

# 复杂网络理论的武汉市路网结构特征

王庆国, 张昆仑

(武汉科技大学 汽车与交通工程学院, 武汉 430065)

**摘要:** 针对武汉市路网的基本结构特征, 该文以道路 stroke 作为路网的基本结构单元, 以对偶拓扑图作为路网几何拓扑结构的表达形式, 基于复杂网络理论的相关定量分析指标, 进行了研究分析。通过对路网节点度分布的统计分析表明: 武汉市路网属于无标度网络; 通过对网络的平均聚类参数和平均网络距离的计算分析表明: 武汉市路网属于小世界网络; 以度中心性、中介中心性、接近中心性和长度为基本评价指标, 通过加权综合评价, 研究了武汉市路网的层次结构特征, 表明武汉市路网的结构构成符合“二八分率”的规律。

**关键词:** 城市交通; 路网结构; 复杂网络理论; 无标度网络; 小世界网络; 层次结构

【中图分类号】P208

【文献标志码】A

【文章编号】1009-2307(2019)04-0066-06

DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2019.04.011

## Research on the structure characteristics of Wuhan road network based on complex network theory

**Abstract:** Based on the quantitative parameters of complex network theory, the structure characteristics of Wuhan road network were studied by taking the road stroke as the basic structural element of the road network and the dual topology graph as the representation of geometrical and topological structure of the road network. Through the statistical analysis of the node degree distribution of the road network, it showed that Wuhan road network belonged to scale-free network. By calculating and analyzing the average clustering parameters and the average network distance, it showed that Wuhan road network belonged to small-world network. Based on the evaluation parameters of degree, betweenness centrality, closeness centrality and length, the hierarchical structure of Wuhan road network was studied by weighted comprehensive evaluation, which showed that the structure of Wuhan urban road network accorded with “20% and 80% rate” rule.

**Keywords:** urban traffic; structure of road network; complex network theory; scale-free network; small world network; hierarchical structure

WANG Qingguo, ZHANG Kunlun (School of Automobile and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

## 0 引言

城市交通系统是保障城市正常运转的重要基础。近年来, 随着城市的快速发展, 城市的交通,

尤其是中心城市的交通, 普遍表现出拥堵日趋严重、状态不断恶化、事故频发、道路通行能力下降等问题<sup>[1-2]</sup>。如何理顺城市发展与城市交通之间的互动关系, 使交通系统负载达到一种理想的均衡状态, 成为实现城市可持续发展的一个关键问题。传统的研究主要集中于如何进行静态或动态交通流量的分配, 对底层的路网并不关心, 对路网结构特征的研究较少。

城市路网是城市交通系统的设施基础, 是构建有序交通系统的物质依托。对城市路网结构的研究, 能为基于路网结构的功能性研究提供准确的数据支撑, 为解决交通拥堵、交通规划, 以及路径导航等问题提供理论指导和决策支持<sup>[3]</sup>。

作为一种复杂的空间网络系统, 城市路网包



作者简介: 王庆国(1974—), 男, 湖北黄梅人, 副教授, 博士, 主要研究方向为信息化测绘与交通地理信息系统。

E-mail: qgwang22@163.com

收稿日期: 2018-01-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571396); 国家级大学生创新创业训练计划项目(201610488016)

含数以百千计的网络节点和复杂的内部结构。传统的基于图论、空间句法, 以及分形理论等的网络分析方法, 在用于这种具有大量节点和复杂不规则拓扑结构的网络时, 都显得无能为力。复杂网络理论作为经典图论和随机图论的自然延伸, 以及系统科学和复杂性科学的创新发展, 能够将网络中的微观个体特征与宏观整体特征有效结合, 其兴起为研究复杂路网的结构特征提供了全新的视角和有力的工具。

