

中图法分类号: P208 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)09-1197-09

论文引用格式: 段滢滢, 陆锋. 不同表达粒度对城市路网结构健壮性评价的影响[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(9): 1197-1205. [DOI: 10.11834/jig.20130919]

不同表达粒度对城市路网 结构健壮性评价的影响

段滢滢, 陆锋

中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

摘要: 城市道路网络结构的健壮性评价需要量化分析不同类型攻击对路网结构的影响。然而, 城市路网拓扑结构在不同表达粒度下具有不同特征, 对各种类型攻击的敏感性也存在差异。本文对城市道路网络进行不同表达粒度下的对偶图建模, 并借鉴复杂网络中基于网络结构特征刻画的持续性模拟攻击方法, 通过观测随机攻击和目的性攻击过程中城市路网结构的变化过程, 评估不同表达粒度对城市路网结构健壮性评价的影响。研究选择了6个不同空间形态的城市路网作为实验路网。结果表明, 在相同表达粒度下, 对于随机攻击或目的性攻击, 不同形态的城市路网结构变化过程具有相似特征, 但同一城市路网在不同表达粒度下, 受到攻击时的结构演变特征有较大差异。因此面向不同应用时需要选择合适的表达粒度来评价路网健壮性。路段粒度适用于评价点状事件造成的交通中断对路网的影响, 可以为突发事件应急方案的制定提供依据; 路链粒度适用于评价线状事件如整条道路交通管制或改为单行线时对路网的影响, 可以辅助交通管理部门制定合理的交通管制方案; 社区粒度适用于评价影响范围较大的交通事件如大型文体活动等面状事件对城市交通的影响, 同时该表达粒度顾及了道路的区域联动, 更适用于动态交通环境下的路网健壮性评价。

关键词: 城市路网; 健壮性; 表达粒度; 复杂网络; 社区发现

The impact of different granularity representations on robustness evaluation of city road network

Duan Yingying, Lu Feng

State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System,
 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Robustness analysis of city road networks requires the evaluation of structural change in networks under attacks. The difficulty of robustness analysis is that when modeled at different granularities city road network structures have different characteristics and show different sensitivities to various attacks. In this article, a city road network is first modeled as dual graph at three different granularities. Then, a series of successive simulated attacks are designed based on network structure characterization methods from complex network theory. The robustness analysis is carried out by characterizing the structural change of a city road network under these successive simulated attacks. Six world cities with different urban morphology forms are tested. The results show that at the same granularity, the performances of different city road network under attacks are similar. However, at different granularities, a city road network has quite different performance. Thus, it is important

收稿日期: 2012-11-05; 修回日期: 2013-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271408); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA12A211, 2013AA120305)

第一作者简介: 段滢滢(1984—), 女, 2012年于中国科学院地理科学与资源研究所获地理信息系统专业博士学位, 主要研究方向为交通GIS理论与技术、复杂网络分析等。E-mail: duanyy@reis.ac.cn

to choose appropriate representation granularity when conducting robustness analysis of city road network for a specific application. We argue that road network represented by segment is suitable for the evaluation on how traffic interruption at certain point affects the network and can provide suggestion on related emergency response. Road network represented by stroke is a good option when we want to evaluate how filiform traffic interruption affects the network and can help to decide traffic control strategies. Road network represented by community is more suitable for robustness analysis under the condition of big events that affect the traffic in a larger area. Moreover, community is an appropriate representation for robustness analysis in dynamic traffic environment since the zonal road traffic interactions could be taken into account.

Key words: city road network; robustness analysis; representation granularity; complex network; community detection

0 引言

城市道路网络结构健壮性(鲁棒性)是指相互连接的道路要素形成空间结构的稳健程度。路网结构健壮性评价旨在分析由于外界干扰引起部分道路失效时,路网整体功能结构的变化情况,可为城市规划、交通管理、路网优化、应急预案制订提供科学依据^[1]。

然而,城市路网结构的健壮性评价一直是难点问题。这是由于传统的研究需要通过分析大量社会经济数据(包括人口密度、出行需求、土地利用类型等)的变化来表征路网的健壮性^[2],这些数据获取困难,且可靠性低。网络科学研究人员很早就发现网络健壮性在很大程度上依赖于网络的结构^[3],因此从网络结构出发探讨其健壮性更为直接可行,且能够减少外部数据带来的不确定性。但是网络的结构特征体现在很多方面,包括道路的通达性和传输效率等,难以通过单一标准度量^[4],制约了路网结构健壮性研究。近年来新兴的复杂网络研究利用统计物理方法提出了网络结构特征识别方法。该方法通过一系列网络结构度量指标来描述网络的结构特征^[5],为量化研究网络结构与网络健壮性之间的关系提供了新的发展契机。

通过观测删除部分节点后网络结构的变化来评价网络健壮性的方法^[6]目前广泛应用于电力网络^[7]、供水管网^[8]等多种人工网络的健壮性评估中。同样地,道路网络的健壮性在很大程度上取决于道路网络的结构特征^[9]。目前国内也有一些研究以完整道路为研究对象,探讨某条特定道路失效对整体路网的影响^[10-12]。然而,不同的交通事件对城市路网的干扰不同,如小规模交通事故造成的影响比较有限,仅能导致点状道路交通中断;而交通管制通常作用于一条或多条连续道路,造成线状的道路交通中断;而大规模交通事故发生或大型文体

