

文章编号:1671-1637(2020)03-0150-09

基于改进 SEIR 模型的新冠肺炎疫情沿 交通线路传播机制

张 宇,田万利,吴忠广,陈宗伟,王 冀

(交通运输部科学研究院 标准与计量研究中心,北京 100029)

摘 要:考虑了新冠肺炎通过接触和飞沫传染、在潜伏期具有传染性等特性,结合交通工具空间狭小、环境密闭的特点,基于 SEIR 模型,建立了考虑交通工具内病毒密度、乘客之间接触率与感染率、乘客乘坐时间等因素的交通工具内部疫情传播模型;基于交通工具内部疫情传播形式,考虑交通工具在多个停靠站点上下乘客的过程将疫情传播到非疫区,建立了基于人口迁徙的疫情沿交通线路传播的模型;利用建立的 2 个模型,分析了疫情沿交通线路传播机制,研究了武汉人口迁徙指数与确诊人数的关系,并模拟了疫情沿高铁线路传播的过程。研究表明:各省、市级累计确诊人数与人口迁徙指数有着较强的正相关性,表明交通对疫情传播具有一定的助推作用,在交通运输工具内有可能造成一定数量乘客被感染;依据潜伏期的推后效应,在一定程度上解释了除武汉之外中国其他各省市在 2020 年 1 月 31 日至 2 月 5 日每日新增确诊人数处于高峰状态;采取隔离与降低乘客上座率等措施减少乘客相互之间接触机会,可以有效降低乘客被感染风险,且效果显著好于通风和消毒措施。可见,为了合理控制疫情沿交通线路传播,在交通运输工具内应以降低上座率,加大乘客之间的乘坐距离,降低相互接触率等措施为主,辅以增加通风和消毒措施。

关键词:交通管理;新型冠状病毒肺炎;疫情传播机制;改进 SEIR 模型;交通线路

中图分类号:U491.112 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.03.014

Transmission mechanism of COVID-19 epidemic along traffic routes based on improved SEIR model

ZHANG Yu, TIAN Wan-li, WU Zhong-guang, CHEN Zong-wei, WANG Ji

(Research Center for Standards and Metrology, China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The characteristics of COVID-19, which is transmitted by contact and droplets and is infectious in the incubation period, were considered. Combined with the narrow space and airtight environment of the vehicle and based on SEIR model, the vehicle internal epidemic transmission model was established considering the factors of virus density, contact and infection rate among passengers, and travel time. Based on the internal epidemic transmission form in the vehicle, the epidemic transmission to the non-epidemic area in the process of the vehicle loading and unloading passengers at multiple stops was considered, and a model of epidemic spread along

收稿日期:2020-03-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFF0207500);交通运输标准(定额)项目(2019-99-069);中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(20190402);安徽省交通控股集团有限公司科技项目(2018BASZ0185);浙江省交通质监行业科技计划项目(ZJ201901)

作者简介:张 宇(1979-),女,吉林长春人,交通运输部科学研究院副研究员,从事交通运输标准化研究。

通讯作者:陈宗伟(1972-),男,河南禹州人,交通运输部科学研究院成绩优异的高级工程师,工学博士。

引用格式:张 宇,田万利,吴忠广,等. 基于改进 SEIR 模型的新冠肺炎疫情沿交通线路传播机制[J]. 交通运输工程学报,2020,20(3):150-158.

Citation: ZHANG Yu, TIAN Wan-li, WU Zhong-guang, et al. Transmission mechanism of COVID-19 epidemic along traffic routes based on improved SEIR model[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(3): 150-158.

traffic routes based on population migration was established. The transmission mechanism of the epidemic along traffic routes was analyzed using the two models. Based on the population migration index and confirmed cases in Wuhan, the relationship between confirmed cases and population migration index was analyzed, and the transmission process of the epidemic along the high-speed railway was simulated. Research result shows that the cumulative confirmed cases of each provincial and municipal level have a strong positive correlation with the population migration index, indicating that transportation has a certain role in promoting the spread of the epidemic. There may be some passengers infected within the vehicle when there are infectives. With the backward effect of incubation period, to some extent, it explains that except for Wuhan, the number of newly confirmed cases in urban areas of other provinces in China was at a peak on January 31 to February 5 in 2020. The measures such as isolation and reducing passenger occupancy to reduce the contact between passengers can effectively reduce the infection risk of passengers, and the effect is significantly better than the ventilation and disinfection measures. Therefore, in order to reasonably control the spread of the epidemic along traffic routes, some measures should be taken to reduce the occupancy rate, increase the distance between passengers and reduce the contact rate, supplemented by the measures to increase ventilation and disinfection. 1 tab, 5 figs, 30 refs.

Key words: traffic management; COVID-19; epidemic transmission mechanism; improved SEIR model; traffic route

Author resumes: ZHANG Yu(1979-), female, associate research fellow, zhangyu@motcats.ac.cn; CHEN Zong-wei(1972-), male, senior engineer, chenzw@motcats.ac.cn.

