

6-20-2023

## Dynamic Simulation of Urban Agglomeration Passenger Transport Network Vulnerability Based on Multi-agent

Chengbing Li

*School of Transportation, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China, bingbingnihao2008@126.com*

Yunfei Li

*School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*

Peng Wu

*School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Dynamic Simulation of Urban Agglomeration Passenger Transport Network Vulnerability Based on Multi-agent

## Abstract

Research on vulnerability of comprehensive passenger transportation network in urban agglomerations helps to ensure the transportation efficiency of intercity travel. *A comprehensive passenger transport network model of urban agglomeration is built based on multi-layer complex network theory. Urban transportation transfer factors are considered, actual passenger flow is used to calibrate the station load and capacity and a dynamic model of network cascading failure is constructed. Multi-agents are used to simulate the actual passenger flow, Dijkstra algorithm is used to find the shortest path, and two time-dimensional vulnerability evaluation indicators are proposed.* MATLAB is used to carry out the dynamic simulation of Hubao-Eyu urban agglomeration. The results show that most train stations have obvious range and time, impact on the network after being attacked, but the duration is not significantly different from the bus stations. The impact on the network of different sites being attacked has no obvious relationship with the duration.

## Keywords

urban agglomeration transport, passenger traffic network, multi-agent, vulnerability, dynamic simulation

## Recommended Citation

Chengbing Li, Yunfei Li, Peng Wu. Dynamic Simulation of Urban Agglomeration Passenger Transport Network Vulnerability Based on Multi-agent[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(6): 1183-1190.

# 基于多智能体的城市群客运网络脆弱性动态仿真

李成兵<sup>1</sup>, 李云飞<sup>2</sup>, 吴鹏<sup>2</sup>

(1. 内蒙古大学 交通学院, 内蒙古 呼和浩特 010070; 2. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

**摘要:** 研究城市群综合客运交通网络脆弱性有助于保障城际出行的运输效率。为了更符合实际情况, 采用多层复杂网络理论建立城市群综合客运网络, 考虑城市交通换乘因素, 利用实际客流标定站点负载及容量, 构建网络级联失效动态模型, 并用多智能体模型模拟实际客流, 通过迪杰斯特拉算法寻找最短路径, 并提出时空维度的脆弱性评价指标。实例动态仿真采用呼包鄂榆城市群, 结果表明: 大部分火车站受到攻击后对网络的影响范围及时间较大; 站点受到攻击后对网络的影响范围与持续时间没有明显关系。

**关键词:** 城市群交通; 客运网络; 多智能体模型; 脆弱性; 动态仿真

中图分类号: TP391; U113 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)06-1183-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0200

**引用格式:** 李成兵, 李云飞, 吴鹏. 基于多智能体的城市群客运网络脆弱性动态仿真[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(6): 1183-1190.

**Reference format:** Li Chengbing, Li Yunfei, Wu Peng. Dynamic Simulation of Urban Agglomeration Passenger Transport Network Vulnerability Based on Multi-agent[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(6): 1183-1190.

## Dynamic Simulation of Urban Agglomeration Passenger Transport Network Vulnerability Based on Multi-agent

Li Chengbing<sup>1</sup>, Li Yunfei<sup>2</sup>, Wu Peng<sup>2</sup>

(1. School of Transportation, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China;

2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Research on vulnerability of comprehensive passenger transportation network in urban agglomerations helps to ensure the transportation efficiency of intercity travel. A comprehensive passenger transport network model of urban agglomeration is built based on multi-layer complex network theory. Urban transportation transfer factors are considered, actual passenger flow is used to calibrate the station load and capacity and a dynamic model of network cascading failure is constructed. Multi-agents are used to simulate the actual passenger flow, Dijkstra algorithm is used to find the shortest path, and two time-dimensional vulnerability evaluation indicators are proposed. MATLAB is used to carry out the dynamic simulation of Hubao-Eyu urban agglomeration. The results show that most train stations have obvious range and time, impact on the network after being attacked, but the duration is not significantly different from the bus stations. The impact on the network of different sites being attacked has no obvious relationship with the duration.

