DOI: 10.13791/j.cnki.hsfwest.20220514
庞磊, 任利剑, 运迎霞. 复杂系统视角下伦敦都市圈轨道交通与空间结构互动发展研究究[J]. 西部人居环境学刊, 2022, 37(5): 98-105.
PANG L, REN L J, YUN Y X. Research on Interactive Development of Rail Transit and Spatial Structure of London Metropolitan Circle from the Perspective of Complex System[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2022, 37(5): 98-105.

复杂系统视角下伦敦都市圈轨道交通与空间结构互动发展研究*

Research on Interactive Development of Rail Transit and Spatial Structure of London Metropolitan Circle from the Perspective of Complex System

庞　磊　　任利剑　　运迎霞　　PANG Lei, REN Lijian, YUN Yingxia

摘　要: 轨道交通网络演变与都市圈空间结构发展有着相互协同的关系。选取受轨道交通网络影响显著, 空间格局呈“一核多心”式分布的伦敦都市圈为研究对象, 基于复杂网络理论的方法构建轨道交通网络生长模型, 分析网络复杂性特征演变规律, 并进一步分析轨道交通与都市圈空间结构演变的互动关系。结果表明: 第一, 中心枢纽站点扁平化组织分布以及轨道网络的传播效应均与都市圈多中心空间结构存在协同发展关系; 第二, 轨道交通与都市圈空间结构存在三个互动规律: 两者通过势能差互动滋长、轨道交通引导圈层结构变迁、站点分化引导空间重构。最后对我国都市圈轨道交通的发展建设提出了 “破除边界”“内优外联”“适度超前”三方面的策略建议。

关键词: 复杂网络; 都市圈; 多层次轨道交通; 空间结构

中图分类号　TU984.3
文献标识码　B
文 章 编 号　2095-6304（2022）05-14-08

*国家自然科学基金面上项目（52278070）; 天津大学自主创新（2022XS-0003）

作者简介
庞　磊: 天津大学建筑学院, 博士研究生
任利剑（通讯作者）: 天津大学建筑学院, 副研究员, 20199384@qq.com
运迎霞: 天津大学建筑学院, 教授

Abstract: At present, the characteristics of the times in China's metropolitan areas are increasingly obvious, which are mainly manifested in population growth, employment commuting, space expansion, industrial linkages and regional linkage. According to the development experience of international mature metropolitan areas, the construction of rail transit network plays an important role in promoting the evolution of the characteristics of the spatial structure of metropolitan areas, which is mainly reflected in improving the synergistic and complementary functional network and accelerating the efficient and convenient factor flow. Therefore, to promote the coordinated development of the rail transit network and the spatial structure of metropolitan areas is the key to the construction of modern metropolitan areas. However, at the present stage, the types of rail transit in metropolitan areas in China are relatively single, mainly based on the subway system, which is difficult to meet the future development needs of metropolitan areas. The author chooses London metropolitan area which is relatively mature in the world as the research object, through exploring its development and evolution rules, in order to provide corresponding experience for the development planning of China's metropolitan area. The rail transit in London metropolitan area has experienced 180 years of construction, and a relatively complete multi-level rail transit network has been formed within the metropolitan area, including the suburban railway system and the subway system. At the same time, the spatial pattern of London metropolitan area shows a typical distribution of “one core and many centers” under the influence of the rail transit network. The overall research is mainly divided into three stages. First, the research method of complex network is used to construct the growth topology model of the rail transit network in each development stage of the metropolitan area. Gephi is used to calculate and analyze the complex eigenvalues of the longitudinal evolution of the rail transit network, and the characteristic evolution law of the rail transit network is summarized. Secondly, it measures the evolution of population density distribution, construction land scale and other factors in each period of the metropolitan area, so as to measure and analyze the spatial structure of London metropolitan area. Finally, the interactive relationship between the rail transit network and the spatial structure evolution of the metropolitan area is analyzed, and the interaction rules of the system are summarized

by comparing the characteristics. The results show that: 1) There is a synergistic development relationship between the distribution characteristics of central hub station and the polycentric spatial structure of metropolitan area, and the propagation effect of rail transit network is also synergistic development relationship with the polycentric spatial structure of metropolitan area. 2) There are three interaction rules between the rail transit network and the spatial structure of the metropolitan area. Firstly, the growth of the rail transit network and the development of the metropolitan area are a pair of long-term spatial interaction processes, which grow and co-evolve through the self-organization effect, completing the life cycle from disorder to order and from low level to high level. Secondly, rail transit leads to the change of urban circle structure, and promotes the diffusion of urban elements such as population and industry inside the central city of the metropolitan circle to the outer circle. Thirdly, densification process of rail transit network makes urban circle rail transit site evolution happen "Matthew effect", the differentiation of the generated hub site in the whole network system plays an important leading role of radiation, the peripheral areas of metropolitan circle forming several times center point or along the corridor between hub site form growth axis, thus induce space reconstruction. Therefore, it puts forward that we should pay attention to the interaction and dynamic mechanism of multi-level rail transit network and spatial structure in the development of Chinese metropolitan areas, and puts forward three suggestions for the development and construction of rail transit in Chinese metropolitan areas: first, it should break down the administrative boundary barriers and support the cross-city development of municipal commuter rail; secondly, the spatial development trend of metropolitan area should be deployed in advance, and the matching process between the spatial structure of metropolitan area and the rail transit network should be considered in a longer time dimension. Finally, it is necessary to continuously enhance the connectivity of core nodes in the central urban area, promote the energy level upgrading of important functional nodes, and extend the connection of peripheral towns or new functional nodes.

