

# 基于二分网络的北京公交线路布局的空间依赖性

段德忠<sup>1,2</sup>, 刘承良<sup>1,2</sup>, 杜德斌<sup>1,2</sup>, 桂钦昌<sup>1</sup>

(1. 华东师范大学城市与区域科学学院, 上海 200062;

2. 华东师范大学科技创新与发展战略研究中心, 上海 200062)

**摘要:** 公交网络运行系统的结构性缺陷常常致使其成为城市交通拥堵的罪魁祸首。传统公交网络空间研究皆将其视为一个独立的交通运输方式, 忽视了城市道路网形态与结构的内生作用。本文基于二分网络的思想, 通过构建公交线路—城市道路的空间依赖矩阵, 引入系列空间依赖度测度指标从局域、全局两个尺度探讨了北京市的公交线路的空间依赖度及依赖的核心空间, 并通过社团识别对北京市公交线路的依赖空间进行了划分。结果发现: ① 局域依赖度方面, 北京市公交线路布局高度依赖少数城市主干道和城—郊区快速干道, 其空间依赖格局形成了以市中心为核心, 以城—郊区快速干道为通道的中心—外围的廊道扩散格局; ② 全局依赖度方面, 北京市公交线路空间布局结构失衡, 比较脆弱, 受城市道路路面路况影响较大, 同时以四环为模糊边界的市中心区域成为北京市公交线路依赖的核心空间; ③ 依赖空间划分上, 北京市公交线路布局与城市地域空间呈现良好的对应性, 朝阳、海淀、三环内(东城和西城)是公交线路布局规模最密的3个区域。

**关键词:** 公交线路; 城市道路; 空间依赖; 二分网络; 北京市

DOI: 10.11821/dlxb201612009

## 1 引言

改革开放以来, 伴随着人口的迅速增长和空间的高度集聚, 超大型城市和城市群的生长是中国快速城市化过程中凸显的重要空间特征之一, 其以空间的高度集中, 大大的提高了资金、信息流动的效率, 加速了经济要素的周转, 刺激了财富的创造, 但在城市高速发展的背后也面临着诸多严峻挑战, 如两极分化明显、环境污染严重、道路交通拥挤、治安管理落后、服务设施缺乏等一系列“城市病”, 尤其是道路交通拥堵, 已经成为中国快速城市化过程中“城市病”的一大毒瘤。在一系列措施当中, “公交先行”或“公交优化”被广泛认为是解决城市交通拥堵的“良方”, “公交都市”也一度成为诸如上海、北京、武汉这些中国巨型城市“解决交通拥堵, 改善城市形象”的奋斗目标。然而, 公交网络运行系统的结构性缺陷常常致使其成为城市交通拥堵的罪魁祸首。诸多研究认为城市交通最根本、最致命的问题, 就是公共交通网络布局不合理, 从而无法为市民的出行提供便利。当然, 这里包括两个现实问题: 一是编制公交发展规划时缺乏对城市社会公交出行需求、公交网络的生长规律以及城市道路网的供给能力的整体把控, 从而导致公交网络规划的编制出现误判; 二是受财政支出影响, 公交网络系统更新缓慢, 致使公

收稿日期: 2015-12-01; 修订日期: 2016-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571123) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41571123]

作者简介: 段德忠(1989-), 男, 博士生, 中国地理学会会员(S110010030M), 主要从事创新地理与交通地理研究。

E-mail: dezong\_tuan@163.com

通讯作者: 刘承良(1979-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 中国地理学会会员(S110009837M), 主要从事交通地理复杂性研究。E-mail: chenglianglew@163.com

交车辆老化严重,舒适度欠佳,因此市民更愿意购买私家车出行。

综观当前公交网络空间研究发现,纯粹的公交网络空间分布研究比较少见,多源自于公共交通规划,采用线路长度、非直线系数、站点平均站距、线路网密度和站点覆盖率等空间分布指标来探讨城市公交网络的发展状况<sup>[1]</sup>。而较为常见的公交网络空间布局研究则往往被分解后从多个侧面去探讨,如公交网络可达性的空间分异<sup>[2-4]</sup>、公交网络的服务质量及均等性<sup>[5-8]</sup>、公交网络空间结构复杂性<sup>[9-12]</sup>、公交网络运行效率与规划政策<sup>[13-15]</sup>以及公交出行行为<sup>[16-19]</sup>等。就是服务于交通规划的城市公交网络空间布局研究也多从空间匹配的视角(公交出行需求和公共交通供给),以期能够填补公共交通服务的“塌陷地”,从而实现基本公共服务均等化。从产品生产的角度来看,城市公共交通系统就如同生产线,以出行服务作为其产品销售给城市居民;城市居民就如同需求方,决定着城市公共交通系统生产量的最小阈值,即生产多少产品才能满足居民出行需求。那么对于一个城市而言,其能够拥有的这种生产“出行服务”的生产线(城市公交系统)的数量是一定的,那是什么决定着其最大阈值?当然,这跟一座城市所处的发展阶段和发展程度有关。众所周知,城市公交系统与其他交通方式(如地铁、高速、航空和铁路网络等)不同,其运行没有自己特有的轨道,必须依赖于城市道路,与其他行走在城市道路的交通载体抢占空间资源。那么,城市道路网络的形态、结构与等级就直接决定公交线网的分布与发展。因此,可以将城市道路看作是城市公交系统发展的供给商,其发展的程度决定着城市公共交通发展的最大阈值,即一条街道所能承载的公交线路是有限的。

那么,一条城市道路所能容纳公交线路的极限是多少?当前公交线路的空间布局对城市道路的依赖程度是未达到还是已经超过阈值?公交线路的空间分布是高度依赖少数城市道路还是均匀散布?公交线路所依赖的空间是不是城市的核心主体空间?这些问题的解答需要多学科交融、多方法的交叉以及大量学者的参与。本文通过构建公交线路—城市道路空间连接矩阵,引入二分网络统计特征量(度、介数以及紧密度),尝试从局域依赖度、全局依赖度以及依赖空间划分三个方面建构公交线路对城市道路的依赖程度评价体系,并以北京市为例,详细探讨了北京市公交线路对城市道路的依赖度以及依赖的核心空间,以期能够回答当前北京市公交网络的布局对城市道路的依赖程度这一问题。