**Keywords:** urban agglomeration transport; passenger traffic network; multi-agent; vulnerability; dynamic simulation

收稿日期: 2022-03-10

修回日期: 2022-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(62063023); 内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划(NJYT22099); 内蒙古自治区自然科学基金(2019MS05083)

第一作者: 李成兵(1982-), 男, 教授, 博士, 研究方向为交通运输系统仿真与优化。Email: bingbingnihao2008@126.com

## 0 引言

随着我国经济社会的发展,城市群已经成为高质量发展的重要载体,城市群交通网络日益庞大且扮演着重要角色。《交通强国建设纲要》明确指出,要构建便捷顺畅的城市群一体化交通网。习近平总书记提到:“要加快提高中心城市和城市群综合承载能力,为‘十四五’发展、实现‘两个一百年’奋斗目标和中华民族伟大复兴的中国梦提供有力支撑。”然而,城市群内部自然灾害、运输设备故障、疫情等扰动情况偶有发生,个别站点受此影响可能会失效。例如,2020年1月,武汉三大火车站就因为疫情的原因而关闭;2020年8月,台风“黑格比”登陆导致宁波部分火车停运航班取消;2021年5月,黄冈西站因站房升级改造而关停等。这些突发状况导致的站点失效会对网络运输效率造成严重影响,需要提前发现薄弱环节并做好应急预案与优化。因此,有必要研究网络的脆弱性。

脆弱性是某一系统中可能被威胁利用而造成损害的薄弱环节。评估区域客运交通网络的脆弱性,对城市群的高质量发展至关重要。在城市群客运交通网络中某一站点因突发状况的失效可能会发生级联失效现象,进而使其他站点超载并导致运输效率下降,是一种潜在的薄弱环节与威胁。对城市群综合客运网络进行级联失效脆弱性动态仿真,系统地识别对网络脆弱性影响较大的关键站点并分析薄弱环节,对保证城市群客运交通安全、高效、稳定运转具有重要意义,从而更好地促进区域乃至全国的经济社会发展。

针对交通运输网络模型,目前已有许多研究。黄敏等<sup>[1]</sup>基于GIS-T(geography information system-transportation)构建路网数据模型,对描述交通规则和路面标线进行强化;何兆成等<sup>[2]</sup>考虑了车辆速度、密度,采用点排队模型建立了轻量化的中观交通仿真系统与标定流程;姜安培等<sup>[3]</sup>构建以外层为组织方案、内层为路径流量的双层交通组织优

化模型;李成兵等<sup>[4]</sup>构建了城市群复合交通网络模型,并对网络级联失效进行了仿真;周天星等<sup>[5]</sup>对城市群公路客运通道与城市交通网络的衔接选择模式进行了探讨,开始考虑城市交通对城市群交通的影响。

针对交通网络的脆弱性,LU等<sup>[6]</sup>提出一种基于道路基础设施属性的可达性方法来衡量道路网络脆弱性,并考虑了不同基础设施的属性影响,对不同运输方式网络脆弱性的研究具有一定参考意义;张光远等<sup>[7]</sup>利用复杂网络理论对成渝城市群的铁路网络特性与脆弱性进行了评估;Malandri等<sup>[8]</sup>利用交通中断后旅客的平均延误时间对公共交通网络的脆弱性进行了评估,并分析了交通中断的影响后果在乘客中的分布情况;Chen等<sup>[9]</sup>利用复杂网络理论描述多式联运网络拓扑结构特性,利用网络平均最短路径和最大连通子图对网络遭受攻击后的脆弱性进行了分析。

许多模型可应用于交通网络仿真,在城市群中观维度下,多智能体模型体现出更好的鲁棒性和灵活性,在基于计算机技术的交通仿真中逐渐被重视。多智能体模型在应急、疏散仿真等研究中得到了广泛的应用,Balac等<sup>[10]</sup>采用MATSim仿真软件模拟行人和机动车,并应用于旧金山案例中,实现了特定场景的仿真模拟;Chen等<sup>[11]</sup>基于多智能体模型对交通流进行建模,比较了不同路网形式的应急疏散效率;Onelcin等<sup>[12]</sup>基于多智能体模型,利用微观以及中观仿真软件模拟了土耳其Aliaga工业区的疏散仿真;吴健宏等<sup>[13]</sup>利用GIS系统以及多智能体模型进行疏散仿真研究;於家等<sup>[14]</sup>构建3种不同的智能体实现应急疏散的仿真模拟,并以上海市静安区为例生成空间配置方案。多智能体模型在其他交通网络方面也有广泛研究,Namoun等<sup>[15]</sup>基于智能体模型,构建了满足不同城市环境下交通基础设施需求的生态友好型交通诱导系统。

综上所述,国内外学者大多只考虑构建单一网络,或在构建多运输方式网络时忽略了网络线

路的里程、限速等实际交通网络特征, 并且极少考虑城市公共交通换乘所带来的影响。大多数学者以分配次数为仿真步长, 忽视了不同运输方式运输负载速度的区别, 忽略了级联失效影响的持续时间与范围。不仅如此, 拥有出行起讫点、能够自主优化路径的多智能体的动态仿真在城市群客运交通网络中的应用尚处于空白阶段。

