

引用格式: 荣培君, 张丽君, 刘荣增, 等. 开封城市家庭日常出行碳排放空间分异研究[J]. 资源科学, 2018, 40(6): 1307-1318.  
[Rong P J, Zhang L J, Liu R Z, et al. The spatial diversity of household daily travel carbon emissions in Kaifeng[J]. Resources Science, 2018, 40(6): 1307-1318.] DOI: 10.18402/resci.2018.06.20

# 开封城市家庭日常出行碳排放空间分异研究

荣培君<sup>1,2</sup>, 张丽君<sup>2</sup>, 刘荣增<sup>1</sup>, 秦耀辰<sup>2</sup>, 郑智成<sup>2</sup>

(1. 河南财经政法大学旅游与会展学院/城乡协调发展河南省协同创新中心, 郑州 450052;

2. 河南大学环境与规划学院, 开封 475004)

**摘要:** 在气候变化和快速城镇化的背景下可持续交通问题日益受到重视。本文借助大样本调查数据和高分辨率遥感影像, 以城市快速扩张的典型中小城市河南开封市为研究区域, 采用ESDA、GWR等空间统计和分析方法探索城市内部家庭出行碳排放空间差异及影响因素。结果表明: ① 开封市家庭出行碳排放的高值集聚区大多分布于城市的外圈层, 在一定程度上验证了城市蔓延对居民出行碳排放增加的驱动效应; ② 家庭出行碳排放的局部空间差异反映出城市快速扩张区域新建商品房小区职住分离、公共服务供给与城市发展不匹配的现象, 以及城市发展缓慢区域大型购物场所等便民服务设施缺失等问题; ③ 家庭出行碳排放的不均衡性明显, 但收入水平并非决定因素, 小汽车的拥有量、出行距离、出行频率以及机动车出行比重对其有显著的正向影响, 其中教育出行距离比居住距离影响更甚, 说明伴随着家庭对教育的不断重视, 优质教育资源的不均衡发展有待改善; ④ 除男主人出行频率对出行碳排放的影响空间破碎化程度较高外, 其余影响因素的作用强度均明显存在与城市发展的主要方向相一致的东西带状渐变的空间分布规律。

**关键词:** 出行碳排放; 分异机制; 标准家庭; GWR; 影响因素; 开封市

DOI: 10.18402/resci.2018.06.20

## 1 引言

随着城市化进程的加快, 城镇居民汽车保有量的迅速增长, 交通拥堵问题日益严重。交通排放造成的空气污染已成为城市发展中的一个关键问题<sup>[1]</sup>。过去30年, 在经济快速发展的地区交通产生的碳排放以每年10%的速度递增<sup>[2]</sup>, 尤其是在城市快速扩张、城市空间重组剧烈、生活水平显著提高的背景下, 居民的日常出行模式发生着重大变化, 这将对环境和人类健康产生严重影响<sup>[3]</sup>。

城市可持续交通的话题吸引了学术界和管理者的大量关注。各级政府都在想方设法改善城市交通系统, 寻求一系列减少机动车使用和交通碳排放的方法和途径, 以降低空气污染物和温室气体的

排放。硬件方面的努力主要包括燃料质量的提高<sup>[4]</sup>和发动机技术的改进<sup>[5]</sup>、鼓励电动汽车和天然气汽车的使用<sup>[6,7]</sup>以及城市公共交通系统的完善<sup>[8]</sup>。但是, 有学者认为仅靠供给导向的技术解决方案是远达不到预期减排目的的, 可持续的生活方式应是治理环境的一种不可或缺的重要方式<sup>[9]</sup>。因此, 政府在软件方面也采取了大量措施, 包括制定驾驶规定(单双号出行)<sup>[10]</sup>、优化公共服务供给<sup>[11,12]</sup>、节约公交出行时间(如建设快速公交、增加地铁的线路和班次等)<sup>[13]</sup>以及鼓励低碳出行行为(如建立公共自行车、公共电动车系统)<sup>[5,14]</sup>。各种政策的制定都应建立在对居民出行模式和碳排放特征深入了解的基础之上, 才能更具针对性和有效性<sup>[15]</sup>。