本文以复杂网络理论为基础, 从无标度特性分析、小世界特性分析和层次结构特性分析几个方面研究分析了武汉市路网在结构构成上的特征。

## 1 基于复杂网络理论的网络结构定量分析指标

连通性是网络结构特征定量分析的基础。设由  $N$  个节点构成的连通网络, 复杂网络理论通过计算和统计网络的节点度与度分布、聚类系数、平均路径长度、介数等参数来分析网络的结构特征。以无向网络为例, 参考文献 [4], 对各参数说明如下。

### 1.1 节点度与度分布

节点  $i$  的度  $k_i$  指与节点  $i$  直接相连的边的数目。度分布  $p_k$  指节点度为  $k$  的节点数占总节点数的比例。对于路网中的节点, 其度值越大, 表明其连接的道路越多, 连通性越强, 在路网中的重要性相应越高。

### 1.2 聚类系数

聚类系数是对网络中局部节点之间连接紧密程度的一个反映。其定义如下:

设节点  $i$  的度为  $k_i$ , 即节点  $i$  有  $k_i$  个邻节点。如果这  $k_i$  个邻节点之间也两两互为邻节点, 那么它们之间最多可以有  $k_i(k_i - 1)/2$  条边。若这  $k_i$  个节点之间的实际边数为  $E'_i$ , 则定义节点  $i$  的聚类系数  $C_i$  为

$$C_i = \frac{E'_i}{[k_i(k_i - 1)/2]} = \frac{2E'_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (1)$$

构成网络的  $N$  个节点的聚类系数的平均值称为该网络的平均聚类系数  $C$ , 其为

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i \quad (2)$$

对于路网而言, 聚类系数和平均聚类系数分别反映了路网局部和路网整体的发达程度和联系的紧密程度。

### 1.3 节点距离与平均路径长度

网络中连接两个节点的边数最少的路径称为两个节点之间的最短路径, 最短路径的边数就称为这两个节点之间的距离  $d_{ij}$ 。网络的平均路径长度  $L$  指的是网络中全部节点两两之间距离的平均值, 也称为网络的特征路径长度。

度分布、聚类系数和平均路径长度是复杂网络中最基本的拓扑结构特性。如果一个网络的度分布表现为长尾分布, 则该网络一般是无标度网络。如果一个网络同时具有较小的特征路径长度和较大的聚类系数, 则称该网络是小世界网络。

### 1.4 中介中心性

节点的中介中心性指网络中所有节点对之间的最短路径经过该节点的比例。中介中心性值越大, 表示通过该节点的最短路径越多, 其在整个路网中的桥梁与枢纽作用越明显, 影响力和控制力越强, 节点越重要。

### 1.5 接近中心性

节点的接近中心性指该节点到网络中其他所有节点的平均距离的倒数。与节点度相比, 接近中心性可进一步描述节点与非直接相连的节点的接近程度, 其值越大, 表明该节点的影响及服务范围越广, 重要性等级越高。

## 2 基于复杂网络理论的武汉市路网结构分析

本文基于 ArcGIS 平台的 .shp 格式的武汉市 2010 年的路网数据进行实验分析, 该数据共包含路段 11 598 个。

### 2.1 结构分析单元的构建

为了从结构上对路网进行定量的分析与研究, 首先需要构建路网的拓扑表达模型。

在常用的“结点-弧段”路网拓扑模型中, 路段是道路的最基本的结构表达单元, 有唯一的编码和相应的属性。但是, 从认知和功能角度看, 路段只是不同道路交叉时形成的“副产品”, 并不是认知和功能意义上的完整道路<sup>[5]</sup>。以路段为基本单元进行城市路网结构的整体分析与评价, 破坏了道路的完整性, 使路网结构显得比较破碎。

根据心理学的研究, 人们习惯于将视觉上平滑连续的路段理解为属于同一条道路。由此, 在城市路网的研究中, 将符合视觉感知原则的具有良好连续性的路段连接成几何路段链, 称为道路 stroke, 作为道路的表达形式<sup>[6]</sup>。如图 1 所示, 左

