

吴函纯, 刘艳军, 孙宏日, 等. 地铁对城市公交系统特性和可达性的影响——基于空间结构差异视角 [J]. 地理科学, 2022, 42(12): 2057-2067. [Wu Hanchun, Liu Yanjun, Sun Hongri et al. Impacts of subways on the characteristics and accessibility of public transport systems: Based on the perspective of spatial structure difference. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(12): 2057-2067.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2022.12.002

地铁对城市公交系统特性和可达性的影响 ——基于空间结构差异视角

吴函纯, 刘艳军, 孙宏日, 付慧

(东北师范大学地理科学学院, 吉林 长春 130024)

摘要: 以沈阳市主城区和大连市主城区为例, 探讨地铁对空间结构不同的城市在公交系统特性和可达性上产生的影响以及影响存在的差异, 分析差异形成的原因。研究表明: ① 地铁开通对沈阳市和大连市公交系统的特性和可达性均产生正向影响, 影响程度以地铁线路为轴向外围递减; ② 地铁开通后大连市公交系统特性和可达性的变化更明显, 地铁自身产生的影响在沈阳市表现得更为显著, 两城市公交系统特性和可达性的差异在地铁开通后扩大; ③ 地铁开通后, 单中心圈层结构城市公交系统集聚中心的集聚效应进一步增强, 该类型城市内部各区域公交系统特性及可达性差异扩大, 多中心组团结构城市公交系统特性及可达性水平则趋向均衡化。

关键词: 地铁; 公交系统特性; 公交系统可达性; 空间结构差异; 复杂网络模型

中图分类号: K901 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2022)12-2057-11

自 21 世纪以来, 为了进一步满足大城市的交通需求, 城市公交系统趋向于多元化、网络化, 轨道交通逐渐渗透到公交系统之中, 并且产生越来越大的影响。截至 2020 年 5 月, 国内已有 47 座城市开通了地铁。随着地铁建设的不断推进, 城市复合公交系统日趋庞大而复杂。城市空间结构各不相同, 使其公交系统空间分布存在差异^[1], 进而导致地铁开通对公交系统的影响出现分异, 这一现象引起了学者们的广泛关注^[2-4]。明确地铁开通后公交系统特性和可达性变化的特征, 以及地铁对不同空间结构城市的公交系统特性和可达性产生的影响, 有利于促进地铁与传统公交优势互补, 协调二者配合与衔接^[5], 形成公平、均衡的公交系统格局, 以满足更多的公交出行需求^[6]。

自 1964 年交通网络拓扑性质开始被量化分析^[7]以来, 学者们尝试应用图论理论^[8]、复杂网络模型^[9-11]等多种方法探究公交系统特性, 研究内容涉及及公交系统的拓扑性质^[9,10]、鲁棒性与脆弱性^[10,12,13]、

复杂性^[14]等。围绕公交系统可达性, 学者们重点关注公交可达性的测度方法^[15-17]、时空演变特征^[18,19]以及多模式公交系统可达性演化^[2-4,17]等。随着公交系统的快速发展, 国内外学者对复合交通系统的关注也与日俱增。相关研究主要聚焦于以下几方面: 一是复合公交系统的拓扑性质。这方面研究包括拓扑性质的测算及时空变化特征。部分学者研究认为, 复合公交系统具有典型的小世界特征和无标度特性, 与单一公交系统相比鲁棒性更高^[13,20]。以往研究大多采用复杂网络分析构建复合公交系统网络模型, 在此基础上进行鲁棒性实验和拓扑性质描述^[13,20,21]。二是复合公交系统特性与可达性的时空变化特征。地铁开通后, 复合公交系统与原有单一的传统公交系统相比, 其特性和可达性均出现了显著变化^[2-4]。部分研究认为, 地铁开通显著提高了公交系统可达性, 居民出行的便捷程度大幅提升^[2,3], 并且作用效果随着地铁线路的扩展以及完善而日渐显著^[2]; 也有研究发现地铁开通对公交系统可达性的改善存在

收稿日期: 2021-10-28; **修订日期:** 2022-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(42171191, 41771172)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (42171191, 41771172).]

作者简介: 吴函纯(1998-), 女, 吉林永吉人, 硕士研究生, 主要研究方向为城市地理、城市与区域发展。E-mail: wuhc003@nenu.edu.cn

通讯作者: 刘艳军。E-mail: liuyj323@nenu.edu.cn

显著的空间差异,进而使得公交系统可达性的区域不平衡现象加重^[4]。三是复合公交系统的协调性。复合公交系统的接驳与协调性问题是交通规划学和交通地理学关注的热点,相关研究涉及多模式公交系统布局优化^[6]、换乘枢纽站规划^[22]、换乘方式的选择^[23]等。

交通是城市发展的重要建成环境之一,受城市空间结构的根本影响^[24]。交通系统作为城市发展的基础骨架,与城市空间结构密切相关^[25]。已有研究证实,城市空间结构与交通发展密不可分^[26],二者相互影响,交通基础设施依照城市空间结构进行布局,并沿城市空间结构的发展延伸,城市空间结构也因交通发展而发生变化。根据社会生产力发展水平和城市自然社会经济特征,城市空间结构主要有单中心、多中心和网络型 3 种演变类型,不同类型的空间结构对城市交通影响存在差异^[27,28],城市空间结构与交通协调性^[29]也因此受到广泛关注。

总体来看,当前关于复合交通系统的研究已经取得了显著进展,特别是在公交-地铁复合系统方面,业内学者们针对复合公交系统的特性和可达性进行了大量实证研究,主要关注特性与可达性的测度、二者的时空变化特征以及多模式公交系统的协调性,从城市空间结构的视角探究地铁开通对公交系统特性与可达性影响的相关研究较少,关于地铁对不同空间结构城市公交系统变化影响机制的问题鲜有探讨。同时,已有研究大多以单一城市为案例进行实证研究,缺少不同城市的对比研究。基于此,本文选择两个空间结构不同的城市——沈阳市和大连市,从城市空间结构差异的角度出发,重点探讨

以下两个关键问题:一是地铁开通后不同空间结构城市公交系统特性与可达性变化的时空特征;二是地铁对不同空间结构城市的公交系统特性与可达性影响作用的差异性。通过对上述问题的探究,本文尝试进一步拓展城市复合公交系统研究视角,为完善城市公交网络布局、优化城市复合公交系统提供理论支持。

