

基于高速公路联网收费数据的江苏省交通流动特征与影响因素

靳 诚^{1,2}, 徐 菁³, 黄震方^{1,2}, 陆玉麒^{1,2}, 柯文前⁴, 陈 娛^{1,2}

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 3. 南京晓庄学院旅游与社会管理学院, 南京 211171; 4. 福建师范大学地理研究所, 福州 350007)

摘要: 高速交通网络是一种十分重要的地区间联系形式, 对区域空间结构的重构有着显著的推动作用。高速公路联网收费数据为从高速公路流量视角探讨区域交通流动提供了有效的数据支撑。以江苏省为案例区, 以江苏省内高速公路网络2014年的收费站点间出发地—目的地(O-D)数据为支撑, 探究区域交通流动特征, 并运用地理加权回归(GWR)模型分析方法探讨流动的影响因素。结果表明: ① 江苏省内部交通流动存在较大的不平衡性, 核心节点(收费站、县城节点)主要位于江苏省南部, 在空间上呈现出以核心节点为中心的放射性结构。② 流量总体上呈现距离衰减特征, 空间间隔尺度越大, 距离衰减规律特征越明显, 且衰减规律符合幂律分布。③ 常住人口、经济发展、公路里程可有效解释县域流量分布, 经济发展对各县域交通流量的影响在江苏北部地区表现的更为强烈, 人口对江苏南部地区交通流量影响具有局部优势, 公路里程对苏南地区存在较弱的负向影响。

关键词: 交通流动; 影响因素; 高速公路; GWR模型; 江苏省

DOI: 10.11821/dlxb201802004

1 引言

交通发展的水平决定了空间相互作用的强度与广度, 其影响和改变着原有的经济活动空间, 是推动社会经济空间结构重塑的显著力量^[1]。充分把握交通要素对经济活动的影响, 对于深刻认知各类经济现象的空间布局规律具有重要意义。随着交通运输技术的发展, 以高速公路、航空和高速铁路等为主体的快速交通网络已逐渐形成, 并成为现代交通运输体系中最重要的重要组成部分^[2]。

在航空研究方面, 国外研究着重从宏观视角分析全球及其欧洲、北美等地航线网络特点和演化过程^[3-5], 从微观视角探究航空公司客运、货运网络特点, 并提出网络设计和优化方法^[6-8]。在国内, 空港布局规律、空间服务范围 and 航空网络组织模式等研究已成为交通地理新兴研究领域^[9], 如航空客流网络发展空间模式^[10], 东、中、西部航空客流差异^[11], 机场中心性评价^[12]、机场体系格局^[13], 航空网络复杂性^[14]以及基于航空网络的中国城市体系等级结构^[15]。在高速铁路研究方面, 高速铁路的快速发展, 大大改变了原有的

收稿日期: 2016-12-30; 修订日期: 2017-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601131, 41571134, 41430635); 江苏省高校自然科学研究重大项目(16KJA170002)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41601131, No.41571134, No.41430635; Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions, No.16KJA170002]

作者简介: 靳诚(1984-), 男, 江苏泗洪人, 博士, 副教授, 中国地理学会会员(S110009053M), 研究方向为区域发展与旅游地理。E-mail: jincheng2431@163.com

通讯作者: 徐菁(1983-), 女, 浙江宁波人, 博士, 研究方向为区域发展与旅游地理。E-mail: xujing@njxzc.edu.cn

时空格局,国内外地理学者侧重于高速铁路的空间效应分析,主要集中在两个方面:一是高速铁路带来的城市间可达性变化^[16-19],高速铁路明显压缩了城市间的通勤时间,“时空收敛”效应十分明显,进而改变了原有的区域空间结构,重构区域发展的空间格局^[20-22];二是高速铁路改变了原有城市间的要素流动方式与流动格局,要素在不同交通方式之间重新配置,影响居民出行行为和企业区位选择^[23-26],并进一步推进沿线城市的经济发展^[27-28]。在高速公路研究方面,日益优化的高速公路网带来了时空收敛效应,已成为大中城市间社会经济联系的重要途径^[2],对区域发展产生了深远地影响,地理学者研究主要集中在高速公路网的布局模式^[29]、可达性改变^[30-33]、公路物流网络构建^[34-35]及其基于公路流量的城市等级体系构建^[36-37]。上述三类交通方式是主导城市间联系的主要形式,但其在功能定位上存在着明显的差异性和互补性^[38]。高速公路更倾向于短程流动,且人流与货流相互混合,从而可以有效识别城市关联结构^[2]。

交通流量是区域间联系最真实的直观反映,然而以往研究对于高速公路流量的分析却十分有限,其背后的根本原因是什么呢?数据是支撑要素间时空关系研究的根基所在,研究数据获取的难易程度,直接影响到不同时空尺度上要素关系研究的深度与广度^[39]。高速公路联网收费数据对进出车辆的相关信息进行了不间断、实时、连续的观测、记录和存储。建立在单个车辆记录之上的细粒度化流量数据蕴含着丰富的时空信息,这些像“分子”一样的数据在宏观和微观之间架起了一座桥梁,为区域交通流动分析找到了良好的视角。基于此,本文以江苏省为案例区,基于高速公路联网收费数据,构建江苏省内高速公路网络出发地—目的地(Origin-Destination, O-D)流量矩阵,探究区域交通流动特征,并进一步分析影响区域交通流动的社会经济要素。

2 研究区域和数据说明

江苏省地处长江三角洲地区,经济发达,地形以平原为主,北部和南部有少许丘陵分布,长江将江苏分为南、北两大区域,南北经济发展不协调。江苏省高速公路建设始终走在全国前列,过江通道建设不断完善。至2014年底,全省境内高速路网密度位居全国第一。全省存在O-D流量的收费站350个,由于本文研究江苏省区域内部的空间联系特征,因而省界收费站点对本文来说缺乏研究意义,故将其剔除,最终得到存在O-D流量的收费站334个,收费站点基本覆盖整个江苏区域(图1)。

交通流数据来源于江苏省高速公路运营管理中心,该数据为2014年全年的江苏省高速公路真实车流量。每辆汽车数据都记录着该车进站和出站的收费站、进出站时间等。2014年全年江苏省内车流记录234535769条,利用数据分析软件对车流记录进行逐条数据汇总,整理得到由“进站—出站”构成的 334×334 二维O-D流量矩阵。鉴于目前中国大多数人口、经济等统计数据以县域为单元,有必要进一步探讨