侧是路网模型，右侧是相应的道路 stroke。

道路 stroke 更接近认知和功能意义上的完整道路。研究表明，基于道路 stroke，可以构建完整的道路几何拓扑网络，能方便地进行道路的几何与拓扑特性的分析<sup>[5-7]</sup>。为此，本文以道路 stroke 作为结构分析单元进行路网的几何与拓扑结构研究。参考文献 [6-7] 中的道路 stroke 构建算法，本文通过计算各交点处相邻路段两两之间的夹角，并设定不小于 120°作为路段夹角阈值，将符合条件且夹角最大的两条相邻路段连接构成道路 stroke。根据武汉市路网实验数据，共构建出 3 705 条道路 stroke。

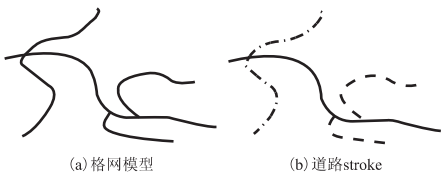


图 1 道路 stroke 示意图  
Fig 1 Road Stroke Diagram

2.2 路网对偶拓扑图的构建

对路网几何拓扑结构的表达目前主要有两种方式：原始拓扑图和对偶拓扑图。

原始拓扑图将道路的交叉口或者端点映射为网络节点，将交叉口之间或交叉口与道路端点之间的路段映射为节点的连线。对偶拓扑图将路网中的每条道路映射为节点，把道路之间的连接关系映射为节点的连线。与原始拓扑图相比，对偶拓扑图凸显了道路在网络中的主体功能地位，道路与道路之间的拓扑关系也更容易识别。

借助 Pajek 等软件，可以很方便地将路网的原始拓扑图转换成对偶拓扑图。图 2 是路网的原始拓扑图(图 2(a))与对应的对偶拓扑图(图 2(b))的表示。

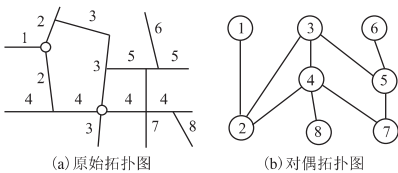


图 2 道路网络的表达  
Fig 2 Road Network Graph

2.3 结构参数的计算与统计

基于武汉市路网的对偶拓扑图，以道路 stroke 为结构单元，本文对武汉市路网的结构参数进行了计算和统计，计算统计结果分别如表 1 和图 3～图 6 所示。

表 1 结构参数统计  
Tab1 Statistics of Structure Parameters

统计量	节点度	中介中心性	接近中心性	长度/m
最大值	92.00	0.259 2	0.205 5	89 371.95
最小值	1.00	0.000 0	0.053 9	5.16
平均值	3.81	0.001 9	0.129 5	891.53
标准差	5.10	0.009 6	0.023 6	3 136.43

