

北京地铁网络时空演化特征评估及演化机制

王志如¹, 张满银^{*2}

(1. 北京科技大学 经济管理学院, 中国 北京 100083; 2. 北京科技大学 马克思主义中国化研究所, 中国 北京 100083)

摘要: 基于复杂网络理论, 使用Space-L网络建模方法构建地铁网络空间结构, 通过改进地铁网络空间结构连通性评估方法, 与网络结构复杂性评估方法, 评估地铁网络时空演化特征。以北京地铁为例, 构建1971—2020年北京地铁网络结构, 分析北京地铁时空网络结构的发育状况、无标度特性和小世界特性的演化特征, 结果发现: ①北京地铁网络结构连通性发育水平仍然较低, 网络结构复杂性较小。②北京地铁网络空间结构扩张过程中, 新线路在选择旧车站进行换乘时, 既存在优先连接, 又存在随机连接。③到目前为止, 北京地铁网络空间结构的演化以覆盖型线路为主、优化型线路为辅。④覆盖型线路与优化型线路上的新建车站设置, 受到廊道走向与感知范围限制。

关键词: 复杂网络; 连通性; 轨道交通; 可达性; 小世界; 北京地铁; 网络演化

中图分类号: U490 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8462(2021)04-0000-09

Spatio-Temporal Evolution Characteristics of Beijing Subway Network and Its Evolution Mechanism

WANG Zhiru¹, ZHANG Manyin²

(1. School of Economics and Management, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. School of Marxism Chinese Studies, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Studying the spatio-temporal evolution characteristics of the subway network is a necessary means to optimize the network structure and conducive to improving the disaster resilience of the system. Based on the complex network theory, this paper uses the Space-L network model to construct the spatial structure of the subway network, and evaluates the spatial and temporal evolution characteristics of the subway network by improving the connectivity assessment method of the subway network spatial structure and the network structure complexity assessment method. Taking the Beijing subway as an example, this study constructs the Beijing subway network structure from 1971 to 2020, analyzes the development status of the Beijing subway network structure, the scale-free characteristics and the evolution characteristics of the small-world characteristics, the results are found: 1) The network structure connectivity development is still at lower level, the network structure complexity is smaller. 2) During the expansion of the spatial structure of the Beijing subway network, when new lines select old stations for transfer, there are both priority connections and random connections. 3) So far, the evolution of the spatial structure of the Beijing subway network has been dominated by covered-type lines and supplemented by optimized-type lines. 4) The setting of newly-built stations on covered-type lines and optimized-type lines is limited by the corridor direction and perception range. Research methods and research results can provide a basis for network optimization and dynamic complexity research on networks.

Keywords: complex network; network connectivity; rail transit; accessibility; small world; Beijing subway; network evolution

新中国成立后, 特别是改革开放以来, 地铁已经成为北京市民出行的最重要的公共交通工具, 并

成为北京城市经济发展的重要命脉。加强地铁网络统筹规划、开发地铁网络主动与被动安全技术是

收稿时间: 2020-05-27; 修回时间: 2020-10-22

基金项目: 教育部人文社会科学规划项目(18YJC630193); 北京市自然科学基金项目(L181009、9194028); 国家自然科学基金应急项目(71641027); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-BR-20-03A)

作者简介: 王志如(1984—), 女, 内蒙古鄂尔多斯人, 博士, 讲师, 研究方向为基础设施网络规划与可持续。E-mail: wangzhiru@ustb.edu.cn

*通讯作者: 张满银(1964—), 男, 内蒙古准格尔旗人, 博士, 教授, 研究方向为区域发展战略、规划及其评估。

E-mail: zhangmanyin@ustb.edu.cn

《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》指出的重要发展目标。地铁网络主动安全技术强调系统的自适应能力,从网络空间结构层面提高系统的主动适灾能力是出发点,研究地铁网络空间结构的演化特征与演化机制是网络规划与优化的必要手段,也是深入研究动力学复杂性问题的基础^[1];科学认知地铁网络时空演化范式是交通经济地理学的核心任务之一。

地铁网络是由车站、轨道、运营线路组成的复杂网络,是非完全随机的时间和空间维度演化的产物。目前,国内外学者利用复杂网络理论对地铁网络的研究主要集中在空间维度方面,主要包括:①大量的文献集中在静态的视角研究单一时期的地铁网络结构特征,如早期学者利用复杂网络研究了地铁网络的度分布、聚类系数等结构特征^[1-3],研究团队也在这方面进行了有益的探索,提出了结合地铁网络实际工程属性的网络复杂性评估方法^[2,4]。②一些学者从网络脆弱性的视角关注地铁网络与扰动之间的关联关系^[1,4-10],如基于统计分析与复杂网络理论研究扰动影响与拓扑结构之间的关系,通过模拟不同类型的扰动,研究地铁网络的脆弱性,并评估车站和区间轨道的重要性程度^[8,10-11]。③一些学者开始关注地铁网络的演化机制建模,如基于随机选择模型的地铁网络空间演化模型^[12]、基于社团结构的都市地铁网络空间演化模型^[13]、基于城市热点的地铁网络空间演化模型^[14]、基于费用效益分析的地铁网络空间演化模型^[15]。在时间与空间维度方面,有学者基于几何结构,从可达性^[16-18]、连通率^[19]、环路指数^[19-20]等方面研究不同时期站点分布和演变情况,连通率、环路指数的计算通常假设网络中任何两个车站都可以由直接的轨道区间连接,不符合地铁系统建设的工程属性;此外,由运营线路决定的非直接相邻车站的直达连接属性往往被忽略。

虽然已有研究对地铁网络拓扑结构及其动力学特征的认识取得了重要的成果,但是,仅从静态视角研究某一时期的地铁网络结构,无法从时间维度认识网络结构特征的变化;其次,已有的动态视角的研究还停留在网络连通性层面,缺乏关于网络结构复杂性,即择优和增长机制的演化研究,而网络结构复杂性是影响地铁网络适灾能力的重要因素;最后,已有的地铁网络结构连通性的评估方法忽略了评估指标的物理意义与地铁系统的实际工程属性,需要改进。总体来看,从时间和空间视角