图1 研究区域

Fig. 1 Study area

县域层面上的交通流时空特征。截止到2014年年末,江苏省共有21个县、23个县级市、市辖区55个,由于部分市辖区面积较小,对其进行合并处理,最终得到63个研究单元(图1)。2014年高淳、如东、阜宁和金湖4县区没有收费站或收费站流量数据没有并入联网中心,故将其剔除。将收费站流量矩阵汇总至县域单元的 59×59 二维流量矩阵。本文涉及的相关社会经济统计数据,来源于《江苏省统计年鉴(2015)》^[40]。

2.2 研究方法

2.2.1 节点流量 在有向流动网络中,不同节点间的车流量存在较大的差异,造就了不同节点在流动网路中的地位差别。节点的重要性可以用流入量、流出量和总流量来进行描述,三者计算公式如下:

$$\text{流入量: } C_{ini} = \sum_{j=1}^n l_{ji} \quad (1)$$

$$\text{流出量: } C_{outi} = \sum_{j=1}^n l_{ij} \quad (2)$$

$$\text{总流量: } C_i = C_{outi} + C_{ini} \quad (3)$$

式中: C_{ini} 、 C_{outi} 分别为节点*i*的流入量和流出量; l_{ji} 为从节点*j*流向节点*i*的流量; l_{ij} 为从节点*i*流向节点*j*的流量; C_i 为节点*i*的总流量。根据各个节点流入量和流出量的差异,计算各个节点流出率,具体计算公式如下:

$$O_i = (C_{outi} - C_{ini}) / C_i \quad (4)$$

式中: O_i 为节点*i*的流出率; C_{outi} 为节点*i*的流出量; C_{ini} 为节点*i*的流入量; C_i 为节点*i*的总流量; $O_i > 0$ 表示该节点为净流出,数值越大,净流出比率越大, $O_i < 0$ 表示该节点为净流入。

2.2.2 GWR 模型 地理加权回归(Geographically weighted regression, GWR)模型在传统回归分析的基础上引入了空间自相关,在探讨区域影响因素方面能很好的反映变量间的空间位置关系,同时它也能够捕捉空间数据的非平稳性和相互差异^[41]。本文利用GWR模型对交通流量的影响因素进行空间回归分析,其模型如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) x_{k,i} + \varepsilon_i \quad (5)$$

式中: (u_i, v_i) 是第*i*个单元的空间地理位置坐标; $\beta_k(u_i, v_i)$ 为独立变量 x_k 在*i*单元的系数值; y_i 为第*i*单元上的因变量; $x_{k,i}$ 为*i*单元上的第*k*个解释变量; ε_i 为随机误差。

3 流动特征分析

本文拟从收费站和县域两个尺度探讨江苏省高速公路车辆流动特征,在分析流动特征时主要从流动路径和节点规模两个方面进行刻画。

3.1 收费站间流动特征分析

江苏省内334个收费站间共存在流动路径105121条,利用ArcGIS软件对二维流量矩阵中流量数值大于1万的路径进行可视化表达(图2a)。高流量路径主要存在于江苏南部地区,呈现出以南京、苏州、无锡等市范围内核心收费站为中心的放射性结构,苏南地区路径密度较大。苏北地区路径密度较小,且路径流量较小。进一步分析不同流量数据及其流量占比(表1),2014年流量在50万以上的路径有22条,这些路径的流量占比为7.37%;流量在20万~50万之间的路径有79条,流量占比为9.47%;流量在1000以下的路径多达84126条,而流量占比仅为6.45%。可以看出,江苏省内收费站间的车流主要

表 1 收费站间不同流量路径分布

Tab. 1 Distribution of paths with different flows among toll stations

流量规模	> 500000	200001~500000	100001~200000	50001~100000	20001~50000	10001~20000	5001~10000	2001~5000	1001~2000	≤ 1000
路径数(条)	22	79	193	419	1409	2015	3189	6521	7148	84126
流量占比(%)	7.37	9.47	11.26	12.23	18.45	12.04	9.60	8.82	4.31	6.45

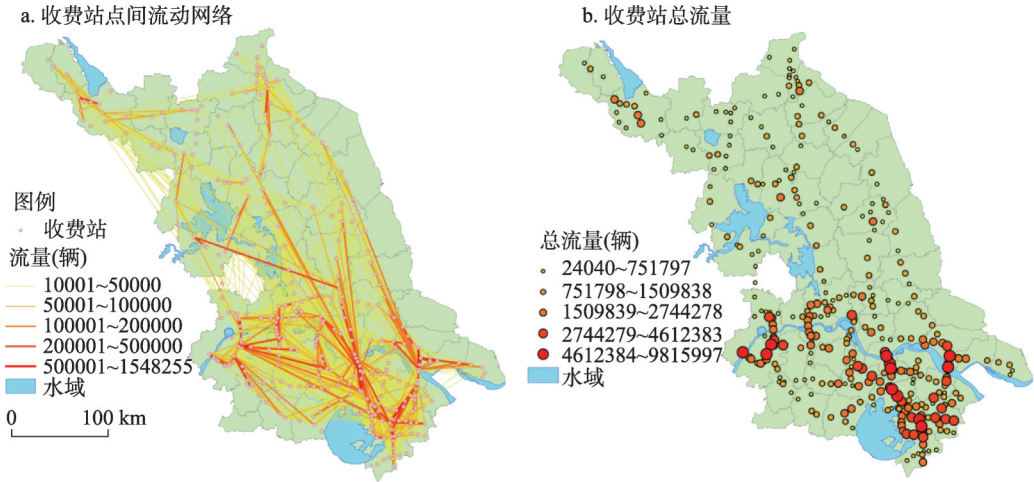


图2 江苏省收费站间流动特征

Fig. 2 Characteristics of flows among toll stations in Jiangsu province

为少数高流量路径，核心收费站点肩负着区域间联系的重任，而绝大多数的路径流量较小，收费站点间联系较小。

根据公式 (3) 计算得到 334 个收费站的总流量，并用jenks 自然断裂法将其分为 5 个等级 (图 2b)，总流量数值较高的收费站主要分布在长江以南地区，且主要分布在南京绕越高速、沪宁高速苏州—无锡段、苏通高速、无锡—江阴高速；苏北地区收费站的中心性整体较小，车流量不大。具体来看，总流量排名前 10 的收费站有 9 个位于长江以南地区，其中 4 个位于无锡市、3 个位于南京市、2 个位于苏州市。数值最高的是沪宁高速南京收费站，该收费站是位于省会南京市的东部，是沟通南京和苏南地区联系的重要节点；在排名前 10 的收费站点中有 5 个位于沪宁高速上，也可以看出这一高速在江苏省内交通中的重要地位。苏北地区高速公路收费站总流量较小，数值最小的收费站仅有沪宁高速南京收费站的 2.45%。

