

韧性城市视角下震后城市结构异化与人口短时再分布

缪惠全^{1,2}

(1. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 北京工业大学 城建学部, 北京 100124)

摘要: 在对典型灾害考察的基础之上, 基于韧性城市视角, 揭示了震后城市结构异化这一现象。基于城市恢复的基本过程, 提出了城市系统社会影响因子这一关键指标, 进行了地震工程科学与社会科学的交叉耦合研究, 从而进一步修正了城市系统韧性度量的评价方式。最后, 以 Agent 模型为基础, 量化研究了对于决定城市系统社会影响因子这一指标的人口再分布问题, 通过定量的方式研究了防灾教育、地震烈度和震后人群信息沟通效率对人口短时再分布的影响。

关键词: 韧性城市; 地震; 城市结构; 人口分布; Agent 模型
中图分类号: TU3; TU98 **文献标志码:** A

Alienation of Urban Structure and Short-term Population Redistribution After Earthquakes from Perspective of Resilient Cities

MIAO Huiquan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, China Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Based on the investigation of typical earthquake disasters, this paper reveals the phenomenon of post-earthquake urban structure alienation from the perspective of resilient cities. Based on the basic process of urban restoration, a key indicator named the social impact factor of urban systems is proposed, which couples engineering science with social science and further revises the function evaluation for the urban system resilience. Finally, based on the Agent model, this paper quantitatively studies the population redistribution for determining the social impact factor of urban systems, and quantitatively studies the influence of disaster prevention education, earthquake intensity, and post-earthquake crowd information communication efficiency

on the short-term population redistribution.

Key words: resilient city; earthquake; urban structure; population distribution; Agent Model

随着城市规模的迅速扩大和城市功能的日益复杂, 尤其是以新一代信息通信技术为载体的智慧城市的建设, 事实上对城市的防灾减灾能力提出了更高要求^[1]。既有灾害所展现出来的城市基础设施高度耦合的物理事实^[2]与灾后城市恢复多维度多学科的复杂性^[3-6], 使得“韧性城市”这一研究应运而生。当前, 对韧性城市这一概念的界定已经基本成熟^[7], 本文将韧性城市简要地定义为“在面临灾害或冲击时能够凭借自身能力维持城市基本功能, 并能快速恢复其正常功能的有机体”。针对地震灾害, 不同研究者还提出了城市抗震韧性的概念。例如文献^[8]将之定义为“使社会单位(如组织、社区)减轻灾害、容纳灾害发生时的影响, 并使社会破坏最小化和减轻未来地震的影响的方式开展恢复活动的的能力”。文献^[9]则定义为“城市系统在受到地震时维持或迅速恢复其功能的能力。即一个城市在遭遇地震影响时, 只要其控制参数不超过一定的阈值, 则依赖城市本身的功能即可使城市的系统特性及其运行模式保持或快速恢复到地震前的状态。”不难发现, 韧性城市这一概念的核心, 在时间维度上, 强调了“恢复”一词, 而在空间维度上, 则强调了“功能”一词。前者使得韧性城市的研究具有了时间阶段性的特征, 而后者则使得韧性城市的研究具有了多学科交叉性的特征。

尽管不同研究者在这两个维度上做了大量的工作, 然而有两个突出的矛盾仍然令人瞩目。首先是时间维度上, 人们往往以日常运行功能标准作为衡量灾后城市系统是否恢复“正常”的标准进行量化分析, 显然, 在小震或者灾害较小的情况下, 这一以“日

收稿日期: 2020-09-24

基金项目: 北京市自然科学基金(8222008); 国家自然科学基金(52108427); 中国博士后科学基金(2021M690278)

第一作者: 缪惠全(1988—), 男, 助理研究员, 工学博士后, 主要研究方向为韧性城市。E-mail: miaohq@126.com.



常标准”为“标准”的分析是合理的,但是大灾、特别是巨灾后的城市结构往往会巨大变化,出现城市部分甚至整体搬迁的情况,显然,此时原有的“日常标准”作为城市不同系统不同位置是否“正常”的衡量标准,已经失效了。其次在服务维度上,人们往往以城市系统可提供正常服务的节点比例或者人口比例作为系统功能量化的指标,未能深层次地考虑“功能”本质上是对“人”这一特殊群体提供服务的描述,因此,对于震后必然重点关注的“第一条通电的线路、第一条通车的道路、第一个复工的企业”等具有重要社会意义的城市系统的功能恢复对城市韧性的影响,难以进行量化的分析。

基于上述思考,本论文从韧性城市的视角出发,基于过去实际震害的案例,提出了震后城市结构异化的问题,并对影响城市结构异化本质的人口短时再分布问题,利用Agent建模技术分析了震级、防灾教育、信息沟通效率对人口应急避难问题的影响。