Foundation items: National Key Research and Development Program of China(2017YFF0207500); Transport Standard (Quota) Project (2019-99-069); Basic Scientific Research Project of Central Public Welfare Research Institute (20190402); Science and Technology Project of Anhui Transportation Holding Group Co., Ltd (2018basz0185); Science and Technology Planning Project of Zhejiang Province Transportation Quality Supervision Industry (zj201901)

0 引言

与非典型性肺炎(Severe Acute Respiratory Syndrome, SARS)疫情爆发时相比,如今更加发达的公路、铁路和航空交通线路对新冠肺炎在国内迅速传播具有一定的助推作用^[1-2]。通过研究疫情借助交通线路传播的机制,对及时遏制疫情传播,减少患者人数和减轻对社会经济的影响具有重要作用。

传染病伴随人类社会的发展,从最初的区域传播,如1910年东北地区鼠疫的流行,到如今在国家,甚至全球范围内传播,如近些年SARS、埃博拉、中东呼吸综合征(Middle East Respiratory Syndrome, MERS)等,人类与传染病的斗争从未停止^[3-4]。对传染病的认识从最初的“瘟疫”,到如今运用科学进行解析。如运用数学知识,通过分析传染病的传播特点建立模型描述传染病的传播过程。最初为描述黑死病传播的SIR模型,被认为是最经典、最基本

的传染病动力学模型,该模型将人分为易感者类、感染者类和移出者类3类^[5],主要针对感染后被治愈并获得免疫能力而不能再次被传染的传染病类型。后来多考虑传染病中存在潜伏期的情况,建立包含易感者类、潜伏者类、感染者类和移出者类4类人群的SEIR模型^[6-7],其中潜伏者类是指已经被病毒感染但还没有传染能力的人群。之后又出现考虑政府等机构采取隔离等措施下的改进SEIR模型^[8]和非线性传染率传染病模型^[9],模型更加复杂,考虑的因素更加全面,对疫情传播过程的描述更加精准。建立模型分析传染病的传播过程,最大目的就是找到了有效的防控手段,以期在疫情早期能够及时阻断传播。大量学者通过对近些年爆发的SARS^[10-11]、MERS^[12]、埃博拉^[13]等疫情传播过程的研究发现,采取隔离、减少交通出行等方式可以有效地抑制和阻断传染病疫情的传播。对于个体层面而言,减少外出与自行隔离,可以在疫情传播的流行期

和高峰阶段有效降低被感染机率^[14]。随着交通发展,疫情借助交通线路快速、大范围传播成为当今世界面临的一大挑战。探索交通在疫情传播中的作用成为一个重要的研究领域。对 SARS 等疫情传播的研究表明,交通运输通道在疫情传播过程中具有重要的媒介作用^[14-15],具有点效应和通道效应^[16],疫情可以沿着交通运输通道快速传播,且不同运输方式的扩散速度不同^[17],并可沿着交通线路出现“飞点”传播现象^[18-20]。研究表明,铁路和民航是长距传播的主要方式^[21],疫情传播早期严格控制铁路和民航客流,可以有效地抑制疫情空间传播^[22]。为了能够及时阻断疫情通过交通线路传播,通过建立模型准确预测疫情利用交通到达某地的时间成为一项重要的手段^[23-24]。

通过对 SARS、埃博拉等疫情传播的研究,在疫情传播机理及交通线路在疫情传播中的作用等方面取得了一定的研究成果。对于此次爆发的新冠肺炎疫情,具有可通过飞沫和接触传染,比 SARS 具有更强的传染特性^[25],其基本再生数为 2.68^[26-27],存在 1~14 d 潜伏期且潜伏期具有传染性等特点,导致了各种出行方式中传播者与健康者混合,造成健康乘客在乘坐交通工具的过程中被感染并沿着交通线路从一点向外快速扩散^[28]。以往的 SIR、SEIR 等模型无法准确描述此次新冠肺炎疫情如何借助交通线路传播蔓延,因此,针对新冠肺炎传染特点和现有研究不足,本文提出了新冠肺炎疫情借助交通线路传播模型,探索疫情借助交通线路的传播机理,为更好地采取防控措施提供理论支持。

1 疫情沿交通线路传播模型

1.1 疫情沿交通线路传播过程

新冠肺炎疫情利用交通工具向外传播主要有 2 个过程,一是在交通工具内部的传播,二是被感染乘客到达目的地后的传播,如图 1 所示。在疫区 A,新冠肺炎患者通过乘坐火车、飞机和公路班线等交通工具前往目的地 Z。新冠肺炎患者在潜伏期无发病症状,但是具有通过接触和飞沫等途径传播病毒的特性,导致乘客本身在不知情的情况下将病毒传染给其他人。交通工具由于空间狭小,密闭性强,通风较差,假设乘客紧密相坐,新冠肺炎患者在交通工具内部形成了一个病毒传染源。与室外开阔空间相比,存在飞沫传染和接触传染双重叠加的风险。当乘客到达目的地后,新冠肺炎传染者和新被感染者将一同成为目的地的新冠肺炎传染者。

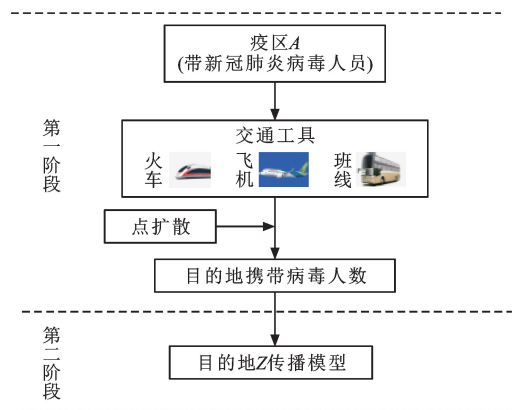


图 1 疫情沿交通线路传播过程

Fig. 1 Spreading process of epidemic along transport route

1.2 交通工具内传播模型

新冠肺炎在交通工具内的传播过程可以借鉴 SEIR 模型分析,但 SEIR 模型中潜伏者不具有传染性,与交通工具内密闭环境且新冠肺炎患者在潜伏期可通过飞沫、接触等途径传播不相符合,不能完全适用,因此,结合新冠肺炎的传染性及其交通工具内部乘客之间接触率高、易受飞沫传染等特点,同时考虑到消毒、通风等防控措施等因素^[15],建立了基于 SEIR 模型的交通工具内部新冠肺炎疫情传播模型。考虑到乘客乘坐交通工具时间有限,可以认为新被感染者在一次旅途中不再向外传播病毒感染他人,因此,交通工具内传播模型仅考虑 SEIR 模型中健康者被感染成为潜伏者的过程。