Keywords: Complex Network; Metropolitan Area; Multi-level Rail Transit; Spatial Structure

0 引言

我国已进入城镇化2.0阶段，为了适应新形势下城市发展需求，现代化都市圈建设逐步受到国家和地方政府的关注。根据国际成熟都市圈的发展经验来看，轨道交通网络的建设对于都市圈空间结构特征要素的演变起着重要的推动作用，主要体现在完善协同互补的功能网络和加快高效便捷的要素流动两个方面。因此，构建多层次轨道交通网络已成为支撑都市圈培育发展的重要抓手[1]。

国内外学者在轨道交通与城市协同发展方面做出了诸多探索，例如彼得·霍尔（Peter Hall）[2]探索了英国城际铁路对城镇空间发展的积极影响；藤井正[3]、佐佐木（Sasaki）[4]等学者探索了日本轨道交通对城市多核化与郊区化发展趋势的影响；任利剑[5]从不同尺度下探讨了天津轨道交通系统与城市功能组织之间的互动机理；全永燊[6]、陈小鸿[7]等学者对多层次轨道交通与上海都市圈多尺度空间协同进行了研究；王宇宁[8] 以巴黎与天津为例，研究了轨道交通影响下大城市边缘城镇发展模式的特征。现有研究主要是从多类型、多尺度等角度展开对两者作用关系的研究，较少的从城市等级与交通等级叠合或分异的关系展开论述，而运用复杂网络能够从拓扑结构的视角剖析都市圈空间与轨道交通网络空间的耦合关系。

国内外已有许多学者开始借助复杂网络来研究轨道交通网络，例如国外学者拉托拉（Latora）[9]、 库拉尔特（Kurarrt）[10]、西塞尔（Sybil）[11]运用复杂网络分别对美国、欧洲等地区的城市轨道交通网络展开研究，证明它们具有无标度特性及小世界效应；国内学者陈宽民通过对中国10个典型城市的地铁交通网络建模来证明大型换乘站点对提升网络整体效率及增强网络稳定性的重要作用[12]；陈培文[13]、丁小兵[14]运用复杂网络研究了北京、上海地铁交通网络的运营情况。目前国内外关于轨道交通复杂网络结构与性质的研究多集中在地铁交通线网和站点的空间拓扑结构及地铁线网结构稳定性研究方面，对于多层次轨道交通网络复杂性的研究较少；其次，对于轨道网络复杂性的研究基本上是对线网的现状进行建模分析，对于轨道交通网络复杂特征演变的分析较少；更是缺少将轨道交通复杂网络特征与都市圈空间结构统筹考虑、关注彼此互动关系及演化行为的研究。

本文通过分析多层次轨道交通复杂网络特征与都市圈空间增长的要素、结构和形态之间的互动关系，探索两者构成的协调演变系统的发展演变规律，进一步丰富和充实复杂网络理论在轨道交通与都市圈空间结构耦合发展方面的研究，为未来都市圈空间增长与轨道交通建设的可持续发展提出参考性建议。考虑到我国都市圈未来主要采取中心城市与周边城镇一体发展的构成方式，本文通过对典型且发育成熟的"一核多心式"布局的伦敦都市圈展开研究，对其一百多年来轨道网络生长及空间格局变迁历程进行梳理，从复杂网络的视角认识轨道网络特征与都市圈空间结构演变的互动关系。

1 复杂网络相关理论

1.1 复杂网络概况

在复杂系统研究中，复杂网络是实际网络拓扑结构被抽象出来的图形，网络是由许多节点和连接各个节点间的边组成的复杂系统，节点表示真实系统中相互联系的各个实体，可以是任何具有特定动力和信息内涵的基本单位，而边表示各个基本单位实体间的相互连接关系。20世纪末，随着小世界网络与无标度网络的研究发现[15]，自然界

中大量真实网络已经被学者们证明是复杂网络，例如交通网络、社会关系网络、信息网络、流行病传播网络等，进入21世纪后，复杂网络理论研究在各个领域被广泛应用。

1.2 复杂网络统计特征指标

复杂网络的拓扑学性质主要通过不同的统计特征指标来描述，不同领域的复杂网络统计特征指标也会有所差异，本文主要使用以下5类统计特征指标。

2 伦敦都市圈及其轨道交通网络概况

2.1 伦敦都市圈概况

本文研究的伦敦都市圈主要是指伦敦大都市区，总面积1.14万平方千米，根据功能布局及通勤距离等因素的影响，划分为内伦敦、外伦敦和伦敦大都市区三个圈层（图1，表2）[17]。

伦敦都市圈大致经过了100多年的发展历程，主要经历了集聚发展、蔓延发展、疏散发展、集约发展四个阶段[18]，具体演变特征如表3所示。

表1 主要统计特征指标

Tab.1 main statistical characteristics

度量指标概念	相关公式
节点数与边数 轨道交通网络实际是节点和连边的集合，节点数N指网络中站点的数量和，边数Q指站点与站点间连线的数量和。	$N=\sum n$ $Q=\sum q$
度、平均度、度分布 节点度k是指与节点相连接的邻近节点数；网络中所有节点度的平均值为网络的平均度〈k〉；节点的度分布p(k)表示通过大量的实验，随机选取一个节点恰好有k条边与它相连的概率。	$G_0=\sum_{K=0}^{\infty}P_k X^K$
网络直径与平均路径长度 网络直径D指轨道交通网络中任意两个站点间距离的最大值； 平均路径长度L指轨道交通网络中任意两点间距离的平均值。	$D=\max d_{ij}$ $L=\frac{1}{\frac{1}{2}N(N-1)}\sum_{i>j}D_{ij}$
聚类系数 聚类系数C_i表示与节点i相连接的n个节点之间互相联系的比例；网络聚类系数C是网络中所有节点聚类系数之和的平均值。	$G_i=\frac{2E_i}{K_i(K_i-1)}$ $C=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}Ci$
（5）HUB节点 HUB节点指的是轨道交通网络中少量连接度非常大的点——即中心站点，HUB节点度的大小及HUB节点的数量在一定程度上反映了网络的辐射能力[16]。	$HUB_{max}=K_{max}$

