

面向防疫的城市交通系统韧性特征及提升策略

李 晔^{1,2}, 刘兴华¹, 何 青³

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海师范大学, 上海 200234; 3. 北京市城市规划设计研究院, 北京 100045)

摘要: 突发公共卫生事件正逐步成为全球经济与安全的最大风险之一, 城市交通系统必须具备韧性才能应对挑战。首先根据突发公共卫生事件疫情特征, 将城市交通系统的经历过程分为5个阶段: 平时阶段、疫情潜伏阶段、疫情暴发阶段、后疫情阶段和恢复提升阶段。通过对各个阶段下的疫情特征、城市交通供给及需求的差异性进行分析, 提出支持状态有效切换的韧性城市交通系统特征, 包括动态性、易达性、多样性、智慧性和资源性, 这是提升城市交通系统防疫性能及城市免疫力的核心。最后, 针对各个阶段的差异性给出城市防疫交通系统韧性提升策略。

关键词: 城市交通; 突发公共卫生事件; 疫情; 韧性; 提升策略

Urban Transportation System Resilience During the COVID-19 Pandemic

Li Ye^{1,2}, Liu Xinghua¹, He Qing³

(1. The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China; 3. Beijing Municipal Institute of City Planning & Design, Beijing 100045, China)

Abstract: Public health emergency is becoming one of the greatest threats to global economy and security. Urban transportation systems must be resilient to meet the challenges. Based on the characteristics of public health emergencies, this paper dissects the operation of urban transportation system during epidemic into five stages - normal stage, virus incubation stage, outbreak stage, post-epidemic stage and recovery stage. Through analyzing the epidemic characteristics and urban transportation supply and demand at different stages, the paper discusses the resilient transportation system's dynamic, accessible, diversified, smart and resourceful qualities, which are the key to improve an urban transportation system and city's ability to control the public health emergency. Finally, the paper proposes how to improve urban transportation system resilience in different pandemic stages.

Keywords: urban transportation; public health emergencies; epidemic; resilience; improvement strategies

收稿日期: 2020-03-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“城市交通治理现代化理论研究”(71734004)

作者简介: 李晔(1974—), 男, 福建三明人, 博士, 教授, 博士生导师, 上海师范大学副校长, 主要研究方向: 交通能源与环境、交通公共政策等。E-mail: jamesli@tongji.edu.cn

0 引言

城市以其完善的基础设施、丰富的功能结构、高信息化程度促进了人口及资金等元素的聚集, 同时也提高了其脆弱性和各类风险。英国医学杂志《柳叶刀》曾报道, 城市很可能是人类健康的最大威胁, 是已知的最致命病毒肥沃的滋生地和温床。随着城市交通运输系统的完善, 日益频繁的旅游、公务等出行增加了病原体的扩散能力。据统计, 最近50年, 国际旅行者数量增长了1300%以上^[1], 每年的航空旅行者数量约为30亿人,

任何新病原体可在几小时内于世界范围内传播, 突发公共卫生事件正逐步成为全球经济与安全的最大风险之一^[2]。

新型冠状病毒肺炎(Coronavirus Disease 2019, COVID-19, 以下简称“新冠肺炎”)具有超强的传播性和隐蔽性, 世界卫生组织(World Health Organization, WHO)已将其设定为全球高风险等级^[3]。为了降低人口流动性及聚集性, 全国各省份相继启动了重大突发公共卫生事件一级响应, 采取了封锁部分高速公路、暂停省际客运、暂停城市公共交通服务等措施, 进而如何在抗疫背景下满足

居民刚性出行需求、根据疫情发展情况及时调整交通策略以维持城市正常运转成为亟待解决的问题。目前关于如何增强城市交通系统防疫性能的理论系统化科学应对策略研究还比较薄弱。

疫情不同发展阶段的差异性较大,城市交通系统不能只适应一种状态,而应具备韧性,在平时预防准备,在疫情干扰下可迅速从常态切换至紧急状态,促使系统尽快恢复、优化、升级,达到更高层次的稳定状态,以预防和应对未来更强的冲击。每次疫情发生对于城市交通系统不是简单重复而是螺旋式进化,每循环一次城市防疫交通系统的韧性将会有所提升。本文通过对由新发传染病(Emerging Infectious Diseases)构成的重大突发公共卫生事件在不同阶段的交通供给特征、居民出行需求及防疫需求等方面差异性进行分析,并基于韧性理论提出针对不同阶段的提升策略,以增强城市交通系统的韧性及城市免疫力。

1 基于传播模型的疫情下城市交通系统状态分析

新发传染病不确定性因素较多,极易流行且不易控制。作为危害最大的新发传染病之一,由病毒引发的新发呼吸道传染病通常具有飞沫传播、气溶胶传播、接触传播等多种传播途径,传播性极强,可不受空间限制在短时间内传播,并造成大量的确诊及死亡病例^[4]。根据《国家突发公共卫生事件应急预案》的分级标准,针对由高致病性新发呼吸道传染病疫情引发特别重大突发公共卫生事件的情形下,对城市交通系统状态进行分析。