1 震后城市结构的异化与恢复过程

1.1 城市的定义与震后城市结构的异化

由于城市防灾减灾所研究的基本对象是城市,因此,对于城市这一研究主体准确的理解和定义就显得尤为重要。由于传统学科群的划分方法,各学科往往以自己所关注的核心来定义城市^[10],生态学关注人与环境之间的关系,社会学则集中于人类群体的社会行为^[11],规划学则聚焦于土地开发利用,地震工程则重点关注各建构构筑物的地震反应。然而,典型地震灾害灾后救援的实际过程和社会调查可以发现,人们首先关注的是“人”这一特殊对象,包含肉体的伤亡、心理和精神的创伤等^[12],这反映了城市本质上是因人而存在发展、为人服务的本质特征。因此,对生命线工程等本身就属于城市尺度的各类特殊建构构筑物,其抗震研究不能忽视对人这一本质服务对象的研究。基于这种考虑,本文将震后城市结构的异化定义为震后城市以人口再分布为本质特征,以城市建构构筑物为破坏为基本表现,以管理、资源、环境、文化等多种要素的突变为现象的城市结构的突发性变化。

1.2 震后城市恢复过程与韧性度量

传统上,人们往往将城市承灾的基本过程分为如图1所示的灾前、灾中和灾后3个过程^[13],对各类建筑结构的震后反应分析或可靠度评估,本质上聚焦于“灾中”这一过程,即图中 t_0-t_1 之间。然而在韧

性城市的视角下,人们对灾后城市的恢复过程给予了更多的关注。考察唐山地震、汶川地震等代表性地震灾后城市恢复的基本过程,将其分为4个阶段。

(1)救援(Rescue)阶段

主要任务是对人员的救援,以最大限度地抢救居民生命为基本特征,通常的持续时间在24—72h(t_1-t_2);

(2)避难(Refuge)阶段

主要任务是为居民提供基本生存需求,对关键基础设施进行维修并制定恢复规划,时间一般在7d—3个月左右(t_2-t_3)。

(3)重建(Rebuild)阶段

城市从复工复学向正常生活发展,主要任务是永久性住房和相关性基础设施的建设,时间在3个月—1年(t_3-t_4);

(4)复兴(Revival)阶段

主要是优化产业发展,以经济建设为中心并涵盖文化、环境、管理等各方面的优化,时间大约是1—10年(t_4-t_5)。上述过程可以概括为城市灾后恢复的4R恢复过程,详可参阅文献^[14]。

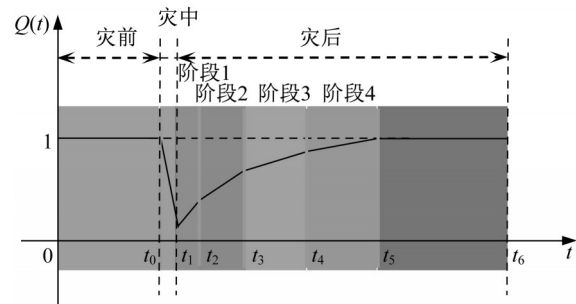


图1 城市系统功能指标

Fig. 1 Urban system function index

既往城市韧性研究中,如果单纯的基于工程学的视角,通常以指标 Q 作为系统功能度量的标准,指标 Q 可能是正常功能的节点比例^[15],则

$$Q = \frac{N_{\text{normal}}}{N_{\text{total}}} \times 100\% \quad (1)$$

或者以系统恢复正常的节点可服务的人员占比衡量^[16],则

$$Q = \frac{P_{\text{normal}}}{P_{\text{total}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: N_{normal} 和 N_{total} 分别为系统功能正常的节点和总节点的数量; P_{normal} 和 P_{total} 分别为可获得系统正常服务的人口和总人口的数量。

然后,将该系统的韧性定义为^[17]

$$R = \int_{t_0}^{t_5} Q dt \quad (3)$$

或

$$R = \int_{t_0}^{t_s} (1 - Q) dt \quad (4)$$

然而考察灾后救援的实际过程可以发现,人们往往对“第一条通电的线路、第一条通车的道路、第一个复工的企业”等各类“第一”恢复的部分给予重点的关注,如按式(3)或(4)的定义,此处以供水管网为例,在阶段1恢复10%的人口供水和在阶段4恢复10%的人口供水对城市韧性的贡献,无论是按照定义(3)还是定义(4),均不能表现出越早恢复所展现出的重大意义。阶段1显然比阶段4更加紧急,此时能够恢复10%的人口供水,理应具有更重要的社会意义,对城市韧性的贡献,感性的分析理应更高。

考察这一矛盾背后不难发现,虽然在工程事实上均是恢复了10%的人口的供水,但是其社会意义是不同的,由于对工程系统的量化分析,忽视了工程系统在灾后所凸显的社会意义,仅以日常情况下的“日常标准”作为系统灾后是否“正常”的标准,在灾后这一特殊情景下失效了。因此,以供水管网为代表的工程系统,其真正的功能指标 Q_s 应在工程功能指标的基础上加以修正,即

$$Q_s = Q\theta_s \quad (5)$$

式中: Q_s 是城市系统考虑社会影响的功能指标; θ_s 是描述城市系统社会影响的量化参数,本文称之为城市系统社会影响因子。显然, θ_s 是一个连接工程科学与社会科学之间的一个“桥梁”参数。考虑到城市灾后本质上是人群再分布为本质的城市结构异化过程,人群的分布实质上表征了灾后人群需求突变的物理事实。

