

# 基于列车运行网络的中国城市中心性分析

钟柯<sup>1,2</sup>, 肖昱<sup>1</sup>, 许珺<sup>3</sup>, 马福光<sup>1</sup>, 刘瑜<sup>1</sup>, 邬伦<sup>1</sup>

(1. 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871; 2. 75719 部队, 武汉 430074;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 本文基于铁路运行网络, 利用复杂网络分析方法中的中心性评价指标, 对城市在铁路网络中的中心性进行了分析。我们根据列车时刻表基于 L 空间模型, 构建了铁路运营网络, 计算了铁路运营网络中节点城市的不同中心性指标, 包括度中心性、邻近中心性和介中心性。这 3 个指标从不同角度衡量了城市在铁路运输网络中的地位和功能, 我们分析了这 3 个中心性指标的空间分布特征及相关性, 并探讨了中心性指标与城市发展之间的关系, 进一步揭示铁路网络结构对城市发展的影响。

**关键词:** 铁路运营网络; 度中心性; 邻近中心性; 介中心性

**DOI:** 10.3724/SP.J.1047.2012.00085

## 1 引言

城市的发展与交通运输网络的演化息息相关。一方面, 交通网络的建设改变了空间的通达性和区域之间的联系, 从而推动了城市社会和经济的发展, 及其自身空间格局的变化; 另一方面, 一个区域内城市发展的空间不均衡造成了交通运输网络结构的演化。因此, 理解城市在交通网络中的地位, 分析其与城市发展之间的关系, 有助于优化交通运输网络建设及促进城市发展<sup>[1-7]</sup>。铁路运输在我国交通网络中占有重要地位, 随着经济的飞速发展, 我国的铁路建设和列车运行网络也得到了快速的发展, 近年来, 客运列车多次提速, 尤其是近年来武广、京沪等高速铁路的相继开通, 大大提高了在既有铁路网络下的运输能力。

研究表明, 中国的铁路网络具有复杂网络的无标度、小世界性<sup>[1,8]</sup>。网络节点的重要性可以通过节点中心性来衡量<sup>[9]</sup>, 在复杂网络研究中, 有多种不同的中心性量化指标, 用以评价节点的地位和功能。近年来, 许多学者开始将各种中心性度量指标应用于交通网络的研究, 用于评价网络的结构特征及地理涵义<sup>[10-14]</sup>。本文首先根据列车时刻表数据构建了基于 L 空间模型的铁路运营网络。然后采用最常用的 3 种中心性指标: 度中心性, 邻近中心性, 以及

介中心性评价了城市在铁路运输网络中的地位。并进一步从城市系统的角度分析了铁路网络的空间格局, 以及铁路网络结构对城市发展的影响。

## 2 基于 L 空间模型的铁路运营网络构建

目前, 交通运行网络, 如城市公交网络研究中, 主要有两种建模方式, 即 L 空间模型和 P 空间模型, 尤其是在城市公交网络的研究中<sup>[15]</sup>。在 L 空间模型中, 在一条经过多个点的线路上, 只有相邻的两个节点才被认为是直接相连的。在 P 空间模型中, 由一条线路连接的所有节点都被认为是两两相连的。图 1 表达了两条实际线路 (Line 1 和 Line 2) 基于不同空间模型所形成的拓朴网络, 图 1(a) 为 L 空间模型的拓朴网络, 图 1(b) 为 P 空间模型的拓朴网络。其中 Line 1 依次经过点 1、2、3、4、5, Line 2 依次经过点 6、7、3、8、9。通过比较, 从中发现: 在交通网络的研究中, P 空间模型忽略了两个节点之间的出行距离, 而注重于是否可达, 因此更适于做换乘分析, 两节点间的距离即为需要乘坐车次的数目; L 空间模型反映了两点之间的距离和空间约束, 更体现出节点的地理位置对其在网络中地位的影响<sup>[16-17]</sup>。L 空间模型考虑了地理空间的限制, 在

收稿日期: 2011-08-06; 修回日期: 2011-12-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171296); 海外及港澳学者合作研究基金 (40928001)。

作者简介: 钟柯 (1982-) 男, 硕士研究生, 主要从事地理信息系统研究与应用。E-mail: zhk0414@gmail.com

计算中心性时可以很好地体现网络的空间特性,更适合作以城市为节点的中心性分析,因此,本文采用 L 空间模型用以构建铁路运营网络。

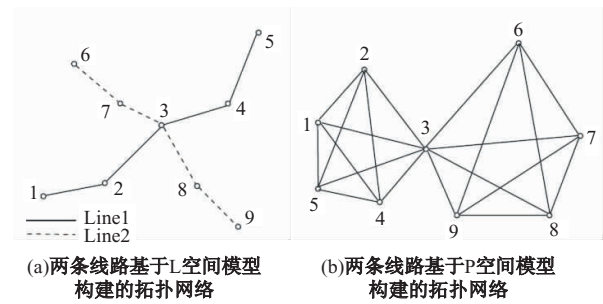


图 1 L 空间模型和 P 空间模型

Fig. 1 The L-space model and P-space model

本文采用的原始数据是 2011 年 7 月 1 日更新的商用“铁路时刻数据库”,共 3 115 个车站(不包括澳门和台湾地区城市),包括高速(G)、动车(D)、特快(T)等所有等级列车共 3698 次。为适应网络分析的需要,本文将城市作为研究节点,对于拥有 2 个及以上车站的城市,将其数据进行合并。如将武汉的武昌、汉口和武汉火车站的车次进行合并。经过简化后共 2 752 个节点城市,表 1 列出了部分车次所对应的节点。

