

基于复杂网络的北京地铁 网络化发展分析

许 葭^{1,3}, 宋守信¹, 翟怀远¹, 陈明利¹, 袁朋伟²

(1. 北京交通大学经济管理学院, 北京 100044; 2. 济南大学商学院, 济南 250022;

3. 上海工程技术大学城市轨道交通学院, 上海 201620)

摘 要: 为了更好地针对地铁网络化运营的特点, 分析地铁网络安全的管理方向, 选取 2009、2012、2015 和 2019 年 4 个时间节点, 运用 Space-L 方法构建北京地铁网络拓扑结构, 通过对比分析地铁站点与线路加入所产生的变化情况。基于复杂网络理论的相关概念, 从动态和静态两个角度提出了 6 个评价指标, 从而定量分析地铁网络建设对网络结构、性能的影响。结果表明, 北京地铁在网络结构上的变化不大, 并且从站点的比例来看, 北京地铁网络中的功能特性仍然集中在少数站点。然而由于网络规模的迅速扩大, 这部分站点的绝对数量有了大幅度提升, 因此北京地铁的网络化管理需要从关注重点站点向网络化、系统化过渡。

关键词: 北京地铁; 复杂网络; 拓扑结构; 历史演变; Space-L

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2020)05-0088-06

Analysis of Network Development of Beijing Subway Based on Complex Network

XU Jia¹, SONG Shouxin¹, ZHAI Huaiyuan¹, CHEN Mingli¹, YUAN Pengwei²

(1. School of Economics and Management, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;

2. School of Business, Jinan University, Jinan 250022; 3. School of Urban Rail Transportation,
Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620)

Abstract: In order to enable the development of a targeted management direction for subway network security according to the characteristics of the network operation of the subway, this study analyzes four special time points in the development of the Beijing subway (2009, 2012, 2015, and 2019, respectively). Four different Beijing subway network topologies were constructed for each point in time using the Space-L method, and were analyzed to determine the impact of a new subway station and line on the structure and functionality of the subway. Based on the related concepts of complex network theory, six evaluation indicators are proposed from the perspectives of dynamic and static indicators. Therefore, the impact of the subway network construction on the network structure and performance can be quantitatively analyzed. The results show that the Beijing subway shows little change in the network structure. From the perspective of the stations, the functional characteristics of the Beijing subway network are still concentrated in a few stations. However, due to the rapid expansion of the network scale, the number of these sites has been significantly improved. Therefore, the network management of the Beijing subway system needs to evolve from focusing only on important stations to focusing on the entire network in a more systematic manner.

Keywords: Beijing subway; complex network; topology; evolution; Space-L

随着城市的不断发展, 地铁已经成为城市通勤的

主要方式之一, 特别是在北京这类大型城市中, 因此地铁一直是学者的研究重点。同时, 在地铁建设运营中, 初期一般只开设了数条线路, 相对拓扑结构简单。随着地铁建设速度的加快, 必然会出现单线向后期网络化运营的转变, 而中国的大部分城市正处在这样一个时间节点上, 其网络安全的重要性日益突出。因此, 对于地铁网络化的分析逐渐得到中外众多学者的

收稿日期: 2019-06-18 修回日期: 2019-07-02

第一作者: 许葭, 女, 博士研究生, 从事轨道交通风险管理的研究, ivy_xu_14@163.com

导师简介: 宋守信, 男, 教授, 博士生导师

基金项目: 国家社科基金(17CGL073)