收稿日期: 2018-01-04, 修订日期: 2018-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41501588; 41671536); 国家社会科学基金资助项目(17BJL065); 中国博士后科学基金面上项目(2017M622333)。

作者简介: 荣培君, 女, 河南开封人, 博士, 讲师, 主要研究方向为区域可持续发展。E-mail: rongpeijun@126.com

通讯作者: 张丽君, E-mail: zlj7happy@163.com

学术界对城市居民出行碳排放的关注正逐渐从区域视角转向家庭和居住区视角,可持续的生活方式和行为模式受到更广泛的关注。新兴的ICT (Information and Communication Technology)<sup>[16]</sup>、GIS和GPS技术<sup>[17,18]</sup>,以及大数据挖掘的方法<sup>[19,20]</sup>不断推动居民出行时空行为模式和碳排放特征的研究。关于微观尺度出行碳排放影响机理研究,总体上存在两方面的争论。一部分学者倾向于认为居住区建成环境对居民出行行为有较强的锁定效应。城市空间规模扩展、城市功能区的划分、城市交通可达性、超大街区社区的建设存在对居民行为的时空制约<sup>[21-23]</sup>。而这一层面的研究已经从居住地的建成环境扩展到了活动地的建成环境,强调了地理背景的不确定性对居民行为的重要影响<sup>[24]</sup>。另一部分学者认为社会经济因素是居民出行碳排放的主要决定因素。收入、出行目的、出行时间比、出行成本比、家庭成员结构、性别会对居民出行行为模式造成实质性影响<sup>[25-27]</sup>,而新兴的出行方式如日常拼车<sup>[28]</sup>、公共自行车<sup>[29]</sup>等也悄然改变着居民的出行行为。事实上,建成环境和社会经济因素作为影响居民出行的慢变量和快变量,二者综合作用构成居民出行的复杂影响机制已引起了学术界更深层次的关注<sup>[30,31]</sup>。

新时代,中国社会主要矛盾已经转化为人民日益增长的美好生活需要和不均衡不充分发展之间的矛盾,这在居民日常出行方面有突出体现。在住房市场化不断推进,城市空间重构变化剧烈的背景下,城市内部居民碳排放的空间分异规律如何?其背后揭示的城市公共服务供给的不均衡体现在哪些方面?快速城镇化和郊区化的过程中城市规划何以实现低碳宜居交通?如何通过政策引导实现居民的可持续生活方式的分区治理?

基于此,本研究以人地关系和区域可持续发展理论为基础,遵循“测度—格局—机理”的基本研究框架,选取城市空间变化显著、居民生活方式转变明显、城市居住区类型多样、居民碳排放空间分异明显、低碳社区建设诉求强烈的开封市建成区为案例区,构建居住区家庭出行碳排放核算体系,结合大样本问卷调查、高分辨率遥感影像及国民经济数据,使用多元空间统计分析方法,试图揭示精细尺度居民出

行CO<sub>2</sub>排放的空间分布规律,探索其影响机理,为低碳社区构建的政策制定提供理论依据和数据支撑。

## 2 研究区概况、数据来源与研究方法

### 2.1 研究区概况

开封市位于黄河中下游,豫东大平原的中心部位。研究选取开封市建成区为研究区域,主要有以下原因。第一,开封是中原经济区的重要城市,是城市化进程快速发展的典型城市。1985—2015年,开封市的市区人口从62.91万人增长至160.60万人,城镇化率从16.2%上升至44.2%,城镇居民人均可支配收入从0.07万元增长至2.29万元<sup>[32]</sup>。第二,开封历史悠久,在发展变革中形成了不同类型的居住区域。“郑汴一体化”的提出加快了开封市建成区建设,既有高楼林立初成规模的新建开发区,亦有“八朝古都”深厚历史底蕴的老城区,胡同社区、单位社区、政策性住房社区、商品房社区等不同区位、不同社区形态和人文特征的居住区共存。第三,开封属于中小城市,中国中小城市数量众多且将在未来低碳城市建设中发挥主力军作用,但目前的居民碳排放研究对中小城市关注还有待加强。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 出行碳排核算方法