## 2 研究方法

### 2.1 公交线路—城市道路二分网络构建

复杂网络模型的确立依赖于网络邻接矩阵的构建。对于公交网络而言,传统意义上的网络构建方法(原始法, primal approach)通常是将公交站点视为节点,站点间的公交联系抽象为边,从而构建复杂公交站点连接模型研究公交网络的拓扑连接性。相较于原始法研究网络的显性特征,对偶法(dual approach)则强调网络的隐性特征,其将公交线路抽象为节点,将公交站点间的联系抽象为边,因此在对偶法下,城市公交网络即可抽象为城市公交换乘网络,研究的是城市公交换乘的便利性,而不考虑实际通达距离和乘坐时间。关于如何识别或构建节点间的联系,较为流行的有两种方法:一种是L-space模型,其仅识别网络中节点间的直接联系;另一种是P-space模型,是Sen等在研究印度铁路网络小世界性时提出了一种新抽象法则<sup>[20]</sup>。该法则认为,如果网络中任意两个点可通过一次联系连接在一起,那么则认为这两点相连。因此,P空间模型中,每个节点的节点度 $k$ 和节点间的距离具有明确的物理意义,即节点度代表从该站点不需换乘公

交线路所能到达的公交站点数, 节点间的距离可解释从一个站点到达另一个站点所需乘坐的公交线路数目<sup>[10]</sup>。

然而无论是原始法还是对偶法、L-space 还是 P-space 模型, 都存在一个假定的前提, 即将公交网络视为一个独立的交通运输方式, 忽视了城市道路网形态与结构的内生作用。城市公交网络作为行走在城市道路网络之上的一个交通网络, 实际上是城市道路网络派生出的一个子网, 城市公交网络与城市道路网络属于子母隶属关系。因此, 从整体上看, 城市公交线路与城市道路的空间依赖网络在网络类型上属于典型的二分网络。鉴于此, 本文从空间关联与空间依赖的视角建构了公交线路—城市道路二分网络, 思路如下(图1):

(1) 空间数据提取: ① 公交线路数据。使用百度地图 API, 借助 Silverlight 与 html 内容的交互功能, 编写 Silverlight 应用从百度地图 Javascript 信息中获取北京市公交网络 Json 信息。基于 ArcGIS 中的 Python 脚本, 将北京市公交网络 Json 数据生成 FeatureClass。由于百度 API 中得到的地理数据是经纬度坐标, 因此需要利用 ArcGIS 中 Project 工具投影到 WGS 1984 Web Mercator 坐标, 从而得到北京市公交线路分布空间数据库, 共包含 1348 条公交线路(提取时间为 2015 年 7 月 25 日); ② 城市道路数据。基于 ArcGIS 平台, 调用 arcgisonline 中国地图数据库作为底图<sup>①</sup>, 同时参照百度地图矢量而成(矢量时间为 2015 年 8 月), 由于本文仅识别有公交线路经过的城市道路<sup>②</sup>, 因此最后的城市道路数量为 2407 条(图1)。

(2) 抽象独立点集: 基于对偶法的抽象思维, 将北京市城市公交线路抽象(按线路名称)为节点  $b$ , 因此城市公交线路网可抽象为集合  $B(b_1, b_2, b_3, b_4, \dots, b_i, \dots, b_{1348})$ ; 将有公交线路经过的城市道路抽象(按街道名称)为节点  $s$ , 则城市道路网即可抽象为集合  $S(s_1, s_2, s_3, s_4, \dots, s_j, \dots, s_{2407})$ ;

(3) 抽象公共边集: 观察每条公交线路行经的城市道路名称, 构建公交线路—城市道路  $(b, s)$  连接矩阵(0~1 矩阵, 即公交线路经过某条城市道路, 即视为该公交线路与该道路的连接, 赋予属性值为 1, 反之则为 0), 最后总计获得 15027 条边(图2)。

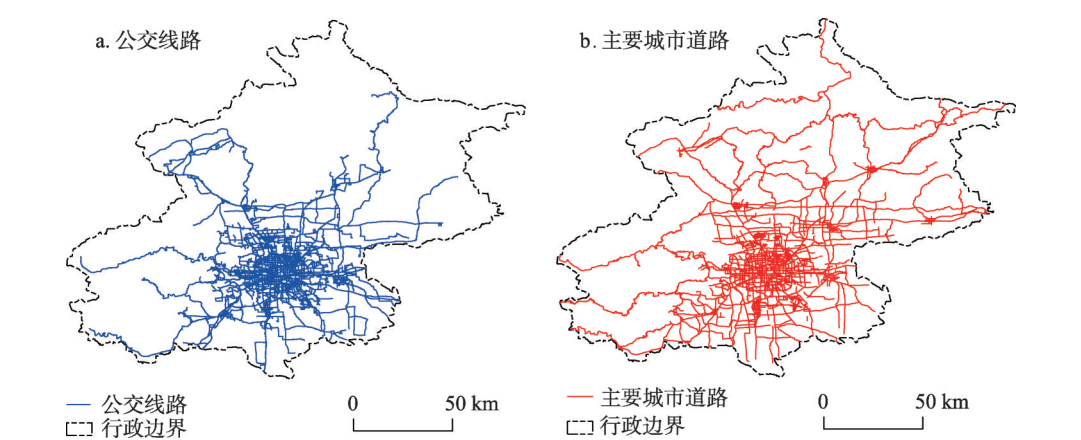


图1 北京市公交线路和主要城市道路  
Fig. 1 Beijing's bus-lines and main city roads

① 服务器调用端口: <http://cache1.arcgisonline.cn/ArcGIS/services>  
② 本文之所以不采用公交站点的数据来研究空间依赖性, 是因为公交线路经过城市道路时, 不一定会设置一个公交站点, 不能因为没有设置公交站点就认为这条公交线路没有占用这条城市街道的空间资源, 因此本文采用“是否经过”这一个判定方法来采取城市街道样本。

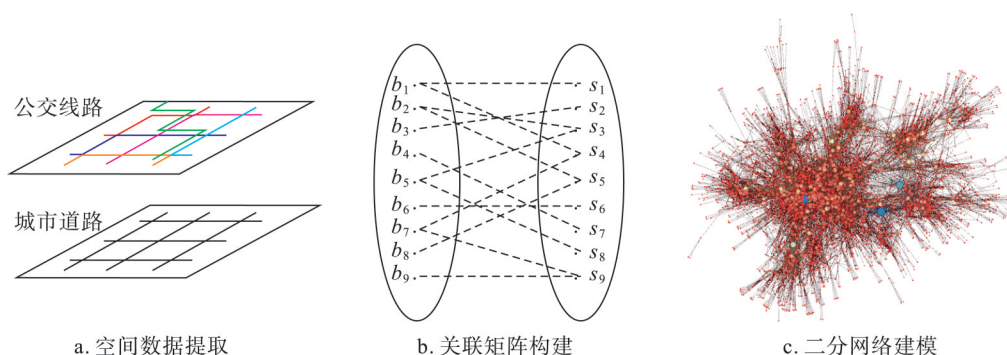


图2 公交线路—城市道路空间关联矩阵及二分网络构建示意图  
Fig. 2 Sketch of space correlation matrix and the bipartite network of bus-line and city road

