

文章编号:1671-6833(2025)01-0051-08

基于 SIR 模型的城市路网拥堵传播分析

郑长江¹, 周思达¹, 郑树康², 马庚华³, 张 博¹, 戴津雯¹

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 研究城市道路交通拥堵传播规律对缓解交通拥堵问题有着积极作用, 为此建立了基于 SIR 的城市道路交通拥堵传播模型, 用以分析城市道路交通拥堵传播过程。首先, 基于城市实际路网构建路网对偶拓扑网络, 并依据 SIR 建立交通拥堵传播模型。其次, 结合道路网络的复杂网络特征和道路自身的相关属性, 引入随机森林算法计算相关权重, 确定拥堵模型中的传播速率等关键参数。最后, 以南京市秦淮区某区域路网为例, 构建有 69 个节点, 163 条连线的城市路网对偶拓扑网络进行仿真实验。结果表明: 道路节点度和道路饱和度是影响道路拥堵传播的关键因素, 道路节点度的影响相对较小, 传播范围增长在 5% 以内, 恢复时间影响在 10% 左右; 道路饱和度的影响相对较大, 随着道路饱和度的增长, 传播范围增长最大可至 40%, 恢复时间影响在 20% 左右。

关键词: SIR 模型; 城市交通; 拥堵传播; 道路节点度; 道路饱和度

中图分类号: U491; TP301

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2025.01.019

城市道路网络作为城市交通的基础形式, 承载着大部分的出行和运输需求, 而交通拥堵严重阻碍了城市的有序发展。随着道路拥堵现象愈发常见, 对于交通拥堵的研究也愈发深入, 同时越来越多的学者发现道路拥堵现象在城市道路网中能够进行传播。为研究交通拥堵发生网络结构、网络规模等特点, Sun 等^[1]提出了不同网络拓扑结构下交通拥堵和瓶颈的时空分布特征; Wei 等^[2]提出了一种利用车辆轨迹数据缓解网络流量瓶颈阻塞的分层控制框架。为对拥堵时的重点路段进行检测, Hamedmoghadam 等^[3]运用一种基于渗透的动态周界控制方法; 罗荣辉等^[4]提出基于卷积神经网络的拥堵识别方法; Zeng 等^[5]将车辆轨迹与地图相匹配, 采用重叠社区检测算法; Wang 等^[6]建立一种基于拥堵边的权值动态可调的拥堵传播模型。为探究大规模路网中交通拥堵的传播特征和时空影响范围, Luan 等^[7]提出一种动态贝叶斯图卷积网络模型, 将贝叶斯推理集成到深度学习框架中; Chen 等^[8]构建基于 SIS 的阻塞传播模型。但这些方法只适用于分析道路网中的交通拥堵传播规律和过程的变化, 无法判断出

究竟是道路网络中哪个路段产生的拥堵并且蔓延至整个道路网。

随着对交通拥堵传播规律和过程研究的深入, 越来越多的学者发现交通拥堵的传播过程与传染病的扩散过程极为相似, 均存在不同状态之间的相互转化, 且二者均与网络拓扑结构密切相关^[9]。在空中交通和城市轨道拥堵方面, 代晓旭等^[10]结合各自交通特点, 将 SIR 模型引入到空中交通拥挤传播研究, 构建基于 SIR 模型的多层轨道交通客流拥堵模型^[11]并引入灰色系统模型对 SIR 模型进行改进^[12], 研究空中交通和轨道交通网络性质, 对拥挤传播影响因素与传播速率之间的关系进行量化计算。同样在道路交通层面, Saberi 等^[13]通过引入传染病模型^[14]以及构建交通事故影响下的 CA-SIR 模型等, 在微观层面模拟了交通拥堵在城市中的传播过程。陈玉婷等^[15]基于 SIS 理论来建立城市交通拥堵传播模型, 并在此基础上提出改进 SIS 模型^[16]和 SIS-CTM 模型^[17], 研究由交通拥堵导致的阻塞扩散的随机性质、影响范围及其随时间的变化趋势。综合上述研究发现, 现有研究大多数都是基于整个

收稿日期: 2024-09-19; 修订日期: 2024-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72301094)

作者简介: 郑长江(1966—), 男, 安徽滁州人, 河海大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事交通运输规划与管理、交通运输信息与控制、交通安全方面的研究, E-mail: zheng@hhu.edu.cn。

引用本文: 郑长江, 周思达, 郑树康, 等. 基于 SIR 模型的城市路网拥堵传播分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2025, 46(1): 51-58. (ZHENG C J, ZHOU S D, ZHENG S K, et al. Analysis of congestion propagation in urban road networks based on the SIR model[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2025, 46(1): 51-58.)