进行地铁网络演化研究正处在发展阶段,客观上要求加强时间维度的、基于复杂网络理论的地铁网络发育特征与机理的识别,为建立地铁网络时空演化模式奠定基础。

北京作为我国超大城市之一,其地铁运营服务正式对外开放于1971年,截止到2020年1月,经过将近半个世纪的扩张演化,网络运营线路达23条,是我国大城市中运营线路最多、发展历程最长的轨道交通基础设施,相比我国其它城市,北京地铁线网演进时间最长、网络发育较为成熟,以北京为研究区域,相比我国其它城市,演化数据具有先进、全面、完整的优势,基于北京地铁网络演化数据分析地铁网络演化具有有一定的基础和代表性,在全球大力推行绿色出行背景下,能够为我国其它城市的地铁发展提供借鉴。

结合以上背景及文献分析,本文基于复杂网络理论,以北京地铁为研究区域,通过Space-L建模方法,构建由车站、区间及运营线路组成的地铁网络空间结构。在此基础上,考虑网络结构连通性与复杂性的实际工程意义,结合地铁系统的物理属性,改进地铁网络空间结构发育状况评估方法,与网络结构复杂性评估方法。最后,利用1971—2020年北京地铁网络数据,建立20个地铁网络模型,从网络结构连通性与复杂性的层面解析地铁网络空间结构在线网扩张过程中成环指数、无标度和小世界的演化特征与演化机制识别。本文提出的地铁网络演化特征评估方法期待能够为建立和完善城市地铁网络演化理论体系提供依据,为后续北京地铁规划中改善轨道交通网络结构提供参考,并在全球大力推行绿色出行背景下,为我国其它城市地铁网络化政策和治理模式的修订提供经验。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 地铁网络空间结构模型构建

由地铁车站、区间轨道及运营线路形成的地铁网络空间结构,有不同的拓扑结构描述方法,如Space L、Space C、Space P^[1]。基于Space L的网络描述方法,将地铁线路上的车站抽象为网络的节点,将同一线路上两个相邻车站之间的轨道区间抽象为两个节点之间的边;基于Space C的网络描述方法,将地铁线路抽象为网络的节点,将两条相交线路的换乘车站作为两个节点之间的边,若两条线路的换乘车站不唯一,则将所有换乘车站的数目作为

边的权重,形成加权网络;基于Space P的网络描述方法,将地铁车站抽象为节点,节点之间的边表示相邻的两个车站在同一条运营线路上。

本文的研究目标在于从网络连通性、复杂网络的无标度与小世界特性方面研究地铁网络空间结构的演化特征,无标度特性的评估,需要构建的空间网络结构能够反映网络演化过程中新线路的接入机理,小世界特性的评估需要反映网络空间结构的聚集程度。由上述不同的网络描述方法可以看出,Space C方法强调线路之间的空间结构关系,而忽略车站在空间网络中的特征,适用于较为宏观的网络空间结构研究;Space P方法将在同一条线路上的车站之间都建立连边,无法反映同一条线路上车站之间的相邻连接次序。为了实现上述研究目标,本文采用Space L方法构建地铁网络空间结构模型。

1.1.2 空间结构演化特征计量方法

1.1.2.1 地铁网络结构连通性特征计量方法

网络环路指数与网络连接指数是评估地铁网络结构连通性的两个重要指标。已有研究将地铁网络的环路指数(α)定义为Space L空间结构中实际环路占理论最大环路的比值^[8,19],计算方法如公式(1)所示。

$$\alpha = \frac{e - n + 1}{(n - 1)(n - 2)} \quad (1)$$

式中: e 表示网络结构中边的数量,也就是轨道区间的数量; n 表示网络结构中节点的数量,也就是车站的数量;分子 $e - n + 1$ 表示网络中存在的环路数量;分母 $(n - 1)(n - 2)$ 表示网络中理论最大环路数量。公式(1)存在两个方面的问题:首先,网络中理论最大环路数量的计算不正确,对于由 n 个节点构成的网络,其理论上能够组成的三角形数量最大值为 $n(n - 1)(n - 2)/6$;其次,环路指数的物理意义在于考察网络结构形态的栅格化率,即网络中的每个栅格为一个环路,虽然同一条线路上的任意三个车站都可以构成一个环路,但是从网络结构形态层面看,由同一条线路上的任意三个车站组成的环路对网络的栅格形态无影响,因此,应在理论最大环路数量中排除由同一线路上的车站组成的环路数量。基于此,改进的网络环路指数(α')定义为:

$$\alpha' = \frac{6(e - n + 1)}{n(n - 1)(n - 2) - \sum_{s=1}^r m_s(m_s - 1)(m_s - 2)} \quad (2)$$

$(m_s \in l_s, s = 1, \dots, r)$

式中: m_s 表示运营线路 l_s 的车站数量, $m_s(m_s - 1)(m_s - 2)/6$ 表示运营线路 l_s 上 m_s 个车站能够组成的最大环路数目;网络中有 r 条运营线路。 $\alpha' = 0$ 时表示网络为树状结构, $\alpha' = 1$ 时表示网络为完全连通图。