3.2 县域间流动特征分析

江苏省内 59 个县域间共存在流动路径 3481 条，利用 ArcGIS 软件对所有流动路径进行可视化表达 (图 3a)。高流量路径主要存在于江苏南部县域之间，呈现出以南京市区、苏州市区、无锡市区为核心的放射性结构。苏北地区路径流量较小，缺乏高流量的路径。进一步分析县域之间不同流量数据及其流量占比，2014 年县域之间流量在 300 万辆以上的路径数有 10 条，这些路径的流量占全部流量的 24.43%，接近于 1/4，在网络中占有绝对的优势地位；流量在 100 万~300 万辆之间的路径数有 32 条，流量占比为 21.47%，所占比例较高；流量在 1 万以下的路径数多达 2214 条，而流量占比仅为 2.71%。可以看出，江苏省内的车流主要集中在少数县域单元之间，而大部分县域之间交通联系较少。

计算各县域在交通网络的流入量、流出量，进而计算各县域的总流量 (图 3b)。从

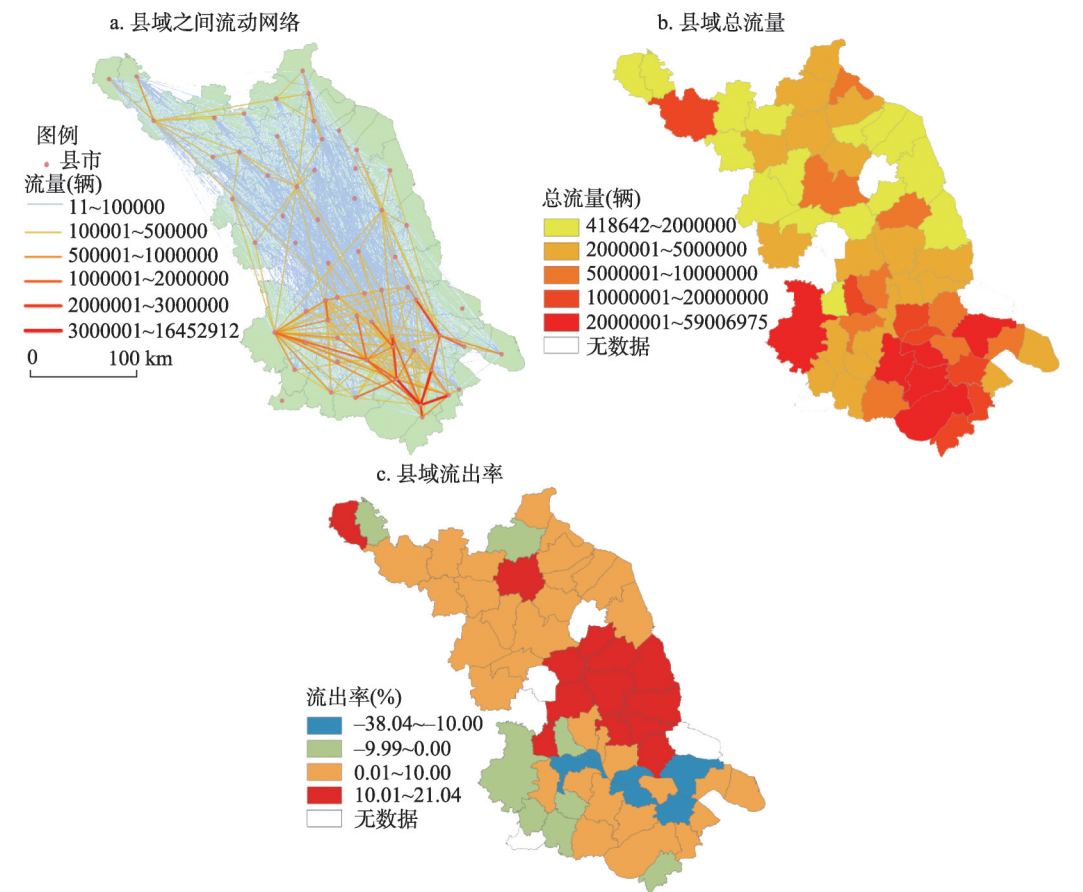


图3 江苏省县域之间流动特征
Fig. 3 Flow characteristics among counties

县域总流量计算结果来看，整体上呈现南高北低的格局，为了能够更好地分析其内部差异，对其进行重分类，将其划分为5个层级（表2）。第一层级为总流量2000万辆的县域单元，包括6个单元，其中苏州市区总流量最高，为59006975辆，其次是南京市，总流量为54598575辆，这两个区域在江苏省内联系中较为活跃；紧随其后的是无锡市区、常州市区和南通市区，总流量分别为34785432辆、34785432辆和26450703辆；可以看出排在前5位的地区都是市域单元的中心城区，核心城市在省内联系中占有重要地位。

表2 基于总流量的江苏省城市等级划分
Tab. 2 Level distribution of cities based on centrality

层级	总流量(万辆)	县域
第一层级	> 2000	苏州市区、南京市、无锡市区、常州市区、南通市区、江阴
第二层级	1000~2000	昆山、常熟、扬州市区、靖江、徐州市区、泰兴、吴江
第三层级	500~1000	镇江市、江都、如皋、淮安区、宜兴、盐城市、张家港、连云港市、海门
第四层级	200~500	姜堰、丹阳、扬中、泰州市、溧阳、宿迁市、灌云、盱眙、海安、句容、赣榆、启东、兴化、溧水、东海、金坛、东台、高邮、沭阳、太仓、涟水
第五层级	< 200	泗洪、灌南、滨海、泗阳、仪征、睢宁、大丰、新沂、响水、射阳、沛县、邳州、宝应、洪泽、建湖、丰县

第二层级为总流量在1000万~2000万辆的县域单元,包括7个单元,主要为苏南的县域和苏北、苏中地级市的中心城区。第三层级和第四层级的县域数量分别为9个和21个,主要分布在长江以北区域。第五层级为总流量小于200万辆的县域单元,包含16个县域单元,其中总流量最低的是丰县,总流量仅为418642辆;总流量低于100万辆的还有两个县,为建湖县和洪泽县,总流量分别为888274辆和912735辆;总流量较低的县域多位于苏北地区,这些县域在网络中的层级较低,所起作用不强。