交通网络状况来进行拥堵传播分析,较少从网络中单个重要节点拥堵对整个交通网络的影响方面来进行传播分析。对于单个节点拥堵传播规律的研究十分重要,有助于确定拥堵传播的关键节点,更好地优化网络结构,从而有针对性地提出拥堵控制的手段。

因此,本文从道路网中单个节点的节点度和道路饱和度对于整体路网的拥堵传播影响的角度入手,将网络中每个路段作为一个独立个体,建立离散化的 SIR 模型来对城市拥堵传播规律进行研究。通过对于关键参数的标定和扰动分析,最终得出城市道路网络拥堵传播的规律,为识别重要拥堵路段、控制城市道路拥堵范围提供理论支持。

1 基于 SIR 的城市路网拥堵传播模型

1.1 城市路网对偶拓扑网络构建

在对城市道路交通网络的分析过程中,需要对路网进行抽象化处理。本文采用对偶抽象的方法^[18]将道路简化为节点,将道路之间的交叉路口定义为弧,通过网络中节点状态的变化来反映城市道路拥堵状态的变化,以此来研究城市路网拥堵传播过程。

为了突出城市道路网络中道路节点度以及道路饱和度对拥堵传播的影响,本文需要对实际路网进行简化处理,以排除其他因素对于网络扰动的影响。首先,本文删除了道路网络中未与其他道路形成回路的道路、交通量过少和道路等级过低的道路,且假设路网中的车辆数目处在动态平衡的状态,重点研究城市道路的拥堵传播特性;其次,由于需要将道路节点度作为节点的网络属性,将道路饱和度作为节点的交通属性,本文假设交通流双向平衡,忽略道路中交通流的流向,同时假设交叉路口所形成的弧是具有无限容量的无向边。城市路网对偶拓扑网络构建的示意图如图 1 所示,通过对偶拓扑网络的简化构建,可以将城市道路网络结构和性质集中于道路节点度以及道路饱和度两个关键点,便于针对两个关键点对道路网络中的拥堵传播的影响进行研究。

在实际路网对偶拓扑网络的构建过程中,研究的核心为交通拥堵传播规律,而本文构建的拓扑网络为无标度网络,具有静态特性,在一定程度上忽略潮汐交通带来的交通流不均衡影响。此外,本文采用一般性拥堵作为所研究的交通拥堵情况,忽略交通事故等突发事件带来的拥堵影响。最后,通过对网络图的处理,可获取各个节点的节点度信息,作为道路节点的网络属性。

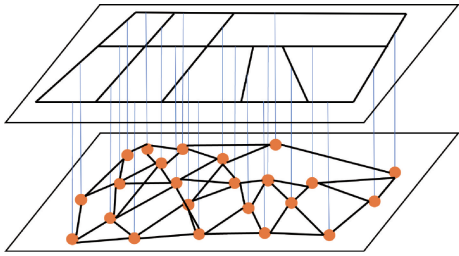


图 1 城市路网对偶拓扑网络构建示意图
Figure 1 Schematic diagram of constructing dual topology network for urban road network

1.2 交通拥堵传播模型

1.2.1 交通拥堵传播过程

交通拥堵是许多城市所面对的主要问题之一,它会导致出行时间的增加和速度的下降。一般来说,交通拥堵可分为常规拥堵^[19]和非常规拥堵^[20]。研究人员通常采用各种指标(如出行时间^[21]、速度^[22]、道路饱和度^[23]等)设置临界阈值来判定拥堵现象,当一个路段上的实时交通指标高于或低于预先指定的阈值时,该路段的交通状况可以被视为拥堵。在本文中,采用道路饱和度 K 作为界定道路拥堵的指标。道路交通的饱和度通常用流量与容量的比值表示,即 $K=Q/C$,其中, Q 为道路的交通流量; C 为道路的饱和容量。参照中国对于道路服务水平的界定^[24],将饱和度处在 $0\sim0.6$ 的道路设置为畅通道路;饱和度在 $0.6\sim0.8$ 的道路设置为略有拥堵的道路;饱和度在 $0.8\sim1.0$ 的道路设置为拥堵道路;饱和度超过 1.0 的道路则为完全阻塞。

此外,当某个路段发生拥堵时,可能会影响其他路段的交通流量,导致其他路段也陷入拥堵的状态^[25],因此,分析不同拥堵路段之间的相关性尤为重要。本文认为在一定区域内,拥堵路段是具备传播效应的,且拥堵会随交通网络结构进行传播,与传染病的传播方式尤为相似。本文采用 SIR 模型对城市路网的拥堵传播过程进行研究,以探究拥堵的传播规律和传播范围。