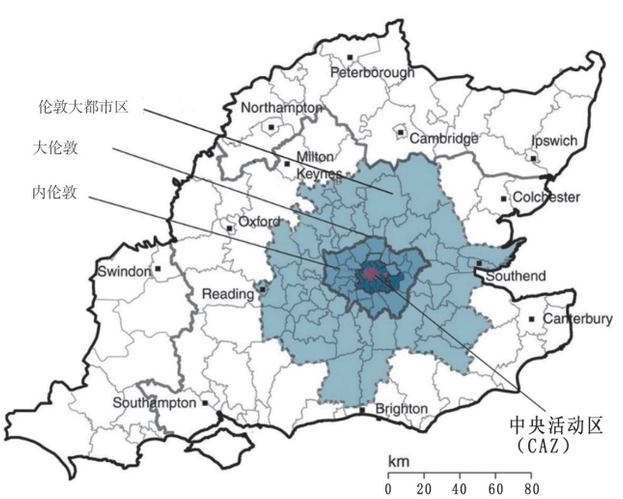

图1 伦敦都市圈各圈层范围

Fig.1 London Metropolitan Area

2.2 轨道交通网络概况

伦敦都市圈轨道交通网络系统分为市郊铁路系统（suburban railway）和地铁系统（underground），其中市郊铁路系统主要包括伦敦地上铁（London Overground）和国铁铁路（national railway），它们主要服务于外伦敦及都市圈内的外围区域[19]。伦敦地上铁从19世纪40年代开始建设，初期主要用于运输煤炭等矿产资源，之后经过一系列的线路合并、废止、延伸、重组或重开等事件，逐渐演变成通勤铁路，截至2018年，伦敦地上铁共有7条运营线路；伦敦都市圈内有15条市郊铁路线（国铁）运营，国铁铁路同样在19世纪40年代作为货运铁路开始建设，20世纪初基本骨架建设完成，截至2018年，伦敦都市圈内共有15条市郊铁路线（国铁）运营[20]；伦敦于1863年开通了世界上第一条地铁线路，随着城市的扩张发展需求，19世纪60年代到20世纪初，伦敦地铁迎来了建设高潮，截至2018年，伦敦都市圈内共有11条地铁运营线路[21]；为实现旧城复兴而建设的道克兰轻轨于1987年开通；主要服务于英格兰南部地区的伦敦有轨电车线于2000年开通。

3 轨道交通导向下的都市圈空间结构演变历程

研究中伦敦都市圈空间结构的演变主要通过人口密度空间分布来度量，伦敦都市圈人口的空间分布经历了一个集中、疏散、再集中的过程（图2）。

3.1 轨道交通集中建设支撑都市圈内核发育

19世纪初，伦敦建成区面积约36 km^2，城市人口约100万。到19世

表2 伦敦都市圈地域空间范围

Tab.2 spatial range of London Metropolitan Area

圈层	地域名称	面积/km^2	人口/万	约等于
第一圈层	内伦敦	310	约360	城市中心区
第二圈层	伦敦市	1 580	约900	中心城
第三圈层	伦敦大都市区	11 430	约1 420	大都市圈

表3 伦敦都市圈发展历程

Tab.3 the development of London Metropolitan Area

发展阶段	时间段	城市特征	规划策略	空间形态
集聚发展	1860—1900年	工业革命使城市内部人口集聚，引发城市问题	田园城市理论提出	内核集聚模式
蔓延发展	1901—1940年	城市蔓延导致城市外围人口激增、外围田地被侵占	田园城市开始建造 住宅与城乡规划法颁布	圈层蔓延模式
疏散发展	1941—1980年	疏散城市内部人口与产业，建设卫星新城	大伦敦规划制定 大伦敦发展规划制定	圈层模式+交通走廊+卫星城
集约发展	1981年至今	复兴老城区，改善城市环境与基础设施	“强化中心、照顾东部、侧重交通走廊”	圈层模式+交通走廊+绿环+卫星城

纪中期，受第二次工业革命的推动影响，伦敦的经济增长方式从传统的工商业开始向机器大生产转型，刺激了轨道交通的发展建设[22]。19世纪中后期，伦敦都市圈更是迎来了市域铁路与地铁的集中建设期，网络的致密化过程使得中心城区人口不断集聚。人口的剧烈增长逐渐超出了城市应有的空间承载力，使得城市规模开始向外进一步扩张。随着对外围地区人口的不断吸引，19世纪末伦敦中心区总人口已经达到500多万人，呈现中心集聚的空间格局。这段时期大部分站点都集中分布在伦敦市范围内，共有289个，外围区域仅有174个，并且高等级的Hub枢纽站点与高介数站点都集中分布在内伦敦区域。都市圈轨道线网整体规模较小，网络复杂特征并不显著，都市圈空间形态呈现典型的内核集聚形态，大伦敦地区建设用地与人口规模的急剧增长使得空间结构呈现“单核增长”模式[23]。

3.2 轨道交通放射带动都市圈区域蔓延

从20世纪初到20世纪40年代，伦敦都市圈的人口整体呈现递增趋势。虽然城市总人口在不断增加，但是内伦敦的人口在逐年递减，而外伦敦的人口在逐年递增。主要原因是这段期间外伦敦地区建设了大量工厂及居住区，而轨道交通网络的进一步建设又推动了越来越多的城市外围居民以及部分内伦敦居民逐步搬迁到外伦敦地区就业和居住。这一时期，在轨道交通缺失的北部地区修建了4条市域铁路，使得都市圈外围区域的轨道交通网络辐射区域更广。总体来说，这段期间伦敦都市圈的人口空间格局仍然以中心集聚为主，城市内部区域间的人口迁移也较为显著，城市人口与产业布局规模也随之不断扩大，都市圈开始借助交通网络向外呈现圈层蔓延发展态势[24]，轨道交通网络的基本骨架已经形成，“小世界网络”特征越发明显，伦敦都市圈“单核双圈层”空间格局开始显现。