关注^[1],并取得了一定的研究成果。

地铁的风险管理是以站点管理为主,一些学者就安全管理的关键站点的确定进行了大量的研究,从脆弱性^[2-3]、鲁棒性^[4-5]、抗毁性^[6]等多个概念^[7-8]对地铁进行管理分析。这样的研究大多都是横向的比较过程。文献[9]选取中国10个典型城市的轨道交通网络结构,并对其网络拓扑结构进行分析;文献[10]调查分析了全球33个地铁系统。这种横向的对比在其他的交通领域^[11-12]也很常见。事实上,这种纵向对比的思路在多个领域已经有了部分的研究结果。例如,黄晓燕等人的“2000—2013年广州的公交可达性的时空分析^[13]”,陈娱等人的“京津冀地区陆路交通网络发展过程^[14]”,WANDEL等人的“2002—2013年国际航空运输国家网络的演变^[15]”;RUI等人的“1995—2017年吉隆坡的公共交通网络的演化^[16]”;Yu等人对南京地铁逐条线路的演化进行了分析^[17]。

北京地铁经过了多年的发展,已经成为一个庞大的网络结构,并且还在不断扩展、建设中。因此笔者试图对北京地铁进行纵向发展对比,探讨地铁站点在网络中的变化趋势,既可以为之北京的发展决策提供理论支持,也可以为其他城市地铁的初期建设、运营提供参考。

1 理论基础

1.1 北京地铁的发展情况

由于北京城市本身就是一个辐射状的发展趋势,因此其公路交通网络本身就是一个以环线为基础的设计,同样在地铁的规划设计上,也是以环线为拓扑特点的地铁网络。北京从1971年开始,陆续建设完成了22条地铁线路,其中2号线、10号线为完整的环线,13号线和2号线共同构成了另一个环线。

由于北京地铁的线路开通运营并不是完全由线路决定的,也就是说在同一时间段内可能有数条线路同时投入运行,也会出现一条线路分若干次才完全投入运营。因此,可以选取以下几个年份的拓扑结构进行实际分析,如图1所示。

截止到2000年底,北京仅有两条线路,一条环线和一条横贯东西的线路,共39个车站,整体发展相对缓慢;而2001年北京获得了第29届夏季奥林匹克运动会主办权,推动了北京地铁事业的发展。到2009年建成并投入运营了9条地铁线路,共136个站点,如图1(a)所示。此后,北京地铁的3条环线投入运营,

贯通东西和南北的多条线路也逐渐建成,北京地铁网络基本成型。到2012年,全网共有224个站点进入运营,如图1(b)所示。相较于2009年,地铁运营的范围也有了很大幅度的提升。

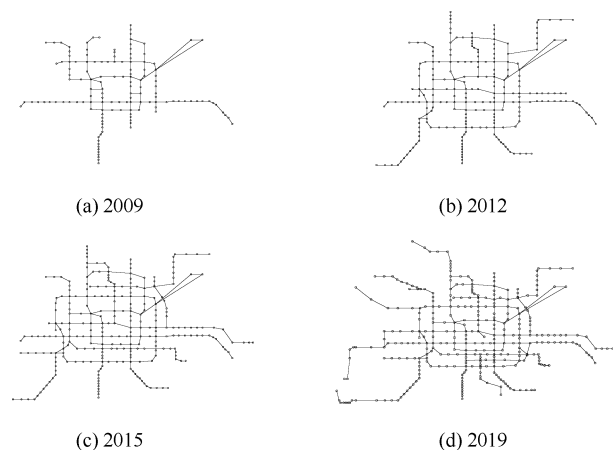


图1 北京地铁网络拓扑发展图

Fig. 1 Topology development of Beijing subway network

之后,北京地铁在2012年的框架中进一步建设,如图1(c)所示。明显可见,地铁网络的覆盖范围没有特别大的延伸、拓展,新投入运营的线路集中在3条环线所覆盖的中心区域,使得该范围内地铁密度增加,其结构的复杂程度也相应增加。截至2019年初,北京地铁网络中共有329个站点,如图1(d)所示。这段时间的北京地铁网络结构,明显出现大面积外延,这使得地铁网络的覆盖范围与之前相比有了很大的扩展。