表 1 车次节点对应表示例

Tab. 1 Some node cities on the China train schedule timetable

车次	节点
G1	北京,南京,上海
D7801	长沙,株洲,衡山,衡阳,耒阳,郴州,韶关,清远,广州
K36/K37	广州,韶关,坪石,郴州,衡阳,祁东,祁阳,永州,东安,桂林,柳州
C2201	北京,武清,天津
1487	北京,霸州,任丘,饶阳,衡水,临清,聊城,菏泽,商丘,民权,兰考,开封,郑州
L9815	西宁,德令哈,格尔木,那曲,拉萨

L 空间模型的网络构建原则,只有空间上相邻的两个节点才被认为是直接相连的。因此,在根据列车时刻表构建的铁路运营网络时,是以两点间有否直达车作为直接相连的条件。例如,车次 G1 从北京到上海,途中停靠南京,则认为北京和上海之间没有直接相连的边,它们通过南京间接连通。如果还有别的车次从北京开往南京,则这两个城市之间的边的数量也会相应增加。鉴此,本文将车次信息转换为 L 空间模型的铁路运营网络,如表 2 所

示,其中首行和首列为节点城市名,矩阵中元素为两节点的车次数目。本文构建的铁路运营网络是一个多重图(multi-graph),与带权重的图有所区别,但是根据 Newman<sup>[18]</sup>的研究,多重图可以帮助我们传统的无权网络研究方法如中心性使用到有权重的网络中。因此,本文利用多重图将车次信息作为权重加入到了节点中心性的计算中。

表 2 列车运营网络矩阵示例

Tab. 2 Samples of the L-space railway matrix

	西安	咸阳	杨陵	蔡家坡	宝鸡	天水	甘谷	陇西	定西
西安	0	25	21	19	50	29	15	25	16
咸阳	28	0	15	14	21	9	6	9	6
杨陵	22	18	0	14	19	6	5	6	4
蔡家坡	19	15	12	0	17	8	7	8	6
宝鸡	48	24	21	17	0	34	19	30	19
天水	28	11	7	8	32	0	20	31	19
甘谷	14	8	6	5	18	19	0	19	15
陇西	23	11	7	8	27	28	18	0	19
定西	16	9	5	7	19	19	15	19	0

3 中心性评价指标

节点在网络中的重要性可以通过中心性来衡量。这一方法首先在社会网络的研究中提出,用以对节点重要性进行量化<sup>[19]</sup>。在这里,节点的重要性可以理解为是该节点对其他节点或整个网络的影响。社会网络学者提出了许多不同的中心性指标,从不同的方面评价了节点的重要性,对交通网络的研究也有非常重要的借鉴意义。中心性指标在交通网络中的应用也取得了显著的成果。例如,Borgatti<sup>[20]</sup>探讨了中心性和交通流量之间的关系,常树春等<sup>[21]</sup>认为交通网络的中心性分析对网络规划和建设具有重要意义,荣莉莉等<sup>[9]</sup>说明了不同中心性指标的特点并指出应该互补应用于一个网络模型。

常用的 3 种中心性指标为:度中心性(Degree Centrality)、邻近中心性(Closeness Centrality)和介中心性(Betweenness Centrality)。这 3 个指标分别反映了节点在网络中的直接交流能力、空间可达性和控制网络交流的能力。本文分别计算了所有节点的 3 种中心性指标,并重点分析了 300 个地级以上城市的中心性特征。

3.1 度中心性

一个节点在网络中的度中心性是指与该节点有直接联系的节点数。一个节点的度越高说明该节点与其他节点的联系越广泛。在有向网络中,节点的度分为入度和出度,入度反映了该节点对网络中其他节点的吸引力,出度反映了该节点对网络中其他节点的影响。在无向网络中,节点的度只有一个,表示该节点与其他节点直接相连的次数。本文

取入度和出度中较大的值,将铁路运营网络矩阵转换成无向图计算出节点的度。度中心性的计算公式如下:

$$D_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n L_{ij}$$

(1)

其中, $L_{ij}$ 是节点*i*和节点*j*之间的边数, $n$ 为节点的总数。度中心性的计算结果如表 3 所示,其中归一化方法将每个城市的度中心性除以最大的度中心性数值。