活动散场等情况通常会影响到一定范围内的道路,造成面状的交通中断。因此不同的情况需要不同的城市路网表达粒度。显然,不同表达粒度下的城市路网具有不同的结构特征。这些结构差异性是否会影响到路网健壮性评价结果,何种表达粒度更适合评价特定条件下城市路网结构健壮性,这些问题的研究目前十分匮乏。

针对上述问题,从路段、路链和社区3种表达粒度出发,对城市道路网络进行对偶图建模,利用复杂网络结构特征识别方法选择模拟攻击策略,分析受到持续性攻击时城市路网结构的变化过程,评价城市路网的结构健壮性,研究不同表达粒度对城市路网结构健壮性评价的影响。

1 城市路网表达粒度与建模

采用图结构来表达城市路网,定义为

$$G = (N, E) \quad (1)$$

式中 N 为图 G 中所有节点组成的集合, E 为 N 中所有节点之间存在的连接边的集合。由于研究所针对的观测对象是城市路网中的道路要素,因此采用对偶图^[13]方式表达路网,节点集 N 表示路网中的道路要素集合,包括路段、路链或社区3种不同的表达粒度,而 E 为道路要素之间存在的连接关系。

1.1 基于路段的城市路网模型

路段(road segment)是指城市道路中两个交叉口之间的道路片段,是城市道路网络最基本的组成单元。基于路段的城市路网模型如图1所示。

从图1可以看出,对偶图以路段为核心,可以更好地展现路段之间的连接关系。

1.2 基于路链的城市路网模型

路链(road stroke)是由路段依据其几何形态组成的道路实体链^[14]。采用自组织路链生成方法^[15],依据局部最优的自组织原则,将夹角较小的

道路段组合成较长的路链,并生成基于路链的城市路网对偶图,如图 2 所示。图 2(a)中,符合自组织原则的路段被识别为同一条路链。图 2(b)为以路链为节点、路链之间的连接为边得到的对偶图。可以看出,路段和路链两种表达粒度下的对偶图结构完全不同。

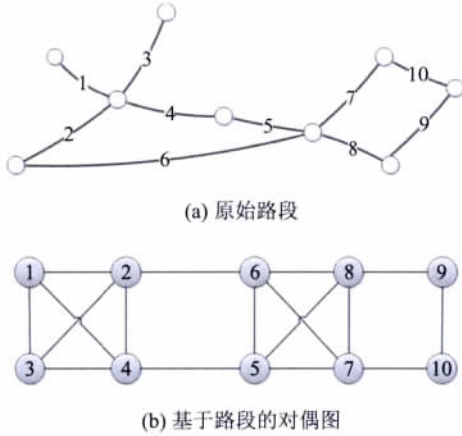


图 1 基于路段的城市路网模型
Fig. 1 Segment-based city road network

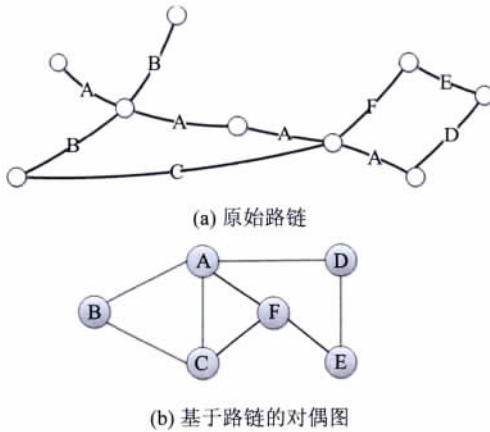


图 2 基于路链的城市路网模型
Fig. 2 Stroke-based city road network

1.3 基于社区的城市路网模型

复杂网络中若干联系紧密的节点往往是集聚的,形成空间集合。这种集合被称为社区(community)^[16]。社区可以在中观尺度上刻画网络的结构特征。城市路网中的社区类似于交通小区或商圈,每个社区包含若干连接紧密的路段。

通过基于标签的社区识别方法^[17],从拓扑关系紧密性角度对路段进行聚类,从而将城市路网划分为若干内部连接紧密、外部连接稀疏的社区^[18],然后将每个社区作为节点,社区间的联系作