当考虑系统的社会影响以后,系统的韧性指标可以定义为

$$R_s = \int_{t_0}^{t_s} Q_s dt \quad (6)$$

或者

$$R_s = \int_{t_0}^{t_s} (1 - Q_s) dt \quad (7)$$

式中: R_s 为考虑系统社会影响以后的韧性指标。修正后 R_s 的数值与系统原先韧性指标值 R 之间的差异,还有待于进一步的研究。这一指标的得出,不仅依赖于对城市系统社会影响因子的构建和量化,更依赖于对某一系统的功能考察和评估。但是考虑系统的社会影响之后,工程系统的韧性指标不仅在逻辑上更具自洽性,而且能够兼顾工程系统的社会影响,从而实现跨学科的量化分析。即便二者在数值上差异不大,如此考虑也有重要的意义,一是修正后

的指标 R_s 不仅考察了系统的技术维度,而且考察了系统的社会维度,而这也是一些研究者所进行的努力,如文献[18],但国外研究者通常是将社会统计的静态指标纳入体系中,因而无法反应灾后系统的动态变化特征。二是正如文献[15]所指出的,即便是较小的指标差异对整个系统经济性的影响可能也是巨大的。文献[15]以美国电网为例,每年0.03%的失效概率的经济成本高达1500亿美元。

参数 θ_s 定义为

$$\theta_s = 1 + \frac{P_{\text{leave}}}{P_{\text{move}}} \quad (8)$$

式中: P_{leave} 为离开其日常活动场所的人员数; P_{move} 则为可移动人员数,如果不考虑日常残疾、婴幼儿或者丧失移动能力的老年人等,可以认为 P_{move} 等于 P_{total} 。显然,日常情况所有人都各司其位, P_{leave} 为0,则 θ_s 为1;而灾难发生以后,人们不得不离开其正常活动的位置, P_{leave} 此时将大于0并小于 P_{move} , θ_s 成为一个随时间变化的参数。随着城市的恢复,人们又逐渐回到其日常所在的位置, θ_s 则逐渐变为1。为了量化 θ_s ,本文以Agent模型为基础,分析了震后短时间内人口向安全避难场所区域移动的过程中参数 θ_s 变化情况。

2 城市人口短时再分布

2.1 Agent模型的建立

Agent模型通常翻译为智能体模型或者代理人模型,常用于对自然界不同系统间或者同一系统内不同部分之间相互作用的影响分析。本文假设震后的城市区域即Patches(Patch意为瓦片,是该类算法特有称谓)分为4类,分别是破坏区域、安全区域、道路区域、自然区域,分别以指定的Color变量来表示。应该认识到,整个城市的构成是复杂的,出于建模的简洁性,本文将一个城市的区域初步划分为上述4类,且模型中4类区域相互之间没有重叠。破坏区域、安全区域分别代表地震破坏区域、避难场所,自然区域、道路区域则代表城市内从破坏区域到安全区域的可达场地。用Turtle来模拟灾后人员,并根据生命状态、健康状态、信息状态三类属性对Turtle模型进行分类,三类状态变量分别为 X_l 、 X_h 、 X_i ,取值均为0或者1的二元变量,变量的取值和含义如表1所示。

假设灾后所有人员均需从破坏区域撤退到安全区域,其基本决策过程如下:

(1)首先判断人员状态,如果人员已经死亡或者虽

表 1 Agent 世界中两类元素的设定
Tab. 1 Setting of two types of elements in the agent world

序号	类别	代表	特征
1	Patch 1	破坏区域	Color=red
2	Patch 2	安全区域	Color=green
3	Patch 3	道路区域	Color=red+5
4	Patch 4	自然区域	Color=green+5
5	Turtle 1	死亡人员或者重伤无法移动	$X_L=0$ 或者 $X_L=1, X_H=0$
6	Turtle 2	存活,移动,但不知道安全区域信息	$X_L=1, X_H=1, X_I=0$
7	Turtle 3	存活,移动,且知道安全区域信息	$X_L=1, X_H=1, X_I=1$

然存活但失去移动能力,则该人员无法移动,如果人员存活且身体健康,则可以进行移动,从而进入下一步;

(2)判断人员是否知晓安全区域信息,如果该人员已经知道,则该人员以其最近的安全区域方向进行移动,移动的速度设定为 X_v , 否则执行下一步;