1 研究区域、方法与数据

1.1 研究区域

本文以沈阳市主城区和大连市主城区(全文称沈阳市、大连市)为研究对象。从沈阳市近代以来城市空间结构演变历程来看,其城市形态呈现明显的单中心圈层式结构^[30]。基于沈阳市城市结构及地铁线路走向,以和平区、皇姑区、沈河区、大东区、沈北新区、浑南区、铁西区、于洪区及苏家屯区为研究范围,并将和平区、皇姑区、沈河区、大东区范围定义为核心区,沈北新区、浑南区、铁西区、于洪区范围定义为拓展区,苏家屯区定义为边缘区(图 1)。大连市因位于辽东半岛最南端,受丘陵为主的地形因素制约,城市空间拓展主要在山海平地、山间平地实现,导致多个规模较小组团先后形成,呈现多中心组团式城市结构^[31]。基于大连市城市结构及地铁线路走向,以核心区(中山区、西岗区、沙河口区、甘井子区)、金州区、旅顺口区为研究范围。

两城市均为副省级城市,沈阳市是辽宁省省会、大连市是计划单列市。经济社会发展方面,沈阳市 2020 年 GDP 达 6571.6 亿元,常住人口 907 万人,建成区面积 567 km²(<http://www.shenyang.gov.cn/>);

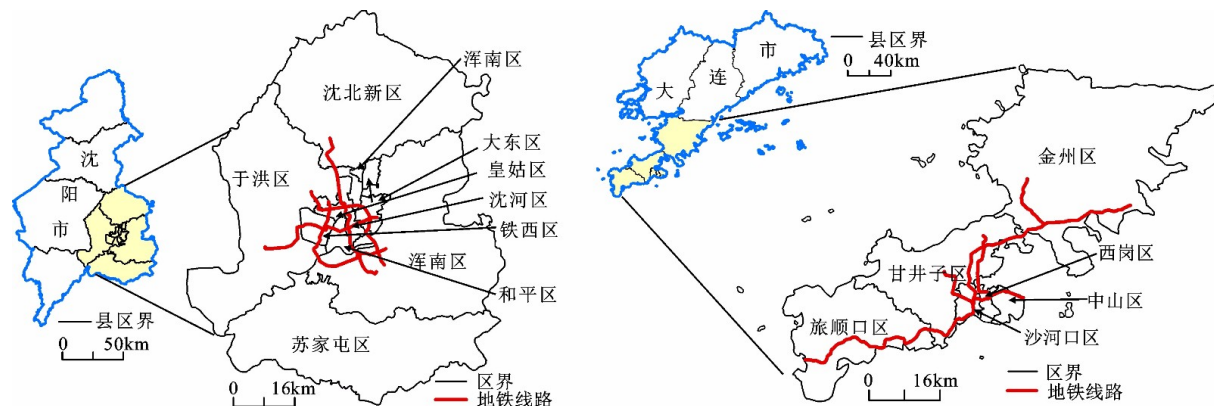


图 1 沈阳市主城区、大连市主城区及地铁线路分布

Fig.1 Spatial distribution of the main urban areas of Shenyang and Dalian and their subway lines

大连市 2020 年 GDP 达 7030.4 亿元, 常住人口 745.1 万人, 建成区面积约 444 km²(<https://stats.dl.gov.cn/>)。公交系统建设方面, 地铁开通前, 沈阳市有常规公交线路 262 条, 站点 2320 个(<http://www.shenyangbus.com/>、<http://sy.bendibao.com/>), 大连市有常规公交线路 196 条, 站点 1341 个(<http://www.dalianbus.com/>)。根据两城市地铁官网数据, 至 2020 年, 两城市均有 4 条地铁线路投入运营, 其中, 沈阳市地铁站点 85 座, 累积里程 117.1 km(<http://www.symtc.com/>); 大连市地铁站点 66 座, 累积里程 157.9 km(<https://www.dlmetro.com/>)。地铁开通后, 至 2020 年, 沈阳市常规公交线路增至 321 条, 站点增至 2935 个, 复合公交系统合计站点 2935 个(<http://www.shenyangbus.com/>、<http://sy.bendibao.com/>); 大连市常规公交线路增至 321 条, 站点增至 2070 个, 复合公交系统站点 2076 个(<http://www.dalianbus.com/>)。综上所述, 两城市经济社会发展水平相近, 传统公交建设与地铁运营规模相当。因此, 作为单中心圈层结构和多中心组团结构的典型城市, 以沈阳市和大连市为例, 研究在空间结构不同的城市, 地铁开通对公交系统特性和可达性的影响具有一定的基础和代表性。

1.2 研究方法

1) 复杂网络模型^[2]。将公交网络抽象为复杂网络模型, 考虑到从空间结构差异视角研究地铁开通对公交系统造成影响的差异, Space L 法构建的复杂网络模型更有助于理解每条公交线路的运行轨迹, 故采用 Space L 法描述其拓扑性质。模型构建的基本假设如下: ① 不考虑发车频率差异, 公交网络抽象为非加权网络。② 不考虑个别站点名称相同位置不同的情况, 名称相同的站点即视为一个站点。③ 不考虑特殊原因造成的临时公交改道、站点取消或增加等情况。

2) 公交系统特性测度。从 3 个方向阐述。

(1) 城市局部公交系统特性。公交系统特性指公交系统的拓扑性质, 参考王焱等^[18]研究, 选取站点度和站点关联度 2 个指标评价城市局部公交系统特性。① 站点度(D)^[5]: 数据在复杂网络模型构建完成后可得。根据地铁开通后两城市站点度变化情况, 采用自然断点法划分站点度等级: 站点度 1~2 为低、3~4 为较低, 沈阳市站点度 5~6 为中等、7~8 为较高、9~12(地铁开通后 9~13)为高, 大连市站点度 5~7 为中等、8~12 为较高、13~18 为高。② 站点

关联度(B)^[32]: 利用中介中心性测度站点关联度, 数据在模型构建完成后可获得。站点关联度数值差距较大, 采用自然断点法进行分级: 地铁开通前沈阳市 $B \leq 14543.42$ 为低、 $14543.42 < B \leq 45077.45$ 为较低、 $45077.45 < B \leq 100802.45$ 为中等、 $100802.45 < B \leq 195529.05$ 为较高、 $B > 195529.05$ 为高, 大连市 $B \leq 11298.77$ 为低、 $11298.77 < B \leq 34616.55$ 为较低、 $34616.55 < B \leq 73750.79$ 为中等、 $73750.79 < B \leq 149696.72$ 为较高、 $B > 149696.72$ 为高; 地铁开通后 $B \leq 9432.46$ 为低、 $9432.46 < B \leq 28162.99$ 为较低、 $28162.99 < B \leq 63495.16$ 为中等、 $63495.16 < B \leq 116383.00$ 为较高、 $B > 116383.00$ 为高。