## 2.2 空间依赖度的测度指标

**2.2.1 度中心性下的局域依赖度** 度中心性是描述节点在网络中地位的最直接的指标。在1-模网络(1-mode network)中,节点度被定义为与其直接连接的节点数目,或以其为中心发散出去的边数。而在公交线路—城市道路二分网络中,城市道路节点 $s_j$ 的度中心性则是以与其连接的公交线路节点数量来测度,公交线路节点 $b_i$ 的度中心性则关注的是与其连接的城市道路节点数量。那么在公交线路—城市道路的连接矩阵中,城市道路节点 $s_j$ 的度中心性就是其对应这一行中值等于1的个数( $N_{ji,x_j=1}^{BS}$ );公交线路节点 $b_i$ 的度中心性就是其对应这一列中值等于1的个数( $N_{ij,x_i=1}^{BS}$ )。

$$C_D^{BS}(s_j) = \sum_{j=1}^{x+y} N_{ji,x_j=1}^{BS} \quad (1)$$

$$C_D^{BS}(b_i) = \sum_{i=1}^{x+y} N_{ij,x_i=1}^{BS} \quad (2)$$

由此看来,如果城市道路节点 $s_j$ 的度中心性值越大,就说明经过其的公交线路就越多;如果公交线路节点 $b_i$ 的度中心性值越大,则说明其经过的城市道路数量就越多。由于度中心性指标考察的是邻里关系,属于局域空间的范畴。因此,其描述的是公交线路的局部空间依赖性。

## 2.2.2 介数中心性和紧密度中心性下的全局依赖度

### (1) 介数中心性

在1-模网络中,节点介数中心性描述的是该节点居于网络中心的程度。而在公交线路—城市道路二分网络中,由于每两个公交线路节点之间的联络都要通过与其相连的城市道路节点来完成,所以城市道路节点总是处于公交线路节点之间的捷径上。同理,每两个城市道路节点之间的联络都要通过公交线路节点来完成,公交线路节点也因而总处于城市道路节点之间的捷径上。

当计算一个城市道路节点 $s_j$ 的介数中心性的时候,需要分3个方面探讨:① 如果仅有一个公交站点与其相连,那么就意味来自 $s_j$ 的所有最短路径都经过该公交节点。在公交线路—城市道路二分网络中,由于存在 $x+y$ 个节点,对于这个不与其他公交节点连接的城市道路节点 $s_j$ 来说,与其连接的这个公交站点将至少得到 $x+y-2$ 个成为介数点的机会;② 如果该城市道路节点是给定一对公交线路节点( $b_i, b_q$ )之间唯一经过的城市道路节点,那么该城市道路节点的介数中心性就增加1个单位;③ 如果该城市道路节点仅是

给定一对公交线路节点  $(b_i, b_q)$  之间经过的城市道路节点的其中一个 (共  $n$  个), 那么该城市道路节点的介数中心性就增加  $1/n$  个单位。因此, 经过城市道路节点  $s_j$  的最短路径数可表达为:

$$N_{b_i \rightarrow b_q}^{s_j} = \frac{1}{2} \sum_{b_i, b_q \in s_j} \frac{1}{n} \quad (3)$$

同理, 公交线路节点  $b_i$  的介数中心性也可按上述3个方面进行计算。不难发现, 在公交线路—城市道路二分网络中, 城市道路节点介数反映的是公交换乘流的负载能力, 其值越大越说明公交网络的全局运行对其越依赖; 公交线路节点介数反映的是城市道路的空间连接能力, 其值越大越说明城市内部空间之间的连接对其越依赖, 进而突出该条公交线路所占据的城市 (街道) 空间就越重要。

## (2) 紧密度中心性

在1-模网络中, 节点紧密度中心性被定义为该节点到其他节点的距离之和的倒数。描述的是节点相互连接的难易程度, 以及节点对其他节点的影响力, 是度量节点在网络中的拓扑通达性的重要指标。而在公交线路—城市道路二分网络中, 公交线路节点仅仅与城市道路节点有关联, 所有从公交线路节点出发的路径必然首先要经过与该节点相连的城市道路节点, 同样, 由于城市道路节点也仅仅与公交线路节点有关联, 那么, 所有从城市道路发出的路径也必然首先经过与该节点相邻的公交线路节点。

因此, 本文在 Faust<sup>[21]</sup>的隶属网络紧密度中心性模型的基础上, 将公交线路节点  $b_i$  的紧密度中心性定义为该节点相邻的城市道路节点到其他公交线路节点和城市道路节点最短距离的一个函数, 即:

$$C_c^{BS}(b_i) = \left[ 1 + \frac{\sum_{a=1}^{x+y} \min_k d(k, a)}{x+y-1} \right]^{-1} \quad (4)$$

式中:  $x$ 、 $y$  分别为公交线路节点总数和城市道路节点总数;  $k$  为与公交线路节点  $b_i$  相邻的城市道路节点数。

同理, 城市道路节点  $s_j$  的紧密度中心性也可定义为与该节点相邻的公交线路节点到其他公交线路节点和城市道路节点最短距离的一个函数, 为

$$C_c^{BS}(s_j) = \left[ 1 + \frac{\sum_{t=1}^{x+y} \min_t d(z, t)}{x+y-1} \right]^{-1} \quad (5)$$

式中:  $z$  为与城市道路节点  $s_j$  相邻的公交线路节点。从介数中心性与紧密度中心性的定义和计算公式皆可看出, 这两个指标考察的是节点在全局网络的地位, 其关系通过邻里遍历全局。因此, 这两个指标描述的是公交线网全局空间依赖性。

**2.2.3 依赖空间划分——社团发现** 在复杂网络中, “社团”是内部联系紧密、与外界联系稀疏的子组织结构。随着大量现实网络被证明存在社区结构, 网络的社区结构发现已经引起了大批学者的广泛, 而且无论是1-模网络, 还是二分网络, 其社团划分的方法都在不断的学术争鸣中得到持续更新<sup>[22-25]</sup>。

基于社团发现的公交线路布局空间的划分是从全局依赖的角度透析局域依赖的一个测度指标。在社团发现算法上, 本文并没有做进一步的探讨, 因为已有的二分网络社团发现算法完全能够分析公交线路—城市道路这一二分网络的社团性质。本文所采用的社团发现算法是基于 Barber 二分网络模块度的社团凝聚算法 (Modularity Agglomerative algorithm of Bipartite networks, MAB), 具体计算方法可见参考文献[26], 在此不再赘述。