根据公式(4),计算江苏省县域单元的流出率,计算结果如图3c所示。从县域流出率计算结果来看,大部分地区能保持在(-10%, 10%)的相对均衡区间内,只有少部分县域突破了均衡空间,呈现明显的净流出或净流入。流出率大于10%的多个县域在江苏省中部集聚,最高的是海安,为21.04%,表现出明显的净流出;其次是如皋,流出率为18.64%,净流出也较为明显。流出率小于-10%的区域均分布在长江两岸,流出率最小的是靖江,流出率为-38.04%,净流入十分明显;其次是扬中,流出率为-25.05%,净流入特征也较为明显。

4 影响因素分析

在探讨流量分布的影响因素时候,考虑到社会经济数据的可获取性,本文亦从收费站和县域两个尺度进行分析。在收费站尺度,收费站分布于各个县域单元中,其本身缺乏足够的社会经济属性,但其空间分布更为均衡,本文重点分析收费站间流量和距离之间的关系。而在县域尺度,社会经济统计数据易于获取,重点分析县域流量和社会经济要素之间的相互关系。

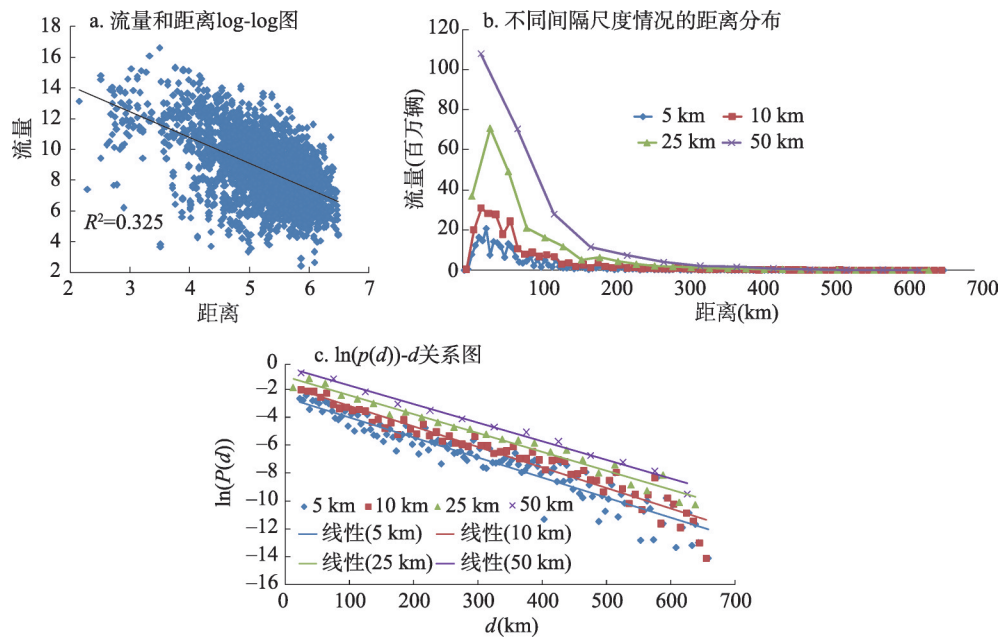
4.1 收费站尺度流量与距离之间的关系

基于高速公路路网,利用网络分析,统计得到不同收费站之间的最短行驶距离,并求得每个路径的距离和流量的log-log图(图4a),并对其进行线性拟合分析,结果发现两者拟合的相关系数并不高,规律性不强,因而笔者进行进一步的尺度综合,统计分析5 km、10 km、25 km、50 km不同间隔尺度下流量的距离分布情况(图4b)。从4种间隔尺度的比较来看,总体上都显现出较为明显的距离衰减特征,而且随着空间间隔尺度的不断增大,距离衰减规律特征也越发明显。

站点间车流量和距离之间存在怎样的分布规律呢?在以往研究中,通过统计数据拟合,流动概率 $P(d)$ 和距离之间遵循如下几种分布规律:幂函数分布规律 $P(d) \sim d^{-\beta}$,指数函数分布规律 $P(d) \sim \exp(-kd)$ 或指数截断的幂律分布规律 $P(d) \sim \exp(-kd) d^{-\beta}$ 。上述分布规律已被广泛的应用于人口迁移、流行病或病毒的传播^[42-43]。本文利用车流数据和距离数据,在4种间隔尺度上,分别拟合上述3类模型(表3)。从模拟结果来看,在4种间隔尺度情况下,高速公路车辆流动和距离的关系均更加符合幂律分布规律(图4c),且 $k=0.014 \pm 0.001$,呈现出较为明显的距离衰减规律。此外,随着间隔尺度的不同增加,拟合结果越来越好。在以往人口流动研究中,学者分别利用旅游攻略数据^[44]、移动电话数据^[45]、出租车数据^[46]、航空旅客数据^[47]来研究中国城市内部、城市间人口迁移,上述研究均符合于指数衰减模型。幂律分布的衰减速度要快于指数分布,这也意味着基于高速收费站点间流动具有更强的距离效应。

4.2 县域尺度社会经济影响因素分析

本文进一步在县域尺度探讨各个县域总流量与社会经济要素的相互关系。在参考前人的研究基础上^[48-49],本文选取常住人口、GDP、固定资产投资、社会消费品零售总额、



注：剔除了行程在 20 km 以下的车辆记录

图 4 流量和距离之间关系

Fig. 4 The relationship between vehicle flow and distance

表 3 回归拟合结果

Tab. 3 The results of regression analysis

间隔尺度(km)	5	10	25	50
指数分布	$P(d) \sim d^{-3.061}$ (Adjusted $R^2=0.777$)	$P(d) \sim d^{-3.220}$ (Adjusted $R^2=0.792$)	$P(d) \sim d^{-2.373}$ (Adjusted $R^2=0.752$)	$P(d) \sim d^{-2.548}$ (Adjusted $R^2=0.814$)
幂律分布	$P(d) \sim \exp(-0.014d)$ (Adjusted $R^2=0.902$)	$P(d) \sim \exp(-0.015d)$ (Adjusted $R^2=0.939$)	$P(d) \sim \exp(-0.014d)$ (Adjusted $R^2=0.973$)	$P(d) \sim \exp(-0.013d)$ (Adjusted $R^2=0.988$)
指数截断幂律分布	$P(d) \sim \exp(-0.014d)d^{0.490}$ (Adjusted $R^2=0.901$)	$P(d) \sim \exp(-0.016d)d^{0.363}$ (Adjusted $R^2=0.938$)	$P(d) \sim \exp(-0.015d)d^{0.254}$ (Adjusted $R^2=0.971$)	$P(d) \sim \exp(-0.014d)d^{0.139}$ (Adjusted $R^2=0.986$)