(2) 城市整体公交系统特性。参考罗艺等^[5]和王焱等^[18]的相关研究, 对平均站点度、平均路径长度和平均聚类系数进行加权求和, 得到城市整体公交系统特性水平。计算公式为:

$$W = \omega_1 \cdot \bar{D} + \omega_2 \cdot \bar{L} + \omega_3 \cdot \bar{C} \quad (1)$$

式中, W 为城市整体公交系统特性; $\bar{D}$ 、 $\bar{L}$ 、 $\bar{C}$ 分别为平均站点度、平均路径长度和平均聚类系数。其中, 平均路径长度($\bar{L}$)即各站点最短路径的平均值。借助复杂网络模型可直接获得各站点接近中心性数据, 取倒数即为该站点最短路径, 进而可求得平均路径长度。聚类系数(C)用来描述网络中各站点的邻接程度^[18]。 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为 3 个指标的权重, 由 CRITIC 赋权法计算求得, 权重分别为 0.537、0.191、0.272; W 是评价城市公交系统特性的综合指标, 用于反映城市整体公交系统特性水平, 借助 W 可直观对比两城市公交系统特性发展水平, W 越大, 城市整体公交系统特性越好。

(3) 地铁开通后公交系统特性的变化。用城市整体公交系统特性变化率(ΔW_t)反映地铁开通后公交系统特性的变化程度^[2]。计算公式为:

$$\Delta W_t = \left| \frac{(W_{t2} - W_{t1})}{W_{t1}} \times 100\% \right| \quad (2)$$

式中, W_{t1} 和 W_{t2} 分别为地铁开通前和后的公交系统特性。

3) 公交系统可达性测度。论述如下。

(1) 公交系统站点可达性。可达性即利用特定的交通系统, 从某一区位到达指定活动区位的便捷程度^[33]。本文运用服务区分析测度公交系统站点可达性, 并探究其空间分异格局。黄晓燕等^[2]的研究结果表明, 我国居民愿意接受步行至公交站点的最

大距离为 400 m, 地铁站点为 750 m, 故本文以 400 m 为公交站点服务半径, 750 m 为地铁站点服务半径, 计算地铁开通前后站点服务范围面积的变化。服务范围面积越大, 站点可达性越好。

(2) 公交系统整体可达性。参考已有研究及实际情况, 考虑数据可获取性及可操作性, 选取站点可达性和网络可达性 2 个指标分析公交系统整体可达性(Z)。计算公式为:

$$Z = \omega_4 \cdot \bar{R} + \omega_5 \cdot \bar{S} \quad (3)$$

式中, $\bar{R}$ 为公交站点可达性; $\bar{S}$ 为公交网络可达性。利用平均路径长度反映公交网络可达性(算法如城市整体公交系统特性中公式 1 的解释)。网络整体处于连通状态时, 平均路径长度越小, 网络可达性越好。 ω_4 、 ω_5 分别为 2 个指标的权重, 采用 CRITIC 赋权法计算求得, 权重分别为 0.518、0.482。

(3) 地铁开通后公交系统可达性的变化。用城市整体公交系统可达性变化率(ΔZ_k)反映地铁开通后公交系统可达性的变化程度^[2]。公式如下:

$$\Delta Z_k = \left| \frac{(Z_{k2} - Z_{k1})}{Z_{k1}} \times 100\% \right| \quad (4)$$

式中, Z_{k1} 和 Z_{k2} 分别为地铁开通前后的公交系统可达性。

1.3 数据来源

本文相关行政区划数据来自国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn/ngcc/>), 参考《辽宁省人民政府关于调整沈阳市和平区等城区行政区划的批复》《辽宁省人民政府关于调整沈阳市沈河区等城区行政区划的批复》有调整。沈阳市和大连市地铁开通前后公交系统的数据来自于百度地图(<https://map.baidu.com/>)以及城市地铁官网(<http://www.symtc.com/>、<http://www.dlmetro.com/>), 借助沈阳公交网(<http://www.shenyangbus.com/>)、沈阳本地宝(<http://sy.bendibao.com/>)、大连公交网(<http://www.dalianbus.com/>)数据进行核准, 数据包括沈阳市和大连市研究区常规公交类型、站点数量及坐标、线路数量及途径站点、沈阳市和大连市研究区开通地铁站点数及坐标、线路条数和里程数。

2 结果分析

2.1 城市公交系统特性及可达性空间分异特征

1) 城市公交系统特性空间分异格局。图 2 可见, 地铁开通前, 沈阳市站点等级相对均衡, 最高

为 12, 大连市最高为 18。从空间分布上看(图 2a、b), 沈阳市高等级站点显著集聚, 22 个高等级站点中 16 个集中于核心区, 55 个较高等级站点大部分也位于核心区, 14 个扩散至拓展区, 5 个位于边缘区。大连市高与较高等级站点在核心区和旅顺口区均有分布, 高等级站点有 7 个, 6 个位于核心区; 较高等级站点有 26 个, 22 个位于核心区, 空间上虽也表现为核心区集中, 但因高与较高等级站点太少, 故集聚特征不明显。从站点关联度的空间分布上看(图 2e、f), 地铁开通前沈阳市高与较高关联度站点分布较分散, 核心区与拓展区均有一定的分布; 大连市则相对集中, 基本位于核心区, 旅顺口区和金州区有零星分布。由此可见, 地铁开通前沈阳市各站点联系相对分散, 高关联度站点分散于各区域, 彼此关联性不强; 大连市各区域有各自的高关联度站点, 由此产生小范围站点关联的同时, 各区域又通过核心区内部分高关联度站点产生联系。整体来看, 地铁开通前大连市公交系统特性与沈阳市相比优势较强, 评价指标上基本优于沈阳市(表 1)。

地铁开通后(图 2c、d), 沈阳市高等级站点增至 30 个, 10 个位于核心区, 较高等级站点增至 74 个, 38 个位于核心区, 高与较高等级站点逐渐扩散至拓展区, 但在核心区的高度集聚现象仍十分显著。大连市高等级站点数量基本不变, 8 个高等级站点中 7 个位于核心区, 较高等级站点数量增至 54 个, 9 个位于旅顺口区, 7 个位于金州区, 高与较高等级站点继续扩散至旅顺口区、金州区, 集聚特征不显著。站点关联度方面(图 2g、h), 地铁开通后, 沈阳市高关联度站点显著集聚在核心区, 区域间差异扩大; 大连市高关联度站点在旅顺口区和金州区有所增加, 高关联度站点仍分散在各区域, 区域间差异缩小。整体来看, 地铁开通后, 大连市公交系统特性评价指标均显著提升, 特别是平均路径长度, 变幅达 14.56%; 沈阳市仅平均路径长度有所缩短, 平均站点度和平均聚类系数不升反降, 导致其公交系统特性提升幅度较小, 大连市公交系统特性提升幅度远超沈阳市, 两城市公交系统特性差距扩大。