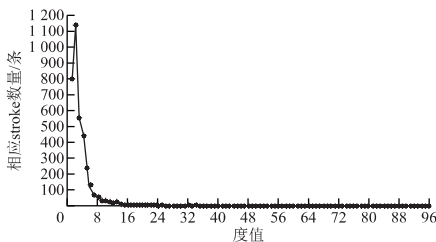


图 3 节点度的统计分布  
Fig 3 Statistical Distribution of Node Degree

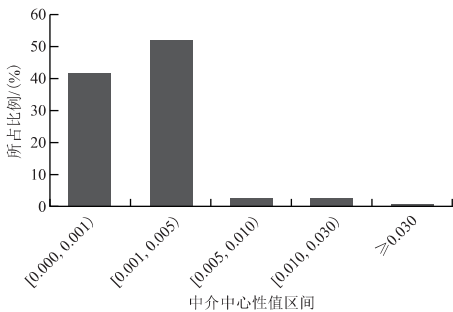


图 4 中介中心性的统计分布  
Fig 4 Statistical Distribution of Betweenness Centrality

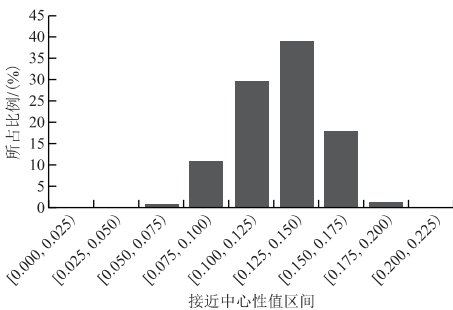


图 5 接近中心性的统计分布  
Fig 5 Statistical Distribution of Closeness Centrality

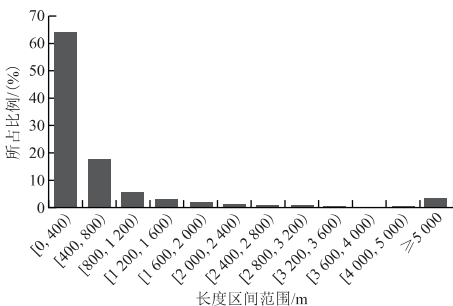


图 6 道路 stroke 长度的统计分布  
Fig 6 Statistical Distribution of Road Stroke Length

## 2.4 路网的结构特征分析

### 2.4.1 路网的无标度特性分析

根据表 1 和图 3 的统计, 武汉市路网的平均节点度为 3.81。其中, 节点度为 2 的道路 stroke 所占比例最高, 占 30.74%; 节点度为 1、3、4 的道路 stroke 所占比例分别为 21.65%, 14.95% 和 11.90%。数据表明, 接近 80% 的道路 stroke 的节点度低于平均节点度。另外, 网络中存在少量的节点度很高的道路 stroke, 其中, 最大的节点度达到 92, 节点度在 10 以上的道路 stroke 占总数的 5.32%。由图 3 所示的节点度统计分布情况可见, 武汉市路网中的道路 stroke 的节点度表现为明显的长尾分布特征。

根据对武汉市路网的度分布的统计分析可知, 武汉市路网具有明显的无标度特性。这意味着路网由少量的主干道路与大量的次要道路构成, 这些主干道路构成了整个城市路网的骨架, 路网中大量的物质和能量流动需要通过这些有限的主干道路的转换来完成。研究表明, 由于度分布的不均匀, 以及绝大部分道路的节点度很小, 无标度网络对随机发生的交通事故或交通堵塞等问题具有良好的抗攻击性, 这些随机事故并不会造成整个交通网络的瘫痪。但面对针对重要节点的选择性攻击却相当脆弱, 如果蓄意对交通枢纽点进行攻击和破坏, 就会迅速导致整个网络的瘫痪<sup>[8-9]</sup>。

### 2.4.2 路网的小世界特性分析

以道路 stroke 为结构单元, 通过统计计算得到, 武汉市路网的平均聚类系数约为 0.118, 平均路径长度约为 4.007。

设  $C$  为平均聚类系数,  $L$  为平均路径长度,  $\langle k \rangle$  为网络的平均节点度,  $N$  为节点数, 则对于一个随机网络, 其平均聚类系数和平均路径长度计算分别如式(3)和式(4)所示。

$$C = \langle k \rangle / (N - 1) \quad (3)$$

$$L \approx \ln N / \ln \langle k \rangle \quad (4)$$

根据式(3), 可计算得到与武汉市路网同规模的随机网络的平均聚类系数约为 0.001, 远低于武汉市路网的实际平均聚类系数。根据式(4), 可计算得到与武汉市路网同规模的随机网络的平均路径长度约为 6.143, 明显大于武汉市路网的平均路径长度。由此可见, 武汉市路网具有明显的小世界特性, 是一种典型的小世界网络。