出行能耗的研究长期以来一直是国内外学术界关注的热点,但是目前中国还没有权威机构公布的各类交通工具的能耗系数或碳排放系数。根据IPCC的碳排放清单数据及相关研究<sup>[33]</sup>,除步行和自行车视为零碳排放外,其余形式的居民出行碳排放分为以下两类进行核算:第一类为私家汽车、摩托车,采用消耗燃料量乘以该类燃料的碳排放因子来核算其碳排放量,该方法可避免不同能耗强度的机动车使用同一碳排放强度的问题;第二类为出租车、电动车、单位集体接送车和公共汽车,采取基于机动车行驶距离的方法,即采用机动车行驶里程乘以不同类型机动车的碳排放因子来核算碳排放量<sup>[34]</sup>。需要说明的是因后文根据出行目的分类具体分析时,无法获取居民每一种出行的私家车的燃料费用,因此根据不同目的的出行碳排放采取第二类方法核算后再进行分析。

目前国内外较常用的交通周期为1周,因此本

2018年6月

研究也以此为时间周期。其中家庭每周通勤或上下学碳排放计算公式为:

$$CT_{ws} = \sum_{i=1}^n D_i \times R_i \times T_i \times 2 \times F_i \quad (1)$$

式中  $CT_{ws}$  为家庭每周通勤和孩子上下学产生的碳排放;  $n$  为通勤或上学的人数;  $i$  为通勤或上下学的家庭成员;  $D_i$  为通勤或上学的距离;  $R_i$  为每天往返的次数;  $T_i$  为通勤人员每周工作的天数及学龄成员每周上学的天数;  $F_i$  为各类交通工具的碳排放因子。需要说明的是如果是家里家长上下班途中顺便接送孩子,则根据问卷中设计的接送孩子绕远距离核算孩子上下学的出行碳排放。

家庭每周购物或娱乐出行碳排放计算公式为:

$$CT_{se} = D_i \times R_i \times 2 \times F_i \quad (2)$$

式中  $CT_{se}$  为家庭每周购物、娱乐出行碳排放;  $D_i$  为家庭每周购物或娱乐的距离;  $R_i$  为每周购物或娱乐的次数;  $F_i$  为各类交通工具的碳排放因子。

### 2.2.2 空间自相关

(1)全局空间自相关。为研究家庭生活碳排放在全局空间上可能存在的聚集、离散或随机模式,采用ESDA方法中的全局空间自相关统计量Moran's I度量,计算公式如下:

$$I = \frac{N}{S_o} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X})^2} \quad (3)$$

式中  $i \neq j$ ,  $X_i$  为观测值;  $\bar{X}$  为  $X_i$  的均值;  $N$  为研究对象的数目;  $S_o = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}$ ;  $W_{ij}$  为研究对象  $i$  和  $j$  之间的空间权重矩阵;采用反距离法进行空间关系的概念化,临近为1,不临近为0。

(2)局部空间自相关。在全局空间自相关的基础上,为克服其要求空间过程平稳性的局限性,引入局部空间自相关方法(LISA)探索局部空间单元在相邻区域的自相关特征,计算公式为:

$$I_i = Z_i \sum_{j=1}^n W_{ij} Z_j \quad (4)$$

式中  $Z_i$  和  $Z_j$  分别为空间单元  $i$  和  $j$  上观测值的标准化值;  $W_{ij}$  为空间权重。

### 2.2.3 SDE方法

标准差椭圆(Standard Deviation Ellipse, SDE)

方法能够定量解释地理要素空间分布的方向性、展布性、中心性等,更精确地揭示研究对象的空间分布特征。其中,中心表征要素在二维空间上分布的相对位置,方位角表示其分布的主趋势方向,长轴反映地理要素在主趋势方向上的离散程度。

旋转角计算公式为:

$$\tan \theta = \frac{\left( \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2 \right) + \sqrt{\left( \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2 \right)^2 + 4 \left( \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i \right)^2}}{2 \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i} \quad (5)$$

式中  $\tilde{x}_i$  和  $\tilde{y}_i$  是  $xy$  坐标与平均中心的偏差。

$x$  轴和  $y$  轴的标准差公式为:

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}_i \cos \theta - \tilde{y}_i \sin \theta)^2}{n}} \quad (6)$$

$$\delta_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}_i \sin \theta + \tilde{y}_i \cos \theta)^2}{n}}$$

### 2.2.4 地理加权回归模型

地理加权回归模型(Geographical Weighted Regression, GWR)对经典回归模型进行了改进与加工,充分考虑了影响因素变量的空间位置,容许局部回归的参数估计值,可以更加客观实际地探测数据的空间非平稳性。计算公式为:

$$y_i = \alpha_0(S_i, T_i) + \sum_{j=1}^n \alpha_j(S_i, T_i) x_{ij} + \varepsilon_i \quad (7)$$

式中  $y_i$  为样本点  $i$  出行碳排放的实际观测值;  $(S_i, T_i)$  为第  $i$  个家庭的地理坐标;  $\alpha_0(S_i, T_i)$  为第  $i$  个家庭的回归常数;  $\alpha_j(S_i, T_i)$  为第  $i$  个家庭的第  $j$  个回归参数;  $n$  为独立变量个数;  $x_{ij}$  为独立变量  $x_j$  在第  $i$  个城市的值;  $\varepsilon_i$  为随机误差。

### 2.3 数据来源

研究数据来源包括三类。

(1)问卷调查数据。首先,进行了问卷的预调查。采用入户调查的方式随机发放200份问卷,通过整理和初步分析,修改部分问项并进行相应补充;而后,在2015年和2016年进行大规模样本采集,主要采取分层随机调查的方式,根据建成区的5个行政分区人口分布比例确定发放问卷的比例,在不同区位的公共场所随机发放问卷5000份,收回



4685份,其中一部分问卷因数据缺失、前后矛盾或无法准确定位等原因未能使用,用于分析的问卷为3895份,共涉及14 412位居民,其样本点分布情况如图1所示。问卷内容涉及居民的家庭人口统计特征、出行特征(如出行目的、距离、频次、方式)以及出行认知偏好等。

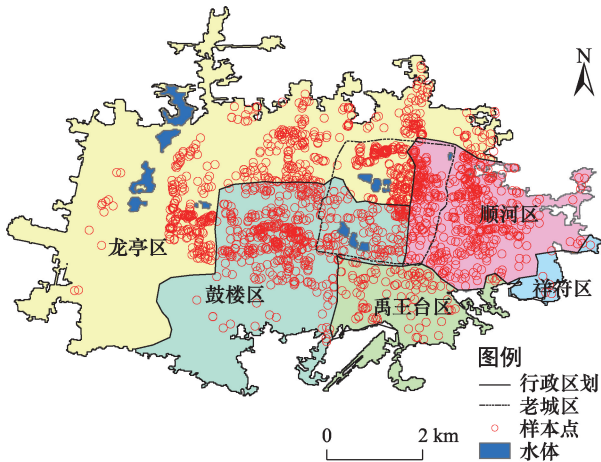


图1 开封市样本点分布示意

Figure 1 Nutus of the spatial distribution of the samples in Kaifeng

(2)社会经济数据,主要包括历年《开封市统计年鉴》<sup>[32]</sup>。

(3)遥感数据,研究采用2016年Google影像提取开封市建成区、水体及道路,并以此为基础进行相关空间分析。

#### 2.4 标准家庭的选取

Glaeser等在研究美国城市发展和居民碳排放时引出标准家庭概念,将其设定为具有固定家庭规模收入水平和户主年龄的家庭<sup>[35]</sup>。李治等采用该概念对全国56个城市家庭碳排放进行了对比分析和影响因素阐释,以探索城市特征对于居民碳排放的纯影响<sup>[36]</sup>。Ye等通过调查厦门14个城镇的1282个标准家庭(3口之家、家庭面积71m<sup>2</sup>,家庭月收入在

2500~4500元,平均年龄在35~45岁),分析城市的自然环境对家庭碳排放的影响<sup>[37]</sup>。为增强样本间的可比性,同时兼顾样本的代表性、居民出行特征和生活方式,本研究的标准家庭是指家庭中有3~15岁的孩子,有1名以上的家长,同时拥有固定的家庭住宅,可以是2代、隔代或3代以上同堂家庭。