(3)如果人员不知道安全区域信息,则首先判断其视域范围内是否有避难场所,假设视域变量为 X_R , 如果有安全场所,则该人员也可直接向该安全场所移动,如果该视域范围内没有避难场所,则需要判断是否有携带安全信息的移动人员,如果有,则借鉴 SIR 传播模型进行分析。SIR 模型是经典的系统动力学模型^[19], 早期来源于传染病学领域,其中 S 代表易感者(Susceptible persons), I 代表感染者(Infected persons), R 代表康复者(Recovered persons)。此处以 SIR 模型模拟人员在移动过程中的信息交换,传染病是人员在接触过程中实现病毒或者细菌的传播,这与人员在移动过程中进行信息交换的过程,具有相似性。

该模型一般表达为

$$\frac{ds(t)}{dt} = -\beta i(t)s(t) \quad (9)$$

$$\frac{di(t)}{dt} = -\beta i(t)s(t) - \gamma i(t) \quad (10)$$

$$\frac{dr(t)}{dt} = \gamma i(t) \quad (11)$$

式中: $s(t)$ 为 t 时刻所有的易感染者数; $i(t)$ 为 t 时刻所有已感染的人数; $r(t)$ 为 t 时刻已经康复的人数; β 和 γ 分别是感染率和康复率。本文将已经知道避难场所信息的人比喻为感染者,而未知道避难场所信息的人比喻为易感者,感染率 β 是在移动过程中人员视域内的信息传播概率(即知道避难场所信息的人将避难场所的信息传达给不知道避难场所的人的沟通效率),当人员移动到安全场所后,成为“康复者”,本文中 β 称为信息沟通效率。如果视域内既无安全场所,也无携带信息的避难人员,则该人员执行随机移动策略,移动方向为 360° 随机移动,速度为 X_v 。

上述决策过程可以概述为图 2, 统计随着时间的变

化达到避难场所的人数,从而计算得到人口再分布以后城市系统社会影响因子 θ_s 。系统层次的分析模型的验证,历来都非常困难,通常采用一些定性的判断或者较为宏观的指标进行大概的判别,特别是灾后城市系统的状况,更是缺乏可量化的监测数据。然而,Agent 模型的广泛实用性,侧面表明了这一方法的有效性;与此同时,本文重在提出对城市工程系统社会影响因子的分析框架,其量化分析具有很好的灵活性,例如城市的真实场景、人员的伤亡状态、移动过程的通信和决策过程等,均可以灵活地替换为基于物理分析的地震灾害场景或者其他的社会学量化分析模型,甚至灾后真实的动态通信监测数据,从而保证了本文方法的实用性。

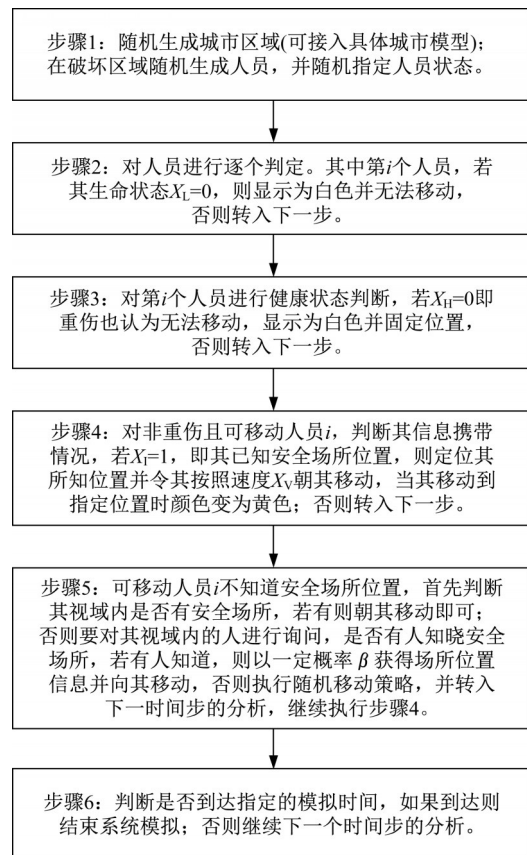


图 2 人员移动决策过程

Fig. 2 Decision-making process of personnel movement

3 算例

3.1 模型设定

为了说明本文方法的可行性,以Netlogo软件为基础,建立了基于Agent模型的城市灾后人口短时移动分析模型,如图3所示。此处人员移动速度为 $1.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[20],考虑灾后城市交通状况、人群心理状态变化等因素,上述速度还需要乘以一个折减系数 η_v ;人员交流的视域范围取值为50m;模拟时间为180min,即3h;模拟范围为 30×30 patches,因此,若按分钟进行模拟,当设定人员速度为 $0.72(1.2\times 60=72\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 时,相当于按照1:100长度比例进行模拟,因此,这一模拟的范围是 $3\text{km}\times 3\text{km}$ 。此外,本次模拟假设安全区域3个、破坏区域100个、道路区域200个,自然区域为总区域减去前三者的数量,为658个。