## 1 城市群综合客运网络模型

应用多层复杂网络理论, 将城市群公路、铁路、水路、航空等不同运输方式网络构建交通子网。考虑城市内部交通, 将城市中换乘时间较短的相邻站点进行耦合关联, 构建多运输方式城市群综合客运网络。基于年平均日旅客发送量与设计容量标定负载与容量, 构建完整的城市群综合客运网络模型。

### 1.1 交通子网模型

将城市群内所有汽车站、火车站、机场等, 抽象为网络中的节点并按类型进行编号, 将各站点间的通车线路视为网络中的连边, 构建城市群公路、铁路和航空交通子网模型, 记作  $W^S = \{N^S, J^S, T^S\}$ 。其中,  $S=1, 2, 3$ , 分别对应公路、铁路、航空的交通子网。 $N^S$ 表示子网 $S$ 中站点坐标的集合,  $N^S = \{N_1^S, N_2^S, \dots, N_{n^S}^S\}$ , 其中,  $n^S$ 表示子网 $S$ 中站点的个数;  $J^S$ 表示子网 $S$ 的连边0-1矩阵,  $J^S = (J_{ij}^S)_{n^S \times n^S}$ , 其中,  $J_{ij}^S = 1$ 表示子网 $S$ 中站点 $i, j$ 之间存在直达线路,  $J_{ij}^S = 0$ 表示不存在;  $T^S$ 表示子网 $S$ 中的连边时间矩阵,  $T^S = (T_{ij}^S)_{n^S \times n^S}$ , 其中,  $T_{ij}^S$ 表示子网 $S$ 中站点 $i$ 到站点 $j$ 的平均行驶时间, 当 $J_{ij}^S$ 为0时, 将 $T_{ij}^S$ 设为极大的数 $M$ 。

由于铁路线路与公路及航空线路性质不同, 铁路站点被攻击后会全线停工, 而公路站点或机场被攻击后, 其相邻站点所受影响并不大。为将公路线网、航空线网与铁路线网进行契合、连接, 公路交通子网、航空交通子网的连通情况以

可达矩阵表示, 而铁路交通子网的连通情况以邻接矩阵表示, 并用矩阵 $J^S$ 表示各子网络的连通情况。

### 1.2 综合客运网络模型

考虑到距离较近的2个不同运输方式站点之间存在旅客的流动情况, 将通过城市交通、步行等换乘时间在10 min以内的不同运输方式的站点进行关联, 以连接不同运输方式的交通子网。连接方式如图1所示。

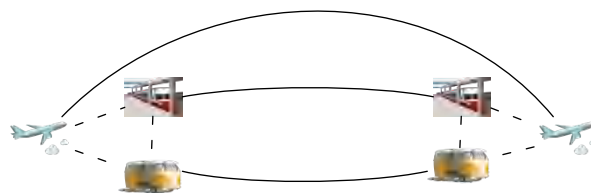


图1 不同交通子网连接方式

Fig. 1 Connection method of different transportation subnets

### 1.3 网络容量及负载的动态平衡关系

定义 $F$ 为综合客运网络站点的初始负载矩阵,  $C$ 为综合客运网络站点的容量矩阵。基于站点的年平均日旅客发送量标定负载, 基于站点的设计容量标定容量。假设城市群客运网络中的站点负载与容量处于一定的动态稳定中, 每个站点的负载 $F_i$ 与容量 $C_i$ 的比值 $\lambda_i$ 一定:

$$\lambda_i = F_i / C_i \quad (1)$$

在进行后续仿真中, 将只考虑扰动动态稳定的部分负载。

## 2 基于多智能体的网络级联失效脆弱性动态模型

### 2.1 攻击策略

采用逐一攻击策略, 将所有站点(共 $n$ 个)按照站点类型依次编号。首先攻击站点1, 接着攻击站点2, 然后攻击站点3, 直到第 $n$ 个站点, 共进行 $n$ 次动态仿真。当攻击站点 $i$ 时, 该站点失效, 客流向外扩散。



## 2.2 多智能体负载疏散过程

设定一定数量的智能体模拟失效站点的组成客流，并根据其他站点的权重随机生成每一个智能体的目的地，利用迪杰斯特拉算法求解每个智能体的路径，模拟客流出行路径重新规划的负载疏散过程。将每个智能体的起讫点以及综合客运网络的连边 0-1 矩阵及时间矩阵代入 MATLAB 中的 graphshortestpath 函数，求解多智能体的最优路径。路径的选择只与网络状态以及起讫点有关，智能体之间互不干涉。