为边,生成基于社区粒度的城市路网对偶图,如图 3 所示。

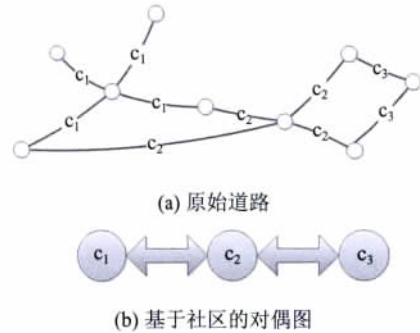


图 3 基于社区的城市路网模型
Fig. 3 Community-based city road network

社区发现方法可以通过路段之间的拓扑关系,识别出地理空间邻近且连接密切的路段集合。

2 网络结构特征刻画

评价路网健壮性首先需要量化描述网络的结构特征。最常见的网络结构特征刻画方法包括从微观尺度描述网络中每个节点的特征,和从宏观尺度描述网络整体的拓扑特征。

2.1 节点结构特征

微观尺度针对网络中每个节点或者某一类节点,通过一系列指标^[5],如节点度^[19]、中介性^[20]等来探讨节点的中心性,以判断节点在整个网络中的重要程度。

节点度(degree,也称为连接数(connectivity)) d_i 表示与节点*i*直接相连的节点数目,是衡量一个节点重要性的最基本度量指标,其计算公式为

$$d_i = \sum_{j \in N, j \neq i} e_{ij} \quad (2)$$

式中*N*为节点集合, i, j 为集合*N*中的两个不同节点, e_{ij} 表示节点*i, j*的连接情况。若节点*i*和*j*之间存在连接边,则 e_{ij} 为 1,否则为 0。节点度高的节点对网络中局部区域内节点之间的通达性有十分重要的作用,如城市中的立交桥、环岛等。

中介中心性度量经过节点的最短路径数量比例^[20],定义为

$$Bc(v) = \sum_{u \neq w \in V} \frac{\sigma_{uw}(v)}{\sigma_{uw}} \quad (3)$$

式中,*V*表示节点集合, σ_{uw} 表示节点*u*到*w*之间最短路径的条数,而 $\sigma_{uw}(v)$ 则表示这些最短路径中,经过节点*v*的数目。如果一个节点具有较高的中介

中心性,说明网络中的传输过程会频繁通过该节点,该节点在网络中具有重要的地位,如城市中的跨江大桥和快速路等。

2.2 网络整体结构特征

宏观尺度是从网络的全局出发分析网络结构^[21]。最基本的网络整体结构刻画指标为平均最短路径距离 l 和聚类系数 C ^[22]。

网络研究中一般定义连接两节点的最短路径所包含的节点数目为两点间的距离。平均最短距离 l 是所有节点对之间距离的平均值,其度量公式为

$$l = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{v \in V} \sum_{w \neq v \in V} d(v, w) \quad (4)$$

式中 n 表示网络中节点数目, $d(v, w)$ 表示节点 v 和 w 之间最短路径的长度。 l 越大,说明两节点之间信息传送的平均路径距离越长,阻抗就越大,则网络的全局传输效率越低。对于城市道路网络而言, l 越小,意味着出行者平均每次出行需要经由的道路越少,则网络的全局传输效率越高。

可以看出 l 与网络规模即节点数目 n 有较大关系。为了尽量降低网络规模对结构特征的影响,提出相对平均最短路径

$$L = \frac{l}{D} \quad (5)$$

式中 D 为网络的直径,即网络中两两节点间最短路径长度的最大值,即

$$D = \max(d(v, w)) \quad (6)$$

聚类系数 C 反映了网络中节点之间相互连接的紧密程度,本文中,网络整体的聚类系数 C 为所有节点聚类系数的平均值,即

$$C = \frac{1}{N} \sum_{v \in V} C_v \quad (7)$$

$$C_v = \frac{|\{e_{uv}: u, v \in N_i, e_{uv} \in E\}|}{k_v(k_v - 1)/2} \quad (8)$$

式中 C_v 表示节点 v 的聚类系数, N_i 为节点 v 所有邻居节点组成的集合, k_v 为集合 N_i 中包含的节点数目。可以看出,节点 v 的聚类系数为一个比值,分子为节点 v 所有的邻居节点之间存在的连接数,分母为节点 v 的 k_v 个邻居节点之间可能存在的最大连接数。这个比值反映的是节点 v 的所有邻居节点之间直接相连的比例。该比值越大,该节点所处的局部区域内节点两两直接相连的比例很高,则信息在该区域传输时经由节点少且有较多传输节点可供选择。因此 C 越大,网络的局部传输效率越高。

3 数据与方法

3.1 实验数据

受到城市自身规模、地形地貌和历史演化规律的影响和制约,不同城市路网的规模、形状和几何形态均有较大差异。从 Open Street Map (<http://www.openstreetmap.org/>) 上获取了全球范围内六大城市路网作为实验对象,以考察不同几何形态路网在不同表达粒度下的结构健壮性是否存在差异。其中包括 3 个欧洲城市哥本哈根、巴黎、伦敦和 3 个北美洲城市纽约曼哈顿、旧金山、多伦多,实验路网如图 4 所示。限于篇幅,3 种表达粒度下 6 个不同城

