



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2013
09
VOL.18

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



城市交通规划 P1197



第18卷第9期（总第209期）

2013年9月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

2013 all rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995 010-82614429

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995 010-82614429

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元

综述

高分辨率遥感影像空间结构特征建模方法综述

秦昆, 陈一祥, 甘顺子, 冯霞, 任文力

1055

简缩极化SAR数据信息提取与应用

张红, 谢镭, 王超, 张波, 吴樊, 汤益先

1065

图像处理和编码

融合CCCTI码和谱系聚类的仿射配准

张桂梅, 江少波, 刘丕玉, 张松

1074

面向虚拟视点绘制的深度图滤波及上采样方法

高凯, 陈贺新, 赵岩, 耿英楠, 王钢

1085

图像分析和识别

包空间多示例图像自动分类

王科平, 杨艺, 王新良

1093

表情和姿态的双模态情感识别

闫静杰, 郑文明, 辛明海, 邱伟

1101

等级关联的粒子群迭代多目标检测跟踪

程旭, 李拟珺, 张索非, 吴镇扬

1107

改进后的TLD视频目标跟踪方法

周鑫, 钱秋朦, 叶永强, 王从庆

1115

多特征稳健主成分分析的视频运动目标分割

甘超, 王莹, 王向阳

1124

融合全局最好和声搜索算法的模糊C均值聚类图像分割

崔兆华, 高立群, 欧阳海滨, 李文娜

1133

从运动中恢复目标结构的改进因子分解法

邱少华, 文贡坚, 回丙伟, 张鹏

1142

计算机图形学

并行扫描转换结构中的状态管理

殷诚信, 韩俊刚, 黄虎才

1149

医学图像处理

3维颅骨表面模型的复杂孔洞修补

包佳蕊, 梁荣华, 吴福理, 黄鲜萍, 蒋莉, 陈矛

1156

归一化Radon变换和统计测度的超声图像肌束方向自动跟踪

李乔亮, 李振宇, 张会生, 张小飞, 陈昕, 陈思平, 汪天富

1164

遥感图像处理

改进的多光谱双边滤波图像融合

吴川, 杨冬

1170

长度归一化扫描的合成孔径雷达图像船舶尾迹恒虚警率检测

南杰, 张红, 王超, 吴樊, 张波

1176

地理信息技术

3D可视化输电线路中杆塔空间挂点计算

何国辉, 周聪

1184

地图符号服务与地图服务的耦合

焦东来, 张海涛, 闫国年, 姜杰

1190

不同表达粒度对城市路网结构健壮性评价的影响

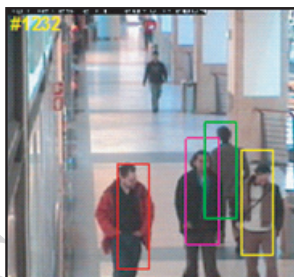
段滢滢, 陆锋

1197

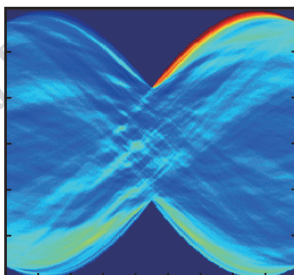
DEM保真精度量化描述模型

张锦明, 游雄

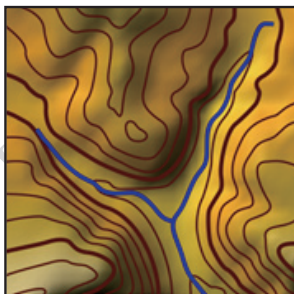
1206



等级关联的粒子群迭代多目标检测跟踪(第1107页)



归一化Radon变换和统计测度的超声图像肌束方向自动跟踪(第1164页)



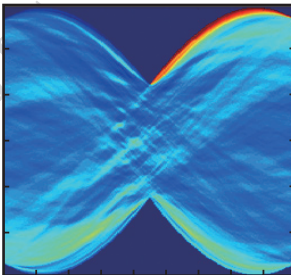
DEM保真精度量化描述模型(第1206页)

CONTENTS

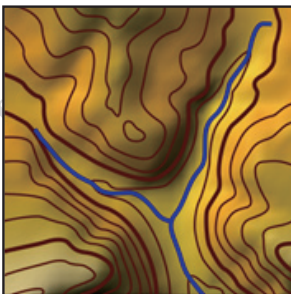
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Hierarchical associative multi-target detection and tracking with particle swarm optimization(P1107)