网络的小世界特性意味着网络具有较好的通达性, 交通流在网络中的传输具有较高的效率, 从一个节点到网络中任意节点都不需要经过太多

的中间节点。但是, 需要指出的是, 这种较好的通达性和较高的传输效率在具有小世界特性的实际路网中并不一定是必然的。两个节点之间能否找到较短甚至最短路径, 还取决于问题的定义、节点所提供的网络结构信息、所使用的搜索算法以及整个网络的拓扑结构等。

### 2.4.3 路网的层次结构特性分析

层次性是城市路网结构和功能上的基本特征, 主要表现为不同道路的重要性等级的差异<sup>[10]</sup>。城市路网中的各条道路, 由于所处的位置和承担的交通量不同, 其重要性是不同的<sup>[11]</sup>。对路网的层次结构特性分析, 主要就是评价路网中不同道路的重要性。

理论上讲, 对道路重要性的评价应综合考虑道路的功能重要性和结构重要性两个方面。但目前, 对道路功能重要性的量化度量、计算和分析还很困难, 也难以建立统一的量化指标, 所以, 相关研究还基本处于探索性阶段。考虑到道路的功能作用在很大程度上由道路在路网中的结构性地位决定, 所以, 对道路重要性的评价目前主要基于路网的结构性指标进行分析, 由结构重要性去推断其功能重要性。

在道路的结构属性中, 几何特征和连通关系是道路的最基本、最重要的属性, 是影响路网功能的关键因素。因而, 基于道路几何与连通关系进行道路的重要性评价具有较高的实用性<sup>[12]</sup>。一般来讲, 一条道路被经过的次数越多, 其作用就越大; 一条道路越长, 完成的空间跨越越大, 其服务的范围和吸引的交通量也越大, 相应地, 其重要性越高<sup>[12]</sup>。因此, 本文对道路结构重要性的评价, 采用两个方面的评价指标: 一个是基于复杂网络理论的节点中心性测度指标, 主要包括度中心性、中介中心性和接近中心性; 另一个是道路的长度指标。

参考文献 [13-15], 本文以客观定权方法中的标准差法为基础, 顾及评价指标间的相关性, 通过信息量最大化定权方法对几个指标进行定权。其步骤过程如下。

首先, 计算某一评价指标内部的对比强度, 由该指标的标准差  $\delta$  表示。 $\delta$  值越大, 表明该指标在不同被评价对象之间的对比强度越强, 信息量越大。然后, 计算多个指标间的冲突强度, 由指标间的相关系数  $r_{ij}$  表示。 $r_{ij}$  值越小, 代表指标间的相关性越小, 冲突强度越大, 信息量越大。设第  $i$  个指标所包含的信息量为  $E_i$ , 则  $E_i$  计算如式(5)

所示。

$$E_i = \delta_i \cdot \sum_{j=1}^m (1 - r_{ij}) \quad (5)$$

最后, 通过对  $E_i$  进行归一化处理, 就得到第  $i$  个指标的权重值, 计算如式(6)所示。

$$\omega_i = \frac{E_i}{\sum_{j=1}^m E_j} \quad (6)$$

在权重确定的基础上, 基于式(7)所示的加权综合评价模型, 计算出武汉市路网中每条道路 stroke 的综合重要性参数, 其分布如图 7 所示。

$$\text{StructureLevel}_j = \sum_{i=1}^n \omega_i \chi_i \quad (7)$$

式中:  $\text{StructureLevel}_j$  代表第  $j$  条道路的综合重要性参数;  $\omega_i$  代表道路第  $i$  个指标的权重;  $\chi_i$  代表道路第  $i$  个指标的值。