1.2.2 基于 SIR 的交通拥堵传播模型

SIR 模型是一种传播模型,主要用来描述不同状态之间的转换过程,而交通拥堵过程中,路段本身的状态属性也同样是相互转换的。SIR 模型中存在 3 种状态:易感者(susceptible)、感染者(infected)和移除者(removed),分别对应交通拥堵之中的易拥堵态、拥堵态和恢复态。在传播过程中,易拥堵态节点(S)以 λ 的速率转化为拥堵态节点(I),而拥堵态节点(I)则以 μ 的速率转化为恢复态节点(R),假设在一次拥堵消散过程中,恢复态节点不会再次进入拥堵状态。根据以上特点,道路网络拥堵状态转化过

程如图 2 所示。

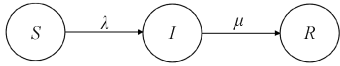


图 2 SIR 模型节点状态转化过程

Figure 2 Node state transition process in the SIR model

SIR 模型的微分公式如式 (1) 所示:

$$\begin{cases} \frac{ds(t)}{dt} = -\lambda s(t) i(t); \\ \frac{di(t)}{dt} = \lambda s(t) i(t) - \mu i(t); \\ \frac{dr(t)}{dt} = \mu i(t). \end{cases} \quad (1)$$

式中: $s(t)$ 、 $i(t)$ 、 $r(t)$ 分别为 t 时刻易拥堵态节点、拥堵态节点和恢复态节点的密度函数; λ 为易拥堵态节点的传播速率, μ 为拥堵态节点的恢复速率, λ 和 μ 均为无量纲参数。

因为道路网络中的各个节点为独立个体,所以对式 (1) 进行离散化处理,使用节点数目代替密度函数;同时,为了方便后续结果分析,对节点数目进行归一化处理,处理结果如式 (2) 所示:

$$\begin{cases} \Delta S_{t+1} = -\lambda S_t I_t; \\ \Delta I_{t+1} = \lambda S_t I_t - \mu I_t; \\ \Delta R_{t+1} = \mu I_t; \\ S_t + I_t + R_t = 1. \end{cases} \quad (2)$$

式中: S_t 、 I_t 、 R_t 为引入的无量纲参数,可分别视为易拥堵态节点、拥堵态节点和恢复态节点在总节点中所占比例。

1.3 参数分析

在上述城市交通拥堵传播模型计算过程中,需结合实际道路运行情况标定传播速率 λ 和恢复速率 μ 。基于现有研究资料,在构建城市路网对偶拓扑网络后,可从拓扑图中获取各个道路节点度 N ,并根据交通调查及历史车流数据获取各个路段的饱和度 K 。

由于传播速率受到道路节点度和道路饱和度的双重影响,因此本文通过对二者的拟合,运用随机森林算法对数据进行处理,确定二者的权重系数,得出公式如下所示:

$$\lambda_i = \varepsilon_1 \cdot \lg N + \varepsilon_2 \cdot K. \quad (3)$$

式中: ε_1 和 ε_2 均为随机森林算法确定的权重。

恢复速率与传播速率类似,同样引入随机森林算法确定相关系数权重,拟合公式如下所示:

$$\mu_i = \varepsilon_3 \cdot \lg N + \varepsilon_4 \cdot (1 - K). \quad (4)$$

式中: ε_3 和 ε_4 均为随机森林算法确定的权重。

本文采用随机森林算法进行权重分析,将资料数据划分为训练集和验证集,使用随机森林分类器

进行训练,取验证集上的准确率作为权重,并对验证集的计算结果进行加权平均,最终得出加权后的计算结果作为相关系数的权重。计算确定恢复速率与传播速率后,可通过仿真道路网络中各条道路的 SIR 拥堵传播过程,以此来分析不同道路拥堵对于整体城市交通路网的影响。

2 案例仿真

利用从开源数据网站获取的南京市秦淮区某区域路网数据进行案例仿真,并通过建立的 SIR 模型对道路网络拥堵的各项参数进行研究分析,探究道路拥堵对城市交通网络的影响。

2.1 路网对偶拓扑网络构建及数据获取

本文以南京市秦淮区某区域路网数据为数据集进行研究,该区域临近新街口商业区,工作日路网交通压力较大,有明显的拥堵传播现象,选择工作日数据来进行仿真。在该数据集中,采用第 1 节介绍的路网对偶拓扑网络构建方法,去除交通量较少和道路等级较低的道路,并对剩余的主次道路进行编号处理,得到该区域有 69 条可进行分析的道路,如图 3 所示。



(a) 区域现状图



(b) 路网结构图

图 3 南京秦淮区某区域现状及路网结构图

Figure 3 Area current status and road network structure illustration of Qinhuai District, Nanjing

利用城市路网对偶拓扑网络构建规则,基于南京市秦淮区某区域路网结构数据,结合道路的连接关系生成区域道路网络邻接矩阵,并通过区域道路网络邻接矩阵生成路网对偶拓扑网络结构图,如图 4 所示。从图 4 中可以获取以下信息:网络中的 69 个节点与区域主要分析道路相匹配,163 条弧与区