Automatic tracking of muscle fascicle orientation in ultrasound images: a approach based on a normalized Radon transform and statistical measure (P1164)



Quantitative descriptive model of DEM fidelity accuracy(P1206)

Review

Review on methods of spatial structural feature modeling of high resolution remote sensing images

Qin Kun, Chen Yixiang, Gan Shunzi, Feng Xia, Ren Wenli 1055

Information extraction and application of compact polarimetric SAR data

Zhang Hong, Xie Lei, Wang Chao, Zhang Bo, Wu Fan, Tang Yixian 1065

Image Processing and Coding

Affine registration based on CCCTI and hierarchical clustering

Zhang Guimei, Jiang Shaobo, Liu Piyu, Zhang Song 1074

Depth map filtering and upsampling method for virtual view rendering

Gao Kai, Chen Hexin, Zhao Yan, Geng Yingnan, Wang Gang 1085

Image Analysis and Recognition

Automatic classification of multiple-instance image based on the bag space

Wang Keping, Yang Yi, Wang Xinliang 1093

Bimodal emotion recognition based on body gesture and facial expression

Yan Jingjie, Zheng Wenming, Xin Minghai, Qiu Wei 1101

Hierarchical associative multi-target detection and tracking with particle swarm optimization

Cheng Xu, Li Nijun, Zhang Suofei, Wu Zhenyang 1107

Improved TLD visual target tracking algorithm

Zhou Xin, Qian Qiumeng, Ye Yongqiang, Wang Congqing 1115

Multi-feature robust principal component analysis for video moving object segmentation

Gan Chao, Wang Ying, Wang Xiangyang 1124

Improved fuzzy C-means clustering combined with the global best harmony search algorithm for image segmentation

Cui Zhaohua, Gao Liqun, Ouyang Haibin, Li Wenna 1133

Improved factorization method for structure from motion

Qiu Shaohua, Wen Gongjian, Hui Bingwei, Zhang Peng 1142

Computer Graphics

Efficient state management for parallel rasterization

Yin Chengxin, Han Jungang, Huang Hucai 1149

Medical Image Processing

Various hole repairing algorithm for 3D mesh surface models of human skull

Bao Jiarui, Liang Ronghua, Wu Fuli, Huang Xianping, Jiang Li, Chen Mao 1156

Automatic tracking of muscle fascicle orientation in ultrasound images: a approach based on a normalized Radon transform and statistical measure

Li Qiaoliang, Li Zhenyu, Zhang Huisheng, Zhang Xiaofei, Chen Xin, Chen Siping, Wang Tianfu 1164

Remote Sensing Image Processing

Improved multispectral bilateral filter video fusion algorithm

Wu Chuan, Yang Dong 1170

Ship wake constant false alarm rate detection algorithm in synthetic aperture radar images based on length normalized scanning

Nan Jie, Zhang Hong, Wang Chao, Wu Fan, Zhang Bo 1176

Geoinformatics

Tower hanging point calculation for transmission line on three-dimensional visualization

He Guohui, Zhou Cong 1184

Coupling of map symbol web service and web map service

Jiao Donglai, Zhang Haitao, Lv Guonian, Jiang Jie 1190

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

Duan Yingying, Lu Feng 1197

Quantitative descriptive model of DEM fidelity accuracy

Zhang Jinming, You Xiong 1206

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交通的区域联动, 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@leis.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,如小规模的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对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。