基于 SEIR 模型,假设交通工具中健康者被感染的可能性 p 与其处在有新冠肺炎传染者交通工具内的时间 t 、接种率 h 和危险区域内病毒密度 ρ 成正比^[29-30],并满足

$$p = (bp + h)t \quad (1)$$

式中: b 为正比例系数,可由实际数据拟合得到。

相对密闭的交通工具内新冠肺炎病毒密度 ρ 满足

$$\rho = \frac{n}{WDV} = \frac{\int_0^t vI dt}{WDV} = \frac{vIt}{WDV} \quad (2)$$

式中: n 为在有新冠肺炎传染者的交通工具内部经过时间 t 后新冠肺炎病毒的数目,假定新冠肺炎传染者以均匀的速度向外释放; v 为病毒向外释放的强度,与携带新冠肺炎传染者的发病状况有关; I 为初始携带新冠肺炎且具有传染特性的乘客数; V 为交通工具的体积; W 为通风指标,假定交通工具通过排风系统以一定的速率向外排除新冠肺炎病毒; D 为交通工具消毒指标,假定通过消毒措施使病毒按此指标被匀速杀死。

其中 W 、 D 最小取值为 1, 表示交通工具内部未采取任何的通风和消毒措施, 数值越大说明通风和消毒的效果越好。

接种率 h 满足

$$h = \beta \alpha I \quad (3)$$

式中: β 为接触率, 即单位时间内一个新冠肺炎传染者与其他乘客近距离接触的有效次数; α 为感染率, 即通过与新冠肺炎传染者一次有效接触被感染的概率。

综合式(1)~(3), 则有

$$p = \left(\frac{bvIt}{WDV} + \alpha\beta I \right) t = \frac{bvIt^2}{WDV} + \alpha\beta It \quad (4)$$

设有新冠肺炎传染者的交通工具内经过时间 t 健康者人数为 S_t , 根据 SEIR 模型, 则交通工具内健康者人数随时间的变化率为

$$\frac{dS_t}{dt} = -pS_t = -\left(\frac{bvIt^2}{WDV} + \alpha\beta It \right) S_t \quad (5)$$

有

$$\frac{dS_t}{S_t} = -\left(\frac{bvIt^2}{WDV} + \alpha\beta It \right) dt \quad (6)$$

则两边积分得

$$\ln(S_t) - \ln(S_0) = -\frac{bvI}{WDV} \int_0^t t^2 dt - \alpha\beta I \int_0^t t dt = -\frac{bvIt^3}{3WDV} - \frac{\alpha\beta It^2}{2} \quad (7)$$

式中: S_0 为交通工具内初始时刻的健康者人数, 即交通工具从始发站点出发后乘客中健康者的数量。

交通工具内总人数 N 为

$$N = S_0 + I \quad (8)$$

对式(7)求对数, 则有

$$S_t = S_0 \exp\left(-\frac{bvIt^3}{3WDV} - \frac{\alpha\beta It^2}{2}\right) \quad (9)$$

因此, 本次旅途时间 T 内, 该交通工具内新被感染的人数 E_T 为

$$E_T = S_0 - S_T = S_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{bvIT^3}{3WDV} - \frac{\alpha\beta IT^2}{2}\right) \right] \quad (10)$$

1.3 沿交通线路的传播模型

新冠肺炎沿交通线路传播的关键环节是人口流动。考虑到交通线路各个站点人员交换情况不同, 对站点所在区域的新冠肺炎传播的影响也不一样。1.2 节介绍了交通工具内部疫情传播的数学模型, 以此模型为基础, 考虑不同站点人流交换情况, 建立人口流动引起的疫情沿交通线路传播模型。

假设由疫区 A 至目的地 Z 之间开行某次交通工具, 共停靠 i 个站点 ($i \geq 2$)。疫区 A 至第 j 个站点 Z_j 的行程时间记为 T_j , 站点 Z_j 所在地区的外流人口总数为 P_j 。交通工具在每个站点均有上下乘

客, 假设在非疫区站点新上车乘客均为健康的乘客。

沿交通线路疫情传播的模型可以描述为以下几个过程。

1.3.1 从疫区 A 至站点 Z_1 传播过程

从疫区 A 至站点 Z_1 的过程中被感染的人数 E_{T_1} 为

$$E_{T_1} = S_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{bvIT_1^3}{3WDV} - \frac{\alpha\beta IT_1^2}{2}\right) \right] \quad (11)$$

假设某站点下客数与该站点所在地区外流人口总数占全线外流人口总数的比例进行测算, 则站点 Z_1 下客数 n_1 为

$$n_1 = \frac{P_1 N_0}{\sum_{j=1}^i P_j} \quad (12)$$

式中: N_0 为初始乘客总人数。

在站点 Z_1 , 交通工具中具有传染性的人数 I'_1 为

$$I'_1 = \frac{n_1 I}{N_0} \quad (13)$$

新被感染者人数 E'_{T_1} 为

$$E'_{T_1} = \frac{n_1 E_{T_1}}{N_0} \quad (14)$$

此时交通工具上乘客的总人数 N_1 为

$$N_1 = N_0 - n_1 \quad (15)$$

具有传染性的人数 I_1 为

$$I_1 = I - I'_1 \quad (16)$$

健康者人数 S_{T_1} 为

$$S_{T_1} = N_0 - n_1 - I_1 - E_{T_1} + E'_{T_1} \quad (17)$$

1.3.2 从站点 Z_1 到站点 Z_2 传播过程

假设在站点 Z_1 上客人数为 S'_1 , 新上客均为健康者, 且上客总人数小于或等于交通工具上空座数, 则此时交通工具上总人数 N'_1 为

$$N'_1 = N_0 - n_1 + S'_1 \quad (18)$$

此时交通工具上健康者人数 S'_{T_1} 为

$$S'_{T_1} = N_0 - n_1 - I_1 - E_{T_1} + E'_{T_1} + S'_1 \quad (19)$$

根据式(10), 在从站点 Z_1 到 Z_2 这段行程时间 T_2 内新被感染者的人数 E_{T_2} 为

$$E_{T_2} = S'_{T_1} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{bv}{WDV} \left(\frac{T_1 IT_2^2 - IT_1^3}{2} + \frac{I_1 T_2^3 - I_1 T_1^3}{3} - \frac{\alpha\beta I_1 T_2^2}{2} \right) \right] \right\} \quad (20)$$