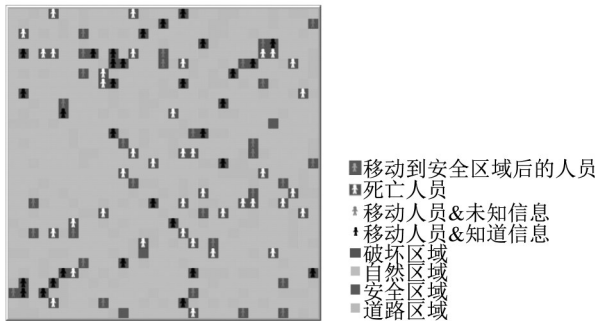


图3 城市震后人群初始状态分布

Fig. 3 Distribution of initial state of population after urban earthquake

对于人口信息,为了加快计算速度,简单地假设总的人口为80单位,其中可移动人口数为地震烈度的函数,根据文献[21],在地震烈度为6度时,地震造成的伤亡人数非常少,死亡人数大约为个位数或者十位数,因此,此处模型假设人员均可移动。地震烈度为10度的震害记录比较少,通常为震中区域的地震烈度,在高烈度下人口的伤亡情况不仅与烈度有关,更与当地人口密度、抗震设防烈度、是否有显著的震前预警地震等因素有关,因此采用一个比较保守的考虑,假设地震烈度为10度时仅20%的人员可自由移动,在中间烈度时,可移动人员比例按照线性变化,并以变量 X_q 代表地震烈度。同时,该指标还可以接入其他相关的地震伤亡人口预测模型,从而使模型更加精确。

对于可移动人员中是否了解安全区域的位置,本文假设了解安全区域的人员与反映震前防灾教育水平的变量 X_E 有关,取 X_E 等于知道安全区域位置的

人员数与总可移动人员数之比。从社会调查来看^[28],以知道避难场所人员的比例来反应防灾教育水平的高低是合理的。因此,当 $X_E=1$ 时,认为所有可移动人员均知道安全区域的位置,防灾教育水平较高;而当 $X_E=0$ 时,移动人员均不知道安全区域的位置,则认为防灾教育比较差。

最后一个变量为视域范围内信息有效沟通的变量 β ,该变量的取值范围内为0~1。当 $\beta=0$ 时,表示即使已经知道安全区域信息的人处于未知晓安全区域信息的人的视野范围之内,后者也无法得到所需信息;而 $\beta=1$ 时,则表示一旦在未知晓安全区域信息的人视野范围之内出现已经知道安全区域信息的人时,前者就立刻得到其最近的安全区域的位置信息。

3.3 计算结果与讨论

(1)情景1模拟

设定 $\beta=1, X_q=8, X_E=0.5$,人口的震后初始时刻、中间代表性时刻、最终时刻的分布状态如图4所示。

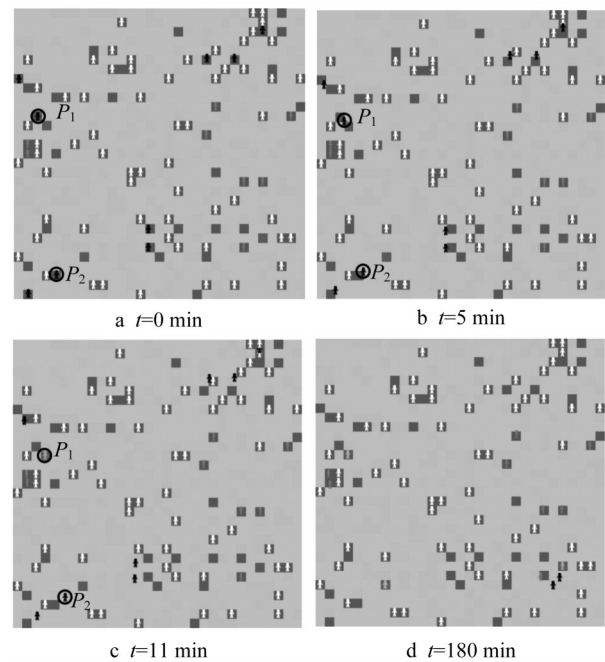


图4 震后城市人口分布变动过程

Fig. 4 Changes in urban population distribution after the earthquake

由图4可以看出,在地震发生后的初始时刻,城市不同部分分布了处于不同状态的人。以可移动且知道安全区域位置信息的人P1和P2为例,其初始位置处于图4a所示位置。灾后人口开始紧急避难,向其所知最近的安全区域移动,人员P1和P2在5min时,处于图4b所示位置,二者均在移动途中;

11min时,人员P1首先移动到安全区域,而此时,人员P2尚在途中。最终全部可移动人口的分布状态如图4d所示,大部分可移动人员已经到达安全区域,尚有部分可移动但因不知晓安全区域位置的人员,仍在结束时刻没能到安全区域。