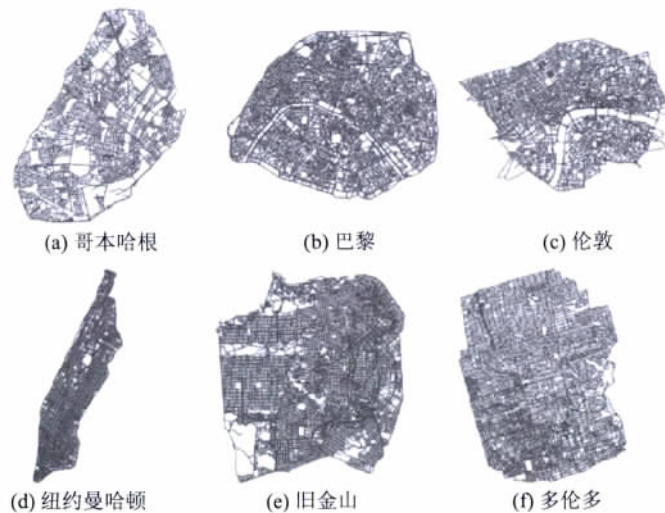


图 4 6 个实验城市路网

Fig. 4 Six city road networks

市路网的对偶图构建过程不再赘述。后文所指的路网结构均是指基于 3 种不同表达粒度构建的路网对偶图结构。

从图 4 可以看出,6 个城市路网各具特色。从规模看,哥本哈根和纽约曼哈顿规模较小,而其他 4 个城市路网规模较大;从形状看,纽约曼哈顿呈南北狭长状,与其他城市差异显著;从地理特征看,巴黎和伦敦均有河流穿过,将整个城市分为几个不同的地理区域;从几何形态看,3 个欧洲城市路网几何形态以放射状为主,城市道路大多环绕核心交叉口向周围发散,而 3 个北美城市路网几何形态以格网状为主,道路交叉口多为十字路口,不存在明显的核心交叉口^[23-24]。量化分析方法将用来研究这些不同城市路网之间结构健壮性的异同。

3.2 城市路网结构健壮性分析策略

网络健壮性分析的实质在于考察网络受到外界干扰或攻击时仍保持运转的能力^[25]。对于城市道路而言,一些极端天气或自然灾害的发生可能会导致某些道路或部分路段失效,这种情况下受到影响的道路并无特别的针对性,是随机的;而战争或恐怖袭击对城

市路网的恶意攻击,会针对重要的道路或交通设施。因此分析道路网的健壮性要同时考虑随机性攻击和目的性攻击下路网结构的变化情况。随机攻击策略较为简单,随机选中路网中的节点使其失效即可。而目的性攻击则要选择当前路网中最重要的节点进行攻击。本文设计了基于节点度和节点中介中心性的目的性攻击策略来决定每次模拟攻击时被选中的节点。

同时,尽管真实世界中无论是自然灾害或恐怖袭击,对路网的攻击次数和范围都是有限的。但仅针对个别道路或者路段的模拟攻击只能度量所涉及路段受到攻击时路网的健壮性,无法量化分析城市路网整体的结构健壮性。因此借鉴复杂网络结构健壮性分析方法,对城市路网进行持续性模拟攻击:每次删除路网中的一个节点及其所有连接,统计路网的结构变化,循环进行直至网络中所有节点都被删除或成为孤立节点,即路网完全崩溃为止。