同理, 根据站点 Z_2 所在地区的外流人口总数可以得到下车的人数为

$$n_2 = \frac{P_2 N'_1}{\sum_{j=1}^i P_j} \quad (21)$$

其中,在站点 Z_2 下车乘客中,具有传染性的人数 I'_2 为

$$I'_2 = \frac{n_2 I_1}{N'_1} \quad (22)$$

新被感染者人数 E'_{T_2} 为

$$E'_{T_2} = \frac{n_2 (E_{T_2} + E'_{T_1})}{N'_1} \quad (23)$$

此时交通工具上乘客的总人数 N_2 为

$$N_2 = N'_1 - n_2 \quad (24)$$

具有传染性的人数 I_2 为

$$I_2 = I_1 - I'_2 \quad (25)$$

健康者剩余人数 S_{T_2} 为

$$S_{T_2} = N'_1 - n_2 - I_2 - E_{T_1} + E'_{T_1} + S'_1 - E_{T_2} + E'_{T_2} \quad (26)$$

同理,可以得到从站点 Z_k 到站点 Z_{k+1} 不同状态乘客数量的变化,即上下交通工具人流中不同乘客的数据,此时车上健康者人数 S_{T_k} 为

$$S_{T_k} = N'_{k-1} - n_k - I_k - \sum_{j=1}^k \left[E_{T_j} - \frac{n_j}{N'_{j-1}} \cdot (E_{T_j} + E'_{T_{j-1}}) \right] + S'_{k-1} \quad (27)$$

此过程即为沿交通线路新冠肺炎传播模型。

2 案例分析

2.1 疫情传播数据分析

利用百度迁徙数据提供的迁徙指数来推算从武汉市流往各地人口数量。2020 年 1 月 23 日上午,武汉市采取封城措施,禁止一切人口外出武汉,从迁徙指数可以看到,从 23 日开始逐渐降低并保持在 0 附近。同时,百度迁徙还提供了每日以武汉市为出发地到各省级单位及前 100 个市级单位的迁出

人口比例。各省及主要市级的平均迁徙指数 X 为

$$X = \frac{\sum_{l=1}^m a_l Q_l}{m} \quad (28)$$

式中: Q_l 为第 l 天武汉迁出人口的迁徙指数; a_l 为各省/市作为迁出目的地在第 l 天所占的比例; m 为统计数据的总天数。

2020 年春运从 1 月 10 开始,至 1 月 23 日武汉封城,这里将 m 取值为 14。

2.1.1 各省疫情传播情况

按照式(28),结合百度迁徙数据,计算得到 1 月 10 日至 1 月 23 日各省级单位的平均迁徙指数,见图 2。其中,从武汉到河南、湖南的平均迁徙指数最大,分别为 0.44 和 0.26,最少的为西藏,只有 0.001 3。武汉市迁往湖北省内其他城市的平均迁徙指数达到了 5.30,同时在省级单位上湖北省也为重要的疫区,因此,未将其考虑在内。新冠肺炎具有平均 10 d 潜伏期,从武汉 1 月 23 日封城到第 10 d,即 2 月 2 日之前各地确诊发病的病人基本为输入型肺炎。利用各省市卫健委公布的确诊人数数据,分别统计了 2 月 2 日和 2 月 20 日各地确诊病人数。

从图 2 可以看出:随着平均迁徙指数的增大,2 月 2 日和 20 日的累计确诊人数都呈逐渐变大趋势。将平均迁徙指数分别与 2 月 2 日、2 月 20 日的累计确诊人数进行斯皮尔曼相关性检验,决定系数 R^2 分别为 0.925 5 和 0.933 3,显著性检验结果 z 分别为 0.002 和 0.005,表明平均迁徙指数与各省累计确诊人数具有较强的相关性。

2.1.2 各市疫情传播情况

市级行政单位同省级行政单位统计数据一

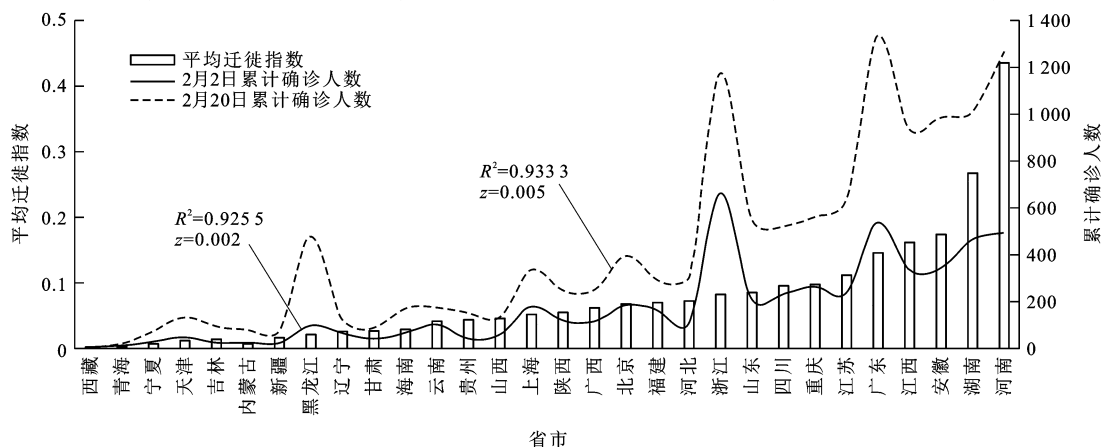


图 2 各省市平均迁徙指数和累计确诊人数

Fig. 2 Average emigration index and total confirmed case of each province or city