表 3 度中心性分析结果(前 20)

Tab. 3 Degree centrality analysis for the top 20 cities

排名	节点城市	度中心性	归一化度中心性	排名	节点城市	度中心性	归一化度中心性
1	南京	416	1.00	11	武汉	282	0.68
2	上海	399	0.96	12	株洲	273	0.66
3	北京	373	0.90	13	长沙	272	0.65
4	苏州	359	0.86	14	沈阳	269	0.65
5	无锡	341	0.82	15	东莞	263	0.63
6	广州	335	0.81	16	徐州	254	0.61
7	常州	293	0.70	17	镇江	243	0.58
8	济南	289	0.69	18	石家庄	236	0.57
9	郑州	289	0.69	19	衡阳	234	0.56
10	杭州	286	0.69	20	天津	231	0.56

对所有节点在铁路运营网络中的度中心性分析发现,度最大的是南京(416),最小的是和田与锡林浩特,度仅为 2,两者相差甚远。由图 2(a)可以看出,约有 50%的城市市度数小于 40(归一化度中心性数值为 0.1)。从表 3 和图 2(b)可以看出,度中心度较大的城市分布于东部发达地区,大致位于京哈、京广和京沪 3 条铁路沿线。在经济较为发达的

东部地区,列车开行频次较高,城市经停的车次数目较多,使得度中心性指标较高。相反,在西部地区,度中心性相对较低:省会城市中度中心性最低的是拉萨,拉萨是青藏铁路的终点,到达拉萨的列车(次)仅有 8 次;地级市中度中心性最低的是和田与锡林浩特,通行车次均较少,这反映了西部地区人口和铁路网密度均较低,列车运行频次较少的现实。

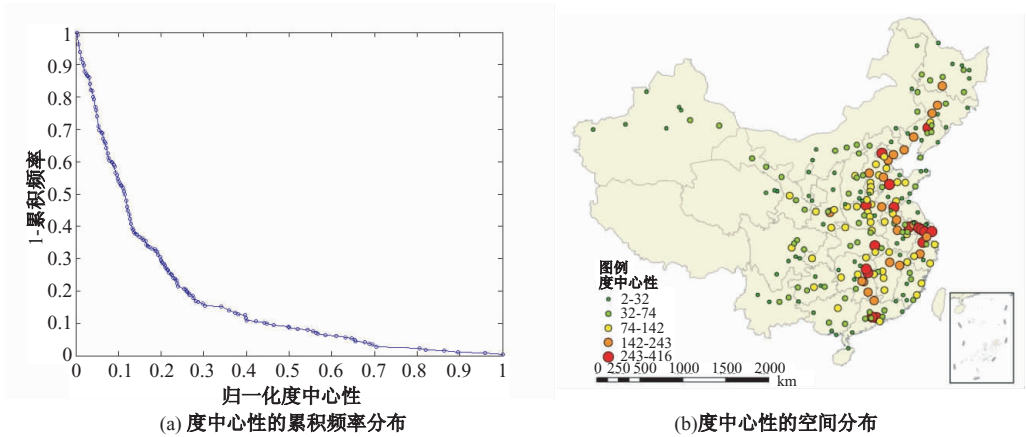


图 2 度中心性的频率分布图和空间分布图

Fig. 2 The cumulative frequency distribution and the spatial distribution of degree centrality

度中心性还反映了中国铁路客运网络发展的一个有趣的现象,近年来,随着都市连绵带的形成,以及高速列车和高速铁路的发展,拉近了大城市之间的距离,如京沪高铁连接的北京和上海,武广高铁连接的武汉和广州,为大都市的形成提供了条件<sup>[22]</sup>。从度中心性来看,排名前十的城市均为有高速铁路通行的城市。依据列车的不同等级,我们将所有车次分为三组,分别为:普通列车,快速、特快、直达特快列车,以及动车组列车(包括高速动车组旅客列车、城际动车组旅客列车、动车组旅客列车)。然后依次计算城市在三组列车网络中的度中心性,从而得到不同等级列车的度中心性占城市总的度中心性的比例,即该组列车对城市度中心性的贡献,如图 3 所示。从三组列车所占的比例来看,动车组列车的通行对城市的度中心性影响最为明显,其所占比例超过 50%的城市有 7 个:南京、上海、苏州、无锡、广州、常州、济南。其次是快速、特快及直达列车,尤其是郑州,这类列车的度中心性在总的度中心性中占有绝对优势。反观普通列车在度中心性中所占的比例,在各个城市中均没有优势,尤其是东部沿海地区的城市。动车组列车对城市度中心性的影响受其高运输频率影响,以京沪高速铁路为例,高峰期每日开行动车组列车 92 对。根据我们构建的铁路运输网络,动车组列车对整个网络的影响反映在它强调了不同城市间的联系强度。