### 3 北京市公交网络布局的空间依赖性

#### 3.1 局部依赖性——高度依赖于城市主干道

北京市整个城市道路网节点的平均度为6.24,其中度最大的城市道路节点为三环路(105),即经过三环路的公交线路有105条。从城市道路节点度位序—规模分布及累积分布曲线来看(图3a、3b),皆呈现出明显的“长尾”特征,这意味着只有极少数的城市道路节点的度较大,而绝大部分节点的度都较小且相近,体现了公交线路对城市道路空间依赖的层次性和无标度特性。为更加清晰的从空间上透析公交线路分布的依赖性特征,本文选取度值前1000的城市道路进行空间分异与空间密度分析(图4),发现:①北京市公交线路的空间分布高度依赖于少数城市主干道,其中极值城市道路主要为以二环和三环为代表的市中心主干道和以京密路、G6辅路、京开路、顺平路、京昆路、顺沙路、建国路等为代表的城郊连接干道,高度值城市道路主要是以二环、三环为起始,连接四环、五环的城市主干道,如莲花池路、莲花池东路、朝阳北路、西外大街、复兴路、阜成路等,这些极值和高值城市道路在北京市公交运行的空间管控上起着至关重要的作用;②北京市公交线路的空间依赖格局呈现出以市中心(以三环为中心、以二环和四环为缓冲边界的区域)为核心,以城郊连接快速路为辐射通道的中心—外围的廊道扩散格局;③通州城区、大兴城区顺义城区以及昌平城区因其内部公交运营基本自成一体,已俨然成为北京市公交线路空间分布的次中心区域。

相较于城市道路节点度分布的“长尾”特征,公交线路节点度分布则呈现另一般的景象。整个公交线路节点的平均度为11.14,其中度值最大的节点为运通115路,为42,即该条公交线路运行需经过42条城市道路。从公交线路节点度位序—规模分布及累积分布曲线来看(图3c、3d),皆呈明显的“S”型特征,指数拟合较优,说明公交线路运行所经过的城市道路数量基本固定在一个区间之内,绝大值区间和绝小值区间内的节点数量皆较少,体现了公交线路运行布局的均衡性特征。从公交线路节点度统计来看,度值超过30的公交线路节点仅有5个(分别是运通115路、959路、621路、特11路和运通101路),度值超过20的节点也只有113个,仅占到总数的8.38%;同时,节点度值低于5的节点也只有151个,仅占到总数的11.19%。由此可见,绝大部分的公交线路节点的度值介于5~20之间,其中节点度值大于5小于16的节点更是多达992个。另外,统计度值前15的公交线路发现,这些公交线路多为远距离跨城区运营线路,平均运营线路长达37.7 km,其中运营公里数最长的公交线路为983路(连接朝阳区与通州区的公交线路、途经石景山区、海淀区和朝阳区),长达65.3 km。

#### 3.2 全局依赖度

**3.2.1 介数中心性——空间布局结构失衡,比较脆弱** 整个城市道路节点的介数中心性平均数为0.0008,其中值为0的城市道路节点多达1906个,介数值大于0.02的城市道路节点仅有10个,突出反映公交线路—城市道路二分网络的交通流多集中于少数几个城市道路节点上。从图5可以看出,高介数城市道路主要由三环路、二环路以及另外几条城郊快速干道(京密路、G6辅路、京开路、建国路等)组成,一方面说明这些高等级城市道路在整个网络中承担着较大的流量,另一方面也意味着流量过度集中也使得北京市公交线路空间布局的结构失衡,显得比较脆弱,一旦这些高介数的城市道路路面发生拥堵,那么公交网络的空间运行将面临极大的威胁。另外从城市道路介数空间密度分异来看,北京市公交网络对城市道路的全局依赖度呈现出中心空心化现象,并形成以三环为主干的环带极值区和以G6辅路、京密路和京开路为依托的三条极值扩散带。由此可见,北京

市三环路无论是在城区公交线路运行的流量负载上, 还是在城—郊公交线路运行的流量负载上都起到了不可替代的“顶梁柱”作用; 而G6辅路、京密路和京开路这三条城郊快速连接干道则在城—郊公交线路和郊—郊公交线路的中转运行上发挥着重要作用。

公交线路节点的介数中心性平均数为0.002, 与城市道路节点不同, 大多数公交线路

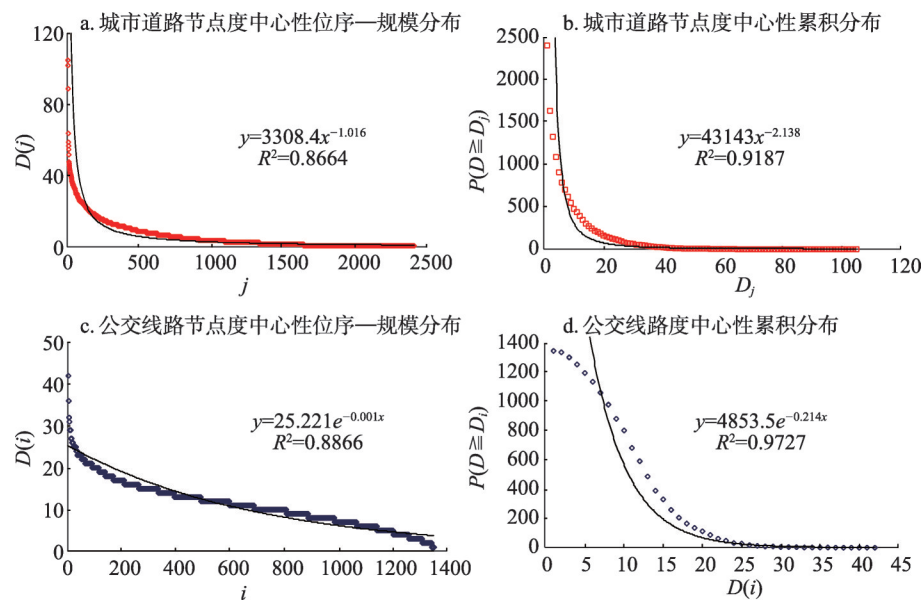


图3 北京市公交线路—城市道路二分网络节点度的位序规模及累积分布

Fig. 3 Degree centrality in the bipartite graph of bus lines and city roads in Beijing