因此,北京地铁网络的扩建存在一定的规律性,大体上可以分为两种类型:一是地铁结构向周边外围的拓展;二是在已有结构内部的路径拓展。这两种类型可以认为是交错进行的。本文的研究目标是对结构逐渐复杂的地铁网络特性的纵向对比,因此基于复杂网络的相关概念选择了静态和动态两类指标,分别从结构和功能两个维度进行对比分析。其中静态指标是对一个网络拓扑结构的概述,是最简单、直观的网络结构指标。而动态指标则是对网络在受到攻击后,网络连通能力的评价,即对地铁结构进行攻击,从而分析网络中连通能力的变化情况。

1.2 静态评价指标

在静态指标中,按照复杂网络的基本概念,选择了节点度、网络直径、平均路径长度以及聚类系数共4个指标进行对比分析,各指标的含义如下。

1.2.1 节点度

节点度体现了站点在网络中的影响分布,是最简单、直观的网络指标。与此同时,它也便于计算,使得其一直是评估网络中应用最广泛的指标。网络中度指标描述了一个节点的邻居节点的个数,体现了该节点与周围节点之间建立直接联系的能力,即

$$k_i = \sum_{j \in G} A_{ij} \quad (1)$$

式中, A_{ij} 为该网络的邻接矩阵。网络中节点的度分布情况可以用节点度的分布函数 $P(k)$ 来表示,即在网络中随机选择一个节点,该节点的度是 k 的概率,也就是网络中节点的度是 k 的比例。而地铁网络等真实网络被很多人认为是无标度网络。其中,无标度特性正是节点的度分布体现出的,它反映了复杂网络具有严重的异质性,即各节点之间的连接状况(度数)具有严重的不均匀分布性:网络中少数称之为 Hub 点的节点拥有极其多的连接,而大多数节点只有很少量的连接;少数 Hub 点对网络的运行起主导作用。

1.2.2 路径长度

路径是一个无论在理论层次还是实际应用中都具有重要研究意义的问题,譬如最短路径对网络的信息传输起着重要的作用,是描述网络内部结构非常重要的一个参数;最短路径也刻画了网络中某一节点的信息到达另一节点的最优路径,通过最短路径可以更快地传输信息,从而节省系统资源。因此在复杂网络中,其最短路径 d_{ij} 定义为连接节点 i 与节点 j 两个节点的最短路径所包含的边数。那么网络中任意两个节点的最短路径的最大值为网络的直径,同样地,对网络中任意两个节点的最短路径长度进行平均,即为网络的平均路径长度 L :

$$L = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad (2)$$

式中, N 为网络中的节点个数。

1.2.3 聚类系数

按照图形理论,聚类系数是表示一个图形中节点聚集程度的系数,也就是衡量网络团块化、集团化程度的重要参数。任选网络中的一个节点 i ,与其直接相连的节点个数 k_i ,这 k_i 个节点最多有 $C_{k_i}^2$ 条边,而网络实际与节点 i 相连的节点边数为 E_i ,那么聚类系数 C_i 可以定义为

$$C_i = \frac{E_i}{C_{k_i}^2} = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)} \quad (3)$$

由于当节点 i 的 k_i 仅为 1 时,那么分母会出现 0 的情况,因此上面的公式仅适合 $k_i \geq 2$ 的情况,当 $k_i=1$ 时,认为 $C_i=0$ 。那么,整个网络的聚类系数即为网络上所有节点的聚类系数的算术平均值 $\bar{C}$,即

$$\bar{C} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n C_i \quad (4)$$

实际的社会、生态等网络都是小世界网络,在这样的系统里,聚类系数值越大代表网络中的交互关系越大,网络结构越复杂,信息传递速度越快,并且少量改变几个连接,就可以剧烈地改变网络的性能,如对已存在的网络进行调整,如蜂窝电话网,改动很少几条线路,就可以显著提高性能。