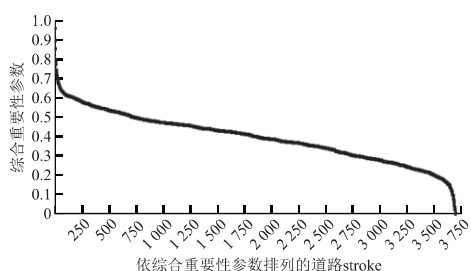


图 7 武汉市道路 stroke 的重要性参数统计分布

Fig 7 Statistical Distribution of the Importance Index of Wuhan Road Stroke

由图 7 可见, 在全部 stroke 中, 只有大约 2% 的少数 stroke 的重要性很高, 重要性参数大于 0.62, 且曲线下降速度很快, 与相邻区间的区分度明显; 重要性参数位于 (0.62, 0.13) 区间的 stroke 超过总数的 95%, 该区间曲线走势平缓, 相邻 stroke 重要性之间的区分度较小; 另有接近 0.5% 的少量 stroke 位于曲线尾部明显下降部分, 重要性参数低于 0.1, 属于路网末端的一些悬挂道路。

根据研究, 城市路网一般由 20% 左右的高等级道路和 80% 左右的低等级道路构成, 而且重要性前 2% 的道路为最重要的道路, 介于前 2% 至前 20% 之间的 18% 的道路为干道网络体系<sup>[16]</sup>。从图 7 的综合重要性参数分布来看, 评价结果符合城市道路的这一整体结构构成规律。前 2% 的道路的重要性明显高于其它的道路; 2% 之后的约 18% 的道路重要性参数较高, 集中在 (0.62, 0.49) 区间。

通过道路的重要性评价分析路网的层次结构特征, 一方面可以为路网的完善发展和合理规划

提供依据, 通过将不同重要性等级的道路网络进行合理布局与配置, 可以使交通分担关系和交通结构更加合理, 增大路网的交通容量; 另一方面, 也可以为道路交通的管理和控制提供指导, 通过加强对城市重要道路的管理控制, 避免因为路网中部分重要道路的交通拥堵导致路网的整体瘫痪。

### 3 结束语

结构和功能是复杂网络理论研究两个核心问题, 而结构特征又是功能特征的重要基础。本文以复杂网络理论为指导, 对武汉市路网的结构特征进行了研究。研究表明, 武汉市路网属于典型的无标度网络和小世界网络, 并且路网在层次结构上符合“二八分率”的规则。

### 参考文献

- [1] 何承, 朱扬勇. 城市交通大数据[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2015. (HE Cheng, ZHU Yangyong. Big data of urban traffic[M]. Shanghai: Shanghai Press of Science and Technology, 2015.)
- [2] 邹德慈. 论大城市交通问题: 以北京为例[J]. 城市规划, 2010, 34(2): 78-79. (ZOU Deci. On the traffic issue in big cities: a case study of Beijing[J]. City Planning Review, 2010, 34(2): 78-79.)
- [3] 刘爽, 朱晓宁, 贾顺平. 城市交通结构优化研究综述[J]. 交通运输系统工程与信息, 2009, 9(1): 28-38. (LIU Shuang, ZHU Xiaoning, JIA Shunping. A review of urban traffic structure optimization[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2009, 9(1): 28-38.)
- [4] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 网络科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015. (WANG Xiaofan, LI Xiang, CHEN Guanrong. Network science: an introduction[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015.)
- [5] 叶彭姚, 陈小鸿. 基于道路骨架性的城市道路等级划分方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(6): 853-856, 878. (YE Pengyao, CHEN Xiaohong. Urban road hierarchy based on road arteriability[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2011, 39(6): 853-856, 878.)
- [6] THOMSON R C, RICHARDSON D E. The 'good continuation' principle of perceptual organization applied to the generalization of road network[C]// Proceedings of the 19th International Cartographic Conference. [S. l.]: [s. n.], 1999: 1215-1223.
- [7] 杨敏, 艾廷华, 周启. 顾及道路目标 stroke 特征保