已有研究将地铁网络的连接指数(γ)定义为Space L空间结构中实际存在的轨道区间数量占理论最大连接数量的比值^[8,19],计算方法如公式(3)所示。

$$\gamma = \frac{2e}{n(n - 1)} \quad (3)$$

式中: e 表示网络结构中边的数量,也就是轨道区间的数量;分母 $n(n - 1)/2$ 表示网络中 n 个节点之间理论上存在的最大轨道区间的数量。社会网络中的连接指数(γ)的物理意义表示各个成员之间实际存在的关系数量与理论上可能存在的关系数量的比值。地铁网络中,在同一条运营线路上的任意两个非直接相邻车站之间虽然未被轨道区间直接连接,但仍然能够不需要换乘而直接到达。公式(3)的定义中分子考察了被轨道区间直接连接的关系数量,而分母所考察的关系数量即包含了被轨道区间直接连接的关系数量,也包含了同一条运营线路上非直接相连但能够直达的关系数量,分子与分母考察的连接属性不一致,不具有可比性。基于此,改进的网络直达连接指数(γ')定义为地铁网络中实际存在的能够直达的关系与理论上可能存在的直达关系的比值,计算方法如下:

$$\gamma' = \frac{2e + \sum_{s=1}^r (m_s - 1)(m_s - 2)}{n(n - 1)} \quad (m_s \in l_s, s = 1, \dots, r) \quad (4)$$

式中: m_s 表示运营线路 l_s 的车站数量, $m_s(m_s - 1)/2$ 表示运营线路 l_s 上 m_s 个车站之间理论上可能存在的最大关系数量。 $\gamma' = 1$ 时表示网络为完全连通图。

1.1.2.2 网络无标度特征计量方法

对地铁网络标度特性的研究,是了解地铁网络的内在择优机制、建立地铁网络演化模型的基础,网络的扩张单位直接影响网络的标度特性^[21]。地铁网络是一种典型的物理轨道依赖型的公共交通网络,其增长以线路为单位,而非以车站为单位。在以线路为演化单位的交通网络中,“节点被连接次数”不能够反映实际网络的演化机制,以“经过车站的线路数目”作为评价节点度分布的指标具有实际意义^[13]。因此,基于课题租前期研究成果,本研究将地铁网络的度分布定义为:给定地铁网络中含

有 r 条运营线路, n 个车站,如果有 k 条运营线路经过车站 i ,则将线路度为 k 的车站数量记作 1 ,即 $i(k)=1$ 。网络中随机选择某个线路度为 k 的车站的概率定义为 $P(k)$ 。

$$P(k) = \frac{\sum i(k)}{n} \quad (5)$$

地铁网络中大部分车站只被一条线路经过,少数车站被两条及以上线路经过。基于此,本文假设地铁网络的线路度分布函数服从幂律分布 $P(k)=ak^{-\lambda}$ 、指数分布 $P(k)=\lambda e^{-\lambda k}$ 、漂移幂律分布 $P(k)=(a+k)^{-\lambda}$ 。虽然针对地铁网络度分布的参数估计已有大量研究,但因未进行分布函数的假设检验,估计过程与结果并不严格。基于此,本文首先利用 Matlab 拟合工具箱 cftool 对分布函数进行参数估计,在此基础上,采用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验统计量,对分布函数进行假设检验。当线路度分布服从幂律分布,则新线路偏好连接到换乘车站接入网络;当线路度服从指数分布时,新线路随机选择车站接入网络;当线路度分布服从漂移幂律分布,则新线路在接入网络时,既存在偏好选择又存在随机选择。

1.1.2.3 网络小世界特性计量方法

小世界网络最早由 Watts 和 Strogatz 在 1998 年提出^[1],用来描述网络的聚集程度和冗余程度,他们将高集聚系数和低平均路径长度作为评价物理网络是否具有小世界特性的特征值。首先,平均路径长度用来描述车站之间的分离程度,从乘客路径选择的费用感知层面来看,乘客通常偏好选择换乘次数最少的路径中,经过的车站数目最少的路径作为最短路径。因此,改进的网络的最短路径长度定义为网络的平均最小换乘最短路径(D),计算如下:

$$D = \frac{\min(\sum d'_{ij})}{n(n-1)}, [d'_{ij} \in (t'_{ij}), \text{且}(t'_{ij}) = \min t_{ij}] \quad (6)$$

式中: n 表示地铁网络中车站数目; t_{ij} 表示车站 i 到车站 j 的路径 d_{ij} 的换乘次数; (t'_{ij}) 表示车站 i 到车站 j 的换乘次数最小的路径集合; $\min d'_{ij}$ 表示换乘次数最小的路径中,经过的车站数目最小的路径。

其次,聚类系数用来描述网络中所有车站的平均聚集程度^[3],也就是指定车站与任意两个邻居车站组成环路的数量与理论最大可能存在环路数量的比值。首先,地铁网络中,由于同一条线路上的任意两个车站不需要换乘就能到直接到达,也应该视作邻居节点;其次,聚类系数的计算应该能够区

别量化直接相邻(通过一个轨道区间直接连接)和间接相邻(通过大于一个轨道区间连接)。因此,基于课题租前期研究成果^[2],改进的聚类系数定义为:

$$c_i = \frac{2}{3} \frac{\sum_{k>j, k \in l_i, j \in l_i} \left(\frac{1}{a_{ij}} + \frac{1}{a_{jk}} + \frac{1}{a_{ki}} \right) + \sum_{li} \left[(V_{li} - 3) \sum_{j \in V_{neighbour}(i)} \frac{1}{a_{ij}} + \frac{1}{2} \sum_{i,j \in l_i} \frac{1}{a_{ij}} \right]}{V_{neighbour}(i) [V_{neighbour}(i) - 1]} \quad (7)$$