假定变量 X_1 代表了到达安全区域可移动人员与总体可移动人员之比, X_2 代表了到达安全区域可移动人员与总人员之比,则震后两变量随时间的变化如图5所示。可以看出,在观察时间内,随着时间的增加,到达安全区域的人数在不断增加,但是在106min以后,人员比例基本恒定,此时 X_1 为0.4118, X_2 为0.0875,这表示41.18%可移动人员在观察时间内到达了安全区域,占总人口的8.75%,还有很大一部分,即58.82%的可移动人员,未能及时到达提前所设定的安全区域。

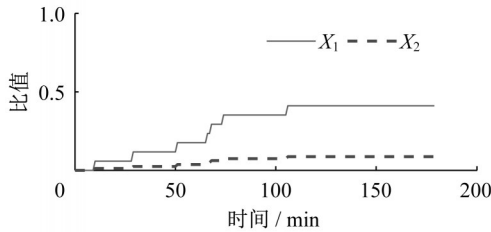


图5 震后城市人口分布比例随时间的变化

Fig. 5 Changes of urban population distribution ratio with time after earthquake

该时间段内,城市系统的社会影响因子 θ_s 就等于 $1+X_1$,其变化曲线如图6所示,其中虚线部位为计算分析时间之外的示意图,还有待于进一步的研究和分析。城市系统社会影响因子的量化是一个仍需探索的过程,本文以式(8)来量化这一因子,其含义为当所有人处于正常位置时(即正常生活状态),该因子为1,即社会系统并未产生异化;而一旦灾害产生,则人们不得不开其正常生活的位置,则该因子在1的基础上继续增加,最大值可达到2,此时暗示所有可移动人员已经完全离开了正常位置。当然,在灾害不严重时,该因子可能并不能达到2。由于本文Agent模型仅模拟分析了前180min的时间,对于后续人群的再分布(如受到政府的统一调控)以及灾后逐渐疏散回归正常生活的过程,尚未能进行有效的模拟分析,因此仅以虚线加以示意。

(2) 防灾教育的影响

设定 $\beta=1, X_0=8$,当变量 $X_E=1$ 时,考虑随机的初始城市区域分布和随机的人员分布,模拟1000次并考察变量 X_1 随时间的变化情况,结果如图7所示。可以看出,由于随机的初试分布,变量 X_1 事实上成为一个随机变量,平均意义上随着时间的变化,可移动人员均逐

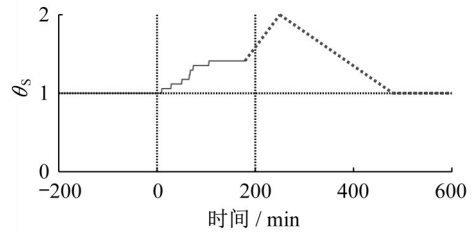


图6 震后城市系统社会影响因子

Fig. 6 Social impact factors of urban system after earthquakes

渐移动到安全区域。

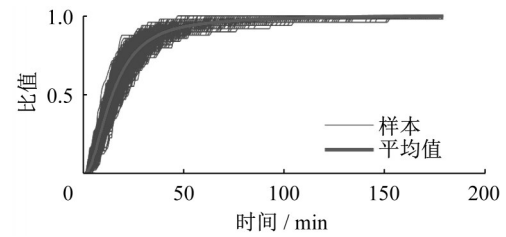


图7 防灾教育指标 $X_E=1$ 时人员移动情况

Fig.7 Population distribution when the parameter $X_E=1$

当 $\beta=0.8, X_E=8$,取 X_E 分别取值为0、0.2、0.4、0.6、0.8和1不同的情况,考察变量 X_1 各自模拟1000次以后所得到的均值对比如图8所示,可以看出:

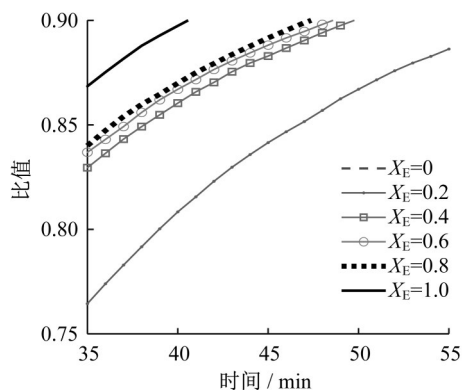
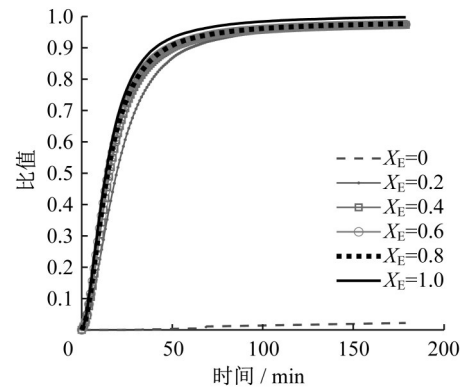


图8 防灾教育对人群移动的影响

Fig. 8 Impact of disaster prevention education on crowd movement

(1)基本上随着 X_E 的增大,人员到达安全区域所需时间越短,以 15min 为例,在 X_E 分别取值 0~1 时候,可移动人员到达安全区域的比例分别为 0%、35.23%、45.49%、47.74%、48.83%、52.26%。