进出口总额、公路里程、民用汽车拥有量 7 个指标作为解释变量，其中常住人口和 GDP 作为宏观基础指标，固定资产投资、社会消费品零售总额、进出口总额为对经济指标的进一步细化，公路里程、民用汽车拥有量主要考虑交通设施和交通工具的影响。这些解释变量数据均来源于《江苏省统计年鉴（2015）》^[40]。社会经济要素如何影响着各个县域单元流量，在空间上表现出怎样的影响特征？本文运用 GWR 模型分析各县域总流量和社会经济要素的空间相互关系。为了避免选取指标的多重共线性问题，首先运用 SPSS 软件中的描述性统计功能对各指标进行标准差标准化处理，然后运用线性回归分析方法对标准化后的所有变量进行共线性检验，将方差膨胀因子（VIF）大于 10 的解释变量剔除，最终选用常住人口、GDP 和公路里程 3 个指标作为 GWR 模型的解释变量。构建回归公式如下：

$$C(i) = \beta_0(i) + \beta_1(i)POP(i) + \beta_2(i)GDP(i) + \beta_3(i)ROAD(i) + \varepsilon(i) \tag{6}$$

式中：C(i)为各县域总流量；POP(i)为各县域常住人口；GDP(i)为各县域 GDP；ROAD(i)为各县域公路里程。

进一步考虑GWR模型的适用情况,利用最小二乘法(OLS)模型对影响流量分布的3个因素进行了全局回归分析,得到OLS回归结果的 R^2 为0.8394,调整 R^2 为0.8278,AICc值为131.0451。而利用GWR模型得到的 R^2 为0.9464,调整 R^2 为0.9283,AICc值为28.9806,Bandwidth为122653.22 m。由 R^2 可知,GWR的回归结果要优于OLS的回归结果。若GWR模型和OLS模型的AICc的差值大于3,表明GWR模型拟合性能优于OLS模型^[50],而本文两者之间的差距为100左右,也同样证明了GWR的回归结果要明显优于OLS的回归结果。

分析 β_1 、 β_2 和 β_3 的回归结果在空间上的分布(图5),可以看出3个系数及其 t 值在空间上存在迥异的分布特征,解释变量在各个县域单元的参数估计结果均各不相同,有正有负,表明各解释变量对高速公路交通流量的影响存在空间差异。

(1) β_1 系数总体上呈现出北高南低的分布特征,在江苏省北部,交通流量和常住人口分布呈现负向相关,而江苏中部和南部地区交通流量和人口分布之间呈现出正相关,且正相关系数的绝对值要明显大于负相关;从显著性上来看,有47个单元能够通过5%水平的显著性检验,江苏南部、中部地区的显著性较好,江苏东北和西北地区整体显

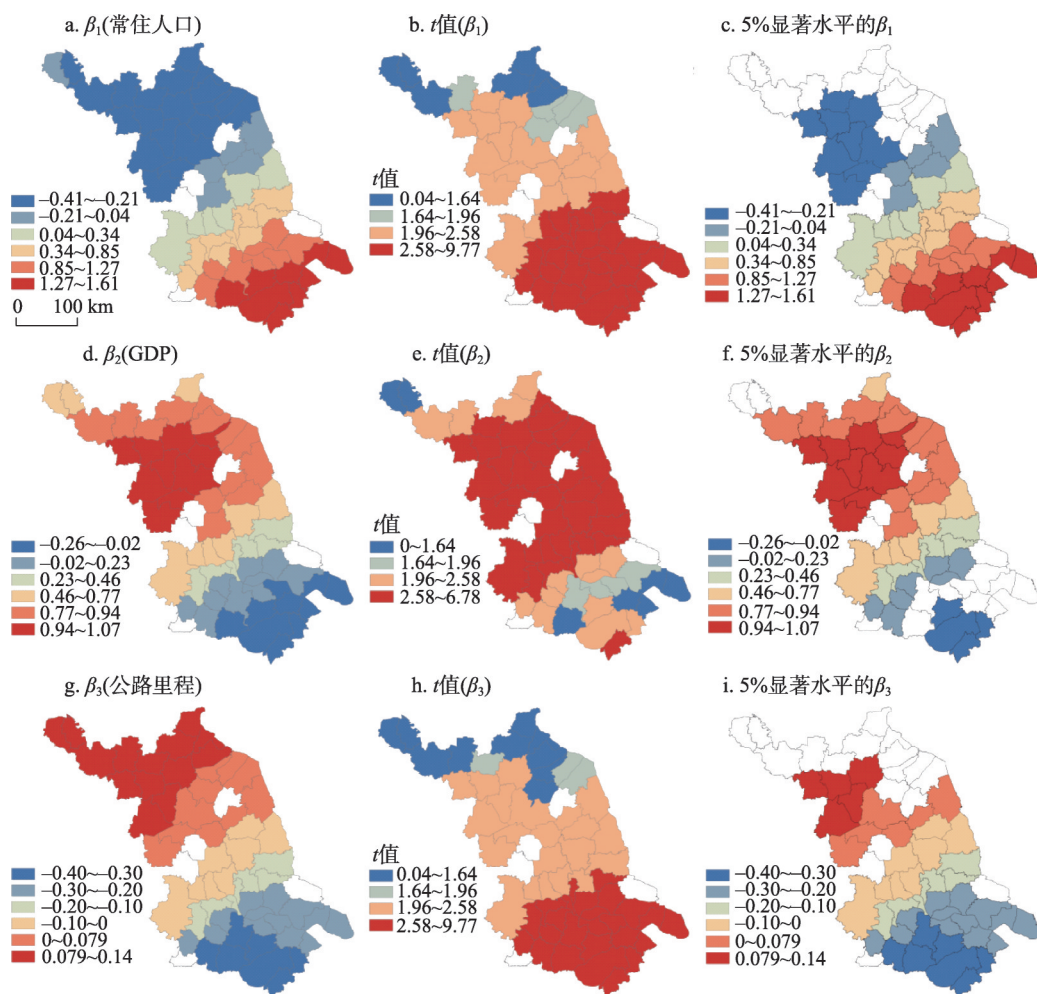


图5 地理加权回归结果

Fig. 5 Geographically weighted regression results

著性较差,有12个县未能通过5%水平的显著性检验;分析结果表明,人口不是江苏北部县域交通流量的决定性因素,而对江苏南部地区的交通流量有着显著的正向影响。江苏南部经济发达,大量的外地人到苏南就业,带来了大量的交通流量,在经济较为发达的情况下,常住人口数量成为交通流量的主要影响因素。苏北经济落后,大量的苏北人到经济发达的苏南地区寻找工作机会,人口外流现象明显,人口对苏北地区交通流量影响呈现出负相关或不相关。