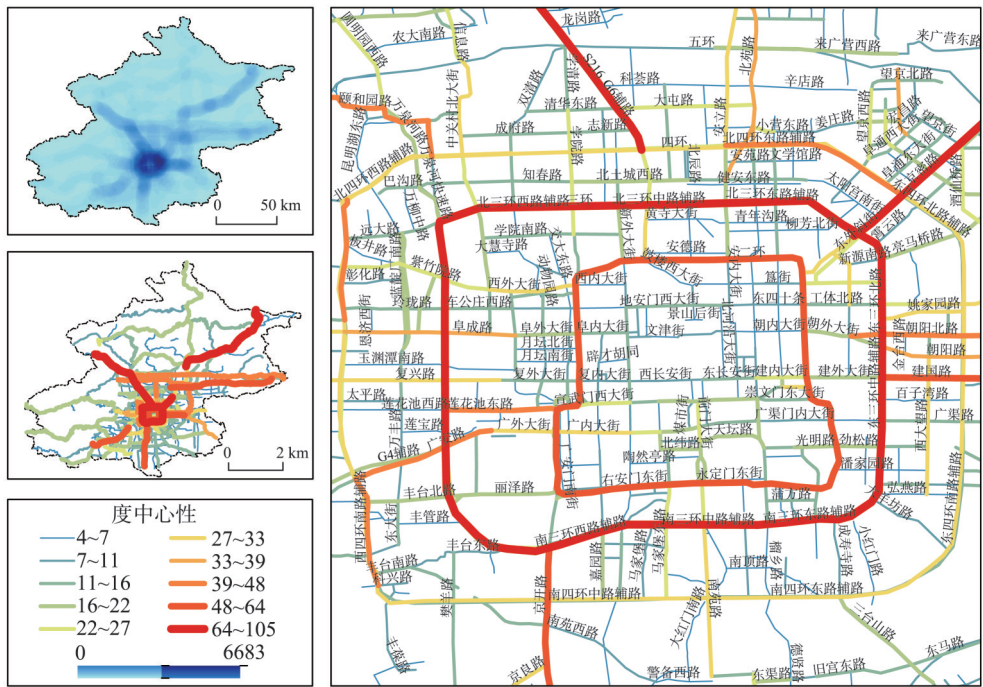


图4 北京市城市道路节点度中心性前1000强空间分异

Fig. 4 Spatial density and differentiation of the top 1000 city roads degree centrality in Beijing

节点的介数值大于0, 达到973个, 占到总数的72.13%, 其中介数最大的公交线路为运通101路(0.029), 运营线路长达48.5 km(往返于门头沟区与朝阳区, 途经石景山区、海淀区、西城区和东城区)。从公交线路节点介数位序—规模分布曲线来看(去除介数为0的公交线路节点), 基本服从幂律分布, 表明只有极少数的几条公交线路在公交线路—城市道路这一二分网络中, 尤其在城市道路之间的隐性连接上扮演着关键的中介角色。

**3.2.2 紧密度中心性——高度依赖于以四环为边界的城市核心空间** 在公交线路—城市道路二分网络中, 城市道路节点紧密度的平均值为0.304, 其中紧密度值最大的节点为三环路(0.466), 紧密度值最小的节点为斋马路(0.197)。整体来看, 城市道路节点紧密度的变异系数为0.219, 远远小于度值(8.492)和介数值(5.209)的变异系数, 一定程度上表明城市道路节点紧密度分布相对较均衡, 离散程度较小。与节点度分布和介数分布特征不同, 城市道路节点紧密度位序—规模分布及累积分布曲线皆呈现良好的指数拟合(图6a、6b), 说明绝大多数城市道路节点的紧密度位于平均数附近, 只有极少数的节点紧密度值较高或较低。事实上从统计来看, 紧密度值超过0.4的城市道路数量仅有10个, 低于0.2的更是只有3个, 而介于0.25至0.35的城市道路数量则达到2050个。

由于紧密度反映的是节点在网络中的拓扑通达能力, 那么城市中的主干道的紧密度理应较高, 这一论断在公交线路—城市道路这一二分网络中同样适用。从图7和表1可知: ①北京市大部分市区主干道以及城—郊快速干道的紧密度值都较高, 其中二环路、三环路、四环路以及京密路、京开路、G6辅路等道路属于全城连接性质道路, 其紧密度也是位居网络的第一层次, 而那些连接二环至三环、四环的东—西向和南—北向主干道的紧密度也自然较高, 其通达能力也位于网络的第二层次, 如东—西向的阜成路、阜石路、莲花池东路、建内大街、广内大街、东直门外大街等, 南—北向的西土城路、学院

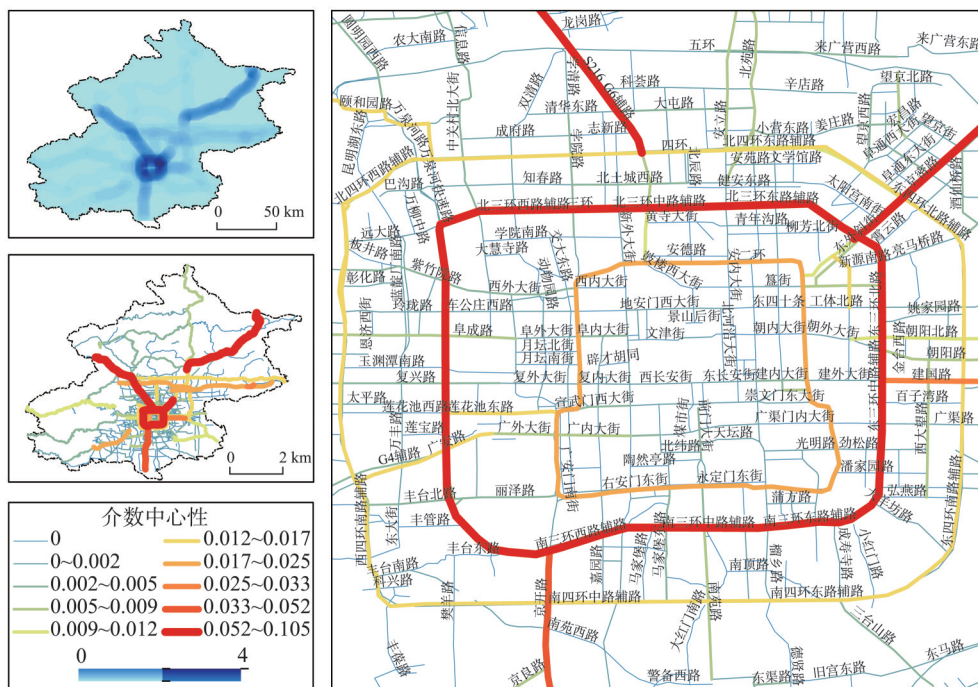


图5 北京市城市道路节点介数中心性前1000强空间分异

Fig. 5 Spatial density and differentiation of the top 1000 city roads betweenness centrality in Beijing

路、前门大街、永外大街、马家堡东路、惠新东街等；② 高紧密度的城市道路高度集聚在以四环为模糊边界的市中心区域，表明北京市公交线路的空间布局高度依赖于以四环为边界的城市核心空间；③ 值得注意的是，在五环之外的亦庄片区、大兴城区、通州城