1.3 动态评价指标

动态指标主要是对网络受到攻击后变化情况的分析,因此采用了复杂网络中最普遍的两种攻击方式,即随机性攻击(failure)和蓄意性攻击(attack)^[18]。随机性攻击是产生一定范围内的随机数,然后从网络中随机移除对应序号的节点;而蓄意性攻击则依照一定的规律对节点进行移除,通常按照节点度的大小顺序进行移除。因此,采用全局效率和连通度 2 个指标进行对比分析,各指标的含义如下。

1.3.1 全局效率

正如上文所说,路径是网络中非常关键的一类指标,然而采用静态指标中的公式进行计算有一个重要的前提,即该网络是连通网络,也就是说节点 i 与节点 j 之间一定有路径。因此,一旦网络受到攻击,从而产生不连通的子图时,某些节点间就不存在连通的路径。因此就需要转换思路采用网络的全局效率这一概念,网络中节点 i 与节点 j 之间的效率定义为 ε_{ij} ,那么 ε_{ij} 可以通过节点 i 与节点 j 之间的距离 d_{ij} 计算得出,即 $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$ 。

那么当节点 i 与节点 j 之间无直接连通的边时, $d_{ij} = +\infty$,那么此时 $\varepsilon_{ij}=0$ 。从整个网络角度出发,网络中的节点间全部网络效率的平均值即可定义为网络的全局效率 E_{glob} ,即

$$E_{\text{glob}} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \varepsilon_{ij} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (5)$$

最短路径长度和全局效率度量了网络的全局传输能力,可以衡量网络中节点间的信息传递的有效程度。最短路径长度越短,网络全局效率越高,则网络节点

间传递信息的速率就越快。

1.3.2 连通分量

在图论中,连通图基于连通的概念。也就是说,在一个无向图中,若从节点 i 与节点 j 有路径相连,则称节点 i 与节点 j 是连通的。而这个无向图的一个极大连通子图称为它的一个连通分量。这就意味着连通图只有一个连通分量,就是它自身;而非连通的无向图有多个连通分量。

2 北京地铁实例测算

考虑到地铁结构的变化情况,按照前文所述的北京地铁网络情况,选取了 2009(134)、2012(226)、2015(268)以及 2019(329)共 4 个不同阶段的北京地铁线路进行了拓扑构建,并采用 MATLAB 对各项指标进行了测算。

2.1 节点度分布分析

使用 Space-L 法分别构建了北京地铁拓扑结构,并对这 4 个拓扑结构进行了节点度分析,其具体数据如表 1 所示。

表 1 北京地铁节点度统计

Tab. 1 Statistics of node degrees of Beijing Subway

节点度	1	2	3	4	5	总
2009	10	105	6	13	2	136
2012	12	176	6	28	2	224
2015	15	209	7	35	2	268
2019	17	254	14	41	3	329

从绝对的数值上来看,经过这 10 年的快速发展,沟通多条线路的站点数量有了大幅度增多,然而从概率上来看,如图 2 所示,这 4 条曲线是高度重合的。也就是说,北京地铁虽然从 136 个站点发展到 329 个站点,但是其结构上是非常相似的,特别是在北京地铁的大规模外延的情况下也保证了外部结构的关联程度,并没有出现大量的孤立站点和线路。

2.2 网络结构参数分析

与节点分布的高度相似来说,对北京地铁的其他 3 个静态结构指标的分析就有了区分度,其结果如表 2 所示。根据上文的分析,2012—2015 年,地铁处于一个网络结构复杂化的阶段,因此在网络直径和平均路径两个指标上均没有大的变化,而在其他的外延、扩展阶段,这两个指标都有比较大幅度的增加,这也从数据上说明了前文对于地铁分阶段的正确性。与此同