式中: l_i 表示经过车站 i 的线路; a_{ij} 为任意两个车站间的区间数目; $V_{neighbour}(i)$ 表示车站 i 的直接相邻与间接相邻的邻居车站数目。地铁网络的聚类系数 C 为:

$$C = \frac{1}{n} \sum c_i \quad (8)$$

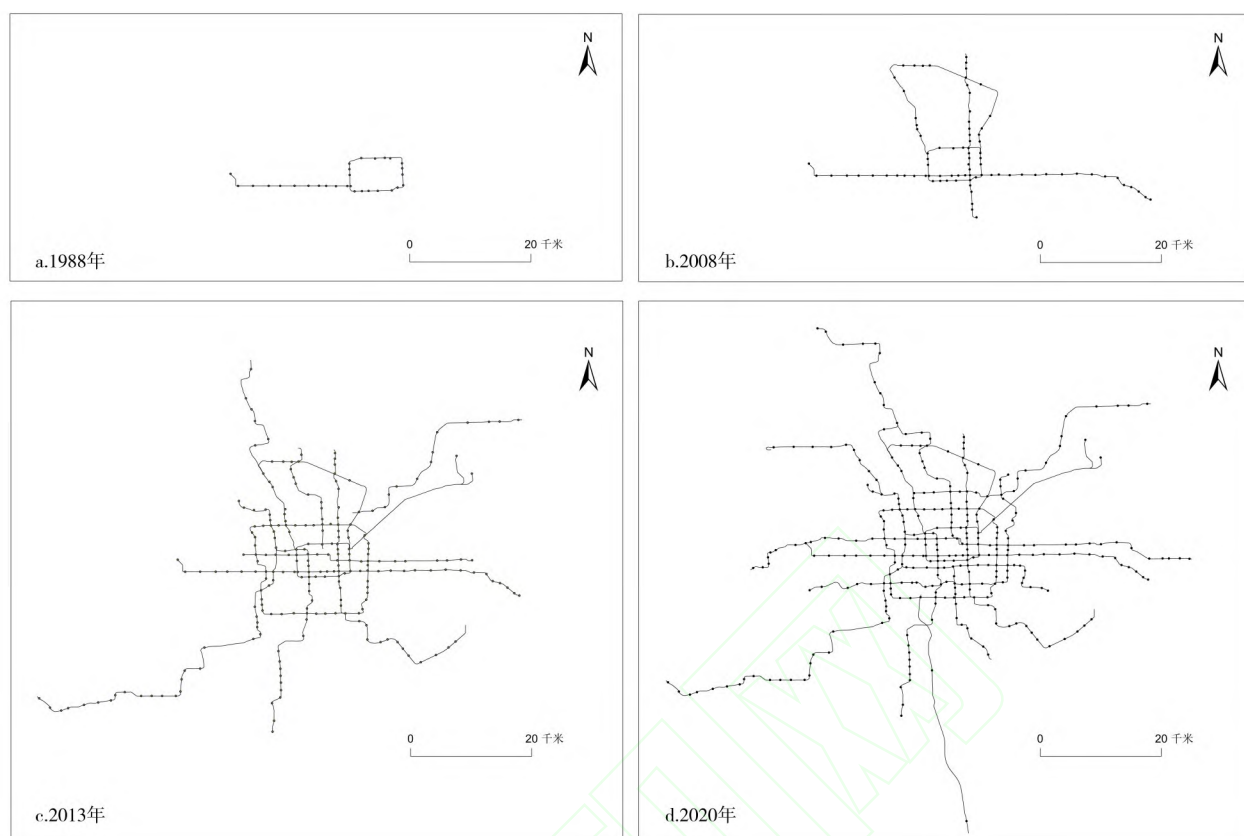
聚类系数(C)的取值为 $[0, 1]$,当网络中所有车站的邻居车站之间不存在可达路径时,取值为0;当网络中所有车站的邻居车站都为直接相邻时,取值为1。所以聚类系数 C 越接近于0,表示网络的聚集程度越低,网络的冗余度越低;聚类系数 C 越接近于1,表示网络的聚集程度越高,网络的冗余度越高。

1.2 研究区域与数据来源

北京地铁运营线路、车站、区间数据以北京地铁官方网站披露的地铁大事记为基础,借助 GIS 平台,通过数字化处理,建立不同年份北京地铁网络空间结构数据库。图1为4个变化显著的北京地铁网络结构图。1988年,北京地铁网络由1号线和2号线组成,由于2号线为环线,使北京地铁由单线结构演化发展至环路结构;2008年,北京地铁网络由5条线路、84个车站和174条区间轨道组成;2013年,北京地铁网络由16条线路、224个车站和498条区间轨道组成;2020年,网络由23条线路、337个车站和752条区间轨道组成。北京地铁在不同的时期呈现出不同的发展特征:1971—2007年,1号线和5号线在北京市区覆盖范围构成了一个“+”,同时,由2号线环线服务核心区内通勤、13号线半环线服务核心区外通勤,基本完成了骨干线路建设;在奥运会的推动下,2008—2012年,北京地铁建设以服务奥运为主导,如8号线、机场线的建设;在2013—2020年,北京地铁进入了平稳发育阶段,通过新建线路,不断提升线网覆盖的规模。

2 北京地铁网络空间结构的演化特征

基于 MyEclipse 平台自编程序实现 Space L 空间地铁网络的构建,实现网络环路指数(α')、网络



注:数据来源于北京地铁公司——地铁大事记。

图1 北京地铁网络空间结构

Fig.1 The spatial structure of the Beijing subway network

直达连接指数(γ')、网络的最小换乘最短路径长度(D)、聚类系数(C)算法。在此基础上,计算1971—2020年北京地铁网络20个不同演化阶段的空间结构发育状况、小世界特性及线路度分布;根据线路度分布,利用Matlab拟合工具箱cftool对度分布函数进行参数估计,进一步对参数估计结果进行K-S检验,通过检验结果确定线路度分布函数。

2.1 北京地铁网络结构连通性演化特征

由1988—2020年网络环路指数(α')和网络直达连接指数(γ')的演化趋势可以看到(图2),随着地铁网络的扩张演化,网络环路指数与网络直达连接指数总体呈下降趋势。1988—2007年,网络环路指数与网络直达连接指数的下降幅度最大,2008—2012年降幅较1988—2007年减小,2013—2020年,网络环路指数和网络直达连接指数分别出现了回升并保持稳定的趋势,说明北京地铁网络扩张到中、后期,拓扑结构的连接性逐渐开始改善。但从整体来看,整个发展阶段中,2个指标值都偏小,北京地铁网络的拓扑结构连接性不强,与完全连通图相比,北京地铁网络的空间连通性发育水平仍然较