SIR模型(Susceptible Infectious Recovered Model)作为经典的传染病模型,已在国内外疫情预测领域得到广泛认可和应用^[5-6]。依据SIR模型,可将城市交通系统在疫情下经历过程分为如图1所示的5个阶段。图中纵坐标为易感者(Susceptible,暂时未感染但无免疫力具有感染风险的人群)、感染者(Infectious,已被感染且具有传染性的人群)、移出者(Recovered,不会被再次感染的人群,指移出传染系统的人群)占总人数的比例,横坐标为疫情不同阶段交通系统状态。

1) 平时阶段,即无疫情干扰的阶段。居民出行以公共交通为主,出行目的具有多样性,既有通勤出行等刚性需求,也有娱乐休闲等弹性需求。此阶段应重视交通系统多

样性建设,确保居民出行易达性,预防在疫情突发的情况下严重影响居民的基本生活需求。

2) 疫情潜伏阶段,即城市出现少量感染者,尚未形成扩散蔓延态势的阶段。此阶段是防疫的关键时期,城市交通系统要体现防控的及时性、策略的准确性、风险可视化,决策层应积极重视,保持警惕,以免迅速进入疫情暴发阶段。

3) 疫情暴发阶段,即确诊病例数迅速增加,交叉感染的风险急速增长的阶段。居家隔离阻断成为控制疫情的重要举措,城市交通主要面向社区进行防控。居民出行频率总体将下降;出行目的集中于基本生活物资采购等刚性需求,弹性需求将大幅度减少;出行距离也以短途为主,出行范围主要集中于居住地附近;交通方式上,公共交通交叉感染风险较高,居民更倾向于选择同行人员少、私密性更高的个体交通工具出行,无车人员出行难度增加;应急保障物资的需求将增加,城市物流系统的储存和配送难度较高。居民的生活需求及医护人员、城市生命线运行人员的通勤出行是该阶段的保障重点。

4) 后疫情阶段,此阶段新增感染者数量将逐渐减少,现存感染者比例达到峰值后开始下降,移出者比例全面增加,但疫情尚未完全结束。如果继续执行封锁和阻断等交通措施,会因长时间停摆付出更大的社会经济代价。此时城市交通系统应综合考虑城市间返程和城市内人员复工、复产、复学等因素,逐步由面向社区防控向面向流动性防控转变,其特点在于:①居民出行需求逐渐增加,且以通勤交通为主;②公共交通将成为城市居民主要的交通方式;③乘客众多的公共交通场所成为易感场所。两种防控方式的

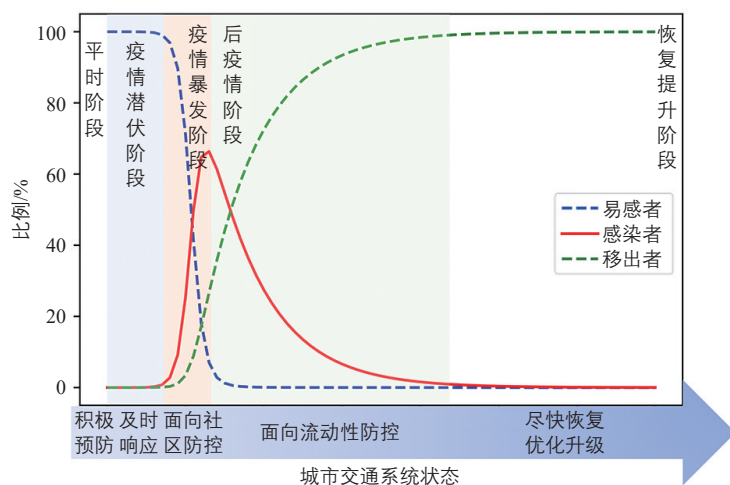


图1 基于SIR模型的疫情发展阶段

Fig.1 Epidemic development stages based on SIR model

具体对比如表1所示。

5) 恢复提升阶段, 此阶段疫情已得到控制, 但难以确定是否还具有无症状感染者, 所以需继续保持警惕, 防止疫情反弹。同时城市内居民出行及日常活动将全面恢复, 弹性需求频次等将全面增加。要继续重视客流密度控制, 继续确保应急物资运输通道的通畅, 并及时依据现有问题优化升级交通系统, 提升城市免疫力。

2 支持城市防疫交通系统状态有效切换的韧性分析

2.1 韧性研究现状

大卫·亚历山大(David Alexander)从语源学角度分析出韧性(Resilience)一词最早来源于拉丁语“resilio”, 其本意为恢复到原始状态^[7]。1973年文献[8]首次将韧性理念应用到生态学中, 提出生态系统韧性, 此后韧性的内涵及应用持续丰富。2009年联合国国际减灾战略署(United Nations International Strategy for Disaster Reduction, UNISDR)提出“韧性是系统、社区或社会在受到干扰时, 能够及时通过有效的方式抵抗、吸收, 适应外部变化, 并从其影响中恢复的能力”^[9]。