(2) β_2 系数和 β_1 系数分布呈现出相反的分布特征,高数值区域主要分布在江苏北部,呈现正相关,而低数值区域主要分布在江苏南部,整体上呈现出正相关,少数县域单元呈现为负相关;从显著性上来看,有48个单元通过5%水平的显著性检验,江苏南部部分地区显著性不明显。可以看出,经济发展对江苏北部地区交通流量的正向影响更加地强烈,而对江苏南部地区交通流量的影响不显著。经济落后的苏北地区,经济处于快速发展期,苏北县域GDP的增长会促进交通流量快速增长;苏南地区经济已经发展到较为发达的阶段,其GDP的增加对交通流量的带动能力有限。

(3) β_3 系数值由北向南逐渐降低,江苏中部和南部区域多为负相关,而北部呈现出正相关,但系数绝对值整体较低;从显著性上来看,有46个单元通过5%水平的显著性检验,是3个解释变量中通过检验单元数量最少的变量,且集中分布在江苏南部和中部地区,江苏北部部分地区显著性不明显。可以看出,公路里程对各县域交通流量的影响程度要弱于前面两个变量,主要对苏南地区呈现出较弱的负相关影响,苏南公路网密集,但逐步增加的公路里程并没有对该地区的交通流量增长起到重要的推动作用。

5 结论与讨论

5.1 结论

基于高速公路联网收费数据,借助于数据挖掘技术,有效获取2014年全年江苏省高速公路精确车流数据,从收费站、县域两个层面分析了高速公路的交通流动网络及其流动特征。在此基础上,讨论交通流量和距离、人口、经济等因素之间的相互关系。本文主要研究结论归纳如下:

(1) 2014年江苏省334个收费站点间共存在车流记录234535769条,流动路径10511221条。高流量路径主要存在于江苏南部地区,呈现出以南京、苏州、无锡等市范围内核心收费站为中心的放射性结构。总流量数值较高的收费站主要分布在长江以南地区,且主要分布于南京绕越高速、沪宁高速苏州—无锡段、苏通高速、无锡—江阴高速。

(2) 59个县域间共存在流动路径3481条,高流量路径主要存在于江苏南部县域之间,苏北地区路径流量较小,路径流量大多在10万辆以下。县域总流量整体上呈现南高北低的格局,苏州市区总流量最高,丰县总流量最低。大部分县域流入和流出相对均衡,净流出区域集聚在江苏省中部,净流入区域均分布在长江两岸。

(3) 在5 km、10 km、25 km、50 km不同间隔尺度下,收费站点间流量总体上均呈现距离衰减的特征,但空间间隔越大,距离的衰减规律特征越明显。从模拟结果来看,高速公路车辆流动和距离的关系符合幂律分布,且空间间隔越大,拟合的相关系数越高。

(4) 从GWR结果来看,常住人口、经济发展、公路里程可有效解释县域流量分布,经济发展对各县域交通流量的影响在江苏北部地区表现的更为强烈,人口对江苏南部地区交通流量影响具有局部优势,公路里程对各县域交通流量的影响主要集中在苏南地区,且为负向影响。

5.2 讨论

对空间的持续关注是地理学的固有特征, 空间分析技术也重在对要素格局的分析与表达。在空间视角上, 以往研究多从地点(place)、区位(location)的视角来认识和表达要素格局^[51]。而随着信息通讯技术、交通物流技术的深入发展, 空间联系变得更加容易和频繁, 区域已成为流的空间(space of flows)^[52]。流空间的出现对于以空间距离为基础与核心的地理学产生了颠覆性的影响, 以人的活动为核心的流动空间对地理学研究的意义超过了传统的基于活动内容的场所空间。在未来的研究范式中, 针对要素之间相互关系及其相互作用的系统分析变得愈加重要。交通流是不同地理单元之间联系的直观反映, 对交通流的认识有利于从流空间的视角直观理解空间相互作用, 本文的高速交通流分析是从流空间视角探究区域联系的有益尝试。同时, GWR分析不仅可以分析影响区域交通流量的相关要素, 而且可以探讨不同要素在不同空间上的作用和影响强度, 有利于深化对交通流影响因素的认知。

需要说明的是, 以江苏省高速公路车流网络为实证对区域交通流动特征分析与时空关系探讨虽有一定意义, 但以下问题仍需进一步讨论: ① 本文的GWR分析是基于面域数据来进行分析, 流动路径的GWR分析需要进一步的探讨。② 本文仅使用1年的静态数据, 对数据的挖掘尚显不足, 区域交通流量变化的时间特征, 在不同小时、天、月等不同时间尺度上的流量变化如何, 呈现出怎样的波动特征? ③ 高速交通车流在国庆节、春节等特殊时期的流动情况和平时的流动情况呈现出怎样的差异, 这样的差异背后原因是什么? ④ 虽然衰减特征与其他研究进行了对比分析, 但其差异的内在原因有待进一步的探讨。上述问题的解决都有待于数据的补充和现有数据进一步的挖掘分析, 这也是进一步研究的方向。

参考文献(References)

- [1] Jin C, Xu J, Lu Y, et al. The impact of Chinese Shanghai-Nanjing high-speed rail on regional accessibility. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 2013, 113(2): 133-145.
- [2] Ke Wenqian, Lu Yuqi, Chen Wei, et al. Evolutionary stages and theoretical model of high-speed traffic network spatio-temporal structure. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(2): 281-292. [柯文前, 陆玉麒, 陈伟, 等. 高速交通网络时空结构的阶段性演进及理论模型. *地理学报*, 2016, 71(2): 281-292.]
- [3] Paleari S, Redondi R, Malighetti P. A comparative study of airport connectivity in China, Europe and US: Which network provides the best service to passengers? *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2010, 46(2): 198-210.
- [4] Lordan O, Sallan J M, Simo P. Study of the topology and robustness of airline route networks from the complex network approach: A survey and research agenda. *Journal of Transport Geography*, 2014, 37: 112-120.
- [5] Jia T, Qin K, Shan J. An exploratory analysis on the evolution of the US airport network. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2014, 413: 266-279.
- [6] Bowen J T. A spatial analysis of FedEx and UPS: Hubs, spokes, and network structure. *Journal of Transport Geography*, 2012, 24(3): 419-431.
- [7] O'Kelly M E. Air freight hubs in the FedEx system: Analysis of fuel use. *Journal of Air Transport Management*, 2014, 36: 1-12.
- [8] Reis V. Analysis of mode choice variables in short-distance intermodal freight transport using an agent-based model. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2014, 61(3): 100-120.
- [9] Wang Jiao'e, Mo Huihui. Geography of air transportation: Retrospect & prospect. *Progress in Geography*, 2011, 30(6): 670-680. [王姣娥, 莫辉辉. 航空运输地理学研究进展与展望. *地理科学进展*, 2011, 30(6): 670-680.]
- [10] Jin Fengjun, Wang Chengjin. Hub-and-spoke system and China aviation network organization. *Geographical Research*, 2005, 24(5): 774-784. [金凤君, 王成金. 轴—辐侍服务理念下的中国航空网络模式构筑. *地理研究*, 2005, 24(5): 774-784.]
- [11] Wang Fahui, Jin Fengjun, Zeng Guang. Geographic patterns of air passenger transport in China. *Scientia Geographica*