随着网络中节点被依次删除,网络通常会产生孤立节点甚至分裂为多个互不连通的子网络。此时网络的破碎程度也是结构特征的重要度量指标。本

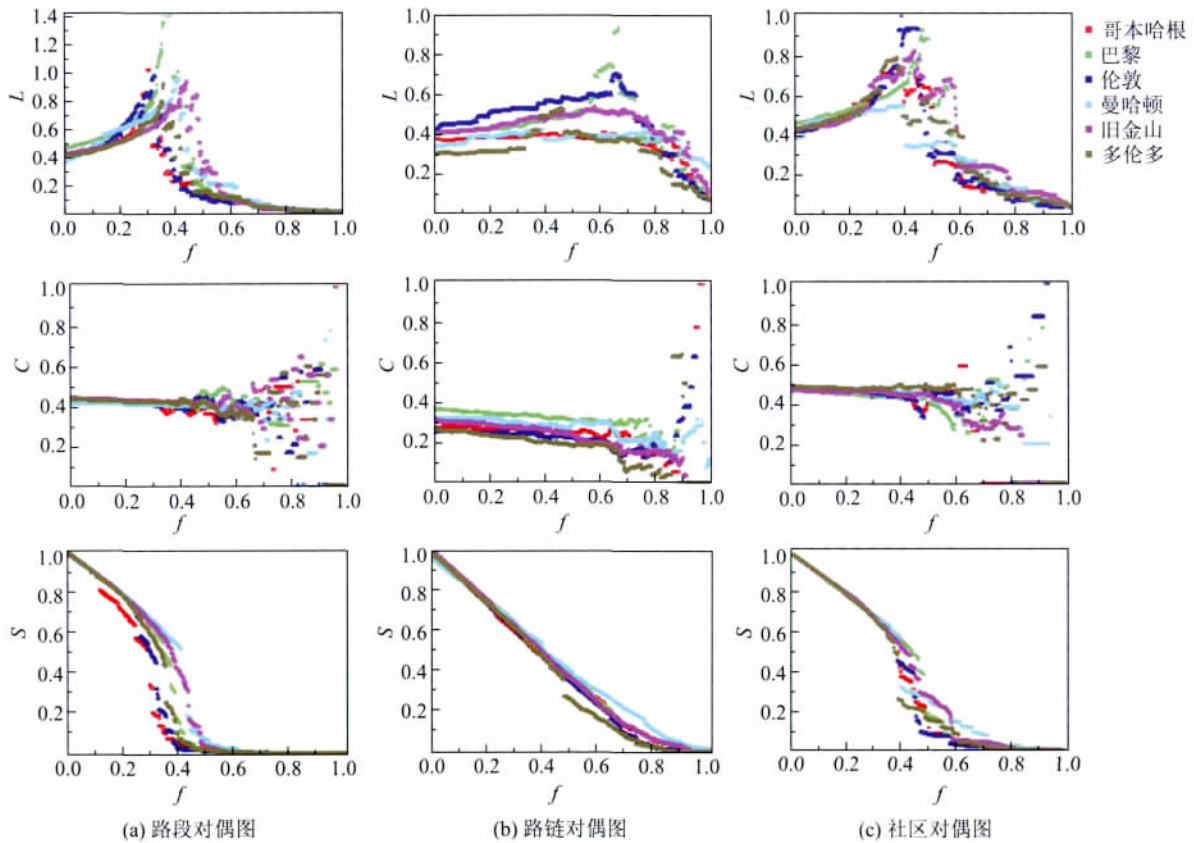


图 5 随机攻击下路网结构变化

Fig. 5 Road network structural changes under random attacks

文中,网络的破碎度通过网络中最大子图相对规模,即当前网络中最大连通子图与原始网络所包含的节点数目之比 S 来度量。

在此基础上,针对3种不同粒度下的城市路网结构采用3种攻击策略分别展开实验。依据攻击策略不同,每次随机或有目的地删除当前路网中的一个节点及其所有连接,统计此时网络的 L 、 C 和 S ,目的性攻击时还需重新计算当前网络中每个节点的度和中介中心性,该过程循环进行,直至 $S \approx 0$ 即网络崩溃为止。

4 结果分析

4.1 随机攻击下城市路网结构变化

采用随机攻击策略对3种表达粒度的6个城市路网结构进行模拟攻击,随着失效节点的增加,网络的相对平均最短路径 L 和聚类系数 C 的变化如图5所示。

图5展示了3种不同粒度(路段、路链和社区)表达的城市路网在受到持续性随机模拟攻击时的结构变化情况。图5中 X 轴为当前的攻击程度 f ,即

网络中被攻击的节点数与原始网络节点数的比值, Y 轴分别为当前网络结构特征度量指标 L 、 C 、 S 。从图5中可以看出,6个不同形态的城市路网在随机攻击下的结构变化过程并无显著差异,3种指标统计的网络结构变化过程均可大致分为3个阶段:1) 初期期, S 仅缓慢下降,说明攻击仅产生了一些孤立节点或规模较小的碎片,网络尚未分裂。但传输效率受到一定的影响,表现为 L 缓慢上升, C 缓慢下降,但大致保持平稳;2) 破碎期, S 迅速下降,说明网络开始分裂为多个规模接近且互不连通的子图,此阶段网络结构发生剧烈变化,表现为 L 大幅下降;3) 崩溃期, S 趋向于零,网络已基本失效。

4.2 基于节点度的目的性攻击下城市路网结构变化

图6展示了基于节点度的目的性攻击下城市路网的结构变化情况。

通过图6与图5对比可以看出,基于节点度的目的性攻击下路网结构变化也可分为3个阶段,但除了图6(a)的第1幅图(基于路段对偶图受攻击时 L 的变化图)外,每个阶段均更短,说明基于节点度