表1 两种防控方式的特点对比

Tab.1 Characteristics of two types of prevention and control methods

| 对比项 | 面向社区防控 | 面向流动性防控 |
|------|--------------------------|--|
| 防控阶段 | 疫情暴发阶段 | 后疫情阶段 |
| 出行需求 | 较小 | 较大 |
| 出行目的 | 基本生活出行、通勤 | 通勤、基本生活出行 |
| 出行距离 | 短距离为主 | 中远距离为主 |
| 交通工具 | 非公共交通为主 | 公共交通为主 |
| 主要挑战 | 交通阻断、控制疫情; 保证刚性需求和应急物资配送 | 鉴别人群健康状态, 精细化管理; 确保刚性需求和应急物资配送; 控制客流密度, 避免交叉感染 |

表2 韧性理论的发展

Tab.2 Development of resilience theories

| 阶段 | 目标 | 理论基础 | 特点 | 韧性定义 |
|------|----------------|------|----------|----------------------------------|
| 工程韧性 | 系统恢复至确定位置的稳定状态 | 工程学 | 单一线性稳定状态 | 韧性是系统受到扰动, 偏离既定稳定状态后, 恢复到初始状态的能力 |
| 生态韧性 | 系统恢复至一定范围的稳定状态 | 生态学 | 非线性多平衡状态 | 韧性是系统改变自身结构之前所能够吸收的扰动的量级 |
| 演进韧性 | 系统达到新的平衡状态 | 系统论 | 网络性多平衡状态 | 韧性是和持续的调整能力紧密相关的一种动态的系统属性 |

资料来源: 文献[7, 10-11]。

韧性通过工程韧性(Engineering Resilience)、生态韧性(Ecological Resilience)、演进韧性(Evolutionary Resilience)的发展演变后, 已从简单追求单一线性稳定状态转变为强调持续适应的网络性多平衡状态(见表2)。

对城市防疫规划重视不够, 会使城市向快速蔓延的封闭程度较高的“单位制”空间结构发展, 增加居民出行距离及疫情传播风险^[12]。从20世纪90年代开始, 韧性城市(Resilient Cities)作为防灾及降低城市风险的新思路被许多学者研究。文献[13]定义韧性城市为“在环境变化后, 城市能够恢复并拥有与环境变化之前相同的功能与结构”。国际韧性联盟(Resilience Alliance)将其定义为“城市系统能够消化及吸收干扰的能力”^[14]。而交通作为连接城市模块化用地的重点规划内容之一, 韧性城市交通的研究随之兴起。文献[15]认为韧性城市交通应富有弹性, 具备较强的抗冲击能力, 并要满足多样化、模块化、高通量、需求侧管理及智慧化五准则。文献[16]根据中国交通特点提出韧性交通要在干扰事件发生的前、中、后期能够灵活动员或调配资源以迅速应变并复原, 且需具备刚性、弹性、自组织性、整体协调性四种特性。在国外, 文献[17]提出韧性交通是指在外界干扰下, 交通系统恢复到原状态的速度及所需援助等, 但该研究忽略了对交通干扰因素的分析。

2.2 面向防疫的韧性城市交通系统特征分析

根据韧性交通的概念及疫情下城市交通系统的动态性和复杂性, 城市交通系统必须具备韧性是提升其防疫性能及城市免疫力的关键。面向防疫的韧性城市交通系统需具备如图2所示的特征。

1) 动态性。城市交通系统通过在平时和疫情不同阶段迅速切换应对策略, 有效避免疫情对城市经济及居民生活造成较大冲击。其并非一蹴而就的静态系统, 而是可依据疫情发展、城市风险等级及居民出行需求等多因素变化及时调整应对策略、多状态的持续优化系统。

2) 易达性。以人为本, 通过缩短居民出行(通勤出行、休闲出行等)距离, 实现日常出行的便捷性及步行友好性。在平时提升居民生活质量, 疫情下保障居民的基本出行需求。

3) 多样性。城市交通系统需具备多种功能相似的设施, 一种设施崩溃, 另一种设

施会及时补充，从而避免整个系统失灵，尽可能满足居民在突发事件下的刚性出行需求。

4) 智慧性。通过人工智能、大数据技术等智慧手段实现疫情数据化和精细化管理，通过交通系统管控与城市大数据对接，达到智慧城市交通管控的目标。

5) 资源性。交通需求及供给随着疫情的发展而变化，通过对不同情形下的交通供给进行动态调整，在其适用期间进行弹性扩充可提升城市交通的韧性。

3 以提升韧性为核心的城市防疫交通系统规划与管控

3.1 平时阶段

城市交通系统应加强 15 min 生活圈和交通系统多样性的建设，应注重出行易达性和系统多样性，构建以人为本、可在任何时期满足居民基本生活需求的多状态韧性系统，避免向单一、脆弱、粗放的方向发展。

3.1.1 15 min 生活圈提升易达性

过去对城市防疫规划思考较为欠缺，使得城市规模持续扩大、空间形态过于密集，延长了居民出行距离，出行易达性大打折扣，在疫情下由于隔离等措施，居民基本物资采购等刚性出行难度将进一步增大。

