beta_E$  以及  $\alpha = 0.3, \beta_D = 0.001\beta_E$  两种情况下，无论  $C:D$  的取值多少，峰值都低于实际确诊人数。 $\alpha$  值越小，宣传报道占比越多，病毒传播峰值越低；另外，密接者界定的范围越大，确诊者峰值也越低；确诊者的传播能力越低，确诊者峰值也越低。可以理解为在实际病毒传播初期，关于病毒传播的政策宣传、确诊者的隔离措施足够有力，都会降低病毒传播的峰值和传播范围。另外，添加了 3 天病毒传播的延迟时间，病毒传播初期拟合数据与真实数据具有较好的一致性，说明若是提前 3 天提高宣传数量和出行管控措施，就会缩短病毒传播时长。

## 4 结束语

本研究是以采集的病毒传播数据为例,研究两个独立的宏观治理策略对病毒传播的影响。文中整合的数据比方匡南等<sup>[31]</sup>的早期研究数据更丰富,如病毒传播情况、媒体宣传和人口流动等。并在病毒传播相关的真实数据基础上,改进了经典的病毒传播模型,将媒体宣传和人口流动作为影响病毒传播的两个宏观因素,用实际病毒传播数据拟合理论模型,证明了两种宏观策略联合管控病毒传播机制的合理性和可行性。研究还进一步证实了,在病毒出现的初期,加强宣传、提早宣传、实施隔离感染者以及扩大密接者范围、加强人口流动管控等措施,可以有效的降低病毒传播峰值并能快速控制病毒传播范围。因此,在病毒初期阶段,防控措施不仅包括对感染者严格的管

控,还应该科学的界定密接者,有效地隔离确诊者和潜伏者;提早普及病毒知识和政策宣传,提高群众防范能力,从根源上降低病毒传播范围和传播时长。这些研究结论可作为应对突发公共卫生事件综合治理的具体措施和对策<sup>[32]</sup>。

随着全社会的共同努力,人类社会成功控制并遏制了病毒的传播,人们的生活和出行又实现了常态。本研究的局限是数据窗口取自2020年1月—2021年7月,此后与研究相关的数据未能更新;另外,人口流动的数据仅考虑数量变化,没有讨论地理位置和人口流动的方向性对传播控制的影响;在病毒传播治理过程中,除了国家制定的管控措施,各种社会组织和国际力量也发挥了不可忽视的作用。在未来研究中需要深入探讨上述问题,进一步优化病毒传播控制模型,为突发流行性病毒传播事件提供更合理可操作的策略和建议,提升社会治理能力。

## 参 考 文 献:

- [1] World Health Organization. Coronavirus disease (COVID-19) weekly epidemiological update-15 December 2020[EB/OL]. <https://www.who.int/publications/m/item/weekly-epidemiological-update-15-december-2020>, 2020.
- [2] Zhu H, Li W, Niu P. The novel coronavirus outbreak in Wuhan, China[J]. Global Health Research and Policy, 2020, (5): 6.
- [3] Kraemer M, Yang C, Gutierrez B, et al. The effect of human mobility and control measures on the COVID-19 epidemic in China[J]. Science, 2020, 368(6490): 493 – 497.
- [4] Eubank S, Eckstrand I, Lewis B, et al. Commentary on Ferguson, “Impact of Non-pharmaceutical Interventions (NPIs) to Reduce COVID-19 Mortality and Healthcare Demand”[R]. Oxford: Bulletin of Mathematical Biology, 2020, 82(4): 52.
- [5] Kucharski J, Russell W, Diamond C, et al. Early dynamics of transmission and control of COVID-19: A mathematical modelling study[J]. Lancet Infectious Diseases, 2020, 20(5): 553 – 558.
- [6] Franco E. A Feedback SIR (fsIR) Model Highlights Advantages and Limitations of Infection-Based Social Distancing[R]. Los Angeles: arXiv: 2004.13216.
- [7] Granell C, Gomez S, Arenas A. Dynamical interplay between awareness and epidemic spreading in multiplex networks[J]. Physical Review Letters, 2013, 111(12): 128701.
- [8] Granell C, Gomez S, Arenas A. Competing spreading processes on multiplex networks: Awareness and epidemics[J]. Physical Review E, 2014, 90(1): 012808.
- [9] Wang W, Liu Q, Cai S, et al. Suppressing disease spreading by using information diffusion on multiplex networks[J]. Scientific Reports, 2016, (6): 29259.
- [10] Yang Z, Zeng Z, Wang K, et al. Modified SEIR and AI prediction of the epidemics trend of COVID-19 in China under public health interventions[J]. Journal of Thoracic Disease, 2020, 12(3): 165 – 174.
- [11] 王治莹, 李勇建. 政府干预下突发事件舆情传播规律与控制决策[J]. 管理科学学报, 2017, 20(2): 43 – 52, 62.