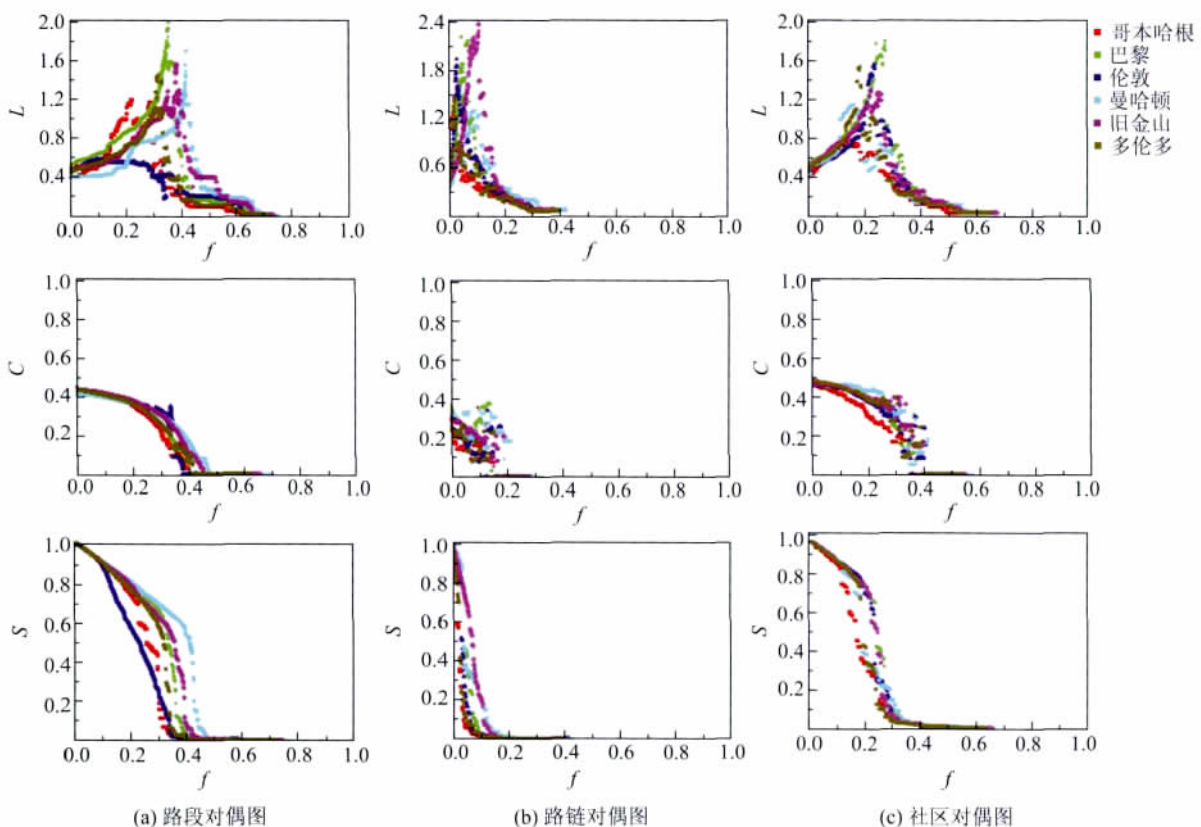


图6 基于节点度的目的性攻击下路网结构变化

Fig. 6 Road network structural changes under degree-based attacks

的目的性攻击对网络的破坏比随机攻击大。尤其是聚类系数 C 的变化下降十分显著, 且网络整体崩溃时, 被攻击的节点比例也小于随机攻击时失效节点比例。

4.3 基于节点中介中心性的目的性攻击下城市路网结构变化

图 7 展示了基于节点中介中心性的目的性攻击下城市路网的结构变化情况。

从图 7 可以看出, 基于节点中介中心性的目的性攻击对网络的破坏程度最为严重, 表现为网络分裂和崩溃时, 被攻击的节点比例明显低于其他两种攻击策略。尤其是 L 的变化十分显著, 几乎无法观测到 L 的先升后降过程, 而直接表现为急剧下降。但聚类系数 C 的变化则较为独特, 表现为持续上升。这说明基于节点中介中心性的攻击使得网络很容易分裂为内部连接紧密但与外界不连通的封闭子网络。