- 持的路网自动综合方法[J]. 测绘学报, 2013, 42(4): 581-587, 594. (YANG Min, AI Tinghua, ZHOU Qi. A method of road network generalization considering stroke properties of road object[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(4): 581-587, 594.)
- [8] CARLSON J M, DOYLE J. Highly optimized tolerance, robustness and design in complex systems[J]. Phys Rev Lett, 2000, 84(11): 2529-2532.
- [9] CARLSON J M, DOYLE J. Complexity and robustness[J]. PNAS, 2002, 99(S1): 2539-2545.
- [10] 翟仁健, 武芳, 黄博华, 等. 城市道路网面域层次结构特征的识别与表达[J]. 测绘科学技术学报, 2014, 31(4): 413-418. (ZHAI Renjian, WU Fang, HUANG Bohua, et al. A method for recognition and representation of areal hierarchy of urban road networks[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2014, 31(4): 413-418.)
- [11] 张喜平, 李永树, 刘刚, 等. 城市复杂交通网络道路重要性评估方法[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2015, 12(3): 7-13. (ZHANG Xiping, LI Yongshu, LIU Gang, et al. Importance evaluation method in urban complex traffic road network[J]. Complex System and Complexity Science, 2015, 12(3): 7-13.)
- [12] 徐柱, 刘彩凤, 张红, 等. 基于路划网络功能的道路选取方法[J]. 测绘学报, 2012, 41(5): 769-776. (XU Zhu, LIU Caifeng, ZHANG Hong, et al. Road selection based on evaluation of stroke network functionality[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(5): 769-776.)
- [13] 栾学晨, 杨必胜, 张云菲. 城市道路复杂网络结构化等级分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(6): 728-732. (LUAN Xuechen, YANG Bisheng, ZHANG Yunfei. Structural hierarchy analysis of streets based on complex network theory[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(6): 728-732.)
- [14] 罗赞骞, 夏靖波, 陈天平. 网络性能评估中客观权重确定方法比较[J]. 计算机应用, 2009, 29(10): 2624-2626, 2631. (LUO Yunqian, XIA Jingbo, CHEN Tianping. Comparison of objective weight determination methods in network performance evaluation[J]. Journal of Computer Application, 2009, 29(10): 2624-2626, 2631.)
- [15] 郭亚军. 综合评价理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (GUO Yajun. Theory, method and application of comprehensive evaluation[M]. Beijing: Beijing Science Press, 2007.)
- [16] 李清泉, 曾喆, 杨必胜, 等. 城市道路网络的中介中心性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(1): 37-41, 127. (LI Qingquan, ZENG Zhe, YANG Bisheng, et al. Betweenness centrality analysis for urban road networks[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010, 35(1): 37-41, 127.)

(责任编辑: 程锦)

(上接第 59 页)

- [13] 杨魁, 杨建兵, 江冰茹. Sentinel-1 卫星综述[J]. 城市勘测, 2015(2): 24-27. (YANG Kui, YANG Jianbing, JIANG Bingru. Sentinel-1 satellite overview[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2015(2): 24-27.)
- [14] 刘媛媛. 基于多源 SAR 数据的时间序列 InSAR 地表形变监测研究[D]. 西安: 长安大学, 2014. (LIU Yuanyuan. Monitoring of surface deformation with time-series InSAR technique based on multi-source SAR data[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.)
- [15] LU Zhong, DZURISIN D. Ground surface deformation patterns, magma supply, and magma storage at Okmok volcano, Alaska, from InSAR analysis: 2. co-ruptive deflation, July-August 2008[J]. Journal of Geophysical Research(Solid Earth), 2010, 115: B00B03.
- [16] BAMLER R, EINEDER M. Accuracy of differential shift estimation by correlation and split-bandwidth interferometry for wideband and delta-k SAR systems[J]. IEEE on Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005, 2(2): 151-155.
- [17] ZHANG Lei, DING Xiaoli, LU Zhong. Ground settlement monitoring based on temporarily coherent points between two SAR acquisitions[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2011, 66: 146-152.

(责任编辑: 程锦)