- Sinica, 2003, 23(5): 519-525. [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. 地理科学, 2003, 23(5): 519-525.]
- [12] Mo Huihui, Jin Fengjun, Liu Yi, et al. Network analysis on centrality of airport system. Sinica Geographica Sinica, 2010, 30(2): 204-212. [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. 地理科学, 2010, 30(2): 204-212.]
- [13] Wang Jiao'e, Jin Fengjun, Sun Wei, et al. Research on spatial distribution and service level of Chinese airport system. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(8): 829-838. [王姣娥, 金凤君, 孙伟, 等. 中国机场体系的空间格局及其服务水平. 地理学报, 2006, 61(8): 829-838.]
- [14] Wang J, Mo H, Jin F, et al. Exploring the network structure and nodal centrality of China's air transport network: A complex network approach. Journal of Transport Geography, 2011, 19(4): 712-721.
- [15] Xue Junfei. Hierarchical structure and distribution pattern of Chinese urban system based on aviation network. Geographical Research, 2008, 27(1): 23-32. [薛俊菲. 基于航空网络的中国城市体系等级结构与分布格局. 地理研究, 2008, 27(1): 23-32.]
- [16] Gutiérrez J, Condeço-Melhorado A, Martín J C. Using accessibility indicators and GIS to assess spatial spillovers of transport infrastructure investment. Journal of Transport Geography, 2010, 18(1): 141-152.
- [17] Jiang Bo, Chu Nanchen, Xiu Chunliang, et al. Comprehensive evaluation and comparative analysis of accessibility in the four vertical and four horizontal HSR networks in China. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(4): 591-604. [姜博, 初楠臣, 修春亮, 等. 中国“四纵四横”高铁网络可达性综合评估与对比. 地理学报, 2016, 71(4): 591-604.]
- [18] Jiao J, Wang J, Jin F, et al. Impacts on accessibility of present and planned HSR network in China. Journal of Transport Geography, 2014, 40: 132-132.
- [19] Jiang Haibing, Xu Jiangang, Qi Yi. The influence of Beijing-Shanghai high-speed railways on land accessibility of regional center cities. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(10): 1287-1298. [蒋海兵, 徐建刚, 祁毅. 京沪高铁对区域中心城市陆路可达性影响. 地理学报, 2010, 65(10): 1287-1298.]
- [20] Shaw S L, Fang Z, Lu S, et al. Impacts of high speed rail on railroad network accessibility in China. Journal of Transport Geography, 2014, 40: 112-131.
- [21] Chen C. Reshaping Chinese space-economy through high-speed trains: Opportunities and challenges. Journal of Transport Geography, 2012, 22: 312-316.
- [22] Jiao Jingjuan, Wang Jiao'e, Jin Fengjun, et al. Impact of high-speed rail on inter-city network based on the passenger train network in China, 2003-2013. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(2): 265-280. [焦敬娟, 王姣娥, 金凤君, 等. 高速铁路对城市网络结构的影响研究: 基于铁路客运班列分析. 地理学报, 2016, 71(2): 265-280.]
- [23] Park Y, Ha H K. Analysis of the impact of high-speed railroad service on air transport demand. Transportation Research Part E, 2006, 42 (2): 96-140.
- [24] Wu Kang, Fang Chuanglin, Zhao Miaoqi, et al. The intercity space of flow influenced by high-speed rail: A case study for the rail transit passenger behavior between Beijing and Tianjin. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(2): 159-174. [吴康, 方创琳, 赵渺希, 等. 京津城际高速铁路影响下的跨城流动空间特征. 地理学报, 2013, 68(2): 159-174.]
- [25] Wang Jiao'e, Hu Hao. Competition and cooperation of high-speed railway and air transport in China: A perspective from spatial service market view. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(2): 175-185. [王姣娥, 胡浩. 高铁与民航的空间服务市场竞争分析. 地理学报, 2013, 68(2): 175-185.]
- [26] Wang Degen, Chen Tian, Lu Lin, et al. Mechanism and HSR effect of spatial structure of regional tourist flow: Case study of Beijing-Shanghai HSR in China. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(2): 214-233. [汪德根, 陈田, 陆林, 等. 区域旅游流空间结构的高铁效应及机理: 以中国京沪高铁为例. 地理学报, 2015, 70(2): 214-233.]
- [27] Ureñaa J M, Meneraultb P, Garmendia M. The high-speed rail challenge for big intermediate cities: A national, regional, and local perspective. Cities, 2009, 26(5): 266-279.
- [28] Wang Degen, Qian Jia, Niu Yu. Evolution and spatial characteristics of tourism field strength of cities under high speed rail network in China. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(10): 1784-1800. [汪德根, 钱佳, 牛玉. 高铁网络化下中国城市旅游场强空间格局及演化. 地理学报, 2016, 71(10): 1784-1800.]
- [29] Wang Chengjin. Regional impact and evolution of express way networks in China. Progress in Geography, 2006, 25 (6): 126-137. [王成金. 中国高速公路网发展演化及区域效应研究. 地理科学进展, 2006, 25(6): 126-137.]
- [30] Cao Xiaoshu, Yan Xiaopei. The impact of the evolution of land network on spatial structure of accessibility in the developed areas: The case of Dongguan city in Guangdong province. Geographical Research, 2003, 22(3): 305-312. [曹小曙, 阎小培. 经济发达地区交通网络演化对通达性空间格局的影响: 以广东省东莞市为例. 地理研究, 2003, 22(3): 305-312.]