低,有很大的改善空间。

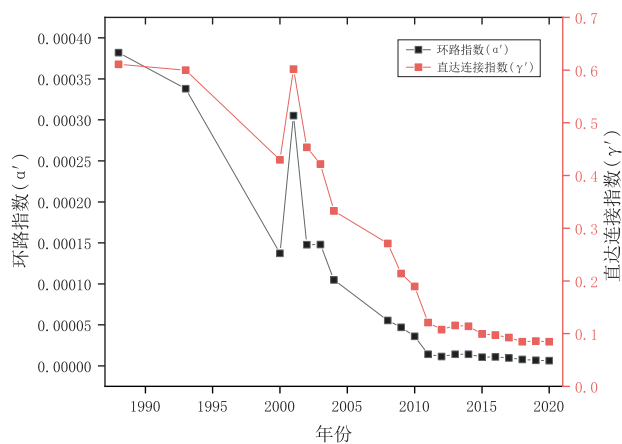


图2 1988—2020年网络环路指数(α')和网络直达连接指数(γ')的演化趋势

Fig.2 The evolution trend of network meshedness index (α') and network direct connection index (γ') from 1988 to 2020

2.2 线路度分布的演化特征

根据换乘车站与非换乘车站的分布情况,假设北京地铁网络的线路度分布函数服从幂律分布

$P(k) = ak^{-\lambda}$ 、指数分布 $P(k) = \lambda e^{-\lambda k}$ 、漂移幂律分布 $P(k) = (a + k)^{-\lambda}$, 利用 Matlab 拟合工具箱 cftool 对拟合较好的分布函数进行参数估计, 并对分布函数进行 K-S 检验, 检验结果见表 1。由检验结果可以看到漂移幂律分布 $P(k) = (a + k)^{-\lambda}$ 的 P 值大于幂律分布 $P(k) = ak^{-\lambda}$ 与指数分布 $P(k) = \lambda e^{-\lambda k}$, 拟合效果最优。

参数 a 的大小是决定网络演化的主要机制。当 $a=0$ 时, 漂移幂律函数为幂律分布, 新增线路倾向于选择已有换乘车站换乘; 当 $a \rightarrow \infty$ 漂移幂律函数趋向于指数分布, 地铁网络扩张过程中新增线路在已有车站中随机选择车站进行换乘。标度系数 λ 的大小表示网络的异质性程度, λ 越大, 表示网络的异质性程度越低, 换乘车站网络中所占的比例越小, 吸引力强的换乘车站越少; λ 越小, 表示网络的异质性程度越高, 换乘车站网络中所占的比例越大, 吸引力强的换乘车站越多, 枢纽效应越显著。当网络中换乘车站与非换乘车站比例相同时, λ 的大小取决于吸引力强的换乘车站与吸引力弱的换乘车站的比例, 吸引力强的换乘车站比例越大, λ 越大, 异质性程度越大, 枢纽效应也越大。

由表 1 可见, 整体上看, 参数 a 的取值随着网络的扩张演化而增大, 而标度系数 λ 的取值随着网络的扩张演化而减小。参数 a 的取值演化趋势说明地铁网络建设初期, 新增线路在选择已有车站接入

网络时以偏好选择为主导, 随着网络的扩张演化, 偏好选择的同时还存在一定程度的随机性。标度系数 λ 的取值在 1988—2008 年呈快速减小趋势, 该阶段北京地铁网络的标度系数 λ 最大, 网络空间结构的异质性程度最低, 换乘车站网络中所占比例的较小, 网络中不存在吸引力强的换乘车站; 2009—2013 年有小幅增加趋势, 但异质性程度高于上一阶段, 网络空间结构的异质性程度提高, 换乘车站网络中所占比例的增加, 网络中吸引力强的换乘车站增加; 2014—2018 年呈缓慢减小且趋于稳定的趋势, 网络空间结构的异质性程度提高, 换乘车站网络中所占比例增加, 网络中吸引力强的换乘车站数量保持不变。然而, 相比全球发育更加成熟的地铁网络, 如东京、伦敦、纽约^[22], 北京地铁网络空间结构的异质性程度仍然较低。2019—2020 年异质性程度有所减小, 枢纽效应降低, 说明北京地铁网络在 2019—2020 年的扩张方式相比 2019 年前发生了很大的变化。

2.3 小世界特性的演化特征

由表 3 可见, 北京地铁网络的聚类系数 C 的取值在 $[0.2576, 0.3429]$ 之间, 网络的聚集程度、冗余度相对较低。1988—2020 年, 聚类系数 C 的取值总体呈下降趋势, 2000 年, 由于短线复八线投入运营, 北京地铁网络的聚类系数提高, 且达到演化考察周期的峰值 0.3429, 2001 年复八线与一号线贯通, 一

表 1 1988—2020 年北京地铁网络线路度分布与 K-S 检验结果
Tab.1 Degree distribution and K-S test of Beijing subway network from 1988 to 2020