(2)当 $X_E=0$,即假设所有人员均不知道安全区域的位置,仅依靠随机移动的策略在视域内寻找安全区域时,其人员向安全位置迁移的效率将非常低,180min 以后,也仅有 2.41% 的人到达了提前规划的安全区域,这提示了防灾教育的重要性。

(3)地震烈度的影响

为研究地震烈度对灾后人员移动的影响,取参数 $\beta=0.8, X_E=0.8$,当地震烈度分别为 6、7、8、9、10 时,考察人员移动的情况,分别模拟 1000 次并取均值,其计算结果如图 9 所示。随着地震烈度的增加,全体人员到达安全区域所需要的时间增长,移动效率降低。按照地震烈度从小到大的顺序,20min 时, X_I 的值分别为 84.15%、76.64%、64.35%、41.24%、12.71%; 而 180min 时, X_I 的值为 99.74%、99.17%、95.70%、85.17%。

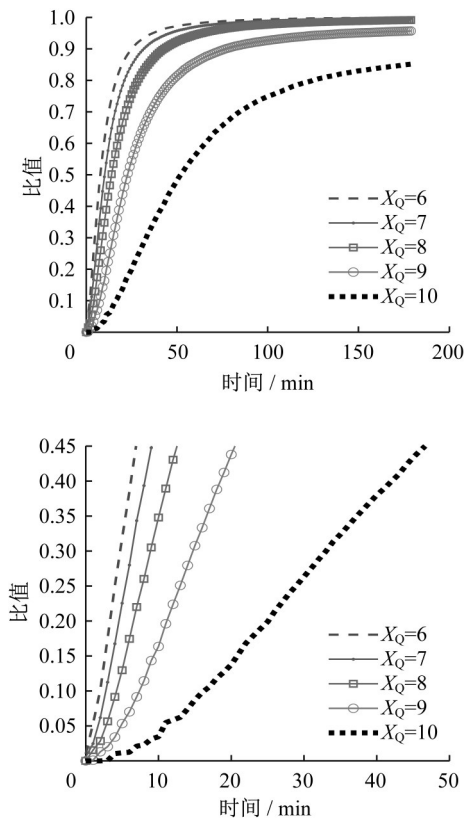


图9 地震烈度对人群移动的影响

Fig. 9 Influence of earthquake intensity on crowd movement

(4)信息沟通效率的影响

为反应信息沟通效率的影响,取 $X_E=0.8, X_Q=$

8,参数 β 的值为 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1,模拟 1000 次并取均值,其计算结果如图 10 所示。可以看出,人群中的信息沟通效率越高,则越有利于灾后人口向安全区域移动。50min 时,随着 β 的增大, X_I 的取值分别为 73.35%、85.89%、88.03%、89.12%、90.08%, 而 180min 时,其取值分别为 81.53%、93.46%、95.39%、96.43%、97.43%、99.08%。

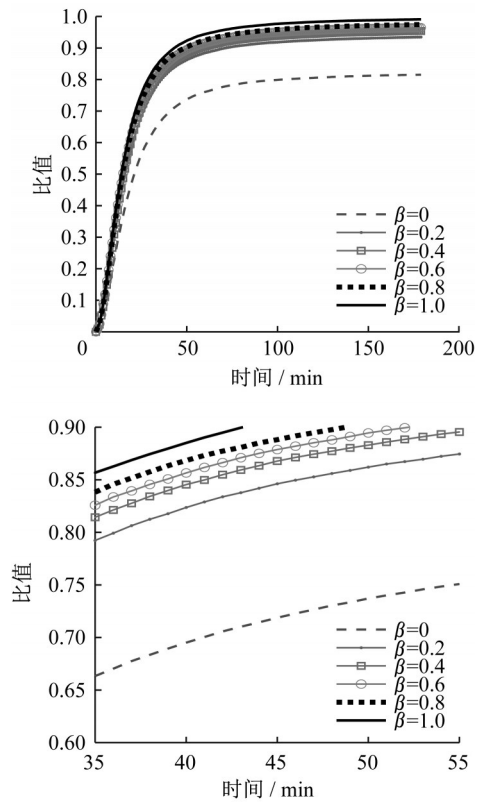


图10 信息沟通效率对人群移动的影响

Fig. 10 Effect of information communication efficiency on crowd movement

4 结论

本文在对典型震害进行调查的基础之上,揭示了震后城市结构异化的问题,提出了连接工程科学与社会科学之间的桥梁参数“城市系统社会影响因子”,并利用 Agent 建模技术分析了决定这一参数的灾后人口短时再分布问题,研究表明:

(1)利用灾后人口的重分布所定义的城市系统社会影响因子,可以有效协调灾后工程系统量化恢复对城市韧性的评价问题,从而打通工程科学与社会科学之间的关系;