2) 公交系统站点可达性空间分异格局。地铁开通前, 沈阳市核心区站点可达性与其他区域相比优势显著, 站点服务范围可覆盖核心区面积的 42.29%, 拓展区次之, 边缘区最低(表 2)。大连市核心区站点可达性最优, 但仅覆盖核心区面积的 13.38%, 各组团站点可达性存在差异, 差异程度与

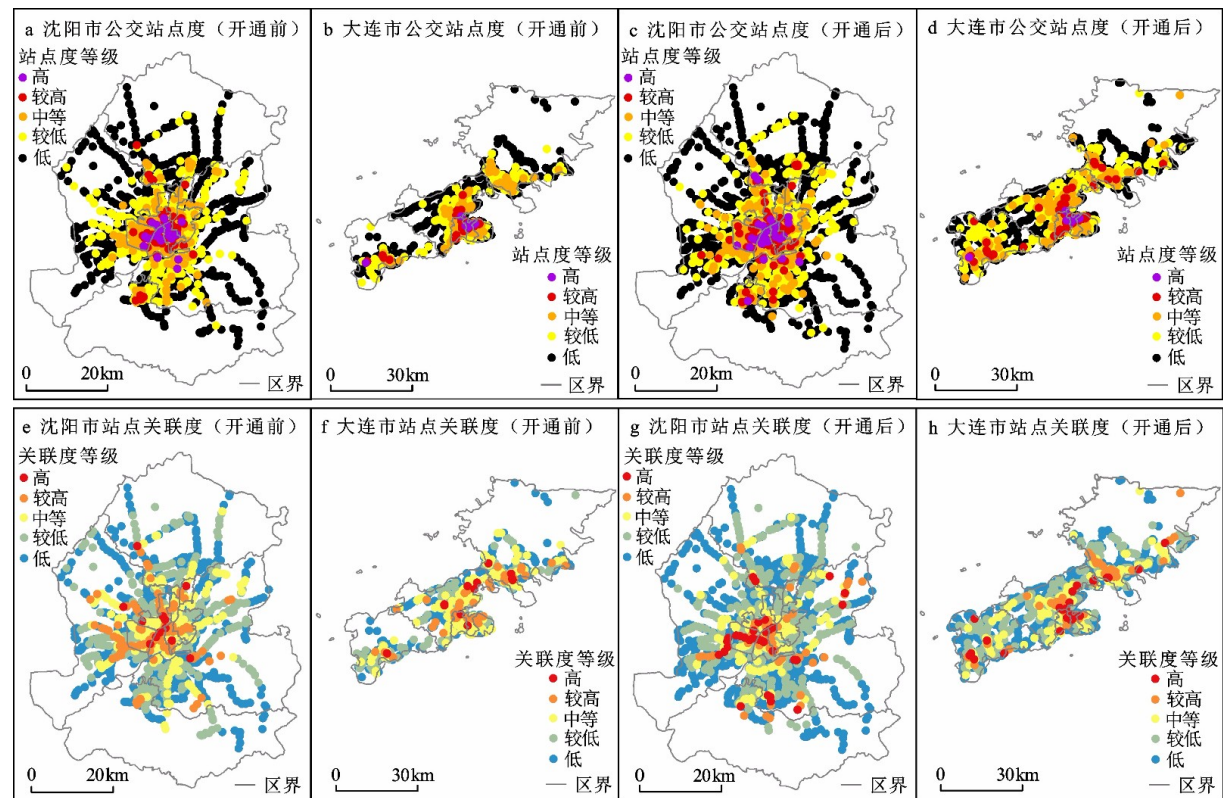


图 2 地铁开通前后站点度和站点关联度分布

Fig.2 Distribution of site degree and site correlation degree before and after subways opening

表 1 地铁开通前后公交系统特性变化对比

Table 1 Comparison of changes in the characteristics of public transport systems before and after subways opening									
城市	平均站点度		平均路径长度		平均聚类系数		整体公交系统特性		整体公交系统特性变化幅度
	开通前	开通后	开通前	开通后	开通前	开通后	开通前	开通后	
沈阳市	2.842	2.830	19.740	18.789	0.090	0.078	0.080	0.095	0.015
大连市	2.793	2.932	14.090	12.038	0.119	0.125	0.120	1.000	0.880

表 2 站点服务面积变化

Table 2 Changes of site service area in Shenyang and Dalian								
城市	区域	站点服务范围面积/km ²		变化面积/km ²	变化率/%	区域面积/km ²	服务范围占比/%	
		开通前	开通后				开通前	开通后
沈阳	核心区	57.99	110.14	52.15	89.93	137.11	42.29	80.33
	拓展区	177.98	327.49	149.51	84.00	2572.92	6.92	12.73
	边缘区	16.70	32.78	16.08	96.29	787.11	2.12	4.17
	研究区	252.67	470.41	217.74	86.18	3497.14	7.23	13.45
大连	核心区	80.65	188.60	107.95	133.85	602.58	13.38	31.30
	金州区	43.33	96.04	52.71	121.65	1357.62	3.19	7.07
	旅顺口区	16.37	55.65	39.28	239.95	498.01	3.29	11.17
	研究区	140.35	340.29	199.94	142.46	2458.21	5.71	13.84

沈阳市区域差异相比较小(表 2)。这一时期,整体上大连市公交系统可达性优于沈阳市(表 3),从评价指标来看,沈阳市站点可达性略高于大连市,但大连市网络可达性显著优于沈阳市,故整体评价结

表 3 公交系统可达性变化对比

Table 3 Comparison of changes in the accessibility of public transport systems

城市	站点可达性		网络可达性		整体公交系统可达性		整体公交系统 可达性变化程度
	开通前	开通后	开通前	开通后	开通前	开通后	
沈阳市	0.072	0.135	19.740	18.789	0.097	0.553	0.456
大连市	0.057	0.138	14.090	12.038	0.354	1.000	0.646