域道路的连接关系相匹配。同时可以从图 4 中导出各个节点的节点度信息。

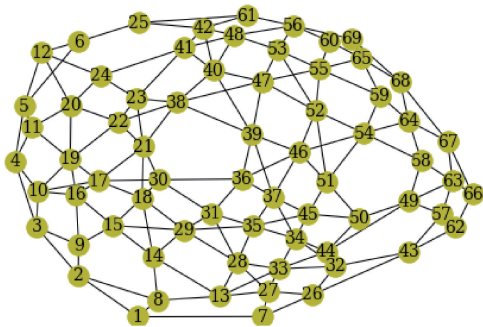


图 4 路网对偶拓朴网络结构图

Figure 4 Dual topology network structure diagram of urban road network

2.2 仿真结果分析

2.2.1 参数计算

研究区域在南京市秦淮区,西起中山南路,东到内环东线,北至中山东路,南达白下路,研究路网由区域内各等级道路组成,并采用研究区域内一周的高峰时段道路饱和度的平均值作为各个节点的道路饱和度。调查时间为 2023 年 12 月 3 日至 12 月 9 日。研究区域内流量较为平均,周围地块属性种类

较多,有一定的代表性,且本文研究重点在传播规律,前期简化路网时忽略了交通流向,故所选区域交通特征有一定的代表性,可以作为验证传播规律的算例。而后引入随机森林算法对 N 与 K 的权重进行计算,得出 $\varepsilon_1 = 0.173\ 2$ 、 $\varepsilon_2 = 0.826\ 8$ 、 $\varepsilon_3 = 0.172\ 4$ 、 $\varepsilon_4 = 0.827\ 6$ 。随后根据式(3)、式(4)计算得出的传播速率 λ 及恢复速率 μ ,结果如表 1 所示。

2.2.2 结果分析

利用计算获得的相关拥堵参数数据,根据建立的 SIR 模型构建拥堵传播图进行仿真,每次仿真选取一个路段节点作为初始拥堵节点,通过几次预仿真实验发现所有路段节点传播均在 30 min 之内完成全部的拥堵-恢复过程,故选定每次仿真时间为 30 min。选取节点 3 作为初始拥堵节点的拥堵传播过程,在传播过程中第 0、3、6、9、13、19 分钟的网络状态图如图 5 所示,其中蓝色节点为仍未传播到的节点,红色节点为拥堵节点,绿色节点为恢复态节点,由于 19 min 后整体网络均处在恢复状态,网络不再发生变化,故未展示 19 min 后的网络节点状态图。

表 1 节点属性及传播、恢复速率

Table 1 Node attributes, propagation rates and recovery rates

序号	N	K	λ	μ	序号	N	K	λ	μ	序号	N	K	λ	μ
1	3	0.36	0.380	0.612	24	4	0.69	0.675	0.360	47	6	0.65	0.672	0.424
2	4	0.65	0.642	0.393	25	3	0.83	0.769	0.223	48	5	0.62	0.634	0.435
3	4	0.82	0.782	0.253	26	4	0.52	0.534	0.501	49	5	0.71	0.708	0.361
4	4	0.56	0.567	0.468	27	5	0.74	0.733	0.336	50	4	0.53	0.542	0.493
5	4	0.64	0.633	0.402	28	6	0.47	0.523	0.573	51	5	0.55	0.576	0.493
6	3	0.32	0.347	0.645	29	6	0.62	0.647	0.449	52	6	0.37	0.441	0.656
7	3	0.62	0.595	0.397	30	5	0.63	0.642	0.427	53	5	0.54	0.568	0.501
8	4	0.43	0.460	0.576	31	5	0.46	0.501	0.567	54	6	0.46	0.515	0.581
9	4	0.31	0.361	0.675	32	5	0.37	0.427	0.642	55	6	0.51	0.556	0.540
10	5	0.27	0.344	0.725	33	6	0.43	0.490	0.606	56	3	0.63	0.604	0.388
11	4	0.35	0.394	0.642	34	6	0.42	0.482	0.614	57	4	0.45	0.476	0.559
12	4	0.41	0.443	0.592	35	6	0.46	0.515	0.581	58	4	0.51	0.526	0.509
13	5	0.51	0.543	0.526	36	5	0.63	0.642	0.427	59	4	0.55	0.559	0.476
14	5	0.71	0.708	0.361	37	6	0.38	0.449	0.647	60	3	0.64	0.612	0.380
15	5	0.42	0.468	0.601	38	6	0.78	0.780	0.316	61	3	0.86	0.794	0.198
16	5	0.37	0.427	0.642	39	6	0.67	0.689	0.407	62	3	0.86	0.794	0.198
17	6	0.44	0.499	0.598	40	6	0.7	0.714	0.382	63	5	0.84	0.816	0.253
18	6	0.38	0.449	0.647	41	5	0.39	0.444	0.625	64	5	0.55	0.576	0.493
19	6	0.78	0.780	0.316	42	5	0.40	0.452	0.617	65	5	0.63	0.642	0.427
20	5	0.67	0.675	0.394	43	4	0.77	0.741	0.294	66	3	0.74	0.694	0.297
21	6	0.73	0.738	0.358	44	5	0.45	0.493	0.576	67	4	0.75	0.724	0.311
22	5	0.45	0.493	0.576	45	5	0.52	0.551	0.518	68	4	0.83	0.791	0.244
23	5	0.52	0.551	0.518	46	6	0.55	0.590	0.507	69	3	0.70	0.661	0.331