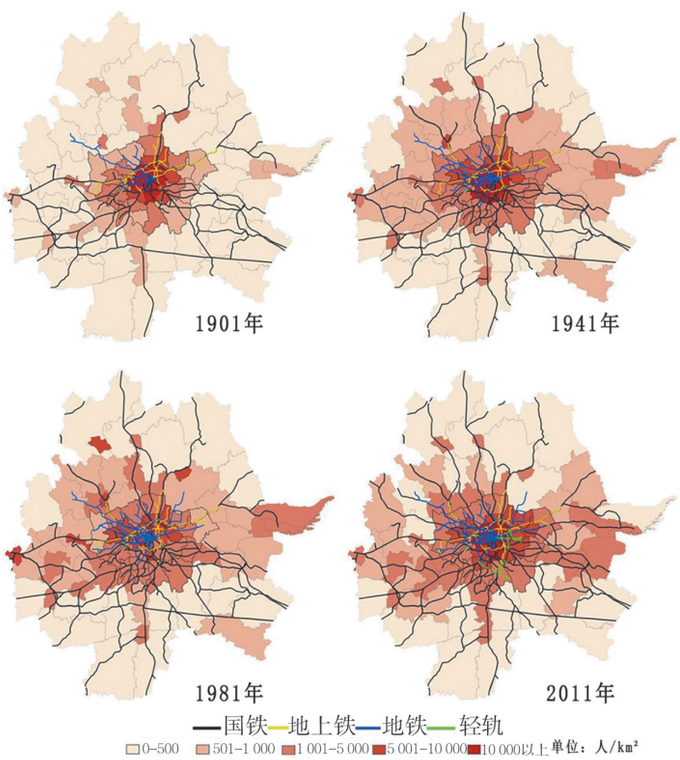

图2 伦敦都市圈人口密度分布演变与轨道网络演变

Fig.2 the evolution of population density distribution and rail network in London Metropolitan Area

3.3 既有路网支撑下的空间分散发展

20世纪50年代，在经历了第二次世界大战后，伦敦的经济遭受重创，工业结构老化。同时，二战后伦敦开始实施疏解规划策略，借助轨道交通网络将城市内部的人口和产业往外围疏散，使城市内制造业就业人数急剧下降[25]。20世纪中后期，伦敦进入了后工业社会，附加值低的产业从中心区转移到外围地区[26]，轨道交通网络建设基本处于停滞状态，而圈层内部产业与人口则沿着既有的轨道交通廊道持续向外围区域及卫星城扩散，人口分布空间格局呈现向外围扩散的趋势。总体来说轨道交通网络拓扑形态与1940年时相差不大，网络特征值也变化不大。都市圈的空间形态呈现“圈层+交通走廊+卫星城”形态，空间结构呈现“一核三层，多中心分布”的格局。

3.4 都市圈成熟期推动各层次轨道网络优化

1980年至今，伦敦政府为了推动城市高效持续运转，开始实行内城复兴发展策略，建设中央活力区。同时，通过强化“廊道效用”来发展与周边地区联系，与比邻区域建立通勤区以促进都市圈协调发展。随着经济全球化的趋势加剧，伦敦城市中心区人口急剧增长，外围地区人口分布相对均匀但增长趋势缓慢，都市圈的人口空间格局呈现中心区再集聚与外围廊道蔓延相结合的趋势[27]。伦敦都市圈轨道交通网络拓扑结构已经相对成熟稳定，部分区域中心型与微节点型站点的度值也进一步提升。伦敦都市圈空间结构呈现“极核-走廊，三层多中心”的格局，外围区域的建设用地呈“串珠式”均匀分布在大伦敦地区四周，外围建设用地沿国铁放射廊道线性分布[28]。同时，在外围线网交汇的交通枢纽区域形成了众多中小型次级中心，城镇圈层分布关系明显（图3）。

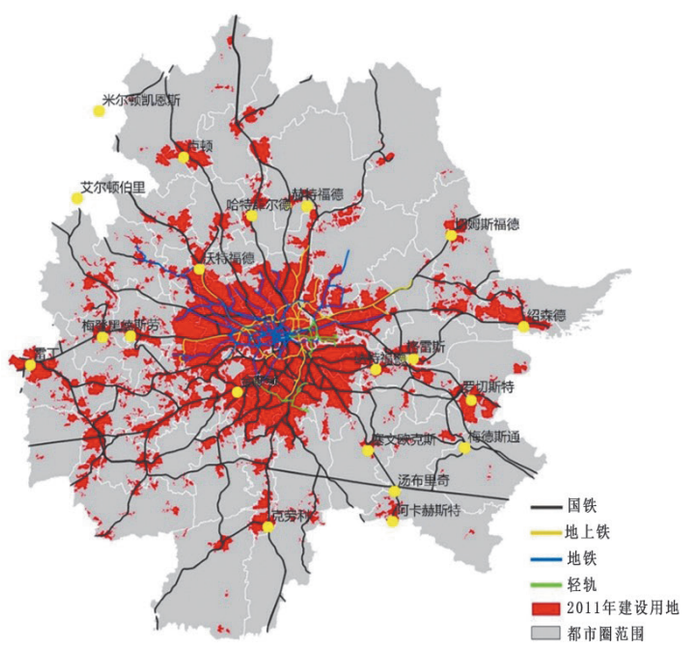

图3 伦敦都市圈城镇分布图

Fig.3 urban distribution map of London Metropolitan Area

4 轨道交通网络复杂性与都市圈空间结构耦合发展分析

4.1 轨道交通复杂网络拓扑结构模型构建

利用Python爬取伦敦都市圈轨道交通站点—线网空间数据，通过维基百科查询并统计相关属性信息，建立轨道交通站点—线网数据库。根据伦敦都市圈发展阶段筛选四组轨道交通网络信息基础数据，利用Gephi构建轨道交通复杂网络演变模型并计算相关特征值（表4）。