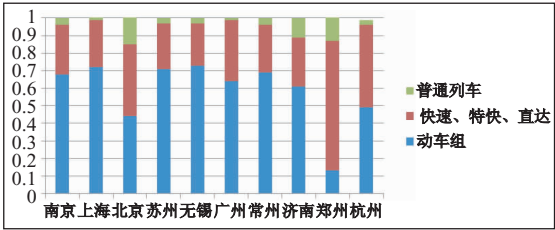


图 3 不同等级列车的度中心性占城市总的度中心性的比例(前 10)

Fig. 3 Proportions of different types of train lines for the top 10 cities

3.2 邻近中心性

邻近中心性用给定节点到其他所有节点的最短距离之和的倒数进行衡量,反映了该节点在网络中的相对可达性<sup>[5]</sup>。度中心性指标关注的是节点与其他节点之间的直接连接,而没有考虑间接连接。因此,可能存在这样的情况,一个节点的度中心性很高,但与其直接相连的节点与网络中的其他节点联系较少或没有联系,那么该节点的中心地位就是区域性的而不是全局性的。邻近中心性是一种对节点在整个网络中不受其他节点控制的衡量方法,它利用节点到网络中其他所有节点的距离评价该节点在空间位置上是否占有优势,其计算公式为:

$$C_i = \frac{1}{\sum_{j=1, j \neq i}^n D_{ij}}$$

(2)

表 4 邻近中心性分析结果(前 20)

Tab. 4 Closeness centrality analysis for the top 20 cities

排名	节点城市	邻近中心性(10 <sup>-5</sup> )	归一化邻近中心性	排名	节点城市	邻近中心性(10 <sup>-5</sup> )	归一化邻近中心性
1	北京	6.89	1.00	11	长沙	6.08	0.88
2	郑州	6.40	0.93	12	鹰潭	6.03	0.87
3	哈尔滨	6.26	0.91	13	四平	6.02	0.87
4	武汉	6.26	0.91	14	南昌	6.01	0.87
5	沈阳	6.23	0.90	15	漯河	6.00	0.87
6	石家庄	6.18	0.90	16	南京	5.95	0.86
7	太原	6.17	0.90	17	九江	5.94	0.86
8	长春	6.16	0.89	18	唐山	5.90	0.86
9	秦皇岛	6.09	0.88	19	天津	5.89	0.86
10	徐州	6.08	0.88	20	张家口	5.88	0.85

其中, $n$  代表网络中节点的总数, $D_{ij}$  代表节点  $i$  和节点  $j$  之间的最短路径距离。表 4 为铁路运营网络邻

近中心性分析结果。  
对所有节点的铁路运营网络邻近中心性分析



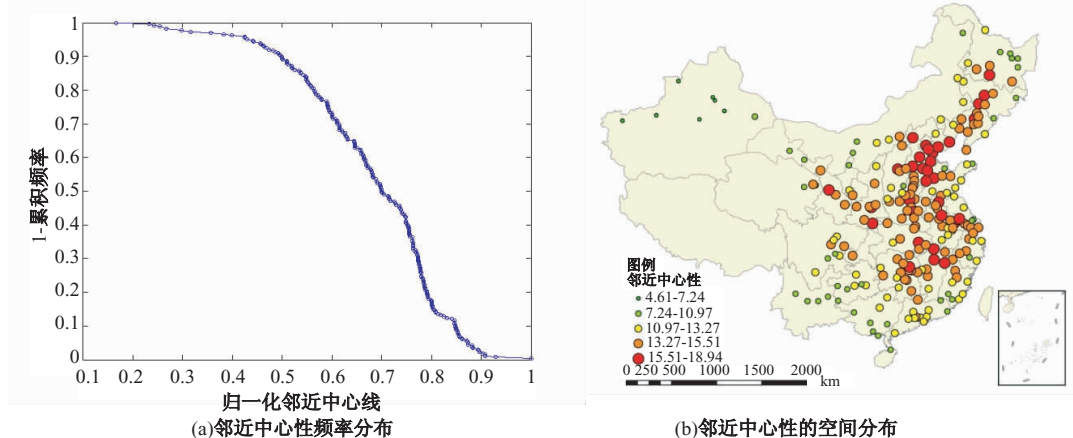


图 4 邻近中心性的频率分布及空间分布

Fig. 4 The cumulative frequency distribution and spatial distribution of closeness centrality