### 3 结果及分析

#### 3.1 家庭出行碳排放基本格局

开封市居民每周出行的总碳排放量平均值为19.86kg/户,最大值为342.91kg/户。部分家庭因采用自行车或步行交通方式不产生出行碳排放,零碳排的比例为8.12%。从变异系数来看,出行碳排放的各项变异系数均较大,说明各类出行碳排放的差异较大,离散程度较高。根据各类出行目的将出行碳排放进行分类,探索家庭出行的碳排放结构,发现通勤出行和上下学出行占总出行碳排放的88.11%,分别为67.32%和20.79%,购物和娱乐出行碳排放所占比重相对较小,分别为5.91%和5.98%(表1)。

采用自然断裂点方法将家庭每周出行碳排放量由高到低分为四类,并进行空间可视化处理(图2),结果表明:①家庭出行总碳排放的较高值区散落于城市各个区域,但最高排放等级基本上均位于城市的外圈层,这在一定程度上验证了城市扩张对碳排放增加的正向影响;②家庭出行碳排放的空间分布上存在两个明显的低值密度较大的区域,分别为中心老城区的偏东北区域和老城区西南角外。这两个区域有以下共同特点:第一,分布有较多优质的教育资源,重点小学和幼儿园密集,在教育资源的可达性方面具有较大优势;第二,这些区域属于建成时间较早、各类商业设施较为齐全的区域,在日常生活的便利性方面具有较大的优势;第三,

表1 开封市家庭出行每周碳排放统计描述

Table 1 Main characteristics of the household travel carbon emissions per week in Kaifeng

(kg/周, %)

出行类别	比重	极小值	极大值	均值	标准差	变异系数	零碳比重
通勤	67.32	0.35	271.47	15.65	20.17	1.29	19.10
上下学	20.79	0.14	73.80	5.54	7.06	1.27	34.58
购物	5.98	0.01	22.86	1.56	2.51	1.61	44.07
娱乐	5.91	0.01	44.28	2.31	4.36	1.89	52.56
总出行	100	0.02	342.91	19.86	23.17	1.17	8.12