时,聚类系数始终保持在一个相对较小的状态下,这说明就目前情况下的北京地铁网络结构是比较简单的,少量站点和线路的改变对于网络连通性能影响并不严重。

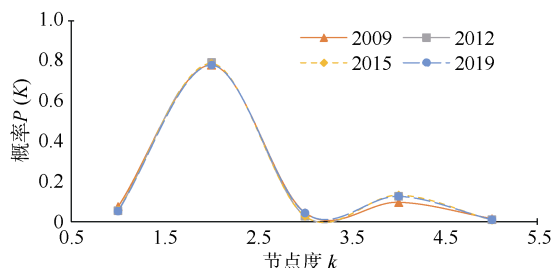


图 2 北京地铁节点度分布

Fig. 2 Distribution of node degrees of Beijing subway

表 2 北京地铁网络结构参数

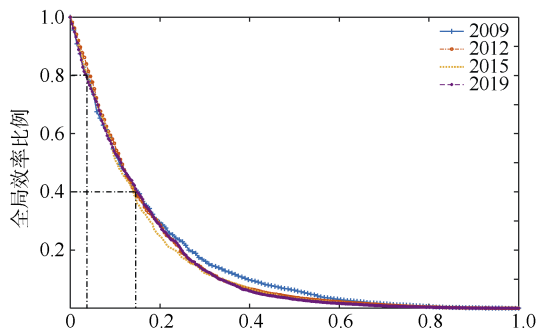
Tab. 2 Structure parameters of Beijing Subway

年份	2009	2012	2015	2019
网络直径	38	44	44	54
平均路径	12.50	14.32	14.59	16.62
聚类系数	0.015	0.013	0.013	0.020

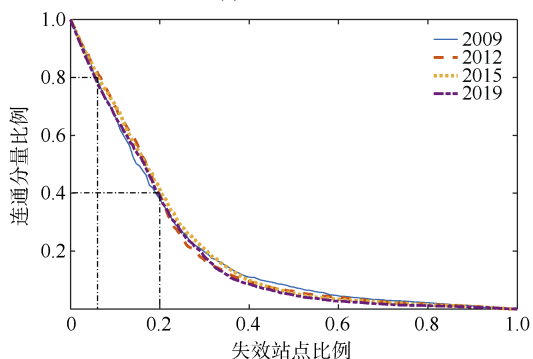
2.3 随机性攻击分析

由于随机攻击在站点选择上的随机性,使得每一次结果都不尽相同,为了使结果更加准确可信,重复试验(去除按照节点度大小顺序的实验)200 次,取这 200 次结果的平均值绘制曲线,如图 3 所示。

从图 3(a)中可以看出,曲线的凹陷程度逐渐增大,即随着北京地铁网络结构的不断扩展,全局效率下降的速度明显逐渐增强,特别是在曲线中段的差距明显,这意味着网络中大部分站点间的连接度增大,累计效果逐渐显现。而从图 3(b)的连通分量来看,4 条曲线出现了比较明显的交叉,即在删除站点的初期,网络结构越复杂,其连通分量的稳定程度有所增强,这之前分析图 3(a)的结果相互印证。两幅图对比,连通分量的变化曲线整体比全局效率的变化曲线要平坦,同样是下降到 80%和 40%,连通分量所需删除的站点比例都要比全局效率要多,这说明很多结构上重要性不高的站点,但是对于信息或者说客流的传递效率仍然是十分重要的。与此同时,在删除站点数达到 5%左右,两项指标均只剩下 80%,甚至在删除站点数达到 20%后,两项指标均不足 40%,这说明北京地铁网络中,对少数重要站点的研究仍具有重要的安全管理意义。