发现,邻近中心性最大的为北京 6.89,最小的为和田,有约 50%的城市归一化邻近中心性大于 0.7,说明邻近中心性呈现出右偏峰分布。从空间分布上看,邻近中心性较高的城市同样集中分布于东部经济较为发达的区域,但是比较图 4(b)和图 2(b),可以看出,高邻近中心性城市的分布更偏西一些。此外,从表 4 也可以看出,前 20 名的邻近中心性城市既包括了北京、武汉、沈阳等大城市、也包括了徐州、鹰潭、四平、漯河等中型城市。这是因为临近性体现了各城市在整个铁路运营网络中的空间位置属性。通常距离网络“质心”较近的城市,具有较高的临近中心性,此外,在铁路网密度较高的区域,相应城市的邻近中心性也会较高,例如,东北地区拥有我国最为密集的铁路网,因此,尽管离网络“质心”较远,但是有 4 个城市(哈尔滨、沈阳、长春、四平)的邻近中心性位于前 20 名,而在华北地区,由于接近网络质心,有拥有较高的铁路网密度,因此,邻近中心性较高的城市也较多,包括北京、郑州、石家庄、太原、秦皇岛、徐州、漯河、唐山、天津、张家口等 10 座城市位于全国前 20 名。

### 3.3 介中心性

介中心性指的是某节点处于其他节点对间最短路径中的次数与节点对之间所有最短路径数目的比值,衡量了一个点的连通潜力,反映了该节点对网络信息流动的影响能力。假设在一个网络中,节点 A 与节点 C 并不直接相连,它们之间的最短路径要经过节点 B,那么我们认为节点 B 为节点 A 和

D 之间的联系起到了“中介”作用。如果节点 B 出现故障,亦会影响到节点 A、D 之间的沟通。介中心性计算方法为<sup>[9]</sup>:

$$B_i = \sum_{s,t \in V; s,t \neq i} \frac{\sigma(s,t|i)}{\sigma(s,t)} \quad (3)$$

其中, $s, t$  为节点集合  $V$  中除  $i$  外的任意节点对,  $\sigma(s, t|i)$  是  $s$  和  $t$  之间最短路径中过节点  $i$  的次数,  $\sigma(s, t)$  是  $s$  和  $t$  之间最短路径的总条数。城市在列车运营网络中的介中心性计算结果如表 5 所示。对于本研究所采用数据集集中的 2752 个城市,两两之间计算换乘次数最少的乘车方案,如果一个城市介中心性越高,表示经由该城市换乘的路径越多。

对所有城市在铁路运营网络中的介中心性结果分析发现,介中心性最大的为北京,而 34 个城市的介中心性为 0(图 5)。全国地级市的介中心性呈现出重尾分布(Fat-tailed)的特征,少数介中心性较高的城市在全国铁路运输网络中处于枢纽地位。从空间分布上看,介中心性较高的城市在空间上较为分散。介中心性前 7 名的城市中,北京是全国的铁路枢纽,哈尔滨、郑州、太原、成都、兰州、沈阳,都是局部的中心城市,分别位于东北、西北、西南和中部地区。而在介中心性前 20 名的城市中,还包括了一些区域性的具有枢纽作用的中等城市,如南充、大庆等。此外,上海、广州等城市由于处于网络边缘区域,必须经过它们的换乘车次相对较少,这降低了其介中心性。

根据公式 3,介中心性反映了城市在整个网络中的控制能力。对于铁路运行网络,该能力源于两个方面。首先,部分大城市是全国或者地区级的枢

纽城市,经停及可换乘列车车次较多,介中心性较高;其次,由于网络结构的原因,使得某些城市处于“咽喉要道”的位置上,其介中心性也相对较高。例

如,位于兰新线的金昌和嘉峪关,是新疆各个城市与其他地区城市联系的必经之地,这提高了其介中心性。

表 5 介中心性分析结果(前 20)

Tab. 5 Betweenness centrality analysis for the top 20 cities

排名	节点城市	介中心性	归一化介中心性	排名	节点城市	介中心性	归一化介中心性
1	北京	2 398 274. 50	1. 00	11	武威	343 523. 63	0. 14
2	哈尔滨	1 032 477. 81	0. 43	12	长沙	330 362. 34	0. 14
3	郑州	682 968. 38	0. 28	13	金昌	292 816. 66	0. 12
4	太原	617 157. 56	0. 26	14	西昌	288 847. 25	0. 12
5	成都	607 361. 19	0. 25	15	长春	287 111. 19	0. 12
6	兰州	534 746. 88	0. 22	16	西安	278 745. 31	0. 12
7	沈阳	488 454. 19	0. 20	17	嘉峪关	262 753. 00	0. 11
8	南充	463 831. 06	0. 19	18	张家口	261 347. 70	0. 11
9	大庆	444 205. 56	0. 19	19	鹰潭	259 666. 64	0. 11
10	武汉	393 360. 16	0. 16	20	齐齐哈尔	233 470. 19	0. 10