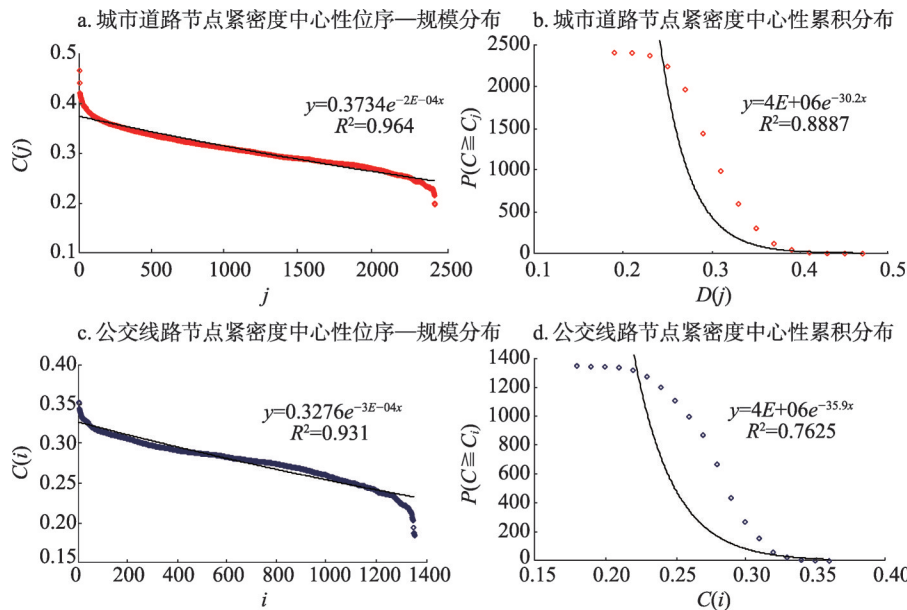


图6 北京市公交线路—城市道路二分网络节点紧密度中心性的位序规模及累积分布  
Fig. 6 Closeness centrality in the bipartite graph of bus lines and city roads in Beijing

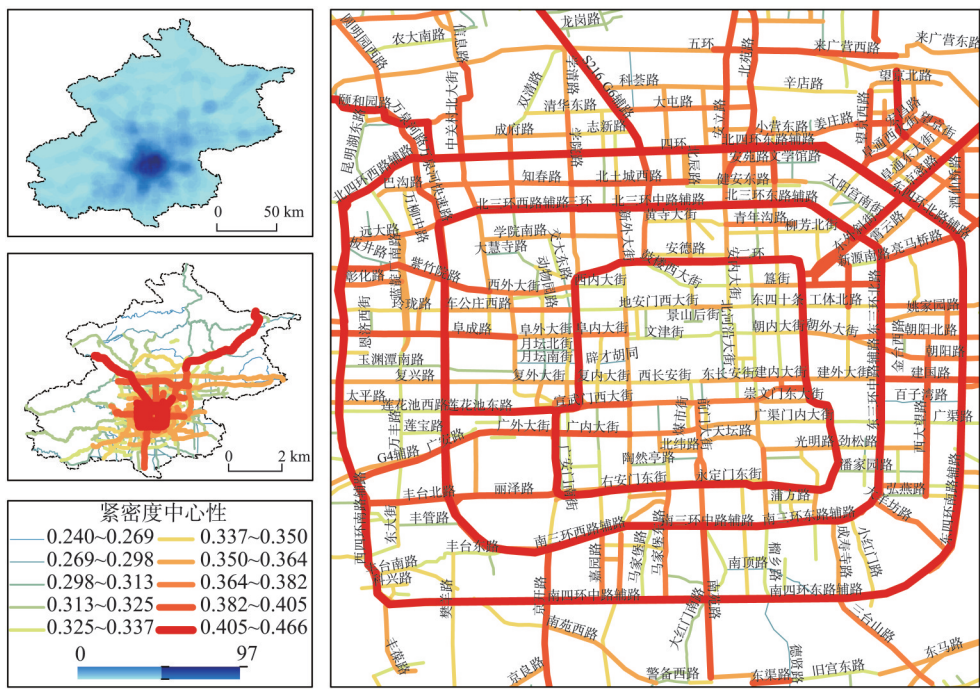


图7 北京市城市道路节点紧密度中心性前1000强空间分异  
Fig. 7 Spatial density and differentiation of the top 1000 city roads closeness centrality in Beijing

区、顺义城区以及昌平城区都行形成了相对独立的公交线路布局的依赖空间，一方面验证了区域性的主干道依然是公交线路布局较为依赖的空间，另一方面也说明了北京市几条环路以及城郊连接干道在实现区际通达性起到了很好的衔接作用。

公交线路节点的紧密度平均数为 0.278，其中紧密度值最大的公交线路节点为运通 101 线，为 0.353。紧密度值最小的公交线路节点为通 16 路，值为 0.185。整体上，公交线路节点紧密度的变异系数（0.010）与城市道路一样，皆远远小于其度值（0.500）和介数值（0.316），说明公交线路节点紧密度相对差异较小，统计分布趋于均衡。与度和介数类似，公交线路节点紧密度位序—规模分布和累积分布曲线指数拟合较优，一定程度上表明，公交线路的空间布局在趋于科学合理的规划指导下越来越均衡，当然，这种均衡是在空间单元连接数量上的均衡，即每条公交线路经过的城市道路的数量是近似的，这可以从节点度分布上得到验证。另外，公交线路的空间布局必然是为了提高人流的便利性，其始发站点、途经站点以及目的地站点必然是人流量较大的居住区、商业区或就业区，而连接这些不同性质空间单元的城市道路，尤其是高等级城市道路是固定的，那么就必然导致公交线路节点紧密度的趋同性，这一点也可用“平均路径长度”这一个指标来反映。通过计算，本文所建构的公交线路—城市道路这一二分网络的平均路径长度为 5.29，也就是意味着整个网络中，任意两个节点之间平均只需 5.29 次的连接就能实现通达，显然这是一个小世界网络。

3.3 依赖空间划分——与城市地域空间具有良好对应性

根据 Barber 二分网络模块度的社团凝聚算法将北京市公交线路—城市道路这一二分网络划分为 14 个社团（表 1）。模块度值为 0.695，划分结果比较满意。整体社团的平均规模（包含节点个数）为 268，如果将高于 300 的定义为大社团，低于 200 的定义为小社团，介于二者之间的定义为中社团，发现这 14 个社团中大社团和小社团皆为 4 个，中社团为 6 个，说明那么北京市公交线路布局所依赖的这 14 个社团的规模分布近似泊松正态分布。另外，从社团的位序—规模分布曲线来看，指数拟合较优，拟合方程为： $y =$

表 1 北京市公交线路依赖空间的社团划分  
Tab. 1 Community detection for the bipartite network in Beijing