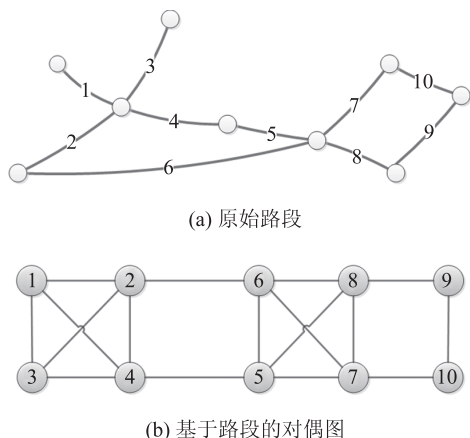


图1 基于路段的城市路网模型
Fig.1 Segment-based city road network

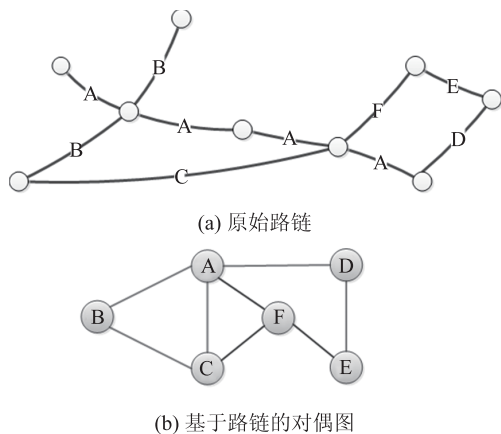


图2 基于路链的城市路网模型
Fig.2 Stroke-based city road network

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。

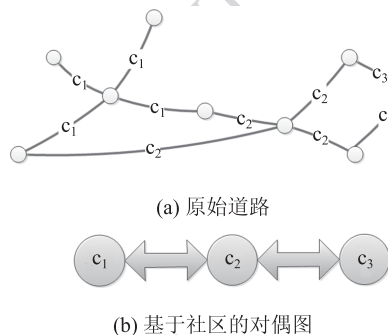


图3 基于社区的城市路网模型
Fig.3 Community-based city road network

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路网的结构特征。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

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

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

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

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

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

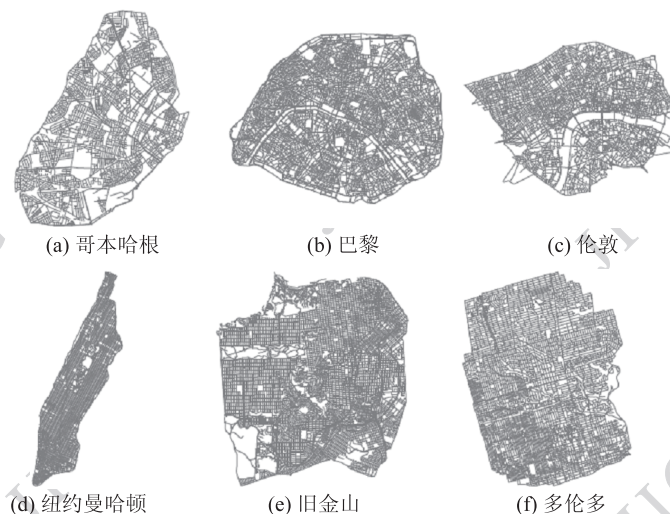


图 4 6 个实验城市路网

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]。定量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,无法定量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