4.2 网络复杂特征演变分析

第一，站点数和边数反映了轨道交通建设的规模，通过演变轨迹发现：1900年时伦敦都市圈已经建设了一定规模的轨道交通线网；1900—1940年期间，轨道交通建设同样呈现快速增长态势；二战后基本处于停滞状态，直到80年代城市复兴运动相关政策与规划的推动，轨道交通才得到进一步发展（图4）。当前伦敦都市圈轨道交通规模远大于我国北京与上海都市圈，处于世界领先地位[29]。

第二，平均度指的是站点总度值的平均值，截至2018年，站点平均度已经增长到2.313，说明轨道交通网络中高等级换乘枢纽站点逐渐增多。站点度分布状况更加体现了网络枢纽体系等级的变化情况。对不同时期站点度分布情况进行曲线拟合分析发现（图5）：1900年以前，度值为5的站点占比仅为0.22%；1940年时，开始出现度值为6、7、8的站点，度值大于等于4的站点数量已经达到52个，占比达到7.3%；1940年到1980年期间，由于轨道交通建设基本处于停滞状态，所以站点的度分布状况无明显变化；1980年以后，网络中换乘枢纽型的站点占比越来越高，度值大于等于4的站点数量已经达到86个，占比接近10%。

随着伦敦都市圈轨道交通网络的发展建设，站点的平均度值与最高度值均在不断提升。截至2018年，伦敦都市圈轨道交通网络中站点的最高度值已经达到12，是位于内伦敦的斯坦福德站（Stratford Station）。度值为2及2以下的一般站点所占的比例从1900年所占的81%下降到2018年的77.74%，一般性站点的减少从侧面说明换乘枢纽站点的数量增多，轨道交通的换乘选择方式也越来越多。

第三，通过对比四个阶段的数据可以发现：伦敦都市圈1900年的轨道交通实体网络中平均路径长度为19.418，2018年已经降至16.271，说明实时轨道交通网络中任意两站点的通行距离逐渐缩短，即表明人们出行交通换乘的选择路径越来越多。伦敦都市圈轨道交通网络直径同样呈现递减的趋势，说明20世纪以来伦敦都市圈轨道交通网络的建设更多的是以服务内部区域发展为主。

第四，1900年伦敦都市圈轨道交通网络主要以外围的市郊铁路为主，整体骨架还未成型，聚类系数为0.006，之后随着网络的进一步建设，1940年增长到了0.013，截至2018年，网络聚类系数已经增长到了0.02。

表4 伦敦都市圈各发展阶段轨道交通复杂网络特征值比较

Tab.4 comparison of eigenvalues of complex urban rail transit networks in different development stages of London Metropolitan Area

	1900年实体网络	1940年实体网络	1980年实体网络	2018年实体网络
节点数N	463	709	744	876
边数Q	483	791	838	1 014
平均度k	2.086	2.231	2.253	2.313
平均路径长度L	19.418	18.248	18.036	16.271
网络直径D	53	50	50	45
聚类系数C	0.006	0.013	0.013	0.02
Hub节点最大度值	5	8	8	12

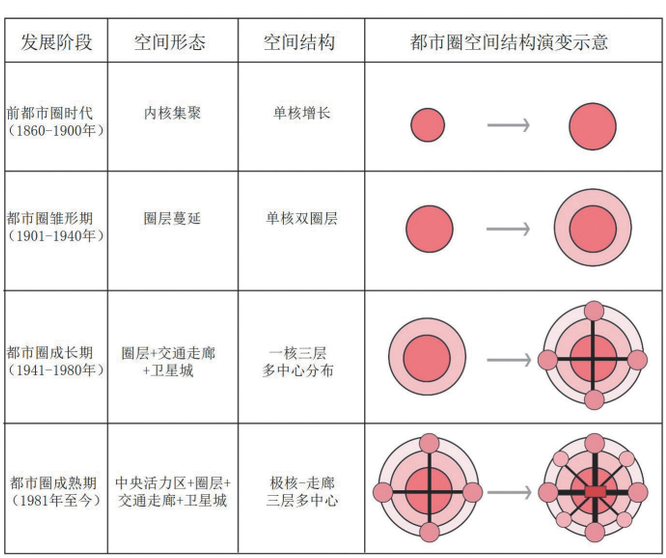

图4 伦敦都市圈空间形态与空间结构演变

Fig.4 spatial form and structure evolution of London Metropolitan Area

4.2 轨道交通网络复杂性与都市圈空间结构的互动关系

4.2.1 中心枢纽站点扁平化组织分布与都市圈多中心空间结构的协同发展

为了探测轨道交通网络枢纽站点分布与都市圈空间结构演变两个子系统的相互关系，首先通过分析都市圈轨道交通网络Hub站点分布来度量网络的换乘便捷性，通过分析空间地域人口密度分布的演变状况来描述都市圈内的城镇空间分布格局以及城镇空间组织结构等。根据研究需要，界定度值大于等于4的站点作为Hub站点，分别提取四个发展阶段的Hub站点，由图6可以看出，1901年时Hub站点集中分布在内伦敦区域，同人口集中分布在内伦敦区域具有高度的趋同性，该时期伦敦都市圈空间结构呈现“单核增长”模式；1941年时Hub站点主要还是集中分布在内伦敦区域，但是外伦敦地区也开始出现一定数量