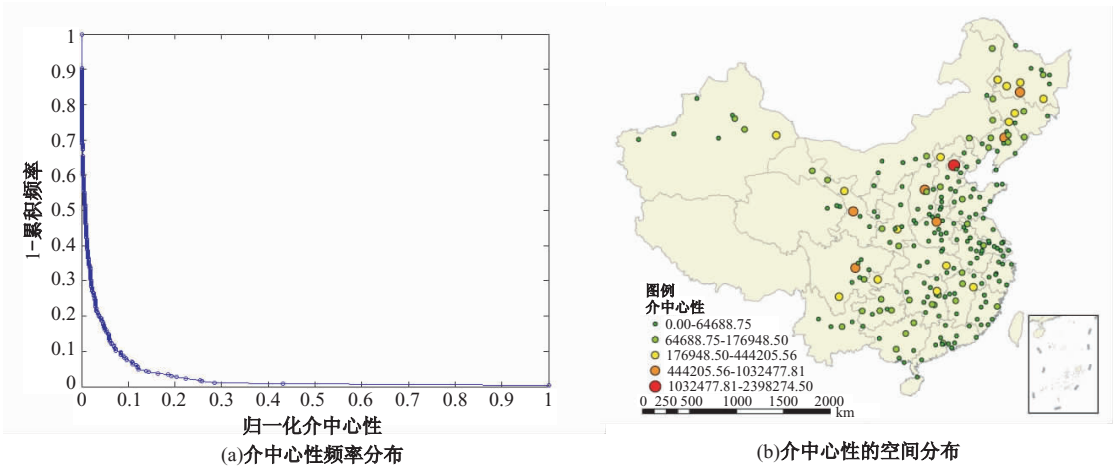


图 5 介中心性频率分布和空间分布

Fig. 5 The cumulative frequency distribution and spatial distribution of betweenness centrality

此外,介中心性的计算并未考虑城市的规模差异。如图 6 所示,如果不考虑城市规模,则城市 C 和 D 具有相同的介中心性,然而,由于城市 A 和 B 城市规模更大,它们之间的最短路径要经过 C,直觉上 C 应该比 D 更为重要。本研究的介中心性是基于全部 2752 个城市,这样在大量中小城市决定了介中心性的计算结果,这使得大庆、南充等偏离东部发达地区的城市拥有较高的介中心性。可以想象,如果采用城市规模对公式 3 进行加权,可以得到一个更为合理的介中心性计算结果。

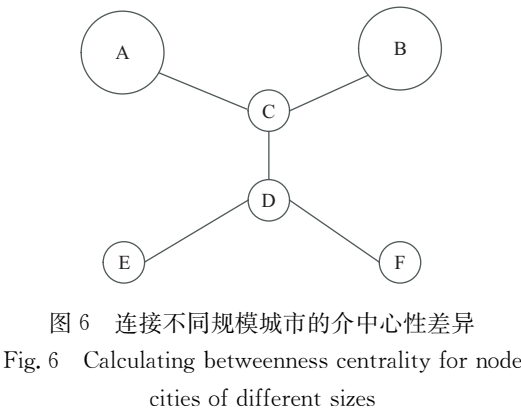


图 6 连接不同规模城市的介中心性差异

Fig. 6 Calculating betweenness centrality for node cities of different sizes

4 城市中心性的综合分析

现有研究认为,3 种网络中心性指标中度中心性反映了节点的局部重要性,邻近中心性反映了节点在整个网络中的位置,介中心性则反映了节点对于流量的控制<sup>[22]</sup>。以铁路运行网络得到的 3 种中心性指标,一定程度上验证了上述论断。此外,度中心性反映了一个区域局部的经济发展程度,在经济发达地区,尤其是都市连绵带(如长江三角洲以及珠江三角洲地区),列车开行频次较高,城市的度中心性也较高。邻近中心性分布则反映了网络的整体结构特征,可以看到,靠近网络中心位置的城市具有较高的邻近中心性,如郑州。此外,在铁路路网密度较高的区域,城市的邻近中心性也较高,如东北城市。最后,介中心性所反映的城市枢纽地位通常由城市的规模(如北京、郑州等),以及城市在网络拓扑结构中的位置(如嘉峪关)引起。

通过计算 3 种中心性指标(度中心性、邻近中心性、介中心性)之间的相关系数(Pearson Correlation Coefficient),我们发现它们之间的相关性较低,如图所示,其中,邻近中心性与介中心性的相关系数仅为 0.16。这个结果反映了不同的中心性评价指标衡量了城市在网络中作为节点的不同特点或功能:度中心性测算了与一个城市直接相连的城市个数,高的度中心性表明该城市很可能是局部中心;邻接中心性反映了一个城市到其他城市的便捷程度,高的邻接中心性表明该城市在网络中占有区位优势,很可能是全局的中心;介中心性衡量了一个城市作为中介或中转的能力,高的介中心性表明该城市是重要的枢纽城市,对连通其他城市之间有重要作用。在综合分析城市的中心性时,我们发现虽然上述 3 种中心性指标的相关度不高,但是有些城市,如北京和郑州,却在这 3 种指标的衡量中表现出了一致的优势,如图 7 所示。此外,还有一些城市在两种中心性指标中占有明显优势,却在另一个指标上值较低。例如:南京的度中心性和邻近中心性很高,但是介中心性却很低;哈尔滨的邻近中心性和介中心性很高,但度中心性却不具有优势。