(a) 全局效率比例



(b) 连通分量比例

图3 北京地铁随机攻击对比曲线图

Fig. 3 Stochastic attack curve of Beijing Subway

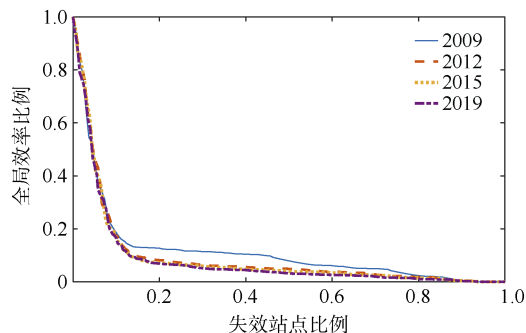
2.4 蓄意性攻击分析

与随机攻击明显不同,无论是图4(a)的全局效率指标还是图4(b)的连通分量指标,曲线前期的下降速度都十分迅速,在站点删除数量达到10%之前就达到曲线的平稳状态。这说明在北京地铁网络中,少数站点无论是在结构还是在传递效率上都具有绝对的作用。同时,为了更好地观察站点的不同作用,将图4中的横坐标换成站点的个数,如图5所示。图5中4条曲线的斜率逐渐变小,同时曲线前段的线性效果逐渐增强,这意味着随着时间的推移,地铁网络的结构逐渐复杂,换乘站点这一类站点的作用仍然显著,但某一站点单独的作用却逐渐减弱。在2009年,删除10个站点后曲线达到平稳状态,然而2019年需要删除近30个站点。

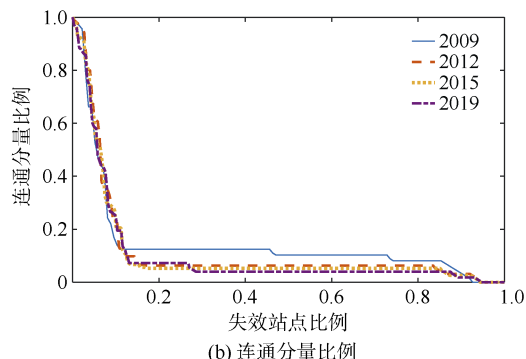
3 结论

针对北京地铁的网络结构进行了静态和动态两方面的分析,主要结论如下:

1) 虽然北京地铁经过了近10年的飞速发展,在线路和站点数量上都显著增加,但网络拓扑结构特性区别不大,因此在对地铁进行安全管理时,不能仅仅依靠拓扑结构指标,更需要多维度的综合考量。



(a) 全局效率比例



(b) 连通分量比例

图4 北京地铁蓄意攻击对比曲线

Fig. 4 Deliberate attack curve of Beijing Subway

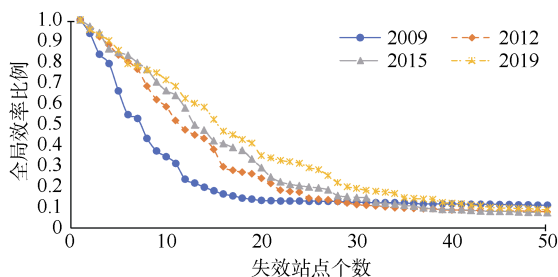


图5 全局效率曲线

Fig. 5 Global efficiency curve

2) 北京地铁网络中的功能特性仍然集中在网络中的少数站点,并且随着北京地铁网络的扩展,这类站点的比例也有所增加;与此同时,由于网络规模的扩大,这部分站点的数量有了比较客观的提升。因此北京地铁网络整体的安全管理难度增大,而且需要从关注重点站点向网络化、系统化过渡。

参考文献

- [1] 张晋, 梁青槐, 贺晓彤. 北京市地铁网络拓扑结构复杂性研究[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(6): 78-84.
ZHANG Jin, LIANG Qinghuai, HE Xiaotong. Research on the complexity of topology structure of Beijing metro network[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013,