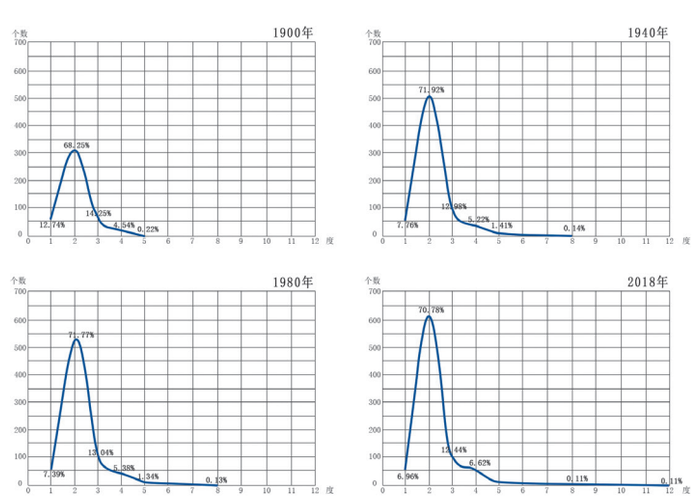

图5 站点度分布曲线拟合

Fig.5 station degree distribution curve fitting

的Hub站点，该时期伦敦的人口空间分布表现为大量外围地区与内伦敦人口迁移到外伦敦区域，外伦敦整体人口密度进一步增高，可以看出Hub站点的分布与人口密度的空间分布具有较强的趋同性；1981年时Hub站点的分布状况变化不大，人口密度的空间分布变化主要是外围区域人口密度的增长，这段时期两者的演化没有呈现明显的互动关系；2011年时Hub站点在外伦敦区域的分布数量进一步增多，主要增加的区域在东部、西部和南部的对外交通走廊地带，而这段时期人口密度的分布同样呈现中心区集聚，外围沿交通走廊蔓延分布，网络致密化过程中都市圈中心集聚度增强，站点扁平化组织结构与都市圈外围多中心结构显著。

4.2.2 轨道网络的传播效应与都市圈多中心空间结构的协同发展

轨道交通网络的传播效应指的是交通事件从某个站点发生，逐渐影响和扩散到其它区域的推动和辐射效应。影响交通事件网络传播速率快慢的主要因素是轨道网络平均路径长度。同时，站点度值分布呈现幂率特征分布的无标度轨道交通网络传播速率一般更快，因为无标度网络中各站点的度值差异很大，如果从较大度节点开始传输，会传送更多数量的交通要素，产生所谓的“放大效应”[30]。如果无标度网络中站点度值小于平均度值的站点所占比例较大，也会出现大量站点传达性较低的现象。网络传播效应与网络模块结构特征也是相互关联的，而网络模块结构特征与空间拓扑结构特征具有较高的相似性。一般来说，整体传播速率较快的网络其平均路径长度相对较短，网络直径相对也会较短，网络中枢纽节点的中心集聚现象比较明显，低于站点平均度的节点数量相对较少，网络整体受单中心辐射带动效应显著；而整体传播速率较低的网络其平均路径相对较长，网络直径也会较长，网络中枢纽节点呈多中心分布的现象比较明显，低于站点平均度的节点数量相对较多[31]（表5）。伦敦都市圈轨道交通网络平均路径长度与网络直径呈逐渐递减的趋势，聚类系数逐渐升高，网络小世界特征与交通一体化特征显著。将网络模块结构特征与都市圈空间结构特征对比后发现（图7），网络的拓扑空间结构与都市圈一核多中心结构具有高度的关联性。

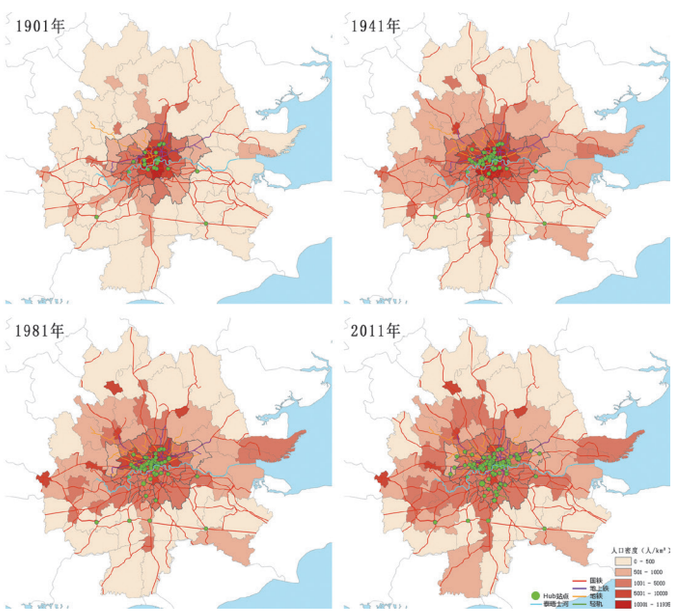

图6 伦敦都市圈Hub站点空间分布演变与人口密度分布演变

Fig.6 spatial distribution and population density distribution of Hub sites in the London Metropolitan Area

4.3 复杂系统导向下都市圈轨道交通网络与空间结构互动规律分析

4.3.1 复杂系统势能差影响下的互动作用过程

轨道交通网络生长与都市圈空间发展是一对长期的空间互动过程，两者构成的复杂系统通过自组织效应互动滋长、协同演化。复杂系统的互动作用源于二者发展不平衡产生的势能差，而势能差的相对关系不仅决定了谁是作用过程的主导一方，也大体限定了整体的演化方向与结构形态。伦敦都市圈范围内早期建设的市郊铁路系统推动了城市极核的快速增长，这一过程轨道交通的作用势能要高于都市圈空间组织模式的作用势能。之后，随着中心城区人口高密度聚集与建设用地持续蔓延现象的加剧，人们出行的距离与时间成本普遍增长，都市圈空间组织模式又在相互关系中成为优势一方，开始要求轨道交通特别是网络中心区域通过地铁建设提升运输效率，因果关系发生转换。而多层次轨道网络的建成和持续优化，又进一步支撑了都市圈功能的网络化发展，主导力再次变换。经过这种复杂系统长期的自组织过程，伦敦都市圈的发展开始逐步进入成熟稳定期。

4.3.2 轨道交通引导都市圈圈层结构变迁

都市圈圈层结构变迁的一个重要因素就是促使都市圈中心城市内部人口与产业等城市要素向外扩散[32]。一般认为轨道交通的发展与都市圈空间圈层的变迁遵循的都是从内到外的生长时序，例如我国的北京都市圈与上海都市圈，两者都是先从人口集聚的内圈层开始建设地铁轨道系统（图8）。然而伦敦都市圈轨道交通网络的空间建设时序