(2)城市灾后人口短时再分布的情况,受到防灾教育、地震烈度和信息沟通效率的显著影响,提前做好

防灾教育,对于灾后人口向安全区域的迁移,有重要影响;较小的地震烈度、更好的信息沟通效率,对此也非常有利。

作者贡献声明:

缪惠全:负责论文的构思、编程、撰写、修改等。

参考文献:

- [1] ZHU S, LI D, FENG H. Is smart city resilient? Evidence from China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 50: 1.
- [2] MENDONÇA D, WALLACE W A. Impacts of the 2001 world trade center attack on New York City critical infrastructures[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2006, 12(4): 260.
- [3] LIU W, SONG Z. Review of studies on the resilience of urban critical infrastructure networks [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2020, 193: 1.
- [4] HOU A, BENJAMIN Q, EDWARD A L, 等. Katrina飓风对新奥尔良市供、排水和污水处理系统的影响[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(4): 1.
HOU A, BENJAMIN Q, EDWARD A L, *et al.* Impact of Hurricane Katrina on water supply, drainage and sewage systems in New Orleans [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(4): 1.
- [5] MARSDEN J. Improving infrastructure resilience to extreme events: lessons from Katrina and Sandy[C/CD]//*Proceedings of the International Symposium on Sustainable Systems and Technologies*. Phoenix: [s.n.], 2016.
- [6] COLTEN C E, KATES R W, LASKA S B. Community resilience: Lessons from New Orleans and Hurricane Katrina [R]. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory, 2008.
- [7] MEEROW S, NEWELL J P, STULTS M. Defining urban resilience: A review[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 147: 38.
- [8] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, *et al.* A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities [J]. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4): 733.
- [9] 翟长海, 刘文, 谢礼立. 城市抗震韧性评估研究进展[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(9): 1.
ZHAI Changhai, LIU Wen, XIE Lili. Progress of research on city seismic resilience evaluation[J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(9): 1.
- [10] 吴志强, 李德华. 城市规划原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
WU Zhiqiang, LI Dehua. Principles of urban planning [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2010.
- [11] 张小娟. 智慧城市系统的要素、结构及模型研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
ZHANG Xiaojuan. Research on the elements, structure and model of smart city system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [12] 于山, 苏幼坡, 刘天适, 等. 唐山大地震震后救援和恢复重建[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.
YU Shan, SU Youpo, LIU Tianshi, *et al.* Rescue and rehabilitation of Tangshan Earthquake [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2003.
- [13] 丁石孙. 城市灾害管理[M]. 北京: 群言出版社, 2004.
DING Shisun. Urban disaster management [M]. Beijing: Qunyan Press, 2004.
- [14] 缪惠全, 王乃玉, 汪英俊, 等. 基于灾后恢复过程解析的城市韧性评价体系[J]. *自然灾害学报*, 2021, 30(1): 10.
MIAO Huiquan, WANG Naiyu, WANG Yingjun, *et al.* An urban resilience measurement system based on decomposing post-disaster recovery process[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(1): 10.
- [15] OUYANG M, DUEÑAS-OSORIO L, MIN X. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems[J]. *Structural Safety*, 2012, 36 - 37: 23.
- [16] CIMELLARO G P, TINEBRA A, RENSCHLER C, *et al.* New resilience index for urban water distribution networks[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2016, 142(8): C4015014.
- [17] LIU W, LI Z, SONG Z, *et al.* Seismic reliability evaluation of gas supply networks based on the probability density evolution method [J]. *Structural Safety*, 2018, 70(2015): 21.
- [18] BALAEI B, WILKINSON S, POTANGAROA R, *et al.* Social factors affecting water supply resilience to disasters [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2019, 37: 101187
- [19] KERMACK W O, MCKENDRICK A G. A contribution to the mathematical theory of epidemics[C]//*Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1927, 115: 700-721.
- [20] 林铭, 金华, 徐汇川, 等. 基于Agent模型的城市轨道交通车站人群聚集风险的分析[J]. *城市轨道交通研究*, 2018(8): 57.
LIN Ming, JIN Hua, XU Huichuan, *et al.* Analysis of crowd gathering risk at urban rail transit station based on Agent model[J]. *Urban Mass Transit*, 2018(8): 57.
- [21] 施伟华, 陈坤华, 谢英情, 等. 云南地震灾害人员伤亡预测方法研究[J]. *地震研究*, 2012, 35(3): 387.
SHI Weihua, CHEN Kunhua, XIE Yingqing, *et al.* Prediction research on casualties due to earthquake disaster in yunnan[J]. *Journal of Seismological Research*, 2012, 35(3): 387.
- [22] 胡国勇. 学校是防灾避难教育中心——走进日本中小学(上)[J]. *上海教育*, 2008(6B): 38.
HU Guoyong. Schools as disaster-prevention education center: case study of Japanese schools(I)[J]. *Shanghai Education*, 2008(6B): 38.