样,分别统计了平均迁徙指数和2月2日及2月20日累计确诊人数数据。由于部分市平均迁徙指数和累计确诊人数较少,因此,只研究了平均迁徙指数较大的前31个城市,见图3,可知:平均迁徙指数最高的城市为湖北省孝感市,前15个城市均为湖北省内城市,河南省信阳市为湖北省外平均迁徙指数最高的城市,重庆第二。对平均迁徙指数和2月2日及2月20日累计确诊人数进行斯皮尔曼相关性检验,决定系数 R^2 分别为0.767和0.8669,显著性检验结果 z 分别为0.0018和0.0002,结果表明平均迁徙指数与各市累计确诊

人数具有较强的相关性。

2.1.3 湖北省外总体情况

从1月24日开始,随着武汉市封城措施开始实施,全国新增确诊人数的变化可分为3个阶段,见图4。第1阶段从1月24日开始至1月30日止,新增确诊人数先是急速下降后又缓慢上升,整体处于上升阶段;第2阶段为1月31日至2月5日,该阶段新增确诊人数于1月31日达到最高峰,并连续处于高位,相对比较平稳,出现集中确诊;从2月6日以后为第3阶段,新增确诊人数开始缓慢下降,并保持在一个较低的水平,直至为0。

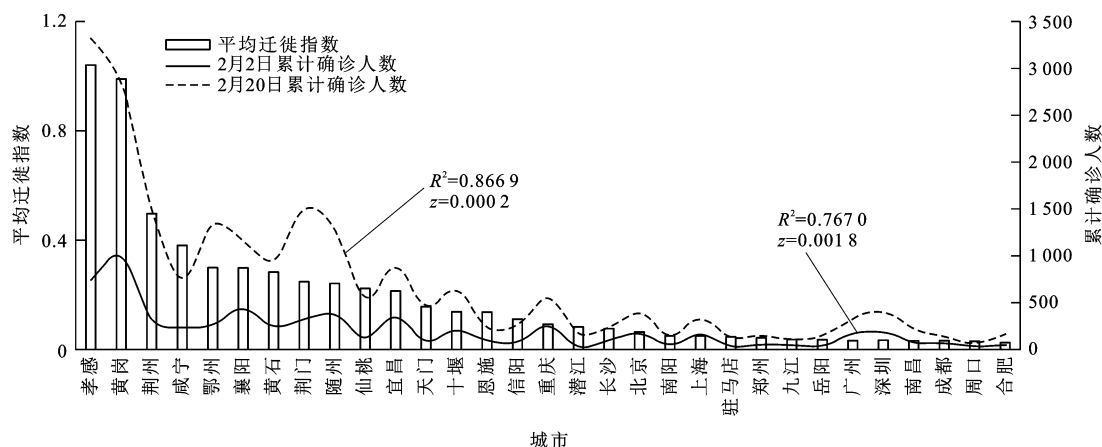


图3 主要城市平均迁徙指数和累计确诊人数

Fig. 3 Average emigration indexes and total confirmed cases in major cities

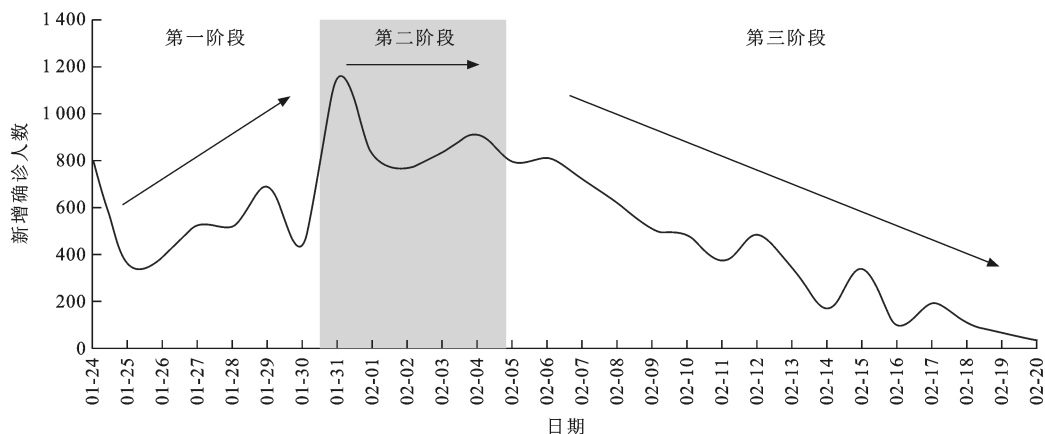


图4 湖北省外的全国新增确诊人数

Fig. 4 Number of newly confirmed cases nationwide except Hubei Province

从省级和市级2个尺度统计数据上来看,累计确诊人数与平均迁徙指数具有正相关性,且疫情传播呈现出2个阶段,在2月5日之前以输入型病例为主,在之后以本地传染型为主。在武汉采取隔离措施之前,铁路、航空及公路客运大巴等交通方式在运送旅客过程中,传染者与正常旅客在未采取预防措施下共处于一个相对狭小、密闭的空间中,容易引