表5 伦敦都市圈轨道交通网络传播效应相关特征值演变

Tab.5 the evolution of eigenvalues related to the propagation effect of the rail transit network in the London Metropolitan Area

都市圈名称	网络特征值	演变状况
伦敦都市圈	平均路径长度	19.418→18.248→18.036→16.271
	网络直径	53→50→50→45
	聚类系数	0.006→0.013→0.013→0.002

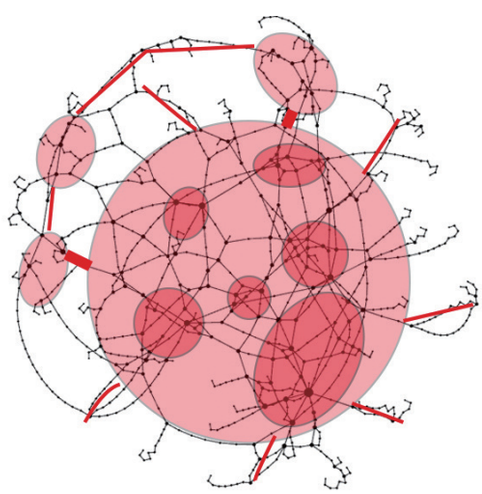

图7 伦敦都市圈轨道交通复杂网络模块结构图

Fig.7 block diagram of the complex network of rail transit in the London Metropolitan Area

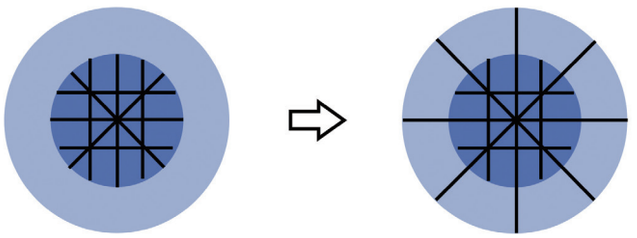

图8　北京都市圈与上海都市圈圈层变迁与轨道网络关系

Fig.8 the relationship between the level change and the rail network of Beijing Metropolitan area and Shanghai Metropolitan Area

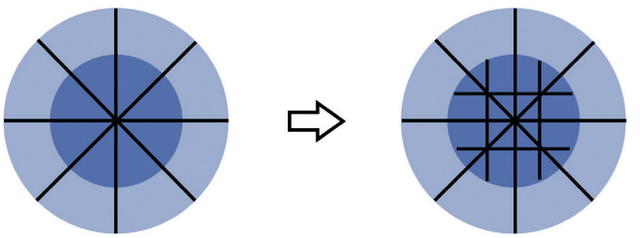

图9　伦敦都市圈与京阪神都市圈圈层变迁与轨道网络关系

Fig.9 the relationship between the level change and the rail network of London Metropolitan Area and Beijing Osaka Kobe Metropolitan Area

与我国都市圈正相反，它是先从都市圈范围内开始建设市域铁路，当大城市中心城区发展到一定规模后再建设主要服务于内圈层的地铁轨道系统（图9）。这种错位式传导看似没有遵循协同演化的规律，但是从复杂系统视角来看，它是将互适匹配的过程放到了更长的时间维度，通过轨道先行和服务提升两个步骤，实现了对都市圈发展趋势的提前部署。

4.3.3　“马太效应”下的站点分化引导“多中心—多廊道”空间重构

轨道交通网络的致密化过程使得都市圈轨道交通站点演变发生“马太效应”，都市圈范围内站点分化生成一定数量的Hub站点和高介数站点，这些高等级枢纽站点在都市圈空间体系中起着重要的辐射带动作用，引导都市圈外围地区形成若干次中心生长点或沿枢纽站点之间的廊道形成生长轴。伦敦都市圈外部圈层分布了较多Hub站点或高介数枢纽站点，围绕这些高等级枢纽站点形成了众多城市次中心和城市边缘节点中心组团，各等级城市间的联系随着轨道交通的发展也日益增强，都市圈“多中心—多廊道”空间结构日渐成熟完善[33]。

5　研究启示与相关建议

5.1　以“破除边界”的规划政策支持市域通勤铁路跨城发展

通过研究伦敦都市圈的发展可以看出，跨越行政边界的市郊通勤铁路能够有效引导人口与产业空间分布沿交通干线向外生长，推动周边节点城镇的联动发展。我国的都市圈市域铁路建设也应打破行政边界壁垒，利用市域铁路串联内外圈层，实现区域联动发展。例如北京都市圈在向东发展过程中也应跨越行政边界壁垒建设市域铁路，加强与北三县的直接通勤联系[34]。

5.2　以“内优外联”的节点配置整合功能体系

从网络功能角度来看，轨道拓扑网络通过其拓扑结构特征与动力效应能够优化空间功能组织行为，并促进形成小世界、无标度网络[35]。目前我国具备发展成为都市圈的地区，仍存在中心城交通辐射带动能力弱以及对周边城镇连接度差两方面的问题。构建多层次轨道网络，目的就是利用其“内优外联”效应实现对功能节点的幂律型网络化配置：一方面能够快速增加中心城尤其是核心节点的连接度，促进CBD、商业中心、交通枢纽等重要功能节点能级提升[36]；另一方面可以将更多的外围城镇或新功能节点整合进都市圈网络[37]。

5.3　以“适度超前”的时序安排谋划演变进程

进入以都市圈为主体的城镇化新阶段后，必须认识到我国城市地区超大规模性以及巨大的集聚需求的实际情况，需要通过对区域轨道交通的适度超前建设。例如伦敦都市圈轨道交通网络遵循的是“由外向内”的建设规律，对都市圈空间发展趋势做了提前部署[38]，将两者互适匹配的过程放到了更长的时间维度，对于疏散中心城区人口、带动外围区域发展具有重要的先导作用。

参考文献：

[1] 国家发展改革委. 国家发展改革委关于培育发展现代化都市圈的指导意见（发改规划〔2019〕328号）[Z]. 2019-2-19.