果占优。

地铁开通以后,两城市站点可达性均明显升高(表 2),大连市变化程度更大。沈阳市核心区站点可达性仍然显著高于其他区域,地铁开通以后站点服务范围可以覆盖核心区 80% 以上的区域,其余区域虽也显著提升,但核心区与其余区域间差距进一步扩大。大连市各组团站点服务面积均大幅提升,尤其是旅顺口区,变化率达 239.95%。从站点服务范围面积占比及空间分布情况看,各区域站点服务面积差距呈缩小趋势。整体上两城市公交系统可达性均显著提升(表 3),地铁开通后两城市的站点可达性基本持平,网络可达性均优化,大连市的变化程度更大,进而使得大连市整体公交系统可达性提升幅度更大,两城市公交系统可达性差距进一步扩大。

2.2 地铁对城市公交系统影响的差异

为更直观比较地铁对公交系统特性和可达性的影响,对比分析 2020 年两城市公交系统包含与不包含地铁的情况下,公交系统特性与可达性的时空分布特征及差异。

1) 地铁对不同空间结构城市公交系统特性的影响。结合站点度和站点关联度变化分析地铁对公交系统特性的影响,影响程度的高中低等级根据对应指标采用自然断点法进行了划分:沈阳市的站点度升高 4 级为高、升高 2 级为中、升高 1 级为低;站点关联度升高幅度大于 209 536.83 为高、小于 53 071.74 则为低,其余为中;关联度降低幅度大于 80 892.91 为高、小于 19 269.12 为低,其余为中。大连市的站点度升高 3 级为高、升高 2 级为中、升高 1 级为低;站点关联度升高幅度大于 59 152.54 为高、小于 11 770.28 为低,其余为中;关联度降低幅度大于 32 272.05 为高、小于 9 337.07 为低,其余为中。加入地铁后,沈阳市有 85 个站点等级升高,升高程度多为 2 级,等级升高站点集中分布在核心区,沿地铁线路向拓展区扩散(图 3a)。大连市有 62 个站点等级升高,升高程度也多为 2 级,空间上

以核心区为中心向旅顺口区 and 金州区扩散,与大连市地铁线路走向一致(图 3d)。与沈阳市相比,大连市站点度变化的站点数量少、程度低、无明显空间集聚特征。两城市等级变化站点均以地铁站点为主。

从站点关联度的变化上看,沈阳市关联度升高的站点占 40.41%,降低的站点占 49.54%,关联度降低现象更明显。受地铁线路走向的影响,关联度升高程度高的站点集中分布在核心区和核心区与拓展区的交界处(图 3b),并且均为地铁线路沿线的站点,降低程度高的站点 95.60% 为传统公交站点(图 3c)。从变化程度的数量对比上看,升高程度低的站点占 96.12%,降低程度低的站点占 84.86%,关联度变化站点占沈阳市站点总量的 89.95%。大连市与沈阳市情形类似,同样表现为站点关联度降低现象更显著,关联度升高程度高的站点沿地铁线路分布(图 3e),以核心区为中心向旅顺口区 and 金州区扩散,降低程度高的站点性质与沈阳市类似(图 3f)。在变化程度的数量对比上,升高程度低的站点占 92.76%,降低程度低的站点占 86.24%,关联度变化站点占大连市公交站点总量的 86.90%。综上所述,地铁对两城市站点关联度的影响均表现为范围大,程度低。

2) 地铁对不同空间结构城市公交系统可达性的影响。地铁对公交系统可达性的影响通过站点可达性和网络可达性的变化来反映。加入地铁后,在站点可达性上(表 4),沈阳市仅拓展区有微弱提升,研究区整体站点可达性略有增加。大连市研究区整体站点可达性有较明显提升,具体来看,核心区站点可达性升高程度较高,旅顺口区 and 金州区也均有升高,且程度相近。

网络可达性变化方面,高中低等级根据对应指标采用自然断点法进行划分:沈阳市站点最短路径变化大于 10.54 为高,小于 1.94 为低,其余为中;大连市站点最短路径变化大于 5.83 为高,小于 1.67 为低,其余为中。沈阳市变化程度高的站点有 57 个,

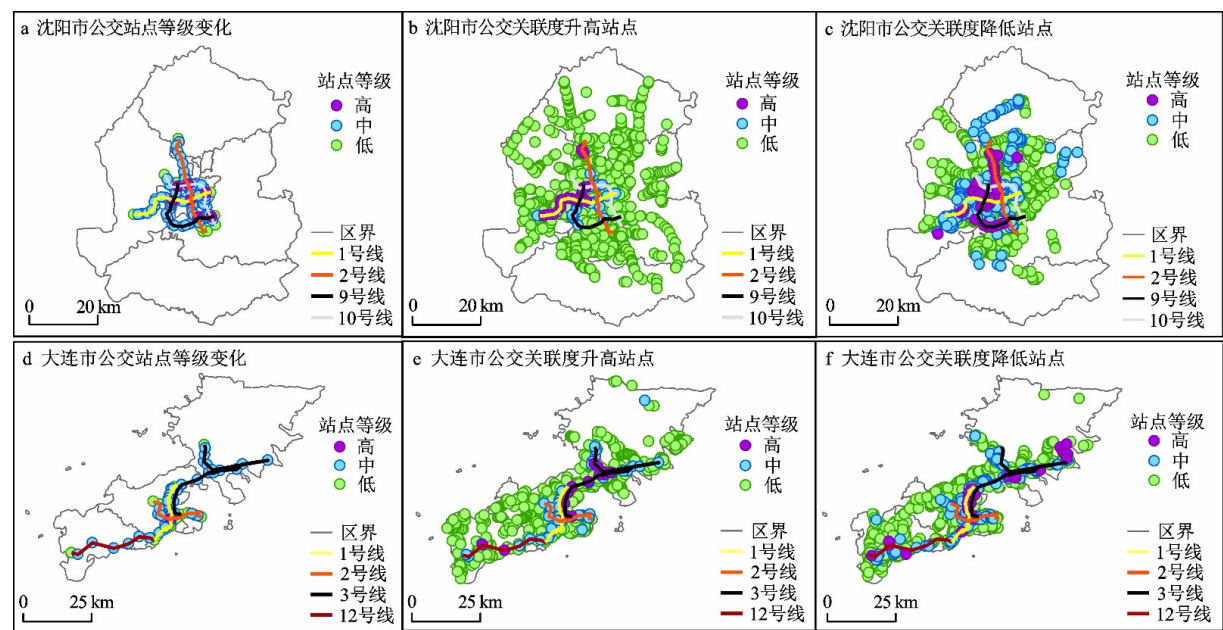


图 3 公交系统特性空间格局分异

Fig.3 Spatial pattern differentiation of public transport systems characteristics