起病毒传播。交通工具成为疫区向外输送和传播疫情的途径之一,研究疫情如何通过交通向外地传播对预防遏制疫情蔓延具有重要的意义。

2.2 模型相关参数取值

从2.1节的疫情数据分析可知,疫情可借助交通线网向各地扩散蔓延。本文以武汉始发至站点Z的铁路运输方式进行模拟试算。统计了站点Z从

1月23日至2月22日每天新增确诊人数,见图5,可以看出:站点Z每日新增确诊人数也呈现3个阶段,并在1月31日至2月5日达到峰值。从12306查询得到,武汉至站点Z之间铁路车型主要为高速铁路。选取由武汉始发至站点Z的某次高铁列车,可以认为从列车始发时上车人员均为从武汉疫区出发人员。列车由武汉至站点Z全程用时0.83 h,中途经停站点 Z_1 ,其中从武汉至站点 Z_1 用时0.50 h,从站点 Z_1 至站点Z用时0.33 h。正值春运期间,出行需求较大,假定列车从武汉站发出之时已坐满,根据高铁列车一节车厢平均定员数量,设定为80人。在旅客进站时进行体温检测,可以认定具有体温超标症状的发病者不会上到列车,即只有潜伏期

具有传染性的旅客上车。由于列车每节车厢相对封闭,可假定相邻车厢之间不相互影响。以列车一节车厢出现1名新冠肺炎传染者为例进行模拟试算,取 $I=1$ 。假设在站点 Z_1 本节车厢下车人数为10人,上车10人,具有传染性的新冠肺炎患者不在此站下车;站点Z本节车厢下车20人,且具有传染性的新冠肺炎患者在本站下车。高铁列车一节火车车厢体积约为 $V=120\text{ m}^3$ 。为了对比通风和消毒措施的效果, D 分别取1和5, W 分别取1和5。借鉴非典的经验^[18], b 取值为0.005, v 取值为10。考虑车厢内人员活动量和范围较小,接触率 β 分别取值为0.1、0.3。鉴于新冠肺炎具有较强的传染特性,将感染率 α 的取值分别设为0.5和0.7。

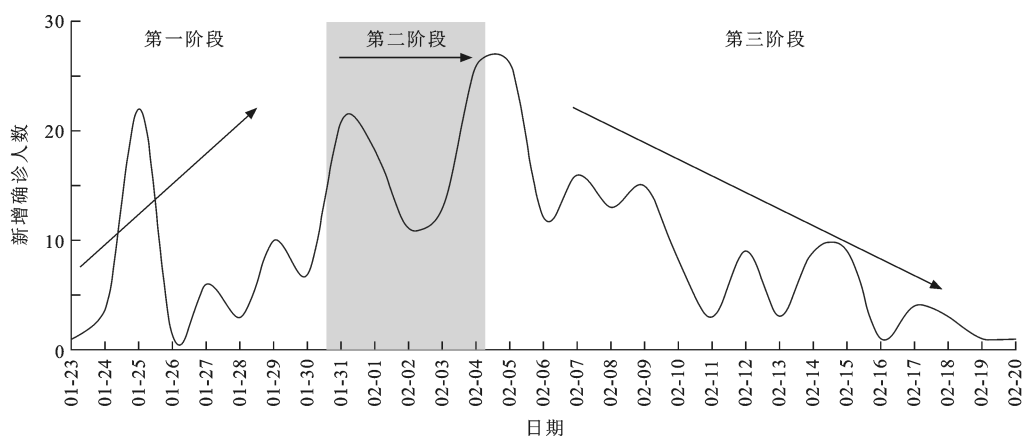


图5 站点Z新增确诊人数

Fig. 5 Number of people newly confirmed at station Z

2.3 计算结果分析

根据第1节建立的疫情传播模型和2.2节相关参数的取值,武汉至站点Z之间接触率和感染率的数值模拟结果见表1。列车通风和消毒取值考虑均为1和5两种情况,1代表未采取消毒和通风措施,数值越大代表效果越好,乘客被感染风险越小。接种率代表通过一次有效接触,单位时间内健康者被感染的概率,根据接触率和感染率的取值,共有4种组合,依次为0.05、0.07、0.15和0.21,因此,从武汉至站点Z之间铁路传播疫情数值模拟共有8种假定情况。通过数值模拟结果可以看到,在假定一节车厢中有一名乘客是新冠肺炎患者且具有传染性,将表1中到达车站 Z_1 的感染人数和到达车站Z的感染人数相加,即各得到在从武汉至车站Z的0.83 h内,8种不同的接触率和感染率组合下,感染人数分别为0.73、1.01、2.16、3.21、0.71、0.99、2.10和3.14人。在假定传染者在车站Z下车后,分别有1.17、1.23、1.49、1.73、1.16、1.23、1.48和

1.72个可能感染者输入到站点Z,同时列车上还有0.50、0.70、1.48、2.20、0.48、0.67、1.44和2.16个可能感染者输送到其他城市。

通过上述数据可以分析,在交通工具内部降低接触率和感染率、增加通风和消毒措施可有效地降低被感染人数。如,将接触率从0.3降低到0.1后,在采取不同通风和消毒措施下总的被感染人数将会分别减少1.39人和2.15人。通过增加通风和消毒措施也可降低乘客被感染人数,但降幅较小,最高仅从3.21人降低到3.14人。通过降低接触率,可以有效降低乘客被感染的机率,间接证明隔离可以有效阻断疫情传播,且效果好于通风和消毒措施。

通过数值模拟的结果,可以在一定程度上解释图4、5曲线的变化,全国各地均采取封闭管控措施后,除湖北省之外全国和站点Z的新增确诊人数仍然保持较高水平,甚至在第10 d左右出现最高峰,然后逐渐下降,直至接近于0。由于新冠肺炎较高的感染率,火车、飞机和汽车内相对狭小、密闭的空