- [31] Wu Wei, Cao Youhui, Cao Weidong, et al. Spatial structure and evolution of highway accessibility in the Yangtze River Delta. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(10): 1065-1074. [吴威, 曹有挥, 曹卫东, 等. 长江三角洲公路网络的可达性空间格局及其演化. *地理学报*, 2006, 61(10): 1065-1074.]
- [32] Ribeiro A, Antunes A P, Páez A. Road accessibility and cohesion in lagging regions: Empirical evidence from Portugal based on spatial econometric models. *Journal of Transport Geography*, 2010, 18(1): 125-132.
- [33] Wang Chengjin, Cheng Jiajia. Spatial pattern of expressway network accessibility and evolution in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(6): 803-812. [王成金, 程佳佳. 中国高速公路网的可达性格局及演化. *地理科学*, 2016, 36(6): 803-812.]
- [34] Xu Jian, Cao Youhui, Sun Wei. Construction of hub-and-spoke logistics network based on road traffic cost in Yangtze River Delta. *Geographical Research*, 2009, 29(4): 911-919. [徐建, 曹有挥, 孙伟. 基于公路运输成本的长三角轴——辐物流网络的构建. *地理研究*, 2009, 29(4): 911-919.]
- [35] Wang Xinlei, Wang Shengyun. The hub-and-spoke logistics network system in central China based on road and railway transportation cost. *Progress in Geography*, 2012, 31(12): 1583-1590. [王鑫磊, 王圣云. 中部地区“轴—辐”物流网络构建: 基于公路和铁路运输成本的分析视角. *地理科学进展*, 2012, 31(12): 1583-1590.]
- [36] Wang Haihong, Miao Changhong, Niu Haipeng, et al. Highway passenger transport contact and its spatial distribution in the central cities of China. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 745-756. [王海江, 苗长虹, 牛海鹏, 等. 中国中心城市公路客运联系及其空间格局. *地理研究*, 2016, 35(4): 745-756.]
- [37] Chen Wei, Liu Weidong, Ke Wenqian, et al. The spatial structures and organization patterns of China's city networks based on the highway passenger flows. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(2): 224-241. [陈伟, 刘卫东, 柯文前, 等. 基于公路客流的中国城市网络结构与空间组织模式. *地理学报*, 2017, 72(2): 224-241.]
- [38] Black W R. *Transportation: A Geographical Analysis*. New York: Guilford Press, 2003.
- [39] Liu Fajian, Zhang Jie, Zhang Jinhe, et al. Analysis of the basic method of collecting the spatial data of tourist flows: A study review and comparison both at home and abroad. *Tourism Tribune*, 2012, 27(6): 101-109. [刘法建, 张捷, 章锦河, 等. 旅游流空间数据获取的基本方法分析: 国内外研究综述及比较. *旅游学刊*, 2012, 27(6): 101-109.]
- [40] Jiangsu Bureau of Statistics. *Jiangsu Statistical Yearbook 2015*. Beijing: China Statistics Press, 2015. [江苏省统计局. *江苏统计年鉴(2015)*. 北京: 中国统计出版社, 2015.]
- [41] Brunsdon C, Fotheringham S, Charlton M. Geographically weighted regression. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1998, 47(3): 431-443.
- [42] Rhee I, Shin M, Hong S, et al. On the levy-walk nature of human mobility. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2011, 19(3): 630-643.
- [43] Cheng Z, Caverlee J, Lee K, et al. Exploring millions of footprints in location sharing services//International Conference on Weblogs and Social Media, Barcelona, Catalonia, Spain, July. DBLP, 2011: 81-88.
- [44] Jin Cheng, Xu Jing, Huang Zhenfang, et al. Analyzing the characteristics of tourist flows between the scenic spots in inner city based on tourism strategies: A case study in Nanjing. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(12): 1858-1870. [靳诚, 徐菁, 黄震方, 等. 南京城市内部景点间游客流动特征分析. *地理学报*, 2014, 69(12): 1858-1870.]
- [45] Kang C, Ma X, Tong D, et al. Intra-urban human mobility patterns: An urban morphology perspective. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2012, 391(4): 1702-1717.
- [46] Liu Y, Kang C, Gao S, et al. Understanding intra-urban trip patterns from taxi trajectory data. *Journal of Geographical Systems*, 2012, 14(4): 463-483.
- [47] Xiao Y, Wang F, Liu Y, et al. Reconstructing gravitational attractions of major cities in China from air passenger flow data 2001-2008: A particle swarm optimization approach. *The Professional Geographer*, 2013, 65(2): 265-282.
- [48] Wang Xiaolei, Yan Shunxi. Analysis of urban passenger transportation mode and influencing factors. *Communications Standardization*, 2007, 7(7): 85-88. [王晓雷, 闫顺玺. 城市客运交通模式及影响因素分析. *交通运输研究*, 2007, 7(7): 85-88.]
- [49] Yu Lei. Study on measurement of linkages between cities and its influencing factors: A case study of the Pearl River Delta [D]. Beijing: Peking University, 2011. [于蕾. 城市间联系测度及其影响因素研究: 以珠江三角洲为例[D]. 北京: 北京大学, 2011.]
- [50] Akaike H. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, 19(6): 716-723.
- [51] Batty M. *The New Science of Cities*. Cambridge, MA: MIT Press, 2013.
- [52] Castells M. *The Information City: Information Technology, Economic Restructuring, and the Urban Regional Process*. New York: Wiley-Blackwell, 1989.

Regional traffic flow and its influencing factors based on expressway network toll collection data: A case study in Jiangsu province

JIN Cheng^{1,2}, XU Jing³, HUANG Zhenfang^{1,2}, LU Yuqi^{1,2}, KE Wenqian⁴, CHEN Yu^{1,2}

(1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 3. Tourism and Social Administration College, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China; 4. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: High-speed traffic networks, as one of the most important methods of regional linkage, play a critical role in promoting the construction of social and economic spatial structure. Expressway network toll collection provides effective data support for regional traffic flow research, from the perspective of expressway network. The paper, supported by O-D data from toll stations throughout the Jiangsu expressway network during 2014, takes Jiangsu province as an example to conduct research on the characteristics and influencing factors of regional traffic flow. The following results can be obtained: (1) The traffic flow in Jiangsu is quite unbalanced, and the core codes (toll stations and counties) are mainly located in southern Jiangsu, which show a radioactive structure with core codes as the center. (2) The characteristics of distance decay are generally shown in the vehicle flow. The longer the space distance is, the more obvious the decay regularity of distance becomes. The relationship between the vehicle flow and distance is in accord with power law distribution. (3) Permanent residents, economic distribution and expressway mileage can effectively explain regional traffic flow distribution. Specifically, economic development has the greatest influence on the traffic flow in northern Jiangsu; population has local advantages on traffic flow in southern Jiangsu; expressway mileage has a relatively weak negative influence on the traffic flow in southern Jiangsu.

Keywords: traffic flow; influencing factors; expressway network; geographically weighted regression; Jiangsu province