年份	$P(k) = ae^{-\lambda k}$			$P(k) = ak^{-\lambda}$			$P(k) = (a + k)^{-\lambda}$		
	a	λ	P 值	a	λ	P 值	a	λ	P 值
1988	0.0344	3.3350	0.10	0.9655	4.851	0.82	0.0225	4.808	0.93
1993	0.0333	3.3700	0.10	0.9667	4.9	0.82	0.0247	4.857	0.91
2000	0.0523	2.8960	0.12	0.9474	4.242	0.82	0.0006	4.276	0.92
2001	0.0510	2.9240	0.12	0.9488	4.279	0.82	0.0002	4.338	0.91
2002	0.0633	2.6950	0.14	0.9363	3.964	0.82	0.0033	4.024	0.95
2003	0.0745	2.5190	0.15	0.9247	3.723	0.82	0.0053	3.772	0.92
2004	0.0919	2.2890	0.18	0.9065	3.411	0.82	0.0235	3.459	0.92
2008	0.1043	2.1480	0.20	0.8930	3.219	0.82	0.035	3.296	0.93
2009	0.1279	1.9060	0.24	0.8610	2.874	0.76	0.052	2.976	0.91
2011	0.1243	1.9340	0.23	0.8600	2.899	0.84	0.052	3.002	0.94
2012	0.1140	2.0360	0.21	0.8740	3.043	0.83	0.044	3.135	0.91
2013	0.1141	2.0370	0.21	0.8750	3.047	0.81	0.044	3.138	0.91
2014	0.1474	1.7350	0.28	0.8360	2.64	0.75	0.067	2.76	0.89
2015	0.1590	1.6420	0.30	0.8230	2.517	0.72	0.077	2.647	0.92
2016	0.1561	1.6670	0.30	0.8270	2.553	0.71	0.073	2.679	0.93
2017	0.1652	1.5970	0.32	0.8170	2.459	0.68	0.081	2.592	0.94
2018	0.1630	1.6140	0.31	0.8200	2.482	0.69	0.079	2.613	0.92
2019	0.1578	1.6550	0.30	0.8260	2.538	0.69	0.074	2.664	0.92
2020	0.1552	1.6760	0.30	0.8300	2.567	0.69	0.072	2.691	0.92

注: K-S 检验原假设 H_0 : 数据服从某一分布。 $P < 0.05$, 拒绝原假设。

号线的长线运营,降低了网络的平均聚类系数。2001—2012年,网络的聚类系数值波动较大,2013—2020年,北京地铁年均扩张演化速度由1988—2012年的27.08%降低至6.25%,聚类系数 C 的取值缓慢减小且年均环比变化(Average Annual Change, AAC)趋向于-2%以下。

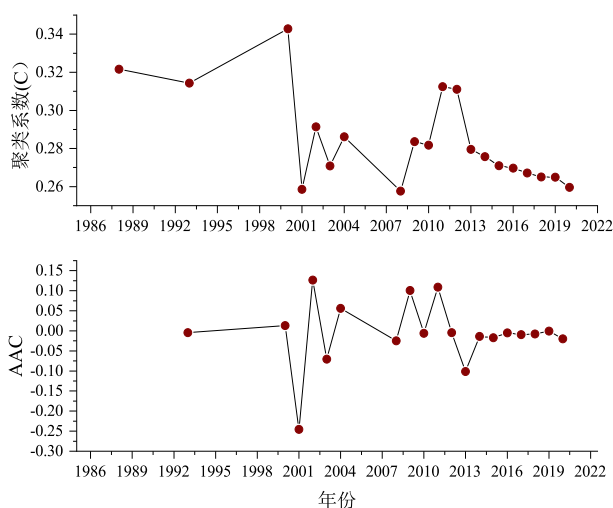


图3 1988—2020年北京地铁网络空间结构聚类系数演化过程

Fig.3 Cluster coefficient evolution of Beijing subway network from 1988 to 2020

与此同时,由图4可见,1988—2020年,北京地铁网络平均最小换乘最短路径长度总体呈增长趋势,网络中任意两个车站之间的距离由1988年的10站增加到19站,说明,北京地铁网络的扩张以新建车站、提高线网覆盖范围为主导。2001年,由于复八线与一号线贯通,北京地铁网络的平均最小换乘最短路径降低,且达到演化考察周期的低谷值8站。2004年前,网络的平均最短换乘最短路径长度等于网络的最短路径长度,而2004年之后,前者略大于后者,说明:从小世界层面来看,线网扩张演化一定程度上减小了网络的分离程度,而二者的增长趋势说明网络尺度增加带来的分离程度增加。

3 北京地铁网络空间结构演化驱动机制

由上述研究结果可以看到,虽然北京地铁网络演化发展将近半个世纪,但网络结构连通性发育水平仍然较低,网络结构复杂性较小。将上述演化特征与线网结构相结合,分析其演化特征的成因,可以概况为两个方面的驱动机制。

3.1 覆盖范围与廊道走向驱动机制

建国初期,中共北京市委向中央上报了《关于

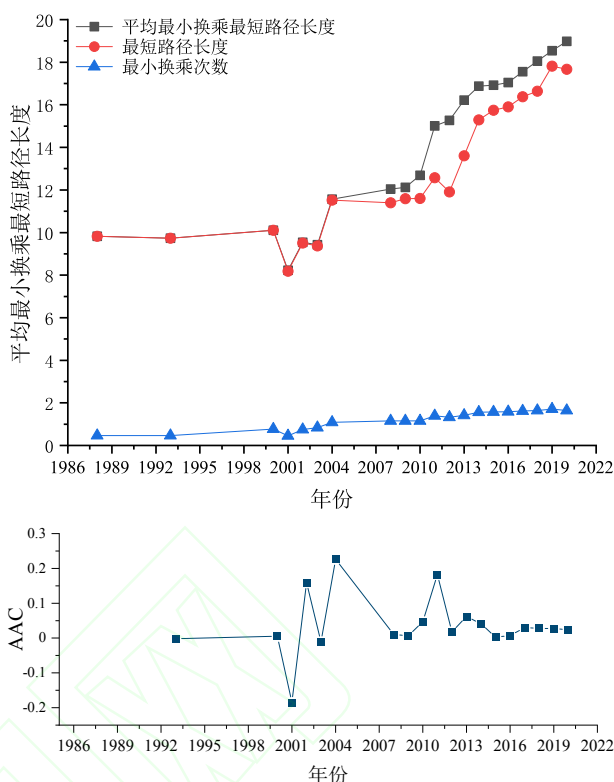


图4 1988—2020年北京地铁网络空间结构最小换乘、最短路径长度演化过程

Fig.4 Evolution of Beijing subway network based on minimal transfer stations with the shortest between the original and terminal stations from 1988 to 2020