社团	社团规模			度中心性	
	节点数总数	城市道路数	公交线路数	城市道路节点度平均	公交线路节点度平均
朝阳	462	283	179	6.763	12.117
海淀	430	253	177	7.941	10.808
三环内(东城—西城)	404	254	150	7.272	12.193
大兴	302	229	73	4.323	14.192
昌平—延庆	291	182	109	5.049	8.431
通州	263	158	105	6.418	8.562
亦庄	259	181	78	5.790	13.667
顺义	246	170	76	5.806	12.697
门头沟—石景山	246	163	83	5.690	10.875
房山	233	145	88	7.972	11.841
密云	165	104	61	6.212	10.738
怀柔	156	91	65	6.582	9.569
丰台	156	101	55	6.257	10.164
平谷	142	98	44	3.745	9.000

$489.84e^{-0.089x}$  ( $R^2 = 0.9521$ ), 验证了社团规模的趋中(值)分布特征。但值得注意的是, 社团间的规模差异较大, 变异系数达到0.370。其中规模最大组团包含462个节点, 规模最小社团仅有142个节点, 极差达到324。

然而, 社团之间在规模上体现的差异性并未延续到社团内部指标的对比上, 在社团所包含的城市道路节点和公交线路节点数量及其各自的平均度数等方面, 皆呈现出一定的共性特征: ① 每个社团所包含的城市道路节点数量基本是公交节点数量的2倍, 但其中有一个例外一大兴组团, 其城市道路节点数量是公交节点数量的3倍之多, 说明大兴组团的公交线路多为长距离或多转向型公交线路, 这意味着其社团内公交线路节点的度值必然很大, 而统计结果也证实了这一点, 大兴组团内的公交线路节点的平均度值达到14.192, 远远大于其他组团; ② 每个社团的城市道路节点平均度与公交线路节点平均度基本接近总体的平均度值, 一定程度上说明此次公交线路依赖空间划分的结果较为理想, 没有出现奇异值。

在归并各个社团城市道路节点与公交线路节点属性发现, 自然划分的14个社团与北京市地域空间具有良好对应性, 表明北京市公交线路布局的区域性特征已经初显。其中朝阳区、海淀区、大兴区、顺义区、房山区、怀柔区、密云县、丰台区、通州区和平谷区基本划分为独立的社团; 由于一些地域空间单元的主城区在地理空间上极为靠近, 公交线路的空间布局没有形成明显的界限, 因此在依赖空间划分上进行了合并, 如东城区和西城区、昌平区和延庆县以及石景山区和门头沟区; 虽亦庄片区在空间上位于大兴区和通州区的交界地带, 但作为北京市经济技术开发区的载体空间, 其区域内的公交网络发育已基本自成一体, 因此形成了一个单独的社团。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

二分网络以“行动者—事件”的关联思维为研究公交网络的空间布局提供了全新的研究视角, 作为行动者的公交线路在选择哪些城市道路作为其事件(线路安排)的过程中, 一幅公交线路与城市道路的空间关联与空间依赖图景就此展现:

(1) 度中心性展现的北京市公交线路局域空间依赖度方面: 北京市公交线路所行经的城市道路数基本固定在一个区间之内, 呈现出运行距离越长, 行经城市道路数量越多的规律; 其次, 北京市公交线路的空间分布高度依赖于少数城市主干道, 如以二环和三环为代表的市中心主干道和以京密路、G6辅路、京开路、顺平路、京昆路、顺沙路、建国路等为代表的城郊快速干道, 这些城市道路在北京市公交运行的空间管控上起着至关重要的作用, 并形成了以市中心为核心, 以城郊快速干道为辐射通道的中心—外围的廊道扩散格局。

(2) 介数中心性和紧密度中心性解释的北京市公交线路全局空间依赖度方面: 北京市公交线路节点介数中心性较小, 只有为数不多的几条公交线路在城市道路之间的隐性连接上扮演着关键的中介角色; 其次, 在北京市公交线路布局上, 仅有少数高等级城市道路在公交网络中承担着较大的流量, 流量过度集中意味着公交线路空间布局的结构失衡, 显得比较脆弱。另外, 由于高紧密度的城市道路高度集聚在以四环为模糊边界的市中心区域, 因此, 以四环为模糊边界的市中心区域成为了北京市公交线路依赖的核心空间。

(3) 社团划分阐释的北京市公交线路布局的区域性特征方面:北京市公交线路—城市道路二分网络社团划分较为理想,与北京市地域空间具有良好对应性,表明北京市公交线路布局的区域性特征已经初显。

## 4.2 讨论

(1) 本文探讨的北京市公交线路的空间依赖程度属于静态的、某个时间点上的状态识别。任何一个实体网络都是一个动态的、发展的网络,因此有必要引入时间序列,通过构建北京市公交网络和城市道路时序发展数据,对公交线路的空间依赖度的时空演化进行研究,从而辨别公交网络的空间布局是否遵循“优者愈优、劣者愈劣”的规律,或者在时间的演化中,公交网络的空间依赖是否有朝着均衡的趋势发展。

(2) 二分网络的思想是独立点集与公共边集的建构,本文在构建城市道路节点集时是通过公交线路是否经过来取样,并通过街道名称来识别。虽然采用此方法采集的城市道路数量多达2407条,且分析结果较为理想,但在局部道路上仍值得商榷。现实中,一条城市道路的长度从几百米到几十千米不等,如北京市的几条环线及城—郊快速干道,而一条公交线路可能仅仅经过其某一部分,且该条城市道路上公交线路可能无一重合。因此,有必要对一些长距离城市道路进行分段采样,但无疑这是一个“大数据”挖掘的过程,期待更多的研究学者运用数据挖掘手段进行研究。

(3) 虽然本文基于二分网络对北京市公交线路的空间依赖程度及依赖空间进行了识别,但仍然没有回答北京市城市道路所能容纳公交线路的极限,进而无法回答当前北京市公交线路的空间依赖度是否已经达到城市道路的承载能力,或者已经超越,或者还有发展的空间。城市道路容纳公交线路的能力与道路的等级、路面质量、车道数以及道路承载其他交通方式的容量等方面有关,是一个多学科(交通地理学、交通工程学、交通管理学等)交叉的领域,值得各领域的研究学者进行融合研究。