在路网对偶拓扑网络结构中,从拥堵态节点的数目变化过程可以明显看出拥堵是在传播还是在消散。SIR 模型作为一种三态模型,可以较好地模拟仿真现实道路的拥堵传播状态。同时,通过节点状态图,可获取每个节点受到影响的大致时间,其中处在拥堵态时间越长的道路,受到初始拥堵态节点的影响越大。此外,节点度较大的节点,一般更容易受到其他节点的影响,具体表现为选定不同的初始拥堵节点时,其均会受到影响,且在较长的时间后才会恢复正常状态。

仿真实验还可得出各个路段对于整体路网的影响,具体表现为该路段影响下路网的拥堵恢复曲线。为去除随机误差的影响,本文在每次仿真过程中进行了 100 次迭代,并取 100 次结果的平均值作为最终结果。选取 4 个能够明显代表不同的拥堵传播状态的节点,其中 10 号节点的 λ 远小于 μ ,55 号节点的 λ 略大于 μ ,28 号节点的 λ 略小于 μ ,63 号节点的 λ 远大于 μ ,具体结果如图 6 所示。通过对比这 4 个节点的拥堵-恢复曲线图,分析城市道路的拥堵传播规律。

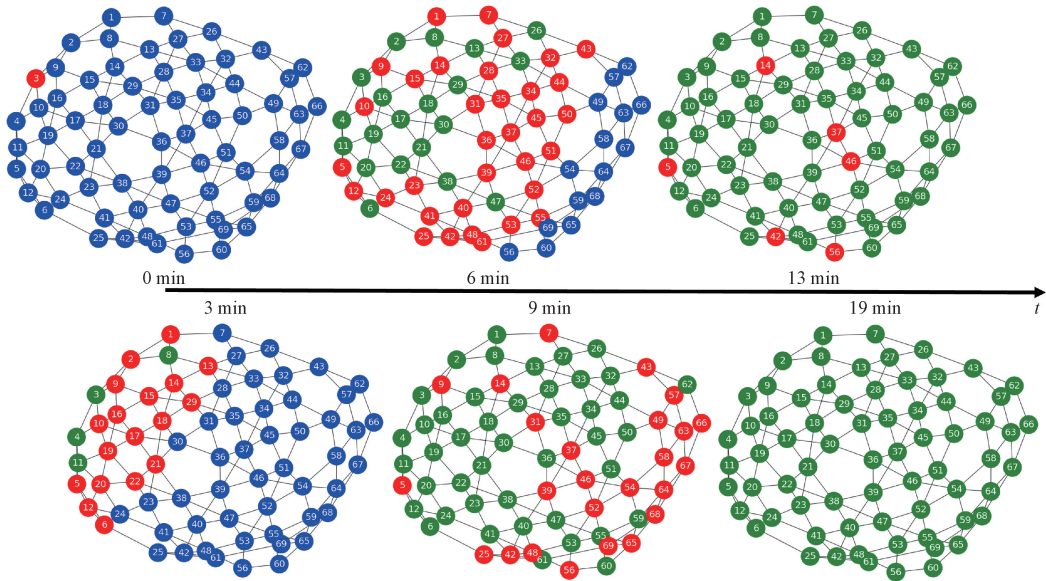


图 5 网络节点状态图
Figure 5 Network node state diagram

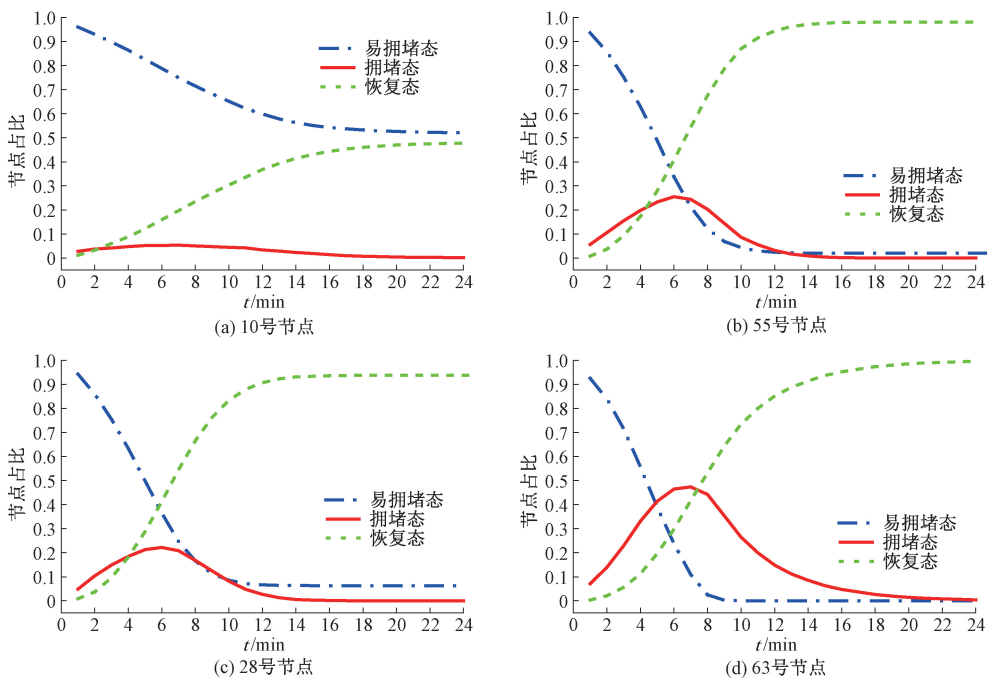


图 6 SIR 模型拥堵和恢复曲线
Figure 6 SIR model congestion and recovery curves

从图 6 中可以看出,当 $\lambda \ll \mu$ 时,拥堵不会随时间传播,整体路网处在较为畅通的状态;当 λ 与 μ 相近时,拥堵会在较短时间内进行传播,但很快会消散,路网整体保持相对畅通的状态;当 $\lambda \gg \mu$ 时,拥堵开始传播,拥堵路段占比会随时间逐渐增多,并在到达一个极值后逐渐恢复为正常状态。在此期间 λ 与 μ 的差距越大,拥堵道路占比所能达到的极值也越高,同时,在到达极值后所需的恢复时间也越长。 λ 和 μ 的相互关系影响着该段道路在拥堵传播过程中对整体路网的影响程度。