韧性系统应是分散而非集中的，应由小的、半自治单元、标准化作业构成^[18]。15 min 生活圈，即在居民 15 min 步行可达的范围内，配备生活所需的服务功能和公共场所空间(见图 3)，其不仅为居民提供丰富、便捷可达的社区服务和更多的就近就业机会^[19]，且将城市离散化，使社区变为城市最小单元，有效提升居民出行的步行友好性和出行便捷性。从而既可有效减少平时阶段居民的中长距离出行，体现绿色环保特性，又可保证疫情期间居民的基本生活不受影响，同时对疫情传播有一定隔离作用。

3.1.2 交通系统多样性

城市交通系统载运工具多样性可提升其韧性和防疫性能。虽在平时阶段倡导环保高效的公共交通，但对其他交通工具不能忽视或歧视，每种交通工具都有其相应的优势及适用场景。在疫情下，可根据是否直接接触将交通工具分类，并根据出行距离为居民通勤出行推荐相应优先出行方式^[20](见图 4)。因此，在平时阶段应对其他交通工具积极引导，促使其向绿色环保、安全高效的方向发展。此外，在道路规划时要重视对各类交通

工具的友好性，一种交通工具瘫痪其他交通工具可及时顺利上路作为补充。

通过提升城市交通路网的通达性提升城市交通系统的韧性^[15]。如疫情下既可在低客流密度时期利用轨道交通等出行，也可在地铁等停运的情况下利用城市道路出行，在出行距离较近时可利用非机动车道出行。

3.2 疫情潜伏阶段

3.2.1 构建城市疫情风险评价体系

疫情潜伏阶段是防疫关键期，城市交通系统应迅速与公共卫生等机构实现数据资源共享，建立城市疫情风险评价体系，通过绘制实时更新的风险地图供市民及社会服务机构参考，有效引导市民避免高风险出行，减少不必要出行，避免人流聚集，提升城市防

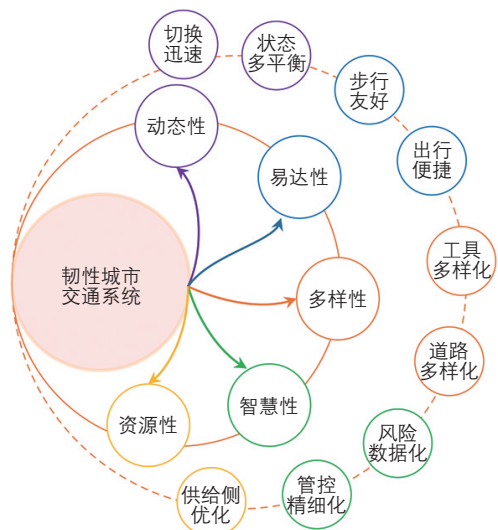


图2 面向防疫的韧性城市交通系统特征

Fig.2 Characteristics of resilient urban transportation systems during epidemic



图3 15 min 生活圈

Fig.3 15 min living circle

资料来源：文献[19]。

疫效力和交通系统韧性。

为了全方位掌握疫情发展状况，城市疫情风险评价体系需涵盖区(县)、社区、人员(包括流动人口)、重点场所(如地铁站等)、交通工具、出行路径等，要重点关注客流密度及人口流动性等指标，建立全面完善的疫情风险评价体系(见图5)，以支持城市交通决策。

在新冠肺炎疫情期间，许多城市通过不同指标对不同实体进行了风险评估，如银川市、金华市、武汉市等通过风险评估分别识别出疫情高风险人群、区域和社区，并将风险可视化以支持实际防疫决策。然而，评估

体系不够完善全面，尚未形成完整体系，无法全面掌握风险空间分布，无法实现以可视化风险为导向的智慧化出行目标。

3.2.2 依据风险等级精细化管理

不同风险等级的实体应实施不同的管控措施，避免一刀切的脆弱化交通管制，实现精细化管理。通过引导居民避免选择高风险交通工具、出行路径前往高风险区域等，变被动防疫为主动预防。同时对高风险区域客流及时疏散，以免人群聚集造成交叉感染，对于中低风险区域实行动态监管，避免转为高风险区域。

3.3 疫情暴发阶段

市民居家隔离和各地区合理的交通阻断、减少居民不必要出行是防止疫情进一步扩散的重要途径，同时也要动态调整城市交通供给，做好必要出行人员的出行保障工作。

3.3.1 阻断信息化

隔离阻断作为必要措施，可融合社区数据、居民基本数据、GPS轨迹数据等多源数据，引入信用机制促进多系统共同合作，通过必要性审核限制出行频次，通过信息交叉验证确保出行信息真实性和可追溯性，从而提升城市交通韧性。所需城市交通防疫各子系统功能关系如图6所示。

1) 疫情信用系统主要根据社区居民及车辆在疫情期间的出行申报情况与实际出行匹配度的高低，对居民及车辆的信用等级进行评级和更新。

2) 基于被动申报的出行信息获取审核系统主要用于收集和审核居民出行需求。所有准备出行的社区居民都需在信息平台提供健康情况、出行信息(出行目的、交通工具、路径、起讫点)等数据，系统社区端需及时审核，从源头减少不必要出行和高风险出行。