## 2.3 站点状态

将站点状态分为正常、超载与暂停：

$$\begin{cases} F_i \leq C_i, & \text{正常} \\ C_i < F_i \leq \phi C_i, & \text{超载} \\ F_i > \phi C_i, & \text{暂停} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\phi$  为过载能力调节参数，用于描述实际站点最大容量的不确定性。负载大于站点容量，但小于该站点容量的一定调节范围之内时，该站点依然可用，但站点的负载接收能力降低。站点暂停状态是一种过度超载所导致的站点暂停。暂停站点只允许向外发送负载而无法接收新的负载。

## 2.4 网络更新

当网络中站点被攻击后该站点失效，而途经该站点的智能体将该失效站点与目的地分别作为起讫点，利用迪杰斯特拉算法重新选择路径。且以一个时间单位(5 min)为步长，进行网络的动态仿真，计算并输出每个 5 min 后负载的分布情况及站点的状态，得到动态仿真视频。

## 2.5 网络状态指标

以突发事件对网络的影响范围及持续时间作为网络的脆弱性指标，用某站点的负载与容量的差值变化情况描述该站点在本次事件中的状态变化情况。

### (1) 影响范围

事故对网络造成影响的范围用网络中发生过暂停现象的站点加权值确定：

$$I = \sum_{o \in \text{overload}} p_o \quad (3)$$

式中： $\text{overload}$  为网络中发生暂停现象的站点集合； $P_o$  为发生暂停现象的站点的节点度。网络中发生暂停现象的站点数加权值越大，事故对网络造成影响的范围就越大。

### (2) 影响持续时间

事故对网络造成影响的持续时间用网络中的暂停站点恢复的时间与站点的节点度表示：

$$T = \sum_{o \in \text{overload}} p_o \cdot \Delta t_o \quad (4)$$

式中： $\Delta t_o$  为站点  $o$  的暂停时间。当网络中最后一个暂停站点恢复成正常站点后，事故对网络造成的影响消除。

### (3) 站点过载程度

站点  $i$  的过载程度  $\lambda_i$  值的变化用每个站点该时刻的负载与初始负载的差值变化情况描述：

$$\lambda_i = F_i - F_{i0} \quad (5)$$

式中： $F_i$  为站点  $i$  该时刻的负载； $F_{i0}$  为站点  $i$  的初始负载。

## 2.6 动态仿真流程

step 1: 网络初始化，构建城市群综合客运网络模型，标定相关参数，时间  $T=0$ ；

step 2: 根据站点编号排序逐一攻击站点  $i$ ,  $i=1$ ；

step 3: 站点  $i$  失效，生成该点的与初始负载数量相同的智能体，根据其他站点权重随机生成智能体的出行目的地；

step 4: 利用迪杰斯特拉算法得到每一个智能体的最优出行路径；

step 5: 未达到目的地的智能体均沿路径移动 5 min，并更新每个站点的状态，时间  $T=T+1$ ；

step 6: 判断网络中是否存在扩散中的智能体，若有则转至 step 5，如无则转至 step 7；

step 7: 该站点级联失效动态仿真结束, 得到动态视频, 计算突发事件对网络的影响范围及持续时间, 统计网络中发生暂停现象的站点;

step 8: 判断所有站点是否均攻击完毕, 否则  $i = i + 1$ , 转至 step 3, 是则转至 step 9;