表 4 加入地铁对不同空间结构城市公交系统可达性的影响

Table 4 The influence of adding subways on the accessibility of public transport systems in cities with different spatial structures									
城市	区域	站点服务范围面积/km ²		变化面积/km ²	变化率/%	区域面积/km ²	服务范围占比/%		占比变化程度/%
		无地铁	有地铁				无地铁	有地铁	
沈阳	核心区	110.14	110.14	0.00	0.00	137.11	80.33	80.33	0.00
	拓展区	327.42	327.49	0.07	0.02	2572.92	12.73	12.73	0.00
	边缘区	32.78	32.78	0.00	0.00	787.11	4.16	4.16	0.00
	研究区	470.34	470.41	0.07	0.01	3497.14	13.45	13.45	0.00
大连	核心区	173.79	188.60	14.81	8.52	602.58	28.84	31.30	2.46
	金州区	92.56	96.04	3.48	3.76	1357.62	6.82	7.07	0.25
	旅顺口区	54.26	55.65	1.39	2.56	498.01	10.90	11.17	0.27
	研究区	320.61	340.29	19.68	6.14	2458.21	13.04	13.84	0.80

占 1.94%，中等变化站点有 557 个，占 18.98%，程度为低的站点占 79.08%。图 4 可以看出，变化程度高的站点集中分布在核心区，中等变化站点集中分布在拓展区西南部和北部，与地铁线路走向一致，变化程度低的站点无显著集聚性(图 4)。大连市变化程度高的站点仅 21 个，占 1.01%，中等变化站点 222 个，占 10.69%，与沈阳市类似，变化程度低的站点数量最多，占 88.29%。在空间分布上，变化程度高的站点在各组团均有分布，无显著集聚特征；中等变化站点主要分布在核心区东北部和金州区南部，与地铁线路走向一致。

2.3 地铁影响城市公交系统的作用机制

地铁开通前，受单中心圈层结构影响，沈阳市公交系统表现出显著的空间集聚特征：核心区是城市生活、工作人流密集区域^[30]，因而传统公交布局密集且通达，以方便与其余站点的邻接，向外愈发稀疏；大连市受多中心组团结构影响，城市人流密集区域数量多而分散，各组团均有传统公交集聚。这种空间结构差异体现在公交系统特性和可达性的特征上，表现为大连市公交系统特性评价结果略高于沈阳市，可达性评价结果显著高于沈阳市。这一时期特性与可达性的特征反映出大连市公交系统联

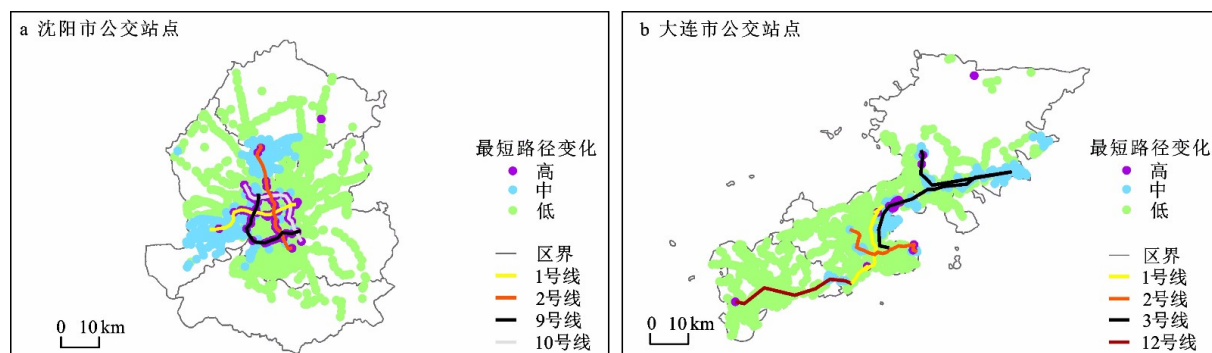


图4 公交站点最短路径变化程度及分布

Fig.4 Change degree and distribution of site shortest path

系更紧密、分布更均衡；而沈阳市各区域差异显著，核心区集聚特征明显，与其他区域差距较大。

地铁开通后，两城市公交系统特性与可达性都得到一定程度优化。从指标变化来看，沈阳市公交系统特性的3项评价指标中有2项小幅降低，平均路径长度有所缩短，但仍远高于大连市，说明沈阳市公交系统核心区过度集聚现象依然严重，各区域差异依旧极大；大连市各评价指标均有提升，变化较明显的是平均站点度和平均路径长度，反映出其公交系统在地铁开通后更加均衡，区域差异缩小。从可达性评价指标来看，沈阳市站点可达性变幅极小，大连市则变化明显，这是由于地铁线路优先布局在传统公交发达区域，沈阳市传统公交高度集中在核心区，核心区传统公交可达性已然极高，故沈阳市站点可达性变幅极小；大连市因多中心组团结构影响，传统公交分布相对均衡，使得地铁布局相对分散，导致站点可达性变幅较大。在网络可达性上，地铁开通后，沈阳市复合公交系统区域差异增大，使其网络可达性变幅与大连市相比较小。在两项评价指标共同作用下，两城市公交系统可达性差距扩大。

从地铁对两城市公交系统的影响来看，空间上两城市均表现为地铁沿线站点受影响程度较大，且因沈阳市地铁线路集中于核心区，由核心区向外延伸，大连市地铁线路在核心区、旅顺口区 and 金州区均有分布，故受地铁影响显著的站点在沈阳市呈现核心区集聚，逐渐向拓展区扩散，在大连市则表现为分散在开通地铁的各组团。沈阳市公交系统特性和可达性受地铁影响更大，表现为站点度、站点关联度和最短路径变化站点数量占比更高、变幅更大。分析原因认为，沈阳市传统公交与地铁均高度集中

于核心区，且两城市当前开通地铁线路数量有限，对公交系统的影响大多集中在地铁线路附近，故沈阳市公交系统受地铁影响更大。

因此，从公交系统特性和可达性的空间格局变化上看，地铁开通以后，单中心圈层结构城市公交系统集聚中心的集聚特征进一步强化，区域差异扩大；多中心组团结构城市公交系统在空间上逐渐分散，网络趋向于均衡化发展。从公交系统特性和可达性的变化程度上看，地铁开通以后，两类城市公交系统特性和可达性均产生了明显的变化，多中心组团结构城市公交系统特性与可达性的变化均大于单中心圈层结构城市，且地铁开通前后，其公交系统特性和可达性均占优。地铁自身产生的影响方面，单中心圈层结构城市公交系统受地铁影响更明显。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文以单中心圈层结构与多中心组团结构的代表城市——沈阳市和大连市为研究对象，运用网络分析等定量分析方法，探讨在空间结构不同的城市，地铁开通后城市公交系统特性和可达性的变化、变化的差异和原因，以及地铁对城市公交系统特性和可达性的影响。得到以下主要研究结论：