3) 基于主动定位的交通监控系统可对社区高风险人群进行实时监控，并对出行居民进行详细的出行数据采集，然后结合出行信息获取审核系统进行信息对比并实时反馈给疫情信用系统，确保真实性。

4) 感染者出行轨迹追溯系统可通过交通监控系统提供的数据库建立居民出行数据库，当出现感染者时，通过对其移动轨迹、到访区域及交通工具及时进行回溯追踪，确定高风险区域和密切接触者，实现可追溯性。

3.3.2 保障动态化

在交通阻断期间，城市公共交通系统大

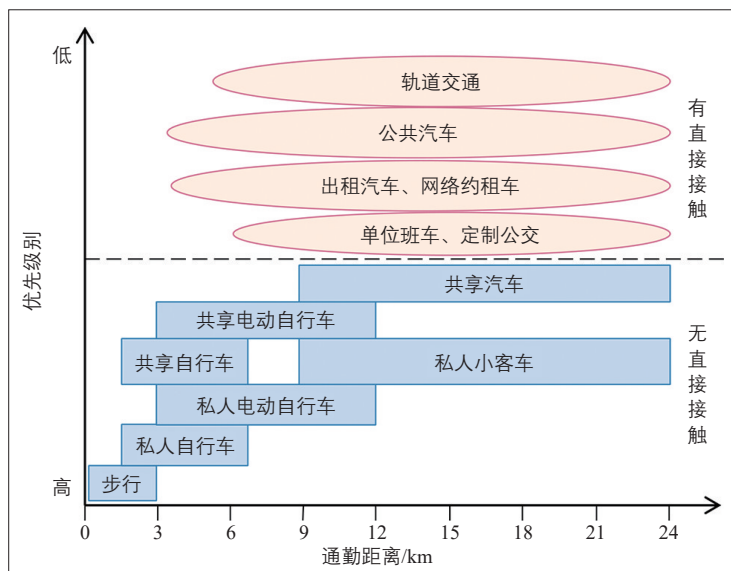


图4 疫情下通勤出行方式的优先级别

Fig.4 Priority of commuting modes during epidemic

资料来源：文献[20]。

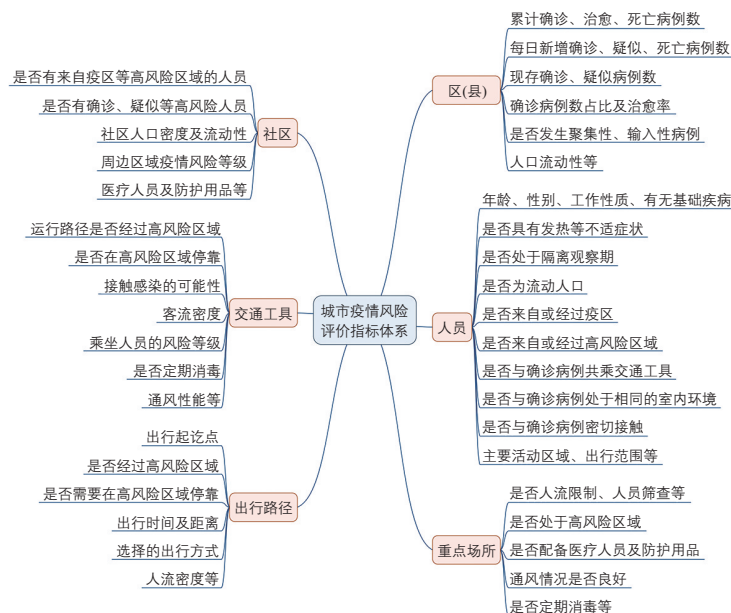


图5 城市疫情风险评价指标体系

Fig.5 Indicators of urban epidemic outbreak assessment

多处于停摆状态(见图7)。通过在线问卷调查,在全国范围内收集了2 268份有效问卷,统计新冠肺炎疫情暴发阶段(调查时间2020年2月5—10日)居民出行方式选择。更多的受访者表示私人小汽车和步行为其主要出行方式^[21]。平时依靠公共交通出行的居民出行风险及难度较大,无车医护人员和患者就医等出行更是难以满足。

通过动态调整城市交通供给可缓解上述问题。疫情暴发阶段居民整体出行频率变低,城市道路状况变好,可通过适当放宽小汽车限行、适当减免城市停车费用等措施扩大小汽车等出行的供给,从而保障居民基本需求。到后疫情阶段随着公共交通系统恢复,再逐步收紧限制转至公共交通主导阶段,从而实现疫情下缺失的交通供给进行有效补充,维持城市正常运转和居民正常生活(见图8)。在新冠肺炎疫情暴发期间,河南洛阳就率先推出7座及以下小型客车在市区内不执行尾号限行政策,此后,开封、南阳等地也纷纷执行尾号不限行措施。