[2] CHEN C L, HALL P. The Impacts of High-Speed Trains on British Economic Geography: A Study of the UK's InterCity 125/225 and its Effects[J]. Journal of Transport Geography, 2011, 19(4): 689-704.

[3] 藤井正. 大都市圏における構造変化研究の動向と課題—地理学における多核化・郊外の自立化の議論を中心として—[J]. 日本都市社会学会年報, 2007(25): 37-50.

[4] SASAKI K, OHASHI T, ANDO A. High-Speed Rail Transit Impact on Regional Systems: Does the Shinkansen Contribute to Dispersion?[J]. The Annals of Regional Science, 1997, 31(5): 77-98.

[5] 任利剑. 城市轨道交通系统与城市功能组织协调发展研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.

[6] 全永燊, 刘剑锋. 区域轨道交通规划若干问题与思考[J]. 城市交通, 2017, 15(1): 12-19.

[7] 陈小鸿, 周翔, 乔瑛瑶. 多层次轨道交通网络与多尺度空间协同优化——以上海都市圈为例[J]. 城市交通, 2017, 15(1): 20-30.

[8] 王宇宁, 运迎霞, 高长宽. 轨道交通影响下大城市边缘城镇发展模式研究——巴黎和天津的对比分析[J]. 城市规划, 2017, 41(1): 40-44.

[9] LATORA V, MARCHIORI M. Is the Boston Subway a Small-World Network?[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 314(1): 109-113.

[10] 高自友, 赵小梅, 黄海军, 等. 复杂网络理论与城市交通系统复杂性问题的相关研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2006(3): 41-47.

[11] DERRIBLE S, KENNEDY C. The Complexity and Robustness

of Metro Networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2010, 389(17): 3678-3691.

[12] 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, 2018(5): 1-8.

[13] 陈培文, 陈峰, 胡映月, 等. 基于复杂网络的城市轨道交通网络中心性研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2017(2): 97-102.

[14] 丁小兵. 复杂网络理论及其在上海城市轨道交通网络可靠性分析评价中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2012(11): 50-53.

[15] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

[16] 王林, 江秀萍, 柯熙政. 关于无标度网络中Hub节点的研究[J]. 计算机应用, 2010, 30(11): 3062-3064.

[17] 武建奇, 母爱英. 世界大都市圈协同发展模式与京津冀协同发展路径研究[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2018.

[18] 童博. 伦敦都市圈发展路径对建设武汉城市圈的启示[J]. 中国商界（下半月）, 2010(11): 158-159.

[19] 刘静月. 伦敦市郊铁路运营管理概况[J]. 中国铁路, 2017(9): 20-25.

[20] Great London Authority. Mayor's Transport Strategy[EB/OL]. [2019-01-01]. https://www.london.gov.uk/sites/default/files/mayors-transport-strategy-2018.pdf.

[21] Transport for London. Travel in London Report 10[EB/OL]. [2019-01-01]. http://content.tfl.gov.uk/travel-in-london-report-10.pdf.

[22] 邓智团. 伦敦全球城市发展研究[M]. 上海: 上海社会科学院出版社, 2016.

[23] 钱喆, 吴翱翔, 张海霞. 世界级城市交通发展战略演变综述及启示[J]. 城市交通, 2015, 13(1): 52-59.

[24] 王晓荣. 轨道交通与大城市形态互动演化关系研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.

[25] 王涛. 伦敦都市圈及其管理体制的发展演变及特点[J]. 城市观察, 2014(4): 87-93.

[26] 何丹, 谭会慧. "规划更美好的伦敦"——新一轮伦敦规划的评述及启示[J]. 国际城市规划, 2010, 25(4): 79-84.

[27] FRIEDMANN J. A Decade of World City Research: World Cities in a World System[M]. London: Cambridge University Press, 1995.

[28] 于晓萍. 城市轨道交通系统与多中心大都市区协同发展研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.

[29] 庞磊, 运迎霞, 任利剑. 基于复杂网络的北京都市圈轨道交通网络特征演变研究[C]//中国城市规划学会, 重庆市人民政府. 活力城乡 美好人居——2019中国城市规划年会论文集（06城市交通规划）. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 11.

[30] 戎亚萍. 城市轨道交通网络演变的复杂网络特征值研究[C]//中国系统工程学会. 中国系统工程学会第十八届学术年会论文集——A12系统科学与系统工程理论在各个领域中的应用研究. 中国系统工程学会, 2014: 2.

[31] 郑建风. 复杂网络建模与典型网络上的动力学过程研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.

[32] 仝德, 戴筱頔, 李贵才. 打造全球城市—区域的国际经验与借鉴[J]. 国际城市规划, 2014, 29(2): 83-88.

[33] 彼得·霍尔, 凯西·佩恩. 多中心大都市: 来自欧洲巨型城市区域的经验[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[34] 华夏幸福产业研究院. 中国都市圈极限通勤研究[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.

[35] 张晋. 城市轨道交通线网结构特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.

[36] 过秀成, 吕慎, 安宁. 组团式结构城市的轨道线网合理规模[J]. 城市发展研究, 2001(2): 33-36.

[37] 王磊, 蔡逸峰. 与全球城市对标的上海市交通基础设施研究[J]. 城市交通, 2019, 17(4): 35-41.

[38] 赵峥, 王炳文. 迈向"治理联盟": 全球大都市圈空间治理的经验与启示[J]. 中国发展观察, 2020(Z6): 114-117.

图片来源:

图1：作者根据 武建奇, 母爱英. 世界大都市圈协同发展模式与京津冀协同发展路径研究[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2018. 绘制

图2-3、6：作者根据Office for National Statistics(ONS)数据绘制

图4-5、7-9：作者绘制

表1- 5：作者整理绘制

收稿日期: 2020-12-03

（编辑: 申钰文）