step 9: 所有站点攻击完毕, 动态仿真结束。动态仿真流程如图 2 所示。

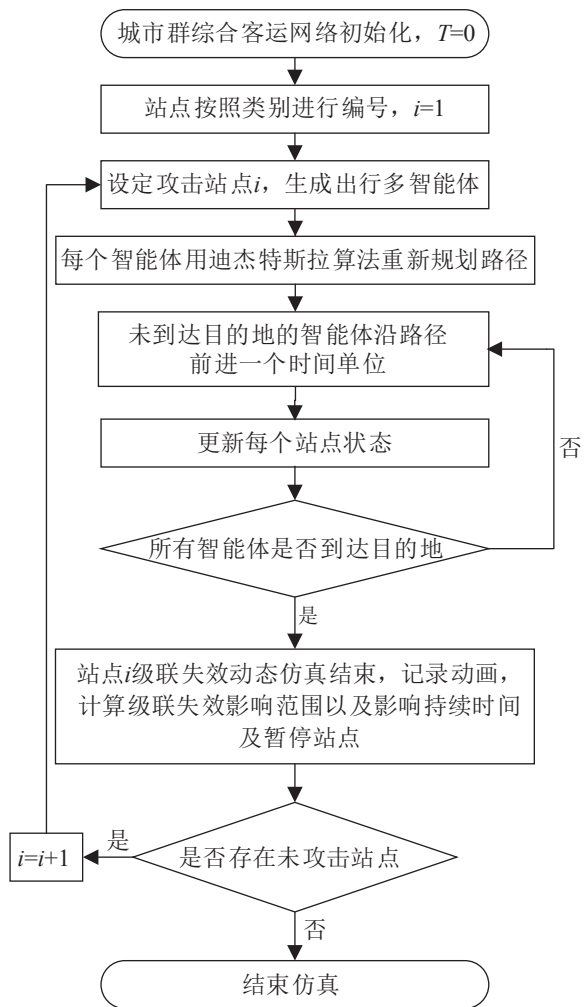


图 2 网络级联失效仿真流程  
Fig. 2 Network cascading failure simulation flow chart

### 3 呼包鄂榆城市群实例动态仿真

#### 3.1 呼包鄂榆城市群数据初始化

对呼包鄂榆城市群客运交通网络进行实例动态仿真分析。由于呼包鄂榆城市群内水路、航空

运输方式所占比例较小, 所以, 仅构建公路交通子网  $W^{(1)}$  与铁路交通子网  $W^{(2)}$ ,  $n^{(1)} = 83$ ,  $n^{(2)} = 18$ 。利用 GIS 软件提取站点坐标及线路长度, 通过飞猪、携程等出行软件以及车站公众号等查询公路客运班次, 依据到发时刻表、距离、长途客车平均行驶速度等要素计算公路客运站点之间的平均行驶时间; 在中国铁路 12306 官网查询铁路客运站站点间的车次信息, 在高铁、动车、普快车次中优先采用速度较快的列车种类的平均耗时标定铁路客运站站点间的行驶时间。

划设呼和浩特、包头、鄂尔多斯、榆林 4 个城市构建城市群多运输方式综合客运网络, 将公路交通子网  $W^{(1)}$  与铁路交通子网  $W^{(2)}$  通过耦合网络进行叠加, 构建呼包鄂榆城市群综合客运交通网络,  $n = 101$ , 初始路网如图 3 所示。以年平均日旅客发送量与设计容量标定站点初始负载与容量。

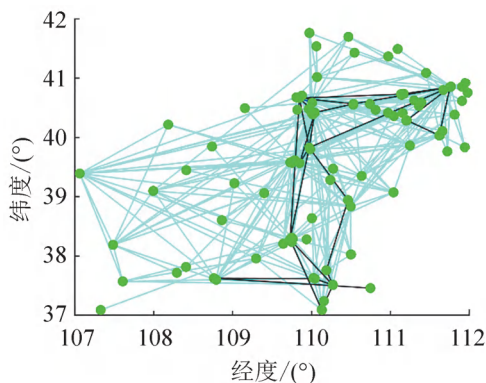


图 3 呼包鄂榆城市群初始路网  
Fig. 3 Initial transport network of Hubao-Eyu urban agglomeration

#### 3.2 呼包鄂榆城市群级联失效动态仿真

攻击 1 号站点, 需要疏散的智能体从 1 号站点发出, 驶向各自的目的站点, 依据综合网络中站点的节点度随机生成智能体的目的地分布, 进行城市群路网的级联失效脆弱性动态仿真。

以 1 号站点被攻击失效为初始时刻, 每隔 5 min 更新画面, 输出智能体向各自目的站点疏散

的仿真动图，并截取具有代表性的40、105、130、185、230、245 min时刻负载疏散情况图，其中，130、185、230 min时刻均存在2个暂停站点，如图4所示。

在完整的动态仿真中，260 min是最后存在暂停站点的时刻，因此，站点攻击时客运网络造成影响持续时间是260 min，在7 min左右，1号站点的关联站点首先受到影响而发生暂停现象。随后，由于网络连通情况较差，大多数智能体要在57号站点换乘，即115 min时刻发生暂停现象的站点。随着该站点不断向外发送负载，聚集负载减少，站点恢复。负载继续疏散，在175 min左右，10号站点发生暂停现象。之后，攻击1号站点对网络造成的影响逐渐恢复。

其中，本次仿真攻击1号站点清水河汽车站，共造成6个站点发生暂停现象，分别是7号站点托

克托汽车站、9号站点土默特左旗长途汽车站、10号站点察素齐汽车南站、57号站点沙圪汽车站、100号站点清水河火车站、101号站点托克托火车站。在该仿真中，能够清晰地看出由于随机事件造成的额外客流的运动轨迹，以及网络中站点的情况。网络中以上6个暂停站点的过载程度变化如图5所示。