疫情暴发阶段要重点保障医护人员正常通勤,及时将患者安全运输到医院等地隔离、治疗。此运输过程交叉感染风险较高,而闲置出租汽车、网络约租车等交通工具良好的封闭性具有适宜的应用场景。可与相关企业协调合作,暂时将车辆提供给医院等部门进行调配,甚至可将其交由政府合理征用,统一调配,提升运行效率,最大限度保障医疗出行。政府机构也可考虑车辆储备机制,虽在常态下不予使用,但在突发事件等非正常状态下或可发挥重要作用。

3.4 后疫情阶段

此阶段防疫管控转为面向流动性的管控,应快速甄别健康人群,保证健康人群的正常复工和流通。为了解后疫情阶段公共交通方式的选择情况,通过在线调查获得1 146份有效问卷,覆盖中国各行政大区及疫情严重程度不同的城市。经过分析得知,在新冠肺炎后疫情阶段(调查时间2020年2月13—19日),公共汽车及地铁等聚集性交通工具在公共交通中占比依然较高^[22](见图9),因此要重视客流聚集和交叉感染的问题。

3.4.1 甄别健康人群

为甄别健康人群,新冠肺炎疫情期间,浙江杭州率先推出健康码,实施“绿码、红码、黄码”三色动态管理。该智慧化产品得到全网一致好评,为返程及复工人员提供了

便利。此后其他省市如江苏、广州等地也相继推出以健康码为核心的产品。由于缺乏统一领导,出现了“百码齐放”的局面,存在健康码异地不承认等现象,降低了用户的使用体验。因此,未来应在政府的引导下,通过城市间的数据资源共享打破数据壁垒,将城市—都市圈—城市群三级结构联动起来,实现联防联控,保障健康居民复工及出行的便利性。

3.4.2 减少不必要出行

为减少不必要出行,可利用出行信息申

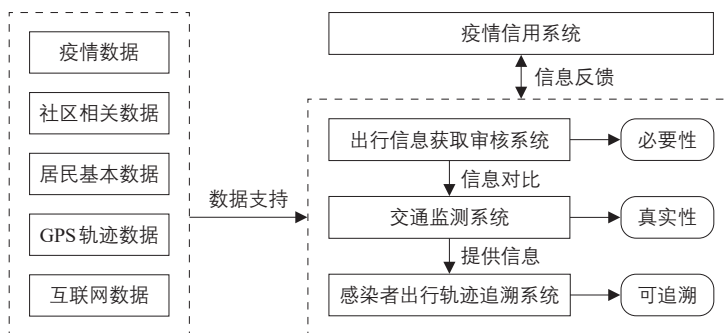


图6 疫情暴发阶段城市交通防疫各子系统功能关系

Fig.6 Functional relationship of different transportation subsystems during epidemic outbreak

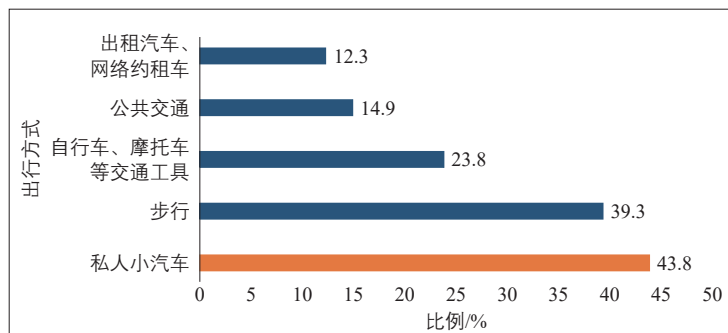


图7 新冠肺炎疫情暴发阶段出行方式选择

Fig.7 Travel mode choice during COVID-19 outbreak

资料来源:文献[21]。

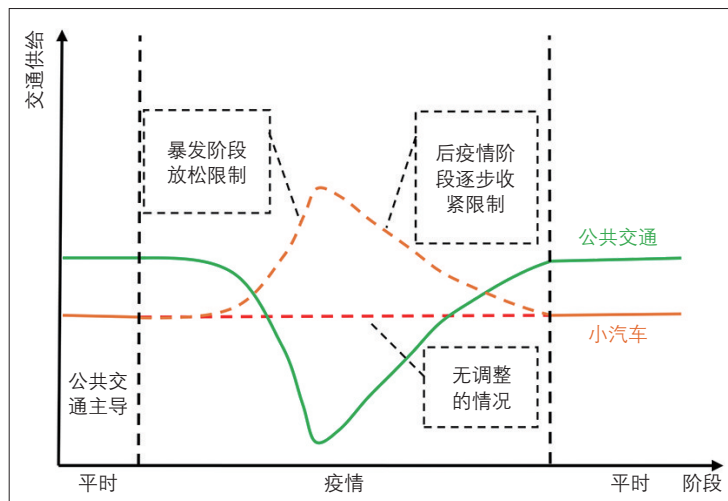


图8 疫情下的交通供给侧动态调整

Fig.8 Dynamic adjustment of transportation supply during epidemic

报系统，通过企业申请一个人健康信息确认一政府部门审核的流程，审核通过保障企业的刚性出行需求，对其他企业可采取延缓复工时间的措施。如苏州、上海等地在新冠肺炎疫情期间，相继实施除涉及保障公共事业运行必需、疫情防控必需、群众生活必需等相关企业的健康员工允许复工，其他企业均延迟复工的措施。