1) 地铁开通对公交系统特性和可达性均产生正向影响，在空间结构不同的城市内部表现出不同的空间分布特征：地铁开通后沈阳市公交系统变化以核心区为主，沿地铁线路向拓展区扩散，边缘区变化较小；大连市公交系统变化较分散，但同样以地铁沿线为主，逐渐向外扩散。

2) 在空间结构不同的城市，地铁开通后公交系统的变化程度不同。就沈阳市和大连市而言，大连

市公交系统变化程度更大,沈阳市地铁开通后,其公交系统虽相较于自身开通前变化程度大,但与大连市相比,两城市在公交系统特性和可达性上的差距进一步扩大。就地铁自身对传统公交的影响来看,沈阳市公交系统特性与可达性受地铁影响更为显著。

3) 地铁开通使单中心圈层结构城市的集聚中心表现出更强的集聚效应,扩大了区域间的差异。对多中心组团结构城市而言,地铁布局更为均衡,区域间差异缩小,公交系统趋向均衡化发展。

3.2 讨论

从研究视角来看,业内已有对复合公交系统的研究大多关注其时空分布特征及其变化^[2-4],对引起变化的作用因素探究不足。本文从空间结构差异的视角出发,以沈阳市和大连市为例,对比分析地铁开通后单中心圈层结构城市和多中心组团结构城市公交系统的变化,以及变化存在差异的原因,并探讨了地铁对公交系统特性与可达性的影响,为深入研究城市复合公交系统的格局及优化提供了新的研究方向。

从研究结果来看,地铁开通后两城市公交系统规模扩大,其特性和可达性均有提高,且受地铁线路走向影响存在空间差异,这一结论与已有研究成果一致^[2-4,17]。在此基础上,进一步分析地铁开通后,不同城市公交系统特性与可达性变化出现差异的原因,结果表明空间结构不同是导致差异性的根本原因,即对单中心圈层结构城市而言,地铁优先布局在单一的集聚中心附近,使原有中心集聚特征加剧,周边区域受地铁影响小,进而扩大了区域间的差异;而多中心组团结构城市的传统公交系统具有多个集聚中心,地铁分散布局在各集聚中心,使各区域差距缩小,公交系统趋向均衡化发展。对于复合公交系统在地铁开通后产生的变化,可通过改变传统公交的布局与运营,对公交系统供需不平衡的区域进行调节,以提高复合公交系统的效率。鉴于目前国内开通地铁城市有限,地铁线路数量较少,未来随着地铁的不断发展,可对上述城市进行长期跟踪研究,或选取更多样本城市进行实证研究,进一步探讨地铁对不同空间结构城市公交系统的影响。

参考文献(References):

[1] 丁成日. 城市空间结构和用地模式对城市交通的影响[J]. *城市交通*, 2010, 8(5): 28-35. [Ding Chengri. The impact of urban

spatial structure and land use pattern on urban transportation. *Urban Transport of China*, 2010, 8(5): 28-35.]

- [2] 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. *Progress in Geography*, 2014, 33(8): 1078-1089.]
- [3] 余伟, 马健霄, 张永辉. 地铁对城市公交网可达性的改善研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2011, 11(1): 121-125. [Yu Wei, Ma Jianxiao, Zhang Yonghui. Research on accessibility improvement of urban public transport network based on metro. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2011, 11(1): 121-125.]
- [4] 陈慧灵, 王伯礼, 曹小曙, 等. 广州市地铁对常规公交出行成本影响及其空间公平性研究[J]. *地理科学*, 2019, 39(8): 1265-1275. [Chen Huiling, Wang Boli, Cao Xiaoshu et al. Impact of rail transit on the travel cost of bus transit and the spatial equity: A case study of Guangzhou. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(8): 1265-1275.]
- [5] 罗艺, 钱大琳. 公交-地铁复合网络构建及网络特性分析[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2015, 15(5): 39-44. [Luo Yi, Qian Dalin. Construction of subway and bus transport networks and analysis of the network topology characteristics. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2015, 15(5): 39-44.]
- [6] 裴玉龙, 金英群, 常铮. 城市多模式公交网络拓扑结构与布局均衡性研究[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(1): 127-138. [Pei Yulong, Jin Yingqun, Chang Zheng. Equilibrium of topology and layout of urban multimode public transit network. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(1): 127-138.]
- [7] William L G, Duane F M. Factor-analytic study of the connectivity of a transportation network[J]. *Papers of the Regional Science Association*, 1964, 12(1): 231-238.
- [8] Domenico G, Ernesto M. Compared analysis of metro networks supported by graph theory[J]. *Networks and Spatial Economics*, 2005, 5(4): 395-414.
- [9] 刘锐, 严宝杰, 黄志鹏. 城市公共交通网络的复杂性分析[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2009, 9(3): 17-22. [Liu Rui, Yan Baojie, Huang Zhipeng. Complexity analysis of urban public transit network. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2009, 9(3): 17-22.]
- [10] Latora V, Marchiori M. Is the Boston subway a small-world network?[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2002, 314(1-4): 109-113.
- [11] Kubly M, Tierney S, Roberts T et al. A comparison of Geographic Information Systems, complex networks, and other models for analyzing transportation network topologies[R]. NASA/TM-2004-213259, 2004.
- [12] Sohrabi K, Merrill W, Elson J et al. Methods for scalable self-assembly of ad hoc wireless sensor networks[J]. *IEEE Transac-*