2.3 参数扰动分析

λ 和 μ 受道路节点度 N 和道路饱和度 K 的影响。为进一步探究道路节点度 N 和道路饱和度 K 对城市道路拥堵传播的影响,本文选取两组特殊的数据进行模拟仿真,分别固定道路节点度 N 和道路饱和度 K ,而后对另一影响因素进行扰动分析。

针对固定值的确定,原则上可以采用研究范围内的任一数值,但为了方便进行分析,应采用仿真结果较为明显的数组进行展示。道路饱和度 K 处在 0.6 以上时,道路处于拥堵状态,拥堵曲线的变化较为明显,而 K 值过大时会导致道路节点度 N 的影响不易分辨,故本文选取 $K=0.65$,取此时研究区域中的节点度 $N=3、4、5、6$ 分别计算,运行 SIR 模型后,取拥堵曲线作为分析对象,仿真结果如图 7 所示。从图 7 可以看出,道路节点度 N 对于拥堵传播的影响程度相对较小,各条曲线之间没有明显的差异,且在道路饱和度相同的情况下,道路节点度越大,道路拥堵传播的范围会略微增大,增大范围在 5% 以内;但同时,拥堵到达极值和拥堵消散的时间也相对缩短,时间影响在 10% 左右。

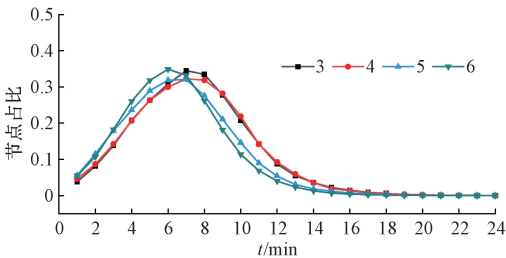


图 7 道路节点度 N 对道路拥堵传播的影响
Figure 7 Influence of road node degree N on road congestion propagation

在道路节点度方面,本文研究区域中节点度为 5 的道路较多,所包含的道路饱和度范围也较广,故取 $N=5$ 。在节点度为 5 的道路中选取部分道路的饱和度进行仿真,同样取拥堵曲线进行分析,仿真结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,道路饱和度对道