3.4.3 减小交叉感染风险

公共汽车作为此阶段的重要出行方式可推广实名制预约定制机制，即居民提前预约，通过扫描健康通行码上车就座，该措施不仅有利于控制客流，且有利于城市交通系统优化，有效降低交叉感染风险。如新冠肺炎疫情期间，北京基于定制公交理念，提供线上预约、隔位而坐的定制公交通勤服务，有效控制了满载率，提升了出行安全性。

地铁部门要积极与铁路等部门进行数据

对接，提升与其他交通工具的衔接程度，实时检测各个车站的客流密度和各车站运行列车的满载率，动态调整列车运行计划，均衡客流密度。而私密性更好的出租汽车和网络约租车等可继续保障医护人员的出行，必要时可继续将部分车辆交由政府统一调配，同时为避免交叉感染可前后排隔离。综上，后疫情阶段居民通勤出行的流程如图10所示。

3.5 恢复提升阶段

此阶段疫情基本结束，城市各类出行将全面恢复，但仍需继续保持警惕，防止疫情反弹。通过提升乘客出行的安全性和公共交通系统的吸引力尽快恢复以公共交通为主导的城市交通模式，并以低密度客流和少接触为目标，提升城市交通系统的防疫水平。

为提升公共交通系统的安全性和吸引力，且避免高密度客流，可通过增加城市预约出行比例来实现。出行即服务(Mobility as a Service, MaaS)系统全面整合了公共交通、自行车等多种交通方式，用户可根据需求购买合适的出行服务，实现门到门出行，从而增加公共交通的便利性和便捷性^[23]。在疫情期间，MaaS系统的推荐子系统可引导用户根据其出行距离、目的等在交通拥堵或人流聚集的情况下选择延迟出行或更换其他交通方式，从而提升城市交通的运行效率和用户在疫情下出行的安全感。

此外，依据经验数据，城市居民通勤、通学出行约为出行总量的50%以上，如果未来充分利用中国互联网高渗透率的优势，使工作性质允许的居民在家办公，不仅可在源头上缓解城市交通压力，也可有效减小疫情下交通场所交叉感染的风险，提升城市交通系统的韧性。

4 结语

本文基于韧性理论，对在重大突发公共卫生事件不同阶段下的疫情特征及城市交通系统的差异性进行分析，提出韧性城市防疫交通系统要根据疫情发展状态变化快速实现应对策略的切换。平时阶段应加强15 min生活圈和交通系统多样性的建设；在疫情潜伏阶段应融合多源数据构建城市疫情风险评价体系，实现风险数据化，并依据风险等级实施精细化管理；在疫情暴发阶段通过引入出行信息申报和监控系统，结合信用机制确保