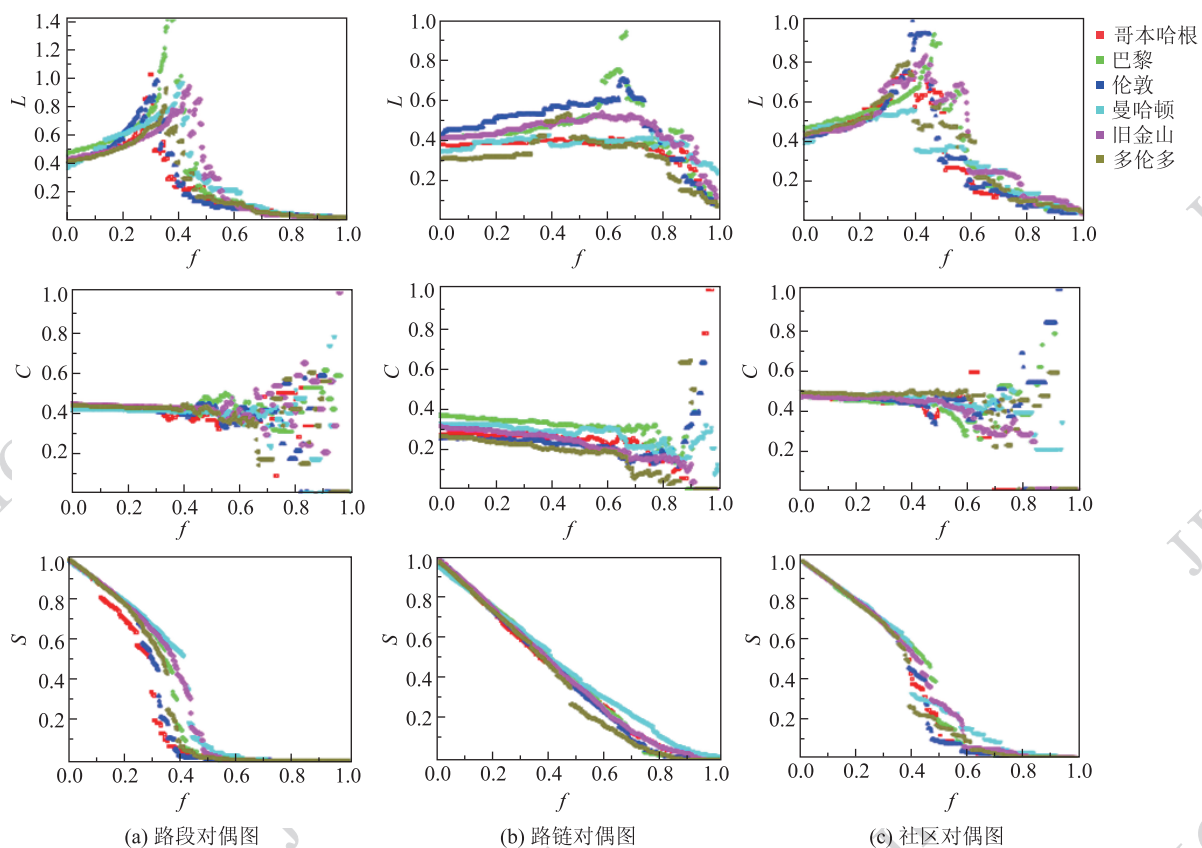


图5 随机攻击下路网结构变化

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) 初始期, 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