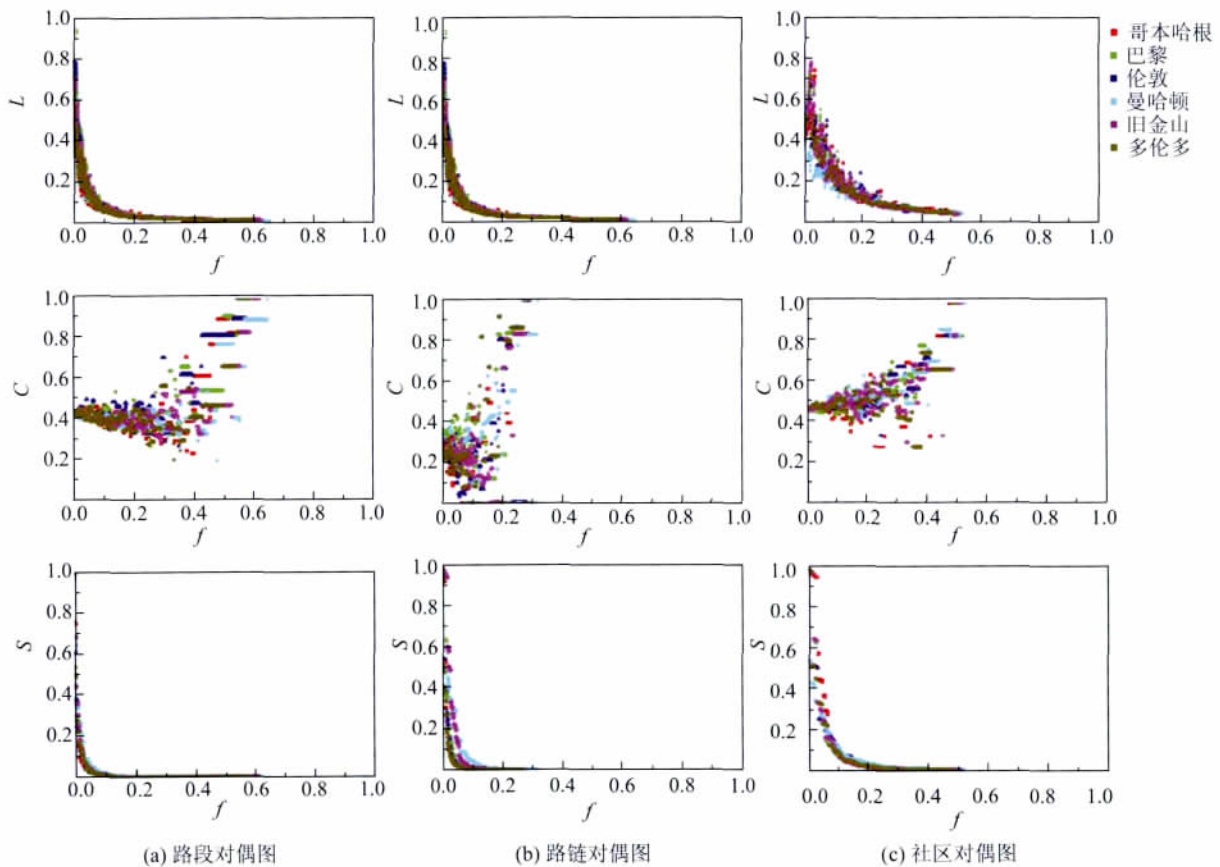


图 7 基于节点中介中心性的目的性攻击下路网结构变化

Fig. 7 Road network structural changes under betweenness-based attacks

4.4 3 种表达粒度对比

从图 5—图 7 的对比可以看出, 在同一种表达粒度下, 不同形态的城市路网受到攻击时结构变化特征十分接近。表现为每幅子图中不同颜色所代表的城市路网受到攻击时变化趋势一致。这种一致性说明, 路网的规模、形状和几何形态的差异对路网结构健壮性影响不大。但在不同表达粒度下, 不同的攻击策略对城市路网结构造成的影响差异显著。主要表现在:

1) 在路段表达粒度下, 基于节点度的目的性攻

击对路网结构的影响与随机攻击较为接近, 说明节点度不适用于评价路段的重要性;

2) 在路链表达粒度下, 路网在受到目的性攻击尤其是基于中介中心性的攻击时最易分裂和崩溃, 说明如主干道限行等事件所导致的大规模线状交通中断对城市交通影响很大, 易导致路网整体交通瘫痪;

3) 在社区表达粒度下, 随机攻击对路网的破坏最小; 针对节点度的攻击对网络局部效率影响最大; 针对节点中介中心性的攻击会导致网络较快破裂。

5 结 论

不同粒度的路网模型所表达出的网络结构差异性导致不同粒度下的城市路网健壮性评估结果存在不确定性。选择了3种不同表达粒度,分别从适宜考察点状道路交通中断的路段粒度、适宜考察线状交通中断的路链粒度和适宜考察面状交通中断的社区粒度出发构造路网对偶图,通过3种攻击策略,观察对偶图中元素失效时路网的结构变化情况来评估城市路网的健壮性,并利用该方法对6个不同形态的城市路网进行了实例分析。

实验结果表明,在同一种表达粒度下,不同形态的城市路网在受到攻击时的结构变化规律呈现出较强的一致性,无论是放射状还是格网状的路网,面对同样的攻击时,健壮性并无显著差异。证明本文研究结论具有一定的普适性。

但不同的攻击策略对不同表达粒度下的城市路网结构造成的影响差异显著,说明在面对不同应用需求时采用不同表达粒度的必要性。

路段粒度能够表征出点状交通中断对路网的影响,基于路段的路网健壮性研究结果表明,中介中心性高的路段是城市路网中最为关键和脆弱的环节,需要通过合适的基础设施改造和路径诱导策略加强保护。

路链粒度能够表征出线状交通中断对路网的影响,基于路链的健壮性研究结果表明,中介中心性高的道路被限制通行时对路网整体的连通性影响很大,因此在制定交通管制方案时,应尽量回避这类道路。

大规模交通意外发生时交通中断可能会由点扩散到面,社区粒度能够顾及这种道路交通的区域联动效应,表征出面状交通中断对路网的影响。基于社区的健壮性研究结果表明,节点度高的社区被攻击时易导致局部范围内社区之间的传输效率下降;而中介中心性高的社区受到攻击时对路网连通性的破坏很大。因此应重点监控这类社区的交通状况,尽量控制其交通拥堵扩散,同时易导致面状交通拥堵的设施如大型体育场馆、高密度居民小区等的修建,应尽量避开节点度和中介中心性高的社区。

受到模拟仿真实验条件限制,本文尚存在一些不足之处:

1) 社区作为一种新的路网表达粒度,其从模型构建到应用还需要进一步研究。包括如何选择合适的社区发现算法,如何确定社区中路段在交通上的相互影响程度等;

2) 为了对网络整体结构健壮性进行评价,选择了持续性模拟攻击,该方法能够在一定程度上弥补仅对单个节点攻击的片面性,但该方式过于极端,在真实世界中几乎不可能出现,仍有待改进;

3) 本文立足于静态的城市路网空间结构,但路网健壮性除了受到路网结构的制约外,实时交通也会产生很大的影响,未来研究应当考虑实时动态环境下路网的健壮性。

参考文献(References)