2018年6月

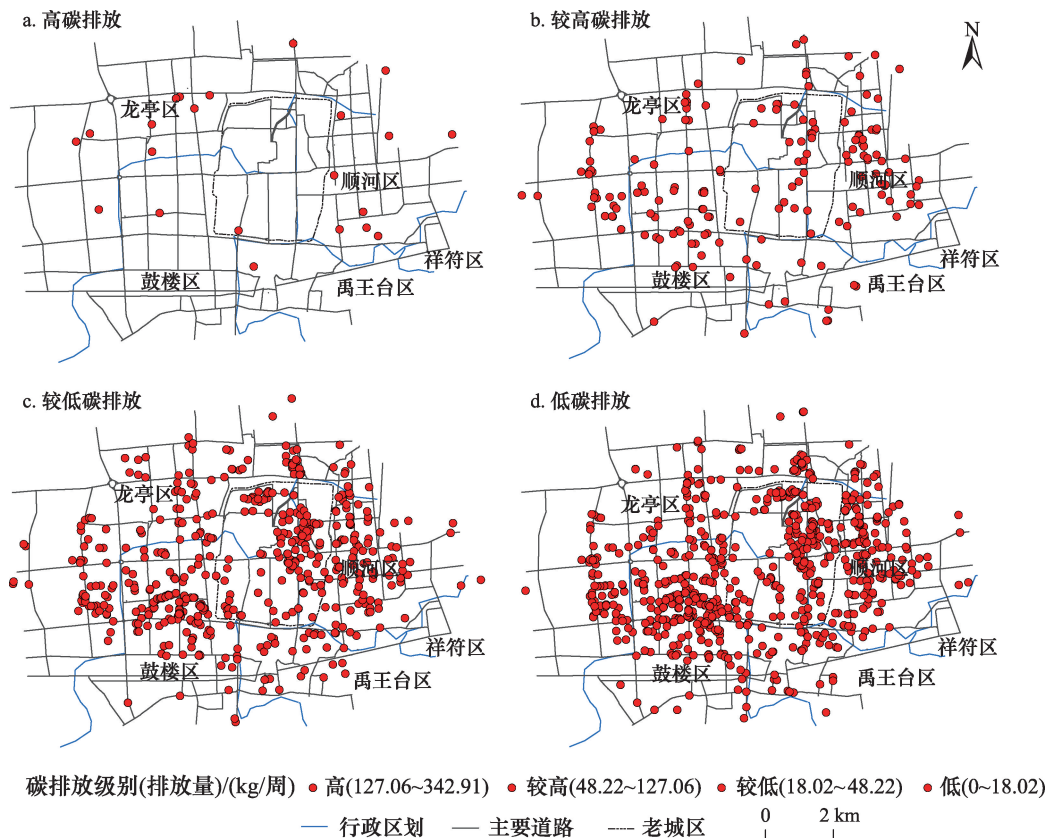


图2 开封市家庭出行总碳排放空间分布示意

Figure 2 Nutus of spatial distribution for household travel carbon emissions in Kaifeng

这些区域的交通相对拥挤,机动车出行并不方便,可以推测这部分家庭可能经济收入并非很高或者机动车拥有量较少和机动车出行概率较小。

### 3.2 全局差异

根据公式(3)计算出家庭生活用能碳排放的全局自相关系数 Global Moran's I,并采用Z值法对其检验,结果如表2所示。居民各类碳排放 Moran's I 值均为正值,其中除家庭娱乐出行碳排放以外,其余的各类用能碳排放的正态统计量Z值均大于0.05的置信水平的临界值(1.96),P值均小于0.05,通过显著性检验。表明了这些种类的家庭碳排放存在一定的空间正相关特性,即碳排放高的家庭趋于临近,碳排放低的家庭也趋于临近。

### 3.3 局部差异

鉴于全局空间自相关的特征很有可能磨灭局部的空间关联特征,有必要引入局部空间自相关方法来揭示家庭出行碳排放的局部空间差异。为使结果的空间展布性更明晰地体现,以LISA分析结

表2 各类家庭碳排放的Moran's I 值统计

Table 2 Estimation of Moran's I for household travel carbon emissions

碳排放种类	Moran's I	Z(I)	P(I)
总交通碳排放	0.073 3	1.998 5	0.033 6
家庭每周通勤碳排放	0.075 3	2.037 9	0.021 1
孩子上下学出行碳排放	0.062 4	6.181 9	0.000 0
家庭购物出行碳排放	0.051 5	5.096 0	0.000 0
家庭娱乐出行碳排放	0.007 1	0.767 4	0.442 8

注:根据实地情况,阈值选取500m,某些要素在指定距离阈值内没有相邻点,根据系统提示将其删除后进行计算。

果的高低分类作为分组字段,使用标准差椭圆法将其高值集聚区(HH)和低值集聚区(LL)分别进行进一步刻画(图3)。

可以发现:

(1)从总碳排放高值集聚的特征椭圆来看,其格局基本上是由上下班和上下学两类所决定。其椭圆面积覆盖了大部分区域,说明离散程度较高,这和城市建成区外圈层存在较多高值集聚区有