- tions on Mobile Computing, 2004, 3(4): 317-331.
- [13] 鲍登, 高超, 张自力. 基于复杂网络的公交-地铁复合网络鲁棒性分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2017, 42(5): 22-27. [Bao Deng, Gao Chao, Zhang Zili. Analysis of robustness of bus and subway interdependent network based on the complex network theory. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2017, 42(5): 22-27.]
- [14] 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 Qinghui, He Xiaotong. Study on the complexity of Beijing metro network. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, 37(6): 78-84.]
- [15] Pasaogullari N, Doratli N. Measuring accessibility and utilization of public spaces in Famagusta[J]. Cities, 2004, 21(3): 225-232.
- [16] 陆化普, 王继峰, 张永波. 城市交通规划中交通可达性模型及其应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(6): 781-785. [Lu Huapu, Wang Jifeng, Zhang Yongbo. Models and application of transport accessibility in urban transport planning. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(6): 781-785.]
- [17] Castillo-Manzano J I, López-Valpuesta L. Urban retail fabric and the metro: A complex relationship. Lessons from middle-sized Spanish cities[J]. Cities, 2009, 26(3): 141-147.
- [18] 王隸, 杨超. 上海市轨道交通网络的复杂网络特性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2009, 12(2): 33-36+55. [Wang Yi, Yang Chao. Characteristics of the complex network in Shanghai urban rail transit. Urban Mass Transit, 2009, 12(2): 33-36+55.]
- [19] Weinberger R R. Light rail proximity: Benefit or detriment in the case of Santa Clara County, California?[J]. Transportation Research Record, 2001, 1747(1): 104-113.
- [20] 强添纲, 赵明明, 裴玉龙. 城市多模式交通网络的复杂网络特性与鲁棒性研究[J]. 交通信息与安全, 2019, 37(1): 65-71. [Qiang Tiangang, Zhao Mingming, Pei Yulong. An analysis of characteristics of complex network and robustness in Harbin multi-mode traffic network. Journal of Transport Information and Safety, 2019, 37(1): 65-71.]
- [21] 郑啸, 陈建平, 邵佳丽, 等. 基于复杂网络理论的北京公交网络拓扑性质分析[J]. 物理学报, 2012, 61(19): 190510. [Zheng Xiao, Chen Jianping, Shao Jiali et al. Analysis on topological properties of Beijing urban public transit based on complex network theory. Acta Physica Sinica, 2012, 61(19): 190510.]
- [22] Gallo M, Montella B, D'Acierno L. The transit network design problem with elastic demand and internalisation of external costs: An application to rail frequency optimisation[J]. Transportation Research Part C, 2011, 19(6): 1276-1305.
- [23] 戴帅, 陈艳艳, 刘小明. 北京市公共交通一体化规划研究[J]. 规划师, 2007, 23(11): 8-11. [Dai Shuai, Chen Yanyan, Liu Xiaoming. Research on Beijing public transportation integration planning. Planners, 2007, 23(11): 8-11.]
- [24] Crane R. The influence of urban form on travel: An interpretive review[J]. Journal of Planning Literature, 2000, 15(1): 3-23.
- [25] 曹小曙, 梁斐雯, 陈慧灵. 特大城市空间形态差异对交通网络效率的影响[J]. 地理科学, 2019, 39(1): 41-51. [Cao Xiaoshu, Liang Feiwen, Chen Huiling. Influence of different spatial forms for metropolians on transportation network efficiency. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(1): 41-51.]
- [26] 周素红, 闫小培. 广州城市空间结构与交通需求关系[J]. 地理学报, 2005, 60(1): 131-142. [Zhou Suhong, Yan Xiaopei. The relationship between urban structure and traffic demand in Guangzhou. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(1): 131-142.]
- [27] 马清裕, 张文尝, 王先文. 大城市内部空间结构对城市交通作用研究[J]. 经济地理, 2004, 24(2): 215-220. [Ma Qingyu, Zhang Wenchang, Wang Xianwen. Review on spatial structure of the metropolis affecting its traffic. Economic Geography, 2004, 24(2): 215-220.]
- [28] 孙斌栋, 潘鑫. 城市空间结构对交通出行影响研究的进展——单中心与多中心的论争[J]. 城市问题, 2008(1): 19-22+28. [Sun Bindong, Pan Xin. The impact research on daily travel by urban spatial: From the points of view of mono-centric and poly-centric. Urban Problems, 2008(1): 19-22+28.]
- [29] 吴玲玲, 彭念. 城市空间结构与公共交通通达性匹配研究——以重庆市核心城区为例[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(11): 173-181. [Wu Lingling, Peng Nian. Research on the matching of urban spatial structure and accessibility of public transportation—Taking the core area of Chongqing for example. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2021, 35(11): 173-181.]
- [30] 赵辉, 王东明, 谭许伟. 沈阳城市形态与空间结构的分形特征研究[J]. 规划师, 2007, 23(2): 81-83. [Zhao Hui, Wang Dongming, Tan Xuwei. A study on fractal characteristics of Shenyang's urban form and spatial structure. Planners, 2007, 23(2): 81-83.]
- [31] 董伟. 大连市城市形态结构功能研究[J]. 城市规划, 2004, 28(12): 23-27. [Dong Wei. Research on the city form of Dalian. City Planning Review, 2004, 28(12): 23-27.]
- [32] 刘军. 整体网分析讲义: UCINET软件实用指南[M]. 上海: 格致出版社, 2009. [Liu Jun. Lecture on whole network approach: A practical guide to UCINET. Shanghai: Truth & Wisdom Press, 2009.]
- [33] 李平华, 陆玉麒. 可达性研究的回顾与展望[J]. 地理科学进展, 2005, 24(3): 69-78. [Li Pinghua, Lu Yuqi. Review and prospectation of accessibility research. Progress in Geography, 2005, 24(3): 69-78.]

Impacts of Subways on the Characteristics and Accessibility of Public Transport Systems: Based on the Perspective of Spatial Structure Difference

Wu Hanchun, Liu Yanjun, Sun Hongri, Fu Hui

(School of Geographical Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, Jilin, China)

Abstract: In the cities with different spatial structures, the impacts of subways on the characteristics and accessibility of traditional public transport systems are quite different. Taking Shenyang and Dalian as examples, this study discusses the impacts on the characteristics and accessibility of public transport systems in cities with different spatial structures which occur when subways open and analyzes the reasons for the differences of impacts. The results show that: 1) The opening of subways has positive impacts on the characteristics and accessibility of the public transport systems in Shenyang and Dalian, the degree of the impacts spreads out and gradually decreases along the subway lines. 2) The impacts of the subways opening on the characteristics and accessibility of the public transport system in Dalian are more significant, and the impacts of subways themselves are more significant in Shenyang. The gap of the evaluation results of public transport systems characteristics and accessibility between the two cities increases after the subways open. 3) With the opening of subways, the agglomeration effect of the cluster center of the public transport system in the single-center circle cities is further enhanced, and the regional differences are enlarged, while the development of public transport system in the multi-center group cities tends to be more balanced.

Key words: subway; characteristics of public transport system; accessibility of public transport system; spatial structure difference; complex network model