表 1 武汉至站点 Z 之间铁路传播疫情数值模拟结果

Tab. 1 Numerical simulation result of diseases spread via railway between Wuhan and station Z

总人数	接触率	感染率	传染源	接种率	消毒	通风	到达站点 Z ₁ 感染人数	站点 Z ₁ 下车 感染人数	到达站点 Z 感染人数	站点 Z 下车 感染人数	未下车感 染人数
80	0.1	0.5	1	0.05	1	1	0.51	0.06	0.22	1.17	0.50
80	0.1	0.7	1	0.07	1	1	0.70	0.09	0.31	1.23	0.70
80	0.3	0.5	1	0.15	1	1	1.51	0.19	0.65	1.49	1.48
80	0.3	0.7	1	0.21	1	1	2.29	0.29	0.92	1.73	2.20
80	0.1	0.5	1	0.05	5	5	0.50	0.06	0.21	1.16	0.48
80	0.1	0.7	1	0.07	5	5	0.69	0.09	0.30	1.23	0.67
80	0.3	0.5	1	0.15	5	5	1.47	0.18	0.63	1.48	1.44
80	0.3	0.7	1	0.21	5	5	2.26	0.28	0.88	1.72	2.16

间环境,感染率和接触率被放大,可能出现聚集性传染。表 1 中的数据表明,在短时间内,车厢采取通风和消毒措施下,1 个传染者就有可能造成 3.14 个人被感染,即使在较低的接触率和感染率下,也会造成 0.73 个人被感染。

3 结 语

(1)疫情传播与人口流动迁徙具有很强的正相关性, R^2 最小为 0.767,表明交通对疫情扩散具有一定的助推作用。

(2)建立了基于改进 SEIR 模型的交通工具疫情传播模型与沿交通线路疫情传播模型,完整描述了新冠肺炎如何通过交通线路向外传播扩散的过程。

(3)数值模拟结果可以一定程度上解释站点新增确诊人数变化的趋势,交通工具内部乘客被感染风险增大;在疫情期间,应以降低上座率,加大乘客之间的乘坐距离,降低相互接触率等措施为主,辅以增加通风和消毒措施,以有效降低乘客之间的感染风险。

(4)在今后的工作中可进一步跟踪疫情数据变化,考虑政府行政干预力度、公众防护等因素修正 SEIR 模型,探索建立适应各种交通运输工具的疫情传播机制。

参 考 文 献 :

References :

[1] 中国疾病预防控制中心新型冠状病毒肺炎应急响应机制流行病学组. 新型冠状病毒肺炎流行病学特征分析[J]. 中华流行病学杂志, 2020, 41(2): 145-151.
Epidemiology Working Group for NCIP Epidemic Response, Chinese Center for Disease Control and Prevention. The epidemiological characteristics of an outbreak of 2019 novel coronavirus diseases (COVID-19) in China [J]. Chinese

Journal of Epidemiology, 2020, 41(2): 145-151. (in Chinese)
[2] YANG Zi-feng, ZENG Zhi-qi, WANG Ke, 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, DOI: 10.21037/jtd.2020.02.64.
[3] 冯佳园. 传染病发生和流行的主要影响因素趋势预测研究[D]. 北京: 北京协和医学院, 2009.
FENG Jia-yuan. Study on the trend prediction of the main factors affecting the occurrence and prevalence of infectious diseases[D]. Beijing: Peking Union Medical College, 2009. (in Chinese)
[4] CHEOWELL G, HENGARTNER N W, CASTILLO-CHAVEZ C, et al. The basic reproductive number of Ebola and the effects of public health measures: the cases of Congo and Uganda[J]. Journal of Theoretical Biology, 2004, 229(1): 119-126.
[5] 王拉娣. 传染病动力学模型就控制策略研究[D]. 上海: 上海大学, 2004.
WANG La-di. Research on the epidemic models and controlling strategy of epidemic diseases [D]. Shanghai: Shanghai University, 2004. (in Chinese)
[6] LEKONE P E, FINKENSTADT B F. Statistical inference in a stochastic epidemic SEIR model with control intervention: Ebola as a case study[J]. Biometrics, 2006, 62(4): 1170-1177.
[7] 刘云忠, 宣慧玉, 林国玺. SARS 传染病数学建模及预测预防控制机理研究[J]. 中国工程科学, 2004, 6(9): 60-65.
LIU Yun-zhong, XUAN Hui-yu, LIN Guo-xi. Mathematical and predictive models of SARS epidemic disease and mechanism of prevention and control [J]. Engineering Science, 2004, 6(9): 60-65. (in Chinese)
[8] ZHANG Juan, LOU Jie, MA Zhi-en, et al. A compartmental model for the analysis of SARS transmission patterns and outbreak control measures in China[J]. Applied Mathematics and Computation, 2005, 162(2): 909-924.
[9] 郭树敏. 传染性疾病传染机制与控制的系统研究[D]. 北京: 中国航天第二研究院, 2010.
GUO Shu-min. System research on transmission mechanism and control of some infectious diseases [D]. Beijing: The Second Academy of China Aerospace, 2010. (in Chinese)