- [1] Yin Y, Madanat S M, Lu X Y. Robust improvement schemes for road networks under demand uncertainty [J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 198 (2): 470-479. [DOI: 10.1016/j.ejor.2008.09.008]
- [2] Jenelius E, Petersen T, Mattsson L G. Importance and exposure in road network vulnerability analysis [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2006, 40 (7): 537-560. [DOI: 10.1016/j.tra.2005.11.003]
- [3] Baran P. On distributed communications networks [J]. *IEEE Transactions on Communications Systems*, 1964, 12 (1): 1-9. [DOI: 10.1109/TCOM.1964.1088883]
- [4] Demšar U, špatenková O, Virrantaus K. Identifying critical locations in a spatial network with graph theory [J]. *Transactions in GIS*, 2008, 12 (1): 61-82. [DOI: 10.1111/j.1467-9671.2008.01086.x]
- [5] Costa L F, Rodrigues F A, Traviesso G, et al. Characterization of complex networks: a survey of measurements [J]. *Advances in Physics*, 2007, 56 (1): 167-242. [DOI: 10.1080/00018730601170527]
- [6] Holme P, Kim B J, Yoon C N, et al. Attack vulnerability of complex networks [J]. *Physical Review E*, 2002, 65 (5): 56109. [DOI: 10.1103/PhysRevE.65.056109]
- [7] Albert R, Albert I, Nakarado G L. Structural vulnerability of the north american power grid [J]. *Physical Review E*, 2004, 69 (2): 25103. [DOI: 10.1103/PhysRevE.69.025103]
- [8] Yazdani A, Jeffrey P. Complex network analysis of water distribution systems [J]. *Chaos*, 2011, 21 (1): 16111. [DOI: 10.1063/1.3540339]
- [9] Jenelius E. Network structure and travel patterns: explaining the geographical disparities of road network vulnerability [J]. *Journal of Transport Geography*, 2009, 17 (3): 234-244. [DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2008.06.002]
- [10] Zhang Y, Yang X G. Complex network property and reliability

- simulation analysis of urban street networks [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(2): 464-467. [张勇, 杨晓光. 城市路网的复杂网络特性及可靠性仿真分析 [J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(2): 464-467.]
- [11] Hu Y H, Wu Q M, Zhu D L. Topological properties and vulnerability analysis of spatial urban street networks [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2009, 6(3): 69-76. [胡一斌, 吴勤旻, 朱道立. 城市道路网络的拓扑性质和脆弱性分析 [J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2009, 6(3): 69-76.]
- [12] Yan W C, Zhang Y L, Zhao M X, et al. Complex network based reliability analysis of urban road networks [J]. *Shandong Science*, 2011, 24(2): 65-70. [闫文彩, 张玉林, 赵茂先, 等. 基于复杂网络的城市路网可靠性分析 [J]. *山东科学*, 2011, 24(2): 65-70.]
- [13] Porta S, Crucitti P, Latora V. The network analysis of urban streets: a dual approach [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2006, 369(2): 853-866. [DOI: 10.1016/j.physa.2005.12.063]
- [14] Thomson R C. Bending the axial line: smoothly continuous road centre-line segments as a basis for road network analysis [C]// *The 4th International Space Syntax Symposium*. London: University College London, 2003: 50(1-10).
- [15] Jiang B, Zhao S, Yin J. Self-organized natural roads for predicting traffic flow: a sensitivity study [J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2008, 2008(7): P07008. [DOI: 10.1088/1742-5468/2008/07/P07008]
- [16] Gulbahce N, Lehmann S. The art of community detection [J]. *Bioessays*, 2008, 30(10): 934-938. [DOI: 10.1002/bies.20820]
- [17] Raghavan U N, Albert R, Kumara S. Near linear time algorithm to detect community structures in large-scale networks [J]. *Physical Review E*, 2007, 76(3): 36106. [DOI: 10.1103/PhysRevE.76.036106]
- [18] Newman M E J, Girvan M. Finding and evaluating community structure in networks [J]. *Physical Review E*, 2004, 69(2): 26113. [DOI: 10.1103/PhysRevE.69.026113]
- [19] Diestel R. *Graph Theory* [M]. 2th ed. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 4-6.
- [20] Barthelemy M. Betweenness centrality in large complex networks [J]. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 2004, 38(2): 163-168. [DOI: 10.1140/epjb/e2004-00111-4]
- [21] Holme P, Zhao J. Exploring the assortativity-clustering space of a network's degree sequence [J]. *Physical Review E*, 2007, 75(4): 46111. [DOI: 10.1103/PhysRevE.75.046111]
- [22] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of "small-world" networks [J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442. [DOI: 10.1038/30918]
- [23] Jacobs A B. *Great Streets* [M]. Cambridge, MA: MIT press, 1993: 201-269.
- [24] Zhang Q, Centrum G. Modeling structure and patterns in road network generalization [C]// *Proceedings of Workshop on Generalization and Multiple Representation*. Leicester: ICA, 2004: 1-6.
- [25] Zeng A, Liu W. Enhancing network robustness against malicious attacks [J]. *Physical Review E*, 2012, 85(6): 66130. [DOI: 10.1103/PhysRevE.85.066130]