- 37(6): 78-84.
- [2] 邓旭东, 王雪, 徐文平, 等. 城市地铁网络脆弱性对比分析[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(3): 152-156.
DENG Xudong, WANG Xue, XU Wenping, et al. Comparative analysis of vulnerability of urban subway network[J]. China safety science journal, 2017, 27(3): 152-156.
- [3] M'CLEOD L, VECSELER R, SHI Y, et al. Vulnerability of transportation networks: the New York City subway system under simultaneous disruptive events[J]. Procedia computer science, 2017, 119: 42-50.
- [4] 曹志超, 袁振洲, 李得伟, 等. 城市轨道交通列车运行图鲁棒性优化模型[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(3): 130-136.
CAO Zhichao, YUAN Zhenzhou, LI Dewei, et al. Robust optimization model for train working diagram of urban rail transit[J]. China railway science, 2017, 38(3): 130-136.
- [5] CATS O, KOPPENOL G J, WARNIER M. Robustness assessment of link capacity reduction for complex networks: application for public transport systems[J]. Reliability engineering & system safety, 2017, 167: 544-553.
- [6] 刘朝阳, 吕永波, 刘步实, 等. 城市轨道交通网络级联失效抗毁性研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(5): 82-87.
LIU Chaoyang, LV Yongbo, LIU Bushi, et al. Cascading failure resistance of urban rail transit network[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2018, 18(5): 82-87.
- [7] 韩云祥, 黄晓琼. 基于极大代数理论的交通系统稳态性能分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(3): 126-132.
HAN Yunxiang, HUANG Xiaoqiong. Analysis of the steady state performance of traffic system based on max-plus theory[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2016, 16(3): 126-132.
- [8] LI H X. Complexity analysis of Beijing urban rail transit network[J]. Advanced materials research, 2014, 998-999: 1366-1369.
- [9] 高天智, 陈宽民, 李凤兰. 城市轨道交通网络的拓扑结构分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(3): 97-106.
GAO Tianzhi, CHEN Kuanmin, LI Fenglan. Topology analysis of urban rail transit network [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018, 38(3): 97-106.
- [10] Derrible S, Kennedy C. The complexity and robustness of metro networks[J]. Physica A statistical mechanics & its applications, 2010, 389(17): 3678-3691.
- [11] SIENKIEWICZ J, HOŁYST J A. Statistical analysis of 22 public transport networks in Poland[J]. Physical review E statistical nonlinear & soft matter physics, 2005, 72(4): 046127.
- [12] LESKOVEC J, LANG K J, DASGUPTA A, et al. Community Structure in large networks: natural cluster sizes and the absence of large well-defined clusters[J]. Internet mathematics, 2009, 6(1): 29-123.
- [13] 黄晓燕, 张爽, 曹小曙. 广州市地铁可达性时空演化及其对公交可达性的影响[J]. 地理科学进展, 2014, 33(8): 1078-1089.
HUANG Xiaoyan, ZHANG Shuang, CAO Xiaoshu. Spatial-temporal evolution of Guangzhou subway accessibility and its effects on the accessibility of public transportation services[J]. Progress in geography, 2014, 33(8): 1078-1089.
- [14] 陈娱, 金凤君, 陆玉麒, 等. 京津冀地区陆路交通网络发展过程及可达性演变特征[J]. 地理学报, 2017, 72(12): 2252-2264.
CHEN Yu, JIN Fengjun, LU Yuxi, et al. Development history and accessibility evolution of land transportation network in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Journal of geographical sciences, 2017, 72(12): 2252-2264.
- [15] WANDELT S, SUN X. Evolution of the international air transportation country network from 2002 to 2013[J]. Transportation research part E: logistics and transportation review, 2015, 82: 55-78.
- [16] RUI D, NORSIDAH U, BIN H H, et al. Complex network theory applied to the growth of kuala lumpur's public urban rail transit network[J]. PLOS ONE, 2015, 10(10): e0139961-.
- [17] YU W, CHEN J, YAN X C. Space-time evolution analysis of the Nanjing metro network based on a complex network[J]. Sustainability, 2019, 11(2): 523.
- [18] 李大愚, 高光锐. 城市地铁网脆弱性分析[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(3): 157-161.
LI Dayu, GAO Guangrui. Analysis of vulnerability of urban metro network[J]. China safety science journal, 2016, 26(3): 157-161.

(编辑: 郝京红)