由于城市 3 个中心性指标相关性较低,可以认为它们反映了城市不同侧面的特征,因此,本文利用 K-均值聚类<sup>[13]</sup>(组间联系、平方欧氏距离)方法,基于三种中心性指标,对城市进行了聚类。聚

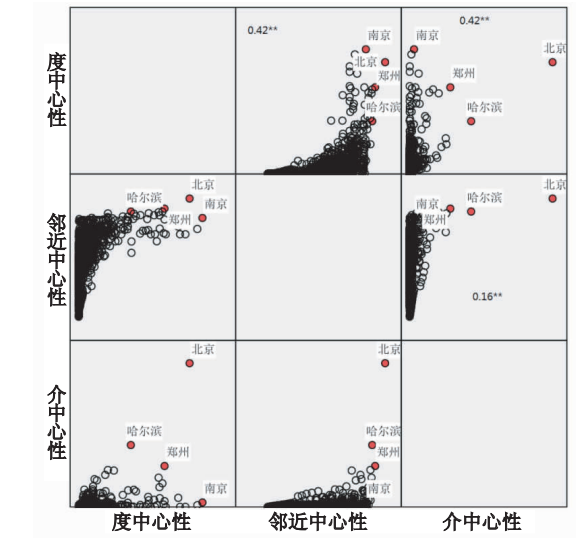


图 7 城市度中心性、邻近中心性及介中心性的关系(相关性显著性水平为 0.01)

Fig. 7 Correlation among degree centrality, closeness centrality and betweenness centrality

类结果(表 6)表明,铁路运营网络中的节点城市可以分为 4 类:第一类包含北京一个城市,其 3 种中心性指标的值均很高。第二类包括哈尔滨、郑州、武汉、兰州等 10 个城市,这些城市是传统的铁路枢纽城市和重要的区域经济中心,3 种中心性指标的排名基本都在前 20。第 3 类包括石家庄、济南、株洲等 82 个城市,这类城市中心性值分布不是很一致,通常存在某个中心性指标较高,而其余两个指标相对较低,如苏州的度中心性排名第六,但邻近中心性值和介中心性值排名均在 100 以后。第四类包含的城市数量最多,其中大多数城市处在铁路轨道的端点,其中,中心性的值相对于前 3 类比较低,如贵阳的介中心性值排名为 30,但度中心性和邻近中心性值分别排名 87 和 200。总体而言,基于中心性指标的分类,反映了我国城市的层次结构。

表 6 中心性 K-均值聚类统计表(部分)

Tab. 6 K-mean clustering result based on the three centrality measures (part)

类别	城市	节点城市数量
第一类	北京	1
第二类	哈尔滨、郑州、武汉、沈阳、成都、兰州、上海、广州、太原、长沙	10
第三类	济南、苏州、常州、太原、南昌、襄阳、株洲、合肥、蚌埠……	82
第四类	贵阳、拉萨、齐齐哈尔、攀枝花、柳州、桂林、遵义、喀什……	207

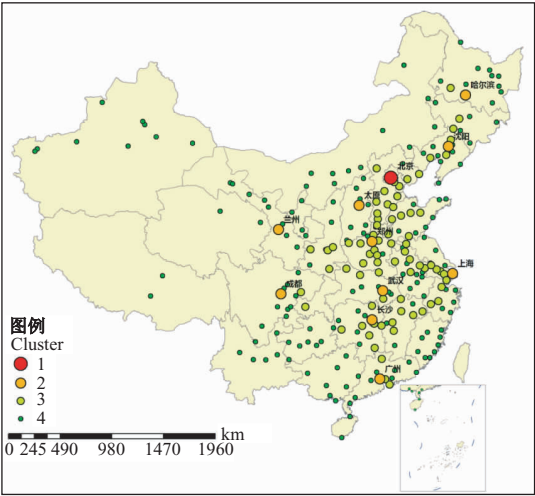


图 8 聚类分析结果地图

Fig. 8 Map of the classification analysis based on the three centrality measures

5 结语

本文重点探讨了城市在铁路运营网络中的中心性,利用不同的中心性指标,定量分析和描述铁路运营网络模型中各城市的重要性。本研究除印证了目前研究中对于 3 种中心性指标的论断外,还揭示了 3 种中心性的地理涵义。其中,度中心性衡量了与该城市直接相连的城市数目,很好地反映了城市在网络中的局部中心性,以及城市所在区域的经济发 展程度;邻近中心性考虑了铁路运营网络内的所有节点,一个邻近中心性较大的节点在铁路运营网络中的可达性往往较高,并位于网络的中心位置;介中心性从整个网络流的角度反映了节点的中介作用,通过计算该节点对其他所有节点之间联系的影响,评价了节点在网络运营流通过程中的重要性。我们的计算结果表明,在铁路运营网络中,度中心性高的城市的车次多,邻近中心性高的城市在区位上占有优势,而介中心性高的城市是整个网络的枢纽节点。基于铁路运行网络中心性指标的聚类分析,大致反映了我国城市的层次结构。但是值得指出的是,由于本研究基于列车运行网络开展,其反映的城市重要性也仅为铁路运输视角下的度量,例如,从图 8 可以看出,深圳市的各项中心性指标并不高,这与该市的经济规模并不相称。在未来研究中,我们拟结合航空、公路等运输网络得到的中心性指标,对城市进行更为全面的评判,此外,还将从时间角度,研究城市 3 种中心性的变化,进而