- [10] CHOWELL G, CASTILLO-CHAVEZ C, FENIMORE P W, et al. Model parameters and outbreak control for SARS[J]. *Emerging Infectious Diseases*, 2004, 10(7): 1258-1263.
- [11] LIPSITCH M, COHEN T, COOPER B, et al. Transmission dynamics and control of severe acute respiratory syndrome[J]. *Science*, 2003, 300: 1966-1970.
- [12] BREBAN R, RIOU J, FONTANET A. Interhuman transmissibility of middle east respiratory syndrome coronavirus; estimation of pandemic risk[J]. *Lancet*, 2013, 382: 694-699.
- [13] 蔡 磊. 基于 2014~2015 年埃博拉疫情数据的统计建模与重要参数分析[D]. 广州:暨南大学,2016.
CAI Lei. Statistical modeling and analysis of important parameters based on 2014-2015 Ebola epidemic data [D]. Guangzhou: Jinan University, 2016. (in Chinese)
- [14] 徐展凯. 基于个体的传染病传染模型构建及应用[D]. 北京: 人民解放军军事医学科学研究所,2016.
XU Zhan-kai. The building of individual-based infectious disease model and applications [D]. Beijing: Academy of Military Medical Sciences, 2016. (in Chinese)
- [15] 张殿业,郭寒英. 交通运输通道防控非典型肺炎(SARS)疫情的作用研究[J]. *交通运输工程与信息学报*,2003,1(1):31-36.
ZHANG Dian-ye, GUO Han-ying. Effect of traffic and transportation preventing and controlling sever acute respiratory syndrome epidemic situation [J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2003, 1(1): 31-36. (in Chinese)
- [16] 郭寒英,张殿业,石红国. 交通运输突发疫情扩散理论与模型研究[J]. *铁道运输与经济*,2004,26(2):65-67.
GUO Han-ying, ZHANG Dian-ye, SHI Hong-guo. Spreading theory and model study of broke-out diseases in traffic and transportation [J]. *Railway Transport and Economy*, 2004, 26(2): 65-67. (in Chinese)
- [17] 程子龙. 面向传染病传染的人工交通系统建模关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2012.
CHENG Zi-long. Research on key technology of artificial transportation system modeling toward infection transmission[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [18] 杨 华,李小文,施 宏,等. SARS 沿交通线路的“飞点”传染模型[J]. *遥感学报*,2003,7(4):251-255.
YANG Hua, LI Xiao-wen, SHI Hong, et al. “Fly dots” spreading model of SARS along transportation[J]. *Journal of remote sensing*, 2003, 7(4): 251-255. (in Chinese)
- [19] 曹春香,李小文,闫 珩,等. 地理空间信息与 SARS 疫情走势[J]. *遥感学报*,2003,7(4):241-244.
CAO Chun-xiang, LI Xiao-wen, YAN Jun, et al. Geo-spatial information and analysis of SARS spread trend[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(4): 241-244. (in Chinese)
- [20] 刘亚岚,阎守邕,李小文,等. 中国内地人口流动空间规律研究及其在 SARS 控制宏观决策中的应用[J]. *遥感学报*,2003, 7(4):273-276.
LIU Ya-lan, YAN Shou-yong, LI Xiao-wen, et al. Study on population migration characteristics in mainland China and its applications to decision-making for SARS control[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(4): 273-276. (in Chinese)
- [21] ZHAO Shi, ZHUANG Zi-an, RAN Jin-jun, et al. The association between domestic train transportation and novel coronavirus (2019-nCoV) outbreak in China from 2019 to 2020: a data-driven correlational report[J]. *Travel Medicine and Infectious Disease*, 2020, 33: 101568-1-3.
- [22] 张 云. 中国大陆地区甲型 H1N1 流感疫情传播的建模与分析[D]. 北京:北京师范大学,2011.
ZHANG Yun. Modeling and analysis of influenza a (H1N1) epidemiology in mainland of China [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2011. (in Chinese)
- [23] WANG L, WU J T. Characterizing the dynamics underlying global spread of epidemics [J]. *Nature Communications*, 2018, DOI: 10.1038/s41467-017-02344-z.
- [24] BROCKMANN D, HELBING D. The hidden geometry of complex network-driven contagion phenomena[J]. *Science*, 2013, 342: 1337-1342.
- [25] LIU Tao, HU Jian-xiong, KANG Min, et al. Transmission dynamics of 2019 novel coronavirus (2019-nCoV) [J]. *BioRxiv*, DOI: 10.1101/2020.01.25.919787.
- [26] WU J T, LEUNG K, LEUNG G M. Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study[J]. *Lancet*, DOI: 10.1016/S0140-6736(20)30260-9.
- [27] ZHAO Shi, LIN Qian-yin, RAN Jin-jun, et al. Preliminary estimation of the basic reproduction number of novel coronavirus (2019-nCoV) in China, from 2019 to 2020: a data-driven analysis in the early phase of the outbreak[J]. *International Journal of Infectious Diseases*, 2020, DOI: 10.1016/j.ijid.2020.01.050.
- [28] 中华预防医学会新型冠状病毒肺炎防控专家组. 新型冠状病毒肺炎流行病学特征的最新认识[J]. *中华流行病学杂志*, 2020,41(2):139-144.
Special Expert Group for Control of the Epidemic of Novel Coronavirus Pneumonia of the Chinese Preventive Medicine Association. An update on the epidemiological characteristics of novel coronavirus pneumonia (COVID-19) [J]. *Chinese Journal of Epidemiology*, 2020, 41(2): 139-144. (in Chinese)
- [29] LIN Kun, FONG D Y T, ZHU Bi-liu, et al. Environmental factors on the SARS epidemic: air temperature, passage of time and multiplicative effect of hospital infection [J]. *Epidemiology and Infection*, 2006, 134(2): 223-230.
- [30] 陈文江,吴开琛,吴开录,等. 运用数学模型探讨 SARS 聚集性传播的机制[J]. *中国热带医学*,2004,4(1):20-23.
CHEN Wen-jiang, WU Kai-chen, WU Kai-lu, et al. Approach to the mechanism of cluster transmission of SARS by mathematical model[J]. *China Tropical Medicine*, 2004, 4(1): 20-23. (in Chinese)