路拥堵传播影响相对较大,各个曲线之间差异较为明显。其中,随着道路饱和度的增长,道路拥堵传播所影响的范围也越来越大,影响增长最大可达 40%;虽然在低饱和度道拥堵范围的峰值到达的时间相对较慢,但是从整体看,饱和度越大,拥堵影响所需的恢复时间也越长,时间影响在 20% 左右。

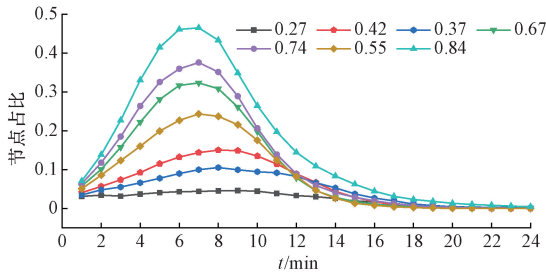


图 8 道路饱和度 K 对道路拥堵传播的影响
Figure 8 Influence of saturation level K on road congestion propagation

3 结论

本文采用城市路网对偶拓扑网络,并基于 SIR 构建了离散化的城市道路交通拥堵传播模型,通过引入随机森林算法进行模型中相关参数的标定。选取南京市秦淮区某区域实际路网作为研究对象,应用了拥堵传播模型进行仿真研究,并根据仿真结果对城市道路的拥堵传播进行分析,得出结论如下。

(1) λ 和 μ 的相互关系决定着拥堵是否会在道路网络中传播,当 $\lambda \ll \mu$ 时,拥堵不会随时间传播;当 λ 与 μ 相近时,拥堵会在较短时间内进行传播,但很快会消散;当 $\lambda \gg \mu$ 时,拥堵开始传播,拥堵路段占比随时间增多,在到达极值后逐渐恢复为正常状态。

(2) 道路节点度 N 对拥堵传播的影响相对较小,且与节点位置有着密切联系,在道路饱和度 K 相同的情况下,节点度越大,道路拥堵传播的范围会略微增大,增大范围在 5% 以内,拥堵到达极值和拥堵消散的时间会在一定程度上缩短,时间影响在 10% 左右。

(3) 道路饱和度 K 对拥堵传播的影响显著,与传播范围呈正相关,饱和度越高,到达拥堵极值的时间越快,拥堵影响的范围越大;随着饱和度的增加,影响增长最大可达 40%,拥堵消散的时间也越长,时间影响在 20% 左右。

本文提出的方法目前仅能适用于短期交通拥堵传播的仿真研究,在此基础上考虑车流方向、长时间多次重复拥堵及部分路段拥堵溢出后负载重分配等情况是下一步研究工作的重点。

参考文献:

- [1] SUN H J, WU J J, MA D, et al. Spatial distribution complexities of traffic congestion and bottlenecks in different network topologies[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 38(2): 496–505.
- [2] WEI L, CHEN P, MEI Y, et al. A hierarchical control framework for alleviating network traffic bottleneck congestion using vehicle trajectory data[J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2023; 1–23.
- [3] HAMEDMOGHADAM H, ZHENG N, LI D Q, et al. Percolation-based dynamic perimeter control for mitigating congestion propagation in urban road networks [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 145: 103922.
- [4] 罗荣辉, 袁航, 钟发海, 等. 基于卷积神经网络的道路拥堵识别研究[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2019, 40(2): 18–22.
LUO R H, YUAN H, ZHONG F H, et al. Traffic jam detection based on convolutional neural network [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2019, 40(2): 18–22.
- [5] ZENG J, XIONG Y, LIU T Y, et al. Uncovering the spatiotemporal patterns of traffic congestion from large-scale trajectory data: a complex network approach [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2022, 604: 127871.
- [6] WANG J W, HE J L, CHEN W, et al. Abnormal dynamics of cascading edge failures with congestion effect [J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2018, 29(10): 1850095.
- [7] LUAN S, KE R M, HUANG Z, et al. Traffic congestion propagation inference using dynamic Bayesian graph convolution network [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 135: 103526.
- [8] CHEN Y T, MAO J N, ZHANG Z, et al. A quasi-contagion process modeling and characteristic analysis for real-world urban traffic network congestion patterns[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2022, 603: 127729.
- [9] WANG Z S, GUO Q T, SUN S W, et al. The impact of awareness diffusion on SIR-like epidemics in multiplex networks [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2019, 349: 134–147.
- [10] 代晓旭, 胡明华, 田文, 等. 利用传染病模型研究空中交通拥挤传播规律[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2015, 15(6): 121–126.
DAI X X, HU M H, TIAN W, et al. Mechanisms of congestion propagation in air traffic management based on infectious diseases model [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2015, 15(6): 121–126.
- [11] 贾锦秀, 朱昌锋, 方劲皓, 等. 基于 SIR 的多层次轨道交通客流拥堵传播研究[J]. *兰州交通大学学报*, 2023, 42(3): 39–45.
JIA J X, ZHU C F, FANG J H, et al. Research on congestion propagation of multi-level rail transit passenger flow based on SIR[J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2023, 42(3): 39–45.
- [12] ZENG Z L, LI T X. Analyzing congestion propagation on urban rail transit oversaturated conditions: a framework based on SIR epidemic model [J]. *Urban Rail Transit*, 2018, 4(3): 130–140.
- [13] SABERI M, HAMEDMOGHADAM H, ASHFAQ M, et al. A simple contagion process describes spreading of traffic jams in urban networks [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 1616.
- [14] 姚佼, 鲍雨婕, 李俊杰. 交通事故下基于 CA-SIR 模型的高速公路拥挤传播 [J]. *公路交通科技*, 2023, 40(4): 170–178.
YAO J, BAO Y J, LI J J. CA-SIR model based congestion propagation of expressway in accident scenario [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2023, 40(4): 170–178.
- [15] 陈玉婷, 晏启鹏, 毛剑楠, 等. 基于 SIS 传播理论的城市交通拥堵传播模型 [J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(6): 103–110.
CHEN Y T, YAN Q P, MAO J N, et al. Urban traffic congestion propagation model based on SIS propagation theory [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2023, 42(6): 103–110.
- [16] 张俊峰, 马昌喜, 吴芳, 等. 复杂城市交通网络拥堵传播的改进 SIS 模型 [J]. *交通运输研究*, 2015, 1(6): 20–25.
ZHANG J F, MA C X, WU F, et al. Improved SIS model of congestion propagation of complex urban traffic network [J]. *Transport Research*, 2015, 1(6): 20–25.
- [17] WANG J W, ZOU L Z, ZHAO J, et al. Dynamic capacity drop propagation in incident-affected networks: traffic state modeling with SIS-CTM [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2024, 637: 129536.
- [18] PORTA S, CRUCITTI P, LATORA V. The network analysis of urban streets: a primal approach [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2006, 33(5): 705–725.
- [19] MARFIA G, ROCCETTI M. Vehicular congestion detection and short-term forecasting: a new model with results [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011,