从图5可以看出，1号站点被攻击后，相邻的100号站点立即受到影响，并发生状态变化，随着负载疏散到其他站点，客运网络发生级联失效，影响范围扩大。但网络存在一定的恢复能力，一些暂停站点随着负载的疏散，逐渐恢复正常。随着暂停站点负载的疏散，系统逐渐恢复正常。从该图也可以看出，在网络受到攻击的第175 min，网络中出现3个站点同时暂停的现象，持续时间达10 min，部分站点所受影响的时间较长。

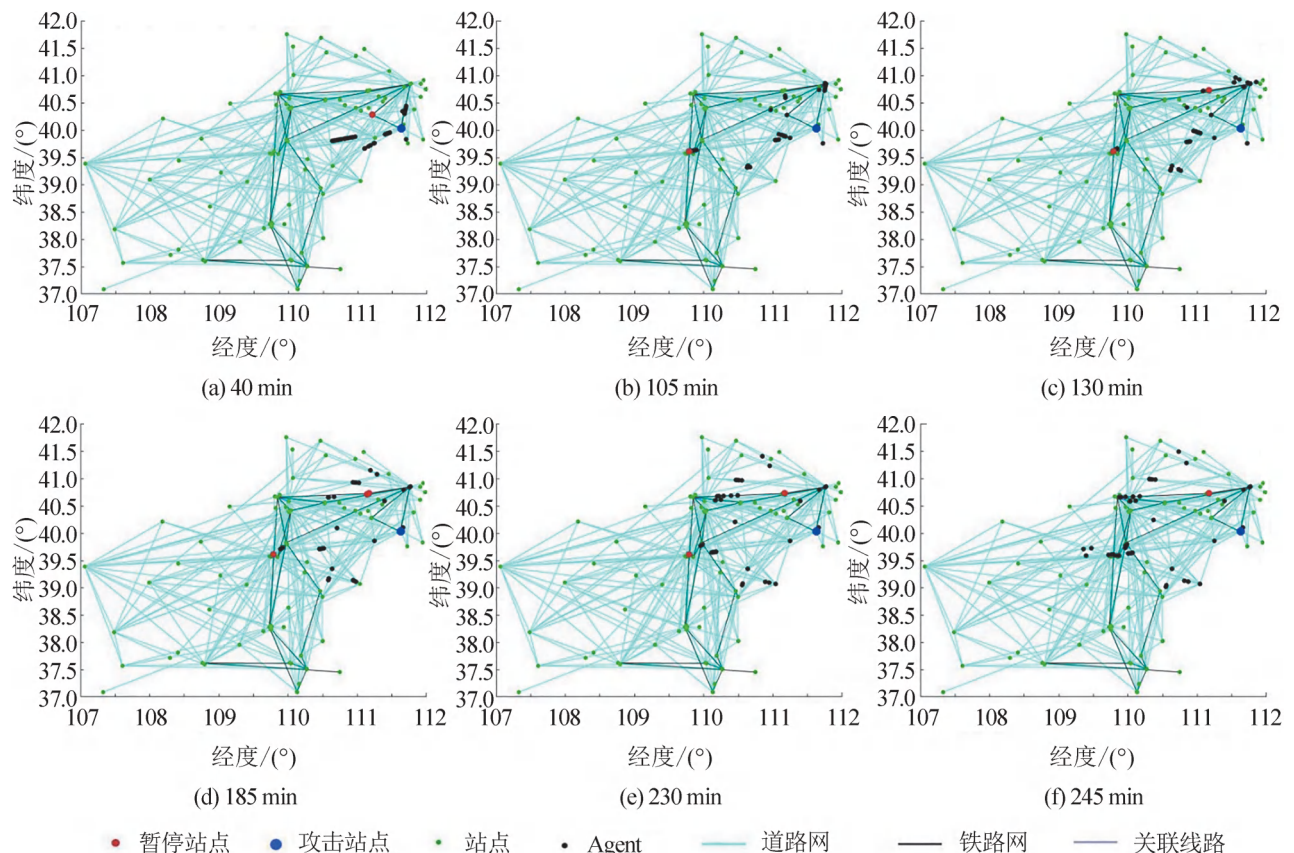


图4 动态仿真部分图

Fig. 4 Partial diagram of dynamic simulation



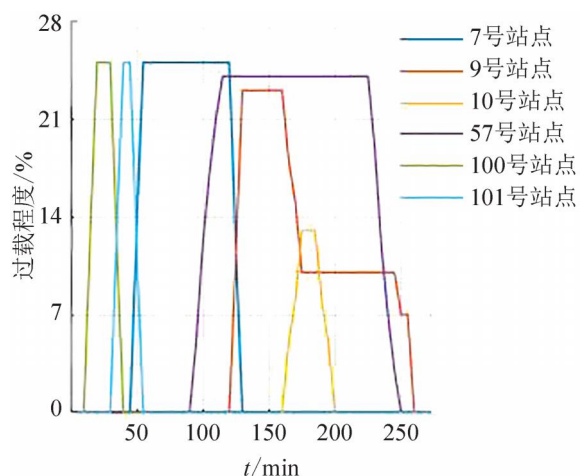


图 5 暂停站点的状态变化  
Fig. 5 Status change of suspended site

### 3.3 呼包鄂榆城市群脆弱性

为研究呼包鄂榆城市群脆弱性, 本文对呼包鄂榆城市群的火车与汽车共 101 个站点进行级联失效脆弱性动态仿真, 计算分析每个站点遭遇突发事件时城市群客运网络受到的加权影响范围及加权持续时间, 如图 6 所示。

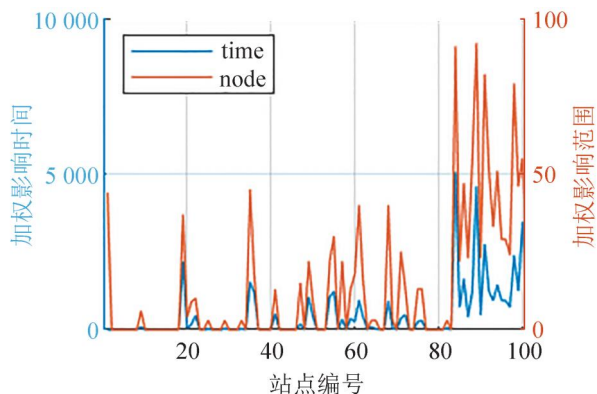


图 6 网络级联失效影响范围及持续时间  
Fig. 6 Scope and duration of network cascading failure

部分站点失效对网络影响范围及持续时间较大, 且大部分关键站点为火车站, 如表 1 所示。由表 1 可知, 相比汽车站, 火车站失效对城市群网络的影响范围更大, 持续时间更长。