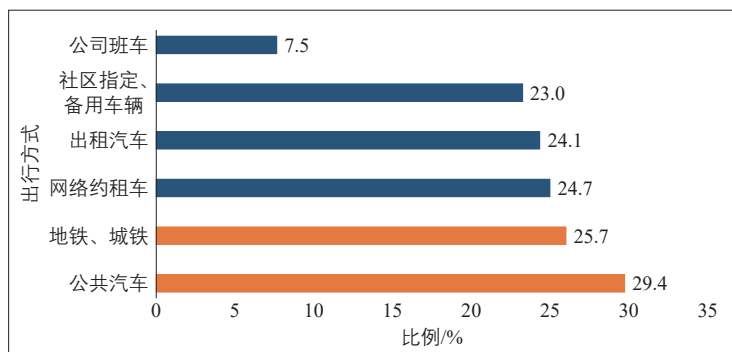


图9 后疫情阶段公共交通方式选择

Fig.9 Public travel mode choice in the post-epidemic stage

资料来源：文献[22]。

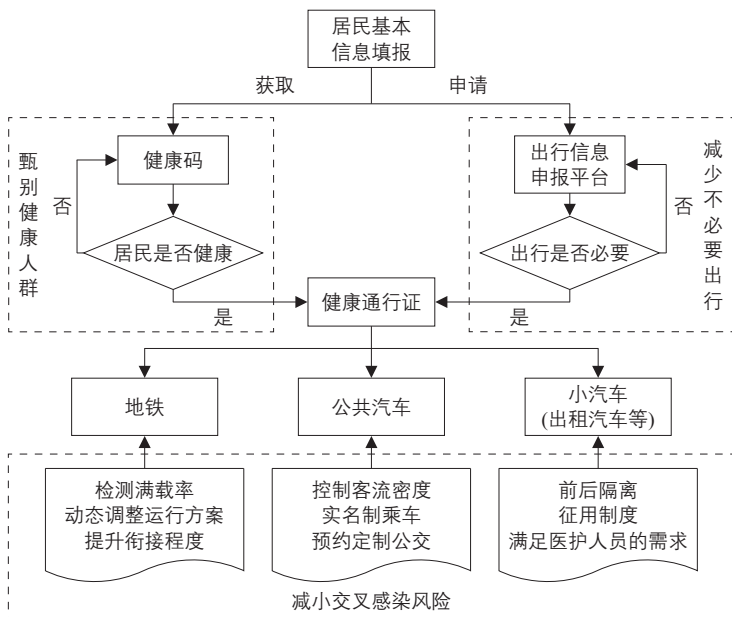


图10 后疫情阶段居民通勤出行流程

Fig.10 Residents' commuting travel post the epidemic

出行信息的必要性、真实性及可追溯性，并通过供给侧的动态化调整保障刚性出行；在后疫情阶段应通过智慧化手段快速甄别健康人群，并通过减少不必要出行及控制客流密度达到减小交叉感染风险的目的；最后，在恢复提升阶段通过预约出行等具有潜力的智慧化手段从源头对城市交通系统进行恢复改善，防止疫情发生反弹。如此每次循环都是城市交通系统的一次螺旋式优化升级，实现城市交通系统韧性的进一步提升。

本文针对面向防疫的城市交通系统韧性特征进行了初步探索，可作为城市防疫交通规划及管控的理论支撑，但未对提升策略进行定量研究，未来可继续完善。

参考文献：

References:

- [1] Mavroidi N. Transmission of Zoonoses Through Immigration and Tourism[J]. *Veterinaria Italiana*, 2008, 44(4): 651-656.
- [2] World Health Organization. Health Emergencies Represent Some of the Greatest Risks to the Global Economy and Security[EB/OL]. 2017[2020-03-04]. <https://www.who.int/dg/speeches/2017/g20-summit/en/>.
- [3] World Health Organization. Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Situation Report - 43 [EB/OL]. 2020[2020-03-04]. https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200303-sitrep-43-covid-19.pdf?sfvrsn=2c21c09c_2.
- [4] 贾淑娟. 新发呼吸道传染病特点及防护[J]. *齐鲁护理杂志*, 2010, 16(22): 53-55.
- [5] Shulgin B, Stone L, Agur Z, et al. Pulse Vaccination Strategy in the SIR Epidemic Model[J]. *Bulletin of Mathematical Biology*, 1998, 60(6): 1123-1148.
- [6] Cai Y, Kang Y, Banerjee M, et al. A Stochastic SIRS Epidemic Model with Infectious Force Under Intervention Strategies[J]. *Journal of Differential Equations*, 2015, 259(12): 7463-7502.
- [7] 邵亦文, 徐江. 城市韧性: 基于国际文献综述的概念解析[J]. *国际城市规划*, 2015, 30(2): 48-54.
Shao Yiwen, Xu Jiang. Understanding the Urban Resilience: A Conceptual Analysis Based on Integrated International Literature Review [J]. *Urban Planning International*, 2015, 30(2): 48-54.
- [8] Holling C S. Resilience and Stability of Ecological Systems[J]. *Annual Review of Ecology & Systematics*, 1973, 4(1): 1-23.
- [9] UNISDR. 2009 UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction[J]. *Abyadh*, 2009, 8(2): 95-105.
- [10] Folke C. Resilience: The Emergence of a Perspective for Social-Ecological Systems Analyses[J]. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 253-267.
- [11] 戴伟, 孙一民, 韩·迈尔, 等. 气候变化下的三角洲城市韧性规划研究[J]. *城市规划*, 2017, 41(12): 26-34.
Dai Wei, Sun Yimin, Han Maier. Resilience Planning and Design Research in the Delta City Under Climate Change[J]. *Urban Planning*, 2017, 41(12): 26-34.
- [12] Smith B J, Tang K C, Nutbeam D. WHO Health Promotion Glossary: New Terms[J]. *Health Promotion International*, 2006, 21(4): 340-345.
- [13] Alberti M. Urban Form and Ecosystem Dynamics: Empirical Evidence and Practical Implications[J]. *Achieving Sustainable Urban Form*, 2000, 4(2): 84-96.
- [14] Resilience Alliance. Urban Resilience Research Prospectus[EB/OL]. 2007[2020-03-04]. http://www.resalliance.org/index.php/urban_resilience.
- [15] 仇保兴. 构建韧性城市交通五准则[J]. *城市发展研究*, 2017, 24(11): 1-8+149.
Qiu Baoxing. Five Guidelines to Build Transport of Tough Urban[J]. *Urban Development Studies*, 2017, 24(11): 1-8+149.
- [16] 黄骞, 上官甦, 史洪芳, 等. 空间信息技术在韧性交通中的应用思考[J]. *公路*, 2018, 63(5): 222-227.
- [17] Murray-Tuite P M. A Comparison of Transportation Network Resilience Under Simulated System Optimum and User Equilibrium Conditions[C]//IEEE. *Proceedings of the 38th Conference on Winter Simulation*. USA: IEEE, 2006: 1398-1405.
- [18] 戴维·R·戈德沙尔克, 许婵. 城市减灾: 创建韧性城市[J]. *国际城市规划*, 2015, 30(2): 22-29.
David R Godschalk, Xu Chan. Urban Hazard Mitigation: Creating Resilient Cities[J]. *Urban Planning International*, 2015, 30(2): 22-29.

(下转第10页)