60(7): 2936–2948.

[20] CHOW A H F, SANTACREU A, TSAPAKIS I, et al. Empirical assessment of urban traffic congestion [J]. Journal of Advanced Transportation, 2014, 48 (8): 1000–1016.

[21] NGUYEN H, LIU W, CHEN F. Discovering congestion propagation patterns in spatio-temporal traffic data [J]. IEEE Transactions on Big Data, 2017, 3(2): 169–180.

[22] MA X L, DAI Z, HE Z B, et al. Learning traffic as images: a deep convolutional neural network for large-scale transportation network speed prediction [J]. Sensors, 2017, 17(4): 818.

[23] 叶晓飞, 包哲宁, 邓社军, 等. 信息化条件下交通拥堵瓶颈识别与扩散判别 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2014, 38(5): 1060–1064.

[24] YE X F, BAO Z N, DENG S J, et al. Evaluating the impacts of travel information on urban traffic congestion propagation and bottlenecks identification [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2014, 38(5): 1060–1064.

[25] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程技术标准: JTG B01—2014 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.

[26] Ministry of Tansport of the People’s Republic of China. Technical standard of highway engineering: JTG B01—2014 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.

[27] LI Y, LIU Y L, ZOU K. Research on the critical value of traffic congestion propagation based on coordination game [J]. Procedia Engineering, 2016, 137: 754–761.

Analysis of Congestion Propagation in Urban Road Networks Based on the SIR Model

ZHENG Changjiang¹, ZHOU Sida¹, ZHENG Shukang², MA Genghua³, ZHANG Bo¹, DAI Jinwen¹
(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: It is crucial to studying the propagation patterns of urban traffic congestion in alleviating traffic problems. A propagation model of urban traffic congestion based on the SIR to analyze the propagation process of urban traffic congestion was established. Firstly, the road dual topology network was constructed according to the actual urban road network. The traffic congestion propagation model was developed based on the SIR. Considering the complex network characteristics of road networks and the relevant attributes of roads themselves, the random forest algorithm was introduced to compute the corresponding weights, determining key parameters such as the propagation rate in the congestion model. Subsequently, using a specific area road network in Qinhuai District, Nanjing City as an example, a city road dual topology network with 69 nodes and 163 links was constructed for simulation experiments. The results indicated that road node degree and road saturation were key factors influencing the spread of road congestion. The impact of road node degree was relatively small, with the propagation range increasing by within 5% and the recovery time being affected by around 10%. In contrast, the impact of road saturation was relatively large. As saturation increased, the propagation range could grow by up to 40%, and the recovery time could be affected by around 20%.

Keywords: SIR model; urban traffic; congestion propagation; road node degree; road saturation