攻击不同站点对网络造成的影响范围与持续时间持正相关关系, 对二者进行线性拟合, 如图 7 所示。

表 1 重要站点  
Table 1 Key sites

站点编号	范围	时间	站点名称
19	37	2 188	呼和浩特长途汽车东站
84	91	5 051	呼和浩特火车西站
89	92	4 602	呼和浩特火车东站
91	82	2 741	榆林火车站
98	79	2 387	靖边县火车站
100	55	3 462	清水河站

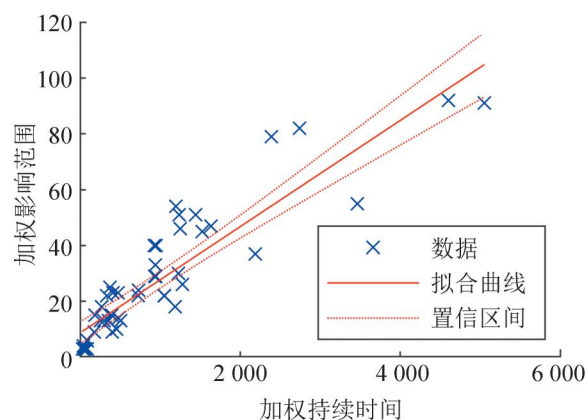


图 7 加权持续时间与影响范围线性拟合  
Fig. 7 Linear fit of weighted duration and influence range

由图 7 可以看出, 关键站点的失效对城市群客运网络的影响范围及时间均比较严重。

## 4 结论

本文基于多层复杂网络理论构建城市群综合客运网络模型, 并基于多智能体构建动态仿真模型进行仿真, 以呼包鄂榆城市群为例, 进行脆弱性动态仿真实例研究, 得出以下结论:

(1) 多智能体模型适用于城市群客运网络脆弱性的研究, 能够直观真实地展现突发事件对城市群客运网络的影响范围及持续时间, 并判断城市群客运网络中的重要站点, 以及站点在级联失效过程中的状态变化情况。

(2) 相对于汽车站, 火车站受到攻击后对网络的影响范围较大, 持续时间较长, 关键站点较多。因此, 相关部门应注重火车站的连通情况, 以减少火车站受到攻击时对网络影响的程度。