探讨这种变化与城市发展的关系。

参考文献:

[1] 金凤君,王姣娥. 20 世纪中国铁路网扩展及其空间通达性[J]. 地理学报, 2004, 59(2): 293 - 302.

[2] 金凤君. 我国航空客流网络发展及其地域系统研究[J]. 地理研究, 2001 (1): 31 - 39.

[3] 王法辉,金凤君,曾光. 中国航空客运网络的空间演化模式研究[J]. 地理科学, 2003(5): 519 - 525.

[4] 左广,李红昌. 铁路网络经济的定量研究[J]. 技术经济, 2003(12): 57 - 58.

[5] Wang J, Jin F, Mo H, Wang F, Spatiotemporal evolution of China's railway network in the 20th century: An accessibility approach [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2009, 43(8), 765 - 778.

[6] 钟业喜,陆玉麒. 基于铁路网络的中国城市等级体系与分布格局[J]. 地理研究, 2011(5): 785 - 794.

[7] 陈超,郑鸯鸯. 基于铁路网络的区域旅游资源开发效应研究进展[J]. 科技和产业, 2011(6): 1 - 5.

[8] Li W, Cai X. Empirical analysis of a scale-free railway network in China[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2007, 382(2): 693 - 703.

[9] 荣莉莉,郭天柱,王建伟. 复杂网络节点中心性[J]. 上海理工大学学报, 2008,30(3): 227 - 230.

[10] Crucitti P, Latora V, Porta S. Centrality in networks of urban streets [J]. Chaos, 2006, 16(1): 1 - 9.

[11] Porta S, Crucitti P, Latora V. The network analysis of urban streets: A primal approach [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2005, 33(5): 705 - 725.

[12] Wang F, Antipova A, Porta S. Street centrality and land use intensity in Baton Rouge, Louisiana[J]. Journal of Transport Geography, 2010, 19(2): 285 - 293.

[13] Porta S, Strano E, Iacoviello V, et al. Street centrality and densities of retail and services in Bologna, Italy [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2009, 36: 450 - 465.

[14] Wang J, Mo H, Wang F, Jin F. Exploring the network structure and nodal centrality of China's air transport network: A complex network approach [J]. Journal of Transport Geography, 2011, 19, 712 - 721.

[15] 毕晓莹,陈学武,李子木. 基于 L 空间改进的城市快速公交网络特性研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011(5): 173 - 180.

[16] Chen Y, Li N, He D. A study on some urban bus transport networks [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2007, 376: 747 - 754.



- [17] Xu X, Hu J, Liu F *et al.* Scaling and correlations in three bus-transport networks of China[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2007, 374(1): 441 – 448.
- [18] Newman M. Analysis of weighted networks[J]. *Physical Review E*. 2004, 70(5).
- [19] 刘军. 整体网分析讲义[M]. 格致出版社, 2009.
- [20] Borgatti S. Centrality and network flow[J]. *Social Networks*. 2005, 27(1): 55 – 71.
- [21] 常树春, 张启义, 王文涛. 交通网络的中心性分析[J]. *军事交通学院学报*, 2011, 13(1): 4 – 7.
- [22] 徐源, 周松. 中国高速铁路的发展[J]. *才智*, 2010(23): 220.
- [23] 莫辉辉, 金凤君, 刘毅, 等. 机场体系中心性的网络分析方法与实证[J]. *地理科学*, 2010, 30(2), 204 – 212.

## Measuring City Centralities Based on the Train Network of China

ZHONG Ke<sup>1</sup>, XIAO Yu<sup>1</sup>, XU Jun<sup>2</sup>, MA Fuguang<sup>1</sup>, LIU Yu<sup>1</sup> and WU Lun<sup>1</sup>

(1. *Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, Beijing 100871, China;*

*2. 75719 Troops, Wuhan 430074, China;*

*3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)*

**Abstract:** Using centrality measures, in this research we analyzed the cities statuses in China's railway network. First, according to the L space model we built the railway network based on a train schedule. Second, different centrality measures, including degree centrality, closeness centrality and betweenness centrality, were adopted to evaluate the cities in the railway network. Finally, we investigated the patterns of different centrality measures in the network to reveal the relationship between the structure of train network and urban development.

**Key words:** China train network; degree centrality; closeness centrality; betweenness centrality