## 参考文献(References)

- [1] Da Fuwen. A research on the character of spatial distribution and accessibility of public transportation of Lanzhou City [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2013. [达福文. 兰州市公共交通空间分布特征及其可达性研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2013.]
- [2] Calvin P Tribby, Paul A Zandbergen. High-resolution spatio-temporal modeling of public transit accessibility. *Applied Geography*, 2012, 34: 345-355.
- [3] Yuval Hadas, Prakash Ranjitkar. Modeling public-transit connectivity with spatial quality-of-transfer measurements. *Journal of Transport Geography*, 2012, 22: 137-147.
- [4] He Baohong, Chen Lichang, Gao Liangpeng, et al. Public transport stop accessibility measure and its application in parking zoning. *Human Geography*, 2015, 30(3): 97-102. [何保红, 陈丽昌, 高良鹏, 等. 公交站点可达性测度及其在停车分区中的应用. *人文地理*, 2015, 30(3): 97-102.]
- [5] Guedes M C M, Oliveira N, Santiago S, et al. On the evaluation of a public transportation network quality: Criteria validation methodology. *Research in Transportation Economics*, 2012, 36(1): 29-44.
- [6] Das S, Pandit D. Importance of user perception in evaluating level of service for bus transit for a developing country like India: A review. *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal*, 2013, 33(4): 402-420.
- [7] Timothy F, Welch A, Sabyasachee M. A measure of equity for public transit connectivity. *Journal of Transport Geography*, 2013, 33: 29-41.
- [8] Ji Jue, Gao Xiaolu. Evaluating urban structure by modeling satisfaction towards public transportation. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(12): 1477-1487. [季珏, 高晓路. 北京城区公共交通满意度模型与空间结构评价. *地理学报*, 2009, 64(12): 1477-1487.]
- [9] Duan Dezhong, Liu Chengliang, Chen Xinyi. Study on the complexity of the public transportation network spatial structure based on fractal theory: Taking Wuhan center city area as an example. *Geography and Geo-Information*

- Science, 2013, 29(2): 66-71. [段德忠, 刘承良, 陈欣怡. 基于分形理论的公交网络空间结构复杂性研究: 以武汉市中心城区为例. 地理与地理信息科学, 2013, 29(2): 66-71.]
- [10] Xu Qing, Zu Zhenghu, Xu Zhijing, et al. Space P-based empirical research on public transport complex networks in 330 cities of China. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information*, 2013, 13(1): 193-198. [许晴, 祖正虎, 徐致靖, 等. 330个中国城市P空间下公交复杂网络实证研究. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(1): 193-198.]
- [11] Michael G, Bell H. A game theory approach to measure the performance reliability of transport network. *Transport Research Part B*, 2000, 34: 533-545.
- [12] 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. [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. 地理科学进展, 2014, 33(8): 1078-1089.]
- [13] Curl A, Davison L. Transport geography: Perspectives upon entering an accomplished research sub-discipline. *Journal of Transport Geography*, 2014, 38: 100-105.
- [14] Walker J. Purpose-driven public transport: Creating a clear conversation about public transport goals. *Journal of Transport Geography*, 2008, 16: 438-442.
- [15] Xiao Zhanxin, Hu Kunpeng. Study on low-carbon development path of public transportation in Pearl River Bay area. *Economic Geography*, 2015, 35(9): 112-119. [肖展欣, 胡坤鹏. 珠江口湾区公共交通低碳发展路径研究. 经济地理, 2015, 35(9): 112-119.]
- [16] Seaborn C, Attanucci J, Wilson N. Analyzing multimodal public transport journeys in London with smart card fare payment data. *Transportation Research Record*, 2009, 2121: 55-62.
- [17] Morency C, Trépanier M, Agard B. Measuring transit use variability with smart-card data. *Transportation Policy*, 2007, 14: 193-203.
- [18] Long Ying, Zhang Yu, Cui Chengyin. Identifying commuting pattern of Beijing using bus smart card data. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(10): 1339-1352. [龙瀛, 张宇, 崔承印. 利用公交刷卡数据分析北京职住关系和通勤出行. 地理学报, 2012, 67(10): 1339-1352.]
- [19] Chen Zhongnuan, Guo Minling, Xu Minlin, et al. Study on the evolution of residents reachable spatial based on regular bus transit in Guangzhou City. *Economic Geography*, 2010, 30(11): 1797-1803. [陈忠暖, 郭敏玲, 许敏琳, 等. 建国以来广州居民市内出行可达空间的演变: 基于常规公交视角的研究. 经济地理, 2010, 30(11): 1797-1803.]
- [20] Sen P, Dasgupta S, Chatterjee A, et al. Small-world properties of the Indian railway network. *Physical Review E*, 2003, 67(3): 036106.
- [21] Faust K. Centrality in affiliation networks. *Social Networks*, 1997, 19: 157-191.
- [22] Fu Guangmei, Wang Hong, Ma Xiaohui. Bipartite network community structure partition based on topological characteristic. *Computer Engineering*, 2012, 38(12): 36-38. [符光梅, 王红, 马晓慧. 基于拓扑特征的二分网络社团结构划分. 计算机工程, 2012, 38(12): 36-38.]
- [23] Xu Yongcheng, Chen Ling, Li Bin, et al. Density-based modularity for evaluating community structure in bipartite networks. *Information Sciences*, 2015, 317: 278-294.
- [24] Zhang Peng, Wang Jinliang, Li Xiaojia, et al. Clustering coefficient and community structure of bipartite networks. *Physica A*, 2008, 387: 6869-6875.
- [25] Wu Yajing, Zhang Peng, Di Zengru, et al. Study on bipartite networks. *Complex Systems and Complexity Science*, 2010, 7(1): 1-12. [吴亚晶, 张鹏, 狄增如, 等. 二分网络研究. 复杂系统与复杂性科学, 2010, 7(1): 1-12.]
- [26] Barber M J. Modularity and community detection in bipartite networks. *Physical Review E*, 2007, 76: 066102.

## Spatial dependency of bus-line distribution based on bipartite network: A case study of Beijing city

DUAN Dezhong<sup>1,2</sup>, LIU Chengliang<sup>1,2</sup>, DU Debin<sup>1,2</sup>, GUI Qinchang<sup>1</sup>

(1. School of Urban and Regional Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

2. Institute for Innovation and Strategic Studies, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** As a subnet derived from and supplied by urban road network, public transport network (PTN) owes its maximum development to the development level of urban road network. The structural defects of PTN often make itself the culprit of urban traffic congestion. Traditional research on spatial distribution of PTN tends to regard PTN as an independent mode of transportation, but overlooks the endogenous effect of urban road network's morphology and structure. Based on the idea of binary network, this paper discusses the local and global spatial dependency of Beijing bus-line distribution by constructing the space correlation matrix between bus line and city road and introducing dependency measures from 1-mode network. This endeavor also divides the dependence space of Beijing bus lines by community detection with the help of the software named Ucinet 6. We find out that in terms of local dependence, the layout of bus lines is highly dependent on a few city trunk roads and expressways connecting downtown areas and suburbs, so its spatial dependence shows a corridor diffusion pattern of core-periphery, which takes the downtown as the core and the rapid suburban corridors as the channel. In terms of global dependence, the unbalanced distribution structure of bus lines seems more fragile and is greatly influenced by the city road traffic conditions. Meanwhile, the downtown area bounded by the Fourth Ring Road becomes the core space of bus-line dependence. In terms of space division, the layout of Beijing bus lines presents good correspondence to the city districts. To exemplify this, Chaoyang District, Haidian District and the area within the Third Ring Road have the densest bus-line distributions.

**Keywords:** bus line; city road; spatial dependency; bipartite network; Beijing city