(3) 同一客运网络中, 攻击不同站点对网络造

成的影响范围与持续时间呈正相关关系,相关部门应同时考虑影响的范围及持续时间。

### 参考文献:

- [1] 黄敏, 钮中铭, 张小兰, 等. 基于GIS-T的交通仿真路网构建研究[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(3): 531-536.  
Huang Min, Niu Zhongming, Zhang Xiaolan, et al. Research of the Construction of GIS-T Traffic Simulation Road Network[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(3): 531-536.
- [2] 何兆成, 林炫华, 聂佩林, 等. 考虑展览设计的中观交通仿真模型及其标定[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(4): 781-791.  
He Zhaocheng, Lin Xuanhua, Nie Peilin, et al. Mesoscopic Traffic Simulation Model and Calibration Considering Stretching-segment Design[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(4): 781-791.
- [3] 姜安培, 吴海俊, 赵慧. 基于双层模型与仿真的区域交通组织优化研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2022, 46(6): 1008-1012.  
Jiang Anpei, Wu Haijun, Zhao Hui. Research on Optimization of Regional Traffic Organization Based on Double-layer Model and Simulation[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2022, 46(6): 1008-1012.
- [4] 李成兵, 张帅, 杨志成, 等. 蓄意攻击下城市群客运交通网络级联抗毁性仿真[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(2): 14-21.  
Li Chengbing, Zhang Shuai, Yang Zhicheng, et al. Invulnerability Simulation in Urban Agglomeration Passenger Traffic Network under Targeted Attacks[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(2): 14-21.
- [5] 周天星, 毛剑楠, 刘澜, 等. 城市群公路客运通道与城市交通网络衔接模式选择模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(3): 22-28.  
Zhou Tianxing, Mao Jiannan, Liu Lan, et al. Connection Model of Highway Passenger Transportation Corridor and Urban Transit Network in Metropolitan Area[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(3): 22-28.
- [6] Lu Qingchang, Xu Pengcheng, Zhang Jingxiao. Infrastructure-based Transportation Network Vulnerability Modeling and Analysis[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2021, 584: 126350.
- [7] 张光远, 张帆, 刘泳博. 成渝地区城际铁路网络特性与脆弱性分析[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(7): 36-42.  
Zhang Guangyuan, Zhang Fan, Liu Yongbo. Characteristics and Vulnerabilities of Intercity Railway Network in Chengdu-chongqing Region[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(7): 36-42.
- [8] Malandri C, Mantecchini L, Paganelli F, et al. Public Transport Network Vulnerability and Delay Distribution among Travelers[J]. Sustainability, 2021, 13(16): 8737.
- [9] Chen Jing, Zhang Yong, Liu Lei. Vulnerability Analysis of Multimodal Transport Networks Based on Complex Network Theory[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2021, 37(2): 209-215.
- [10] Balac M, Hörl S. Simulation of Intermodal Shared Mobility in the San Francisco Bay Area Using MATSim [C]//2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference(ITSC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 3278-3283.
- [11] Chen X, Zhan F B. Agent-based Modelling and Simulation of Urban Evacuation: Relative Effectiveness of Simultaneous and Staged Evacuation Strategies[J]. Journal of the Operational Research Society, 2008, 59(1): 25-33.
- [12] Onelcin P, Mutlu M M, Alver Y. Evacuation Plan of an Industrial Zone: Case Study of a Chemical Accident in Aliaga, Turkey and the Comparison of Two Different Simulation Softwares[J]. Safety Science, 2013, 60: 123-130.
- [13] 吴健宏, 翁文国, 倪顺江. 基于GIS和Multi-Agent的城市应急疏散[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(8): 1168-1172.  
Wu Jianhong, Weng Wenguo, Ni Shunjiang. Urban Emergency Evacuation Plans Based on GIS and Multi-agent Systems[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2010, 50(8): 1168-1172.
- [14] 於家, 温家洪, 陈芸, 等. 基于应急疏散智能体模型模拟的城市避难所空间配置—以上海市静安区为例[J]. 地理学报, 2017, 72(8): 1458-1475.  
Yu Jia, Wen Jiahong, Chen Yun, et al. Spatial Configuration of Urban Shelters Based on Simulation Using Emergency Evacuation Agent-based Model: A Case Study in Jing'an District, Shanghai[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(8): 1458-1475.
- [15] Namoun A, TufailA, Mehandjiev N, et al. An Eco-friendly Multimodal Route Guidance System for Urban Areas Using Multi-agent Technology[J]. Applied Sciences, 2021, 11(5): 2057.