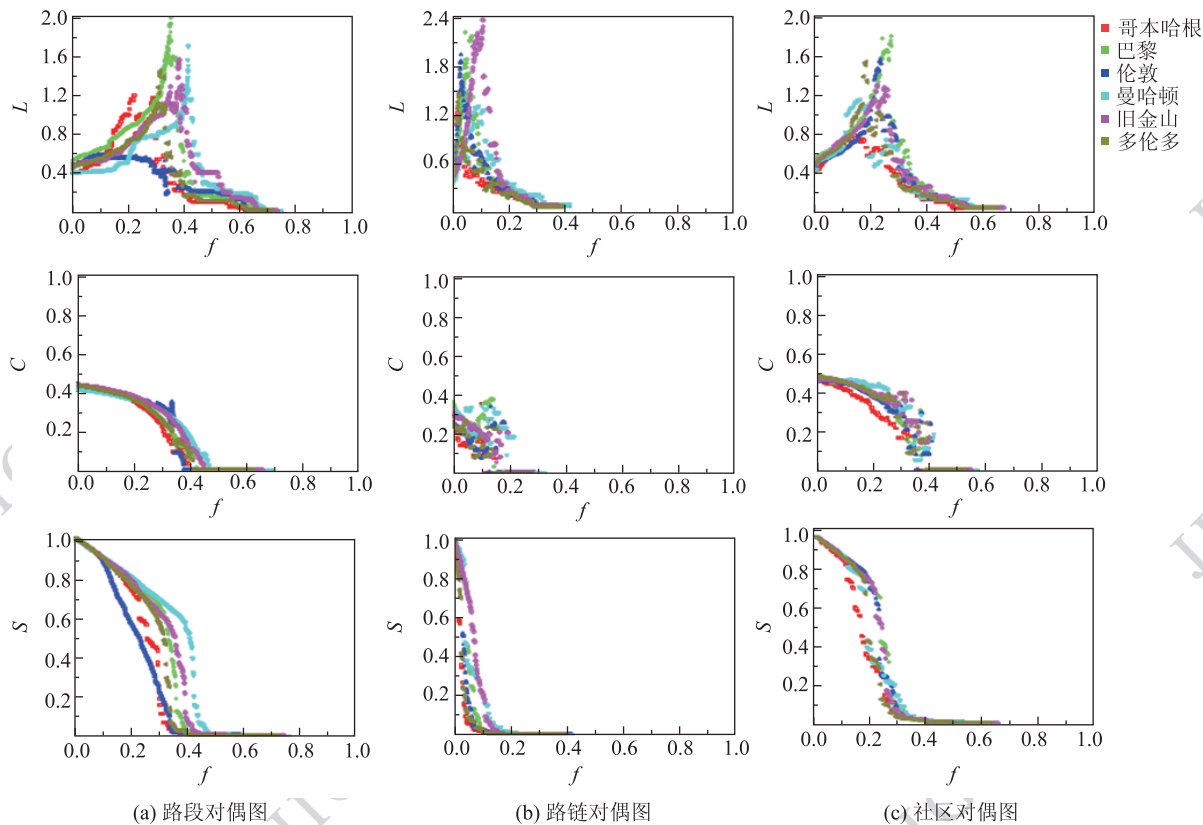


图 6 基于节点度的目的性攻击下路网结构变化

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。

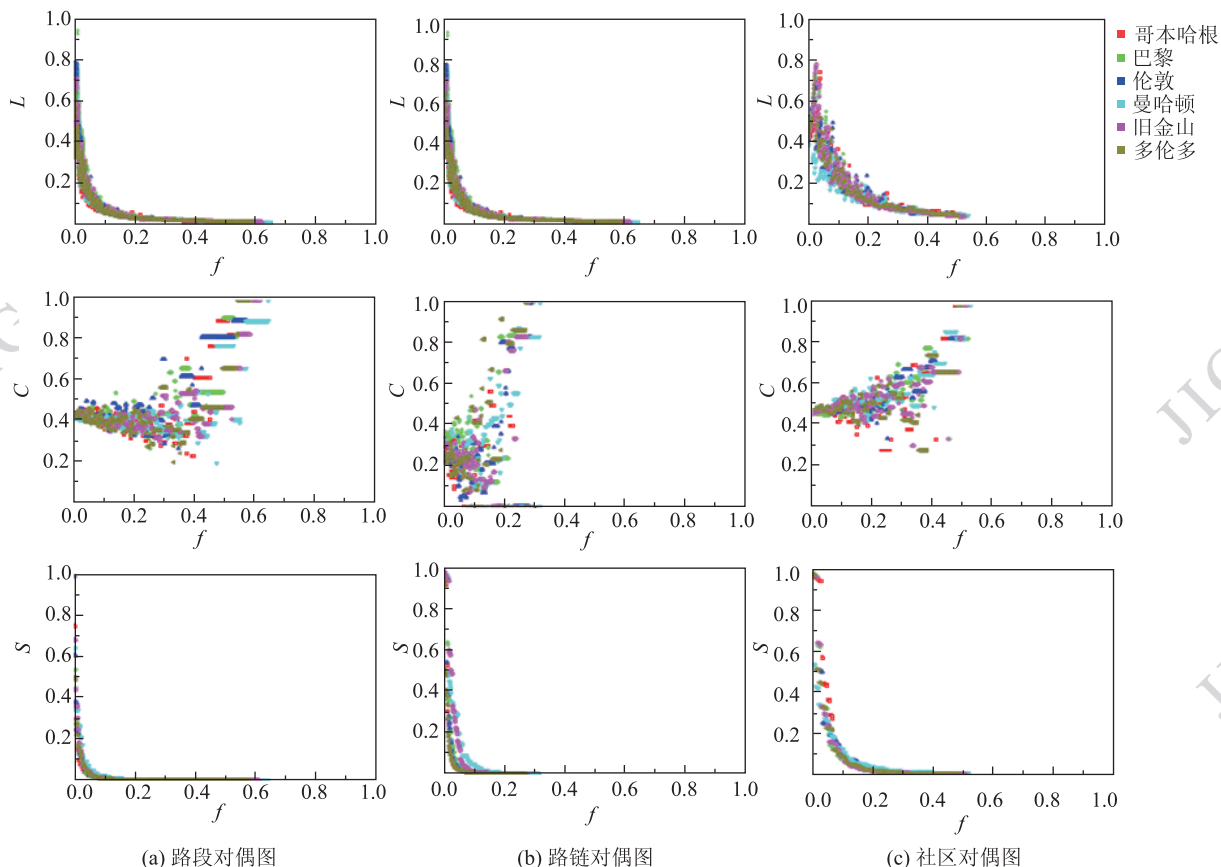


图7 基于节点中介中心性的目的性攻击下路网结构变化

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,应尽量避免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 L, 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. [胡一竑, 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]