改建与扩建北京市规划草案的要点》,其中明确提出:“为了提供城市居民以最便利、最经济的交通工具,必须及早筹划地下铁道的建设。”1971—2007年,北京地铁网络先后依北京市东西交通主干、二环中心区、北京北部三大边缘集团,建设并投入运营1号线、2号线、13号线、基本完成了骨干线路建设;2008—2012年,北京地铁网络快速扩张,先后有城市东部、西部两条南北运营主线4号线和5号线投入运营、城市中心区与郊区的连接线15号线东段、9号线、大兴线、亦庄线、昌平线、房山线投入运营,同时以服务奥运为主导,完成8号线、10号线、机场线的建设并投入运营。2013—2020年,先后有6号线、14号、7号线、16号线、燕房线、S1线、大兴机场线等7条线路建成并投入运营。

从1988年北京地铁网络出现闭合环路起,至2020年,衡量网络结构连通性的网络环路指数、网络直达连接指数与衡量网络小世界特性的网络聚类系数,总体都呈下降趋势,同时,衡量网络小世界特性的最小换乘最短路径长度呈增长趋势,这些演化特征说明,到目前为止,北京地铁网络空间结构

以新建车站的方式扩大线网覆盖范围为线网演化的主导驱动机制。也就是说,北京地铁网络空间结构的演化主要受北京城市既有功能布局与总体规划影响,大部分线路建设都是为了覆盖既有城市功能布局与总体规划范围而规划建设。增加覆盖型线路的线网演化方式,由于线网的尺度增大,线网结构的栅格形态、非中心区域车站都具有稀疏性,车站的邻居车站之间可达性较差,是出现连通性、小世界特性指标值呈下降趋势的主要原因。

2013—2020年,上述指标的变化速度趋于稳定且变化率降低。究其原因,该阶段有少部分线路的建设,是在已有线网覆盖的情况下,通过进一步提高线网密度而优化网络,如7号线、14号线。线网优化型线路通过与已有建立轨道区间的方式,提高线网结构形态的栅格化率,增加车站的邻居车站直接的可直达性,提高网络的聚集程度,降低线网平均最短换乘次数与平均最小区间距离,提高出行便利程度,北京地铁网络仍然有很大的改善空间。

3.2 随机选择与优先连接机制

由线路度分布结果可以看到,北京地铁网络空间结构不是完全服从幂律分布,尽管拓扑上的偏好依附对网络的演化影响很大,但并不是唯一支配地铁网络演化依附机理,其度分布并不严格服从幂率分布。也就是说,北京地铁网络扩张过程中,新增线路并不是完全按照旧车站的换乘能力择优连接的,标度系数 λ 减小的另一个驱动力是新增线路随机选择非换乘车站与已有网络进行连接。在线网建设初期,参数 a 的取值较小,新增线路接入已有网络以偏好选择为主导驱动机制。线网建设初期,为了满足交通需求,新增线路偏好选择交通枢纽或其它政治、商业、旅游等热点车站与已有网络建立连接关系,例如2号线由复兴门车站与1号线建立连接,复兴门车站位于长安街与二环路交叉口,是重要交通节点;13号线由西直门站、东直门站与已有网络建立连接,二者均为重要交通枢纽。由于网络发展的初始阶段,由于线路数量有限,能够产生的换乘车站数量相比非换乘车站数量差距较大,因而在地铁网络发展的初始阶段,标度系数 λ 的取值较大。

随着线路数量增多及网络栅格数量增加,新增线路在择优选择已有车站作为换乘车站时,还受既有功能布局与总体规划廊道走向的约束、廊道走向上既有车站的约束,并不能完全按照既有车站的线路度分布进行择优选择。地铁线路、车站规划相比

社会网络有其特殊性:首先,由于地铁网络服务功能特殊性,线路规划受到交通需求约束,因此,新增线路的走向具有一定的指向性;其次,由于新建物理轨道的经济成本、地理空间等约束,在特定指向上新建轨道区间与车站,受到既有车站约束,当指定方向上的有限感知范围内不存在既有车站时,则新建车站,当指定方向上存在既有车站,则新建车站通过与既有车站建立轨道区间接入网络。因此,接入网络的既有车站的选择无法完全服从偏好选择,特别是在网络演化的中、后期,偏好选择的同时还存在一定程度的随机性,这也是线路度分布函数中参数 a 的取值逐渐变大的驱动机制。同时,由于网络演化的中、后期,线路数量增多及网络栅格数量增加,由于指定方向上存在既有车站的比例增加,相应地,新增线路上既有车站的比例也增加,也就是每新增一条线路,产生的换乘车站数量要高于网络建设初期,网络的异质性程度逐渐上升,标度系数 λ 的取值逐渐减小。但由于北京地铁网络扩张至目前为止仍以扩大线网覆盖规模为主要扩张方式,只有少量线路以增加线网密度为建设目标,因此,每新增一条线路,产生的换乘车站数量有限,这也是北京地铁网络相比全球发展较为成熟的地铁网络复杂性较低的原因。

4 结论及建议

基于复杂网络理论的网络连通性、无标度特性和小世界特性,更加直观地刻画了北京地铁网络的时空演化特征与机制。研究结果表明,北京地铁网络虽然经过将近半个世纪的演化发展,但网络结构连通性发育水平仍然较低,网络结构复杂性较小,其成因机制主要为新增线路存在随机选择与优先连接的双重演化机制,并且随机选择受到北京城市既有功能布局与总体规划范围内交通需求的廊道走向约束,根据上述研究可以得到以下结论与建议:

第一,北京地铁网络空间结构不是完全服从幂律分布,尽管拓扑上的偏好依附对网络的演化影响很大,但研究结果表明这并不是唯一支配地铁网络演化依附机理,其度分布并不严格服从幂率分布。也就是说,北京地铁网络扩张过程中,新增线路并不是完全按照旧车站的换乘能力偏好选择换乘车站的;标度系数 λ 减小的另一个驱动力是新增线路随机选择非换乘车站作为换乘车站。因此,北京地铁网络时空演化机制建模需要同时考虑偏好连接

与随机选择机制。

第二,新建线路随机选择已有车站作为换乘车站时,需要受既有功能布局与总体规划廊道走向的约束。新建线路随机选择已有车站作为换乘车站时,并非在所有已有车站中随机选择,而是在指定走向上的有限感知范围内随机选择已有车站作为换乘车站,这种情况下,网络通过新建区间实现扩张演化。若已有车站超出感知范围,则网络通过新建车站与区间实现扩张演化。

第三,适度规划优化型线路,提高网络的聚集程度,降低出行成本。从线路的功能类型层面看,1971—2020年,北京地铁网络的空间结构扩张演化以覆盖性线路投入为主。覆盖型线路的线网演化方式会降低线网的聚集程度,增大线网平均最少换乘次数、最短换乘距离与平均最小区间距离。通过规划优化型线路,改变单中心的发展格局,引导城市空间结构的改善,降低出行成本,提高网络的聚集程度。

最后,由北京地铁网络的演化特征与演化机制的实证分析看到,基于复杂网络理论与地铁网络特殊属性构建的网络连通性和小世界特性评估方法,能够更加客观地刻画地铁网络的时空演化进程中的主导驱动机制,揭示地铁网络演化过程遵循的由扩大线网覆盖范围到提高线网密度为主导的驱动机制演变;同时,通过北京地铁网络线路度分布的演化规律分析得到的漂移幂律分布,证实并揭示了地铁网络空间结构新增线路的连接机制由初期偏好选择到中、后期的伴有随机性的偏好选择的演变过程。客观地评估地铁线网结构的复杂性特征演化规律与机制,能够为各个城市地铁网络的动力学分析与控制提供基础,如研究地铁线网结构演变过程中的复杂性与供给效率之间的关联关系,复杂性对扰动的传播与吸收特征等动力学问题,通过了解线网结构演变过程中的复杂性特征与动力学特征的关系,干预线网结构的演变、优化线网结构,进而控制动力学表现。

参考文献:

- [1] von Ferber C, Holovatch T, Holovatch Y, et al. Public transport networks: empirical analysis and modeling[J]. *European Physical Journal B*, 2009, 68(2): 261 – 275.
- [2] 王志如, 苏国锋, 梁作论. 基于信息传递效率的地铁网络小世界特性评价[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2016(4): 411 – 416.
- [3] Zhang J, Xu X, Hong L, et al. Networked analysis of the Shanghai subway network, in China[J]. *Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications*, 2011, 390(23): 4562 – 4570.
- [4] Zhiru W, Wubin M, Albert C. Exploring the relationships between the topological characteristics of subway networks and service disruption impact[J]. *Sustainability*, 2020, 10(12): 3960.
- [5] Zhalechian M, Torabi S A, Mohammadi M. Hub-and-spoke network design under operational and disruption risks[J]. *Transportation Research Part E*, 2018, 109: 20 – 43.
- [6] Lu Q. Modeling network resilience of rail transit under operational incidents[J]. *Transportation Research Part A-Policy and Practice*, 2018, 117: 227 – 237.
- [7] Oded Cats G K M W. Robustness assessment of link capacity reduction for complex networks[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017(167): 544 – 553.
- [8] Cats O. Topological evolution of a metropolitan rail transport network: The case of Stockholm[J]. *Journal of Transport Geography*, 2017, 62: 172 – 183.
- [9] Mattsson L, Jenelius E. Vulnerability and resilience of transport systems-A discussion of recent research[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 81: 16 – 34.
- [10] Eduardo R, Juan G C. Measuring the vulnerability of public transport networks[J]. *Journal of transport geography*, 2014, 35: 50 – 63.
- [11] Zhang X, Miller-Hooks E, Denny K. Assessing the role of network topology in transportation network resilience[J]. *Journal of transport geography*, 2015, 46: 35 – 45.
- [12] 周溪召, 智路平. 城市轨道交通网络演化和形成影响因素研究[J]. *交通与运输(学术版)*, 2016(1): 148 – 151.
- [13] 丁益民, 丁卓, 杨昌平. 基于社团结构的城市地铁网络模型研究[J]. *物理学报*, 2013(9): 508 – 514.
- [14] Wang Z, Niu F, Yang L, et al. Modeling a subway network: A hot – point attraction-driven evolution mechanism[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2020, 537: 122625.
- [15] Cats O, Vermeulen A, Warnier M, et al. Modelling growth principles of metropolitan public transport networks[J]. *Journal of Transport Geography*, 2020, 82: 102567.
- [16] 周群, 马林兵, 陈凯, 等. 一种改进的基于空间句法的地铁可达性演变研究——以广佛地铁为例[J]. *经济地理*, 2015, 035(3): 100 – 107.
- [17] 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.
- [18] 郭谦, 吴殿廷, 鲍捷. 基于换乘效率指数的北京轨道交通网络通达性评价及其成因分析[J]. *经济地理*, 2012, 32(11): 38 – 44.
- [19] 陈少沛, 李勇, 庄大昌, 等. 地铁网络可达性时空演化及空间形态分析[J]. *测绘科学*, 2018, 43(3): 123 – 130.
- [20] 龙玉清, 陈彦光. 京津冀交通路网结构特征及其演变的分形刻画[J]. *人文地理*, 2019, 34(4): 115 – 125.
- [21] 蔡萌, 杜海峰, 费尔德曼. Caveman网络及其在复杂网络熵分析中的应用[J]. *系统工程理论与实践*, 2017(9): 2403 – 2412.
- [22] 王志如, 梁作论, 袁竞峰, 等. 地铁网络无标度特性分析[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2013(4): 895 – 899.