- Wang Zhiying, Li Yongjian. Propagation law and coping strategies for public opinions in emergency with the consideration of the government intervention[J]. Journal of Management Sciences in China, 2017, 20(2) : 43 – 52, 62. (in Chinese)
- [12] 郑春东, 刘 宁, 冯 楠, 等. 重大公共威胁情境下个体亲社会行为形成机制——以新冠疫情为例[J]. 管理科学学报, 2021, 21(3) : 63 – 79.
- Zheng Chundong, Liu Ning, Feng Nan, et al. Generating mechanism of individual prosocial behavior in the context of major public threats: A case of the novel coronavirus epidemic[J]. Journal of Management Sciences in China. 2021, 21(3) : 63 – 79. (in Chinese)
- [13] West R, Michie S, Rubin G, et al. Applying principles of behaviour change to reduce SARS-CoV-2 transmission[J]. Nature Human Behaviour, 2020, 4(5) : 451 – 459.
- [14] Eksin C, Paarporn K, Weitz J. Systematic biases in disease forecasting: The role of behavior change[J]. Epidemics, 2019, (27) : 96 – 105.
- [15] 谭索怡, 曹自强, 秦 烁, 等. 基于密切接触者人数推断新冠肺炎疫情发展趋势[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(5) : 788 – 794.
- Tan Suoyi, Cao Ziqiang, Qin Shuo, et al. Inferring the trend of COVID-19 epidemic with close contacts counting[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2020, 49(5) : 788 – 794. (in Chinese)
- [16] Brugnago E, Silva R, Manchein C, et al. How relevant is the decision of containment measures against COVID-19 applied ahead of time? [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2020, (140) : 110164.
- [17] Tian L, Li X, Qi F, et al. Harnessing peak transmission around symptom onset for non-pharmaceutical intervention and containment of the COVID-19 pandemic[J]. Nature Communications, 2021, 12(1) : 1147.
- [18] Prem K, Liu Y, Russell T, et al. The effect of control strategies to reduce social mixing on outcomes of the COVID-19 epidemic in Wuhan, China: A modelling study[J]. The Lancet Public Health, 2020, 5(5) : 261 – 270.
- [19] Lai S, Ruktanonchai W, Zhou L, et al. Effect of non-pharmaceutical interventions to contain COVID-19 in China[J]. Nature, 2020, 585(7825) : 410 – 427.
- [20] Bengtsson L, Lu X, Thorson A, et al. Improved response to disasters and outbreaks by tracking population movements with mobile phone network data: A post-earthquake geospatial study in Haiti[J]. PLOS Medicine, 2011, 8(8) : e1001083.
- [21] Ruktanonchai N, Floyd J, Lai S, et al. Assessing the impact of coordinated COVID-19 exit strategies across Europe[J]. Science, 2020, 369(6510) : 1465 – 1576.
- [22] Weitz J, Park S, Eksin C, et al. Awareness-driven behavior changes can shift the shape of epidemics away from peaks and toward plateaus, shoulders, and oscillations[J]. PNAS, 2020, 117(51) : 32764 – 32771.
- [23] Anderson R, May R. Infectious Diseases of Humans: Dynamics and Control[M]. New York: Oxford University Press, 1992.
- [24] Li J, Ma Z. Qualitative analyses of SIS epidemic model with vaccination and varying total population size[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2020, 35(11 – 12) : 1235 – 1243.
- [25] Giles P. The Mathematical theory of infectious diseases and its applications[J]. Journal of the Operational Research Society, 1977, (28) : 479 – 480.
- [26] Jones T, Biele G, Mühlmann B, et al. Estimating infectiousness throughout SARS-CoV-2 infection course[J]. Science, 2021, 373(6551) : 180 – 200.
- [27] Rossa F, Salzano D, Meglio A, et al. A network model of Italy shows that intermittent regional strategies can alleviate the COVID-19 epidemic[J]. Nature Communication, 2020, 11(1) : 1 – 9.
- [28] Chan J, Yuan S, Kok K, et al. A familial cluster of pneumonia associated with the 2019 novel coronavirus indicating person-to-person transmission: A study of a family cluster[J]. Lancet, 2020, 395(10223) : 514 – 523.
- [29] Huang C, Wang Y, Li X, et al. Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China[J]. Lancet, 2020, 395: 497 – 506.
- [30] 叶沿林, 庞丹阳, 刘循序. SARS 疫情分析及对北京疫情走势的预测[J]. 物理, 2003, 32(5) : 345 – 347.

- Ye Yanlin, Pang Danyang, Liu Xunxu. Analysis of the current SARS epidemic and the forecast for Beijing[J]. Physics, 2003, 32(5) : 345 – 347. (in Chinese)
- [31]方匡南, 任蕊, 朱建平, 等. 基于动态 SEIR 模型的传染性疾病预测和政策评估[J]. 管理科学学报, 2022, 25(10) : 114 – 126.
- Fang Kuangnan, Ren Rui, Zhu Jianping, et al. Prediction and policy assessment of infectious diseases transmission using dynamic SEIR model[J], Journal of Management Sciences in China, 2022, 25(10) : 114 – 126. (in Chinese)
- [32]张辉, 刘远立, 陈春花, 等. 全球性公共卫生危机治理: 趋势与重点[J]. 管理科学学报, 2021, 24(8) : 133 – 146.
- Zhang Hui, Liu Yuanli, Chen Chunhua, et al. Global public health crisis governance: Trend and emphasis[J], Journal of Management Sciences in China, 2021, 24(8) : 133 – 146. (in Chinese)

## The impact of population travels and media propagandas on epidemic diffusion

MA Ying-hong, LI Ran, LIU Lun

School of Business, Shandong Normal University, Jinan 250014, China

**Abstract:** Epidemic diffusion has made great damages to human life and development. Controlling epidemic diffusion is an important issue for all social societies. During the fight against public health emergencies, government have made arduous efforts to control virus diffusion to ensure people's safety, such as strengthening media propaganda, controlling population travels, and so on. In this paper, sets of heterogeneous data about disease diffusion are collected and combined. After a careful analysis of the data, the disease diffusion process is divided into 3 stages. Media propaganda and population travels are quantified with parameters, and the classical states of disease transition model are extended from 3 to 5. A two-associative-strategy disease diffusion control model, based media propaganda and population travels, is presented. Numerical simulations and empirical data fittings demonstrate that the two-strategy control model is efficient and feasible in deceasing epidemic diffusion.

**Key words:** epidemic diffusion; data analyze; dynamic equation; control strategy