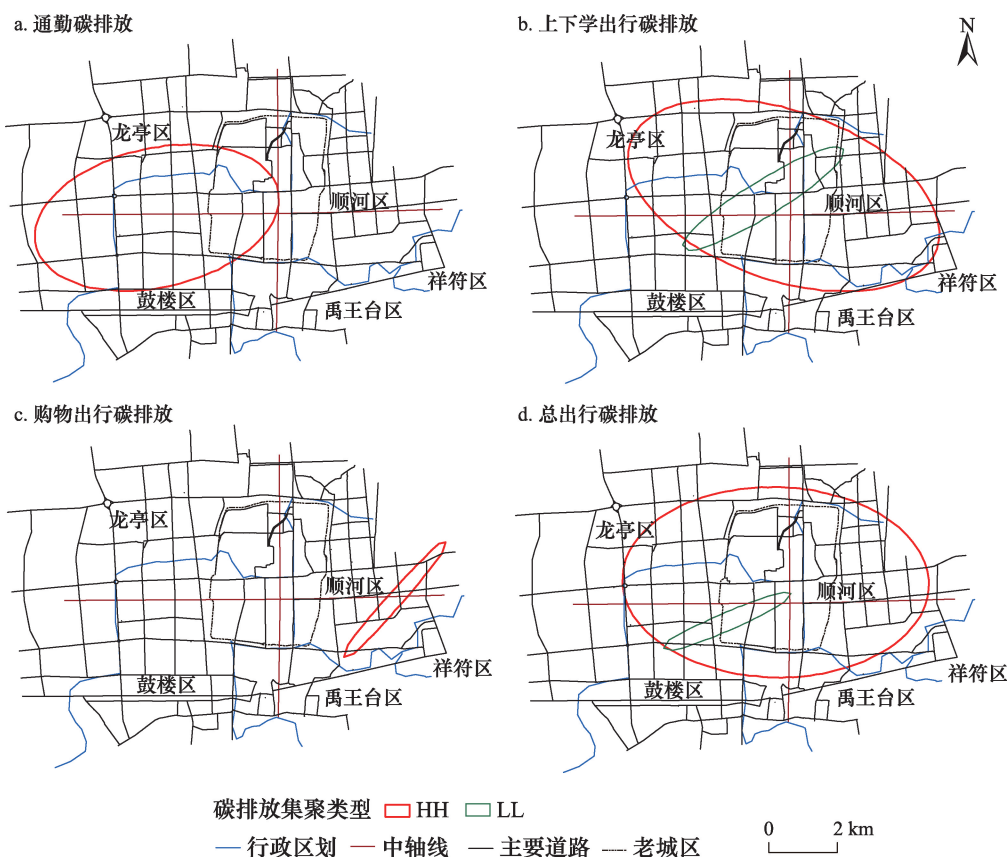


图3 开封市出行碳排放SDE分析结果示意

Figure 3 Nutus of results of standard deviation ellipse for household travel carbon emissions in Kaifeng

关。椭圆呈现“东-西”方向分布,基本是通勤和上下学碳排放椭圆方向角度的中和,与在省会郑州的带动下开封城区向西快速发展的方向一致。

(2)家庭通勤碳排放高值集聚椭圆分布于城市中轴线以西,一方面城市建成区西部的居住区居民职住分离的现象较为凸显,另一方面该区域居民机动车拥有量较高,采取机动车出行的机率较大。

(3)孩子上下学出行碳排放的高值集聚椭圆的离散程度较高,且呈现“西北-东南”分布特征,这与开封市建成区目前西北区域和东南区域优质教育资源缺乏有密切关系。而其低值集聚刚好相反,呈现“东北-西南”分布特征,椭圆面积较小,证明其中心的集聚性更强,也说明了优质教育资源的分布相对集中。从这个现象可以看出,开封市在城市向外扩张的过程中,教育资源的跟进相对滞后。

(4)居民购物出行碳排放只存在高值集聚的标准差椭圆分布。购物出行的特征椭圆面积较小,且

在中轴线以东呈现狭长的“东北-西南”分布,其中心在东西中轴线上。说明城市在郑汴一体化政策引领下经济和基础设施建设都向城市西部偏移,在城市发展有侧重点的情况下,发展相对缓慢的区域(城东的城乡结合地区)缺乏大型的一站式购物中心等便民设施。

## 4 影响因素分析

### 4.1 综合影响机制探索

问卷中涉及的影响居民碳排放的因素主要包括居民的家庭特征(包括家庭人口数、家庭月收入、家庭拥有各类交通工具数量等)、出行距离、出行方式、出行频率和低碳出行认知等。为筛选出其中的主要影响因素并辨别其作用大小和方向,对调查所涉及问项采取逐步回归的方法选择模型,最终家庭出行碳排放影响因素的回归模拟结果如表3所示。从中可以看出,调整后的 $R^2$ 为0.429,回归模型通过F检验。对于大样本的社会经济数据,该结果被认

2018年6月

为具有较好的统计学意义<sup>[38]</sup>。从回归结果来看,各变量均对家庭的出行碳排放产生显著的正向影响,下面进行分类阐释:

家庭特征方面,家庭拥有小汽车的数量对家庭出行碳排放有显著的正向影响,与大量研究结论基本一致。随着社会经济的发展,小汽车的拥有率逐年提高,根据《2016年开封市统计年鉴》<sup>[32]</sup>,2015年开封全市小汽车拥有率达到每百户家庭拥有24辆小汽车,样本中拥有小汽车的家庭占总样本家庭比例的0.35%,证明建成区居民的小汽车拥有量高于全市平均水平。汽车改变了居民的活动空间、生活方式、生活节奏和生活品质,但目前中国的汽车还是以燃烧化石燃料为主,因此小汽车在给居民生活带来便利生活的同时也对人们赖以生存的环境带来了极大的挑战。根据调查,开封市拥有3辆、2辆、1辆小汽车和没有汽车的家庭每周人均出行碳排放分别为0.83kg、0.80kg、0.39kg和0.29kg。从数值的对比可以清晰地看出小汽车对居民出行影响之显著。有意思的是,家庭收入和家庭人口数在逐步回归过程中被剔除,证明二者未对居民出行碳排放产生显著影响。对于收入因素可能的原因在于:一方面,收入高的家庭可能更有条件居住在学区或职住距离较近;另一方面,一些年轻人虽然收入不高,但对小汽车的依赖程度较高。而家庭人口数对户均碳排放并没有显著的正向影响,说明并非家庭人口多的家庭碳排放水平就高,而是采用高碳排放强度的交通工具出行的家庭成员多碳排放水平才

会增高。

出行特征方面,出行距离、出行方式和出行频率对通勤碳排放的影响是被学术界一致所认可的<sup>[24, 26, 34]</sup>。第一,出行距离,主要包括职住距离和教育出行距离,二者均对家庭出行碳排放产生显著的正向作用。而且数据显示,碳排放强度越大的交通工具对应的群体其学住距离越远,因此在距离和出行方式相互依存的作用下,距离的作用会有所凸显。第二,通勤和上下学每天的往返次数对居民出行碳排放也存在显著正向影响。男主人的通勤平均距离远大于女主人,因此出行频率对其碳排放影响的边际效应更大。此外,通勤距离和往返频率有一定的相关性,一般而言,距离越远,往返频率越低。第三,出行方式决定了居民出行所使用的不同的交通工具的碳排放强度,是居民收入水平、生活习惯、节能意识的总和体现。从回归估计结果来看,机动车出行的比率越大,出行碳排放量越高,而且出行方式的选择影响程度较大。

#### 4.2 空间分异机制

为进一步揭示各因素和家庭出行碳排放的关系在空间上的变化,采用地理加权回归进行空间分异机制的探索。结果显示,GWR模型对居民出行碳排放分异格局的解释力度优于全局空间回归模型,方程拟合优度检验值调整后的 $R^2$ 由全局回归模型的0.429提高到0.499。将地理加权回归结果采用反距离加权法进行插值,以更清晰地进行可视化处理(图4)。

表3 家庭出行碳排放影响因素逐步回归结果

Table 3 Results of stepwise regression for influencing factors of household travel carbon emissions

解释变量	变量说明	单位	系数	标准误	显著性
(常量)			-17.025	1.686	0.000
男主人职住距离( $x_1$ )	住所距离男主人工作地点的距离	km	0.591	0.070	0.000
男主人往返次数( $x_2$ )	家庭男主人每天上下班往返的次数	次	5.531	0.821	0.003
女主人职住距离( $x_3$ )	住所距离女主人工作地点的距离	km	1.765	0.041	0.000
女主人往返次数( $x_4$ )	家庭女主人每天上下班往返的次数	次	2.681	0.785	0.011
学住距离( $x_5$ )	住所距孩子学校的距离	km	2.234	0.145	0.000
上学往返次数( $x_6$ )	家里学龄孩子每天上下学往返的次数	次	2.597	0.591	0.000
小汽车数量( $x_7$ )	同一住所家庭成员所拥有小汽车数量	辆	2.285	1.316	0.013
机动出行概率( $x_8$ )	每周机动车出行的次数占总出行次数的比例	%	6.225	2.515	0.013
调整的 $R^2$	0.429				
F检验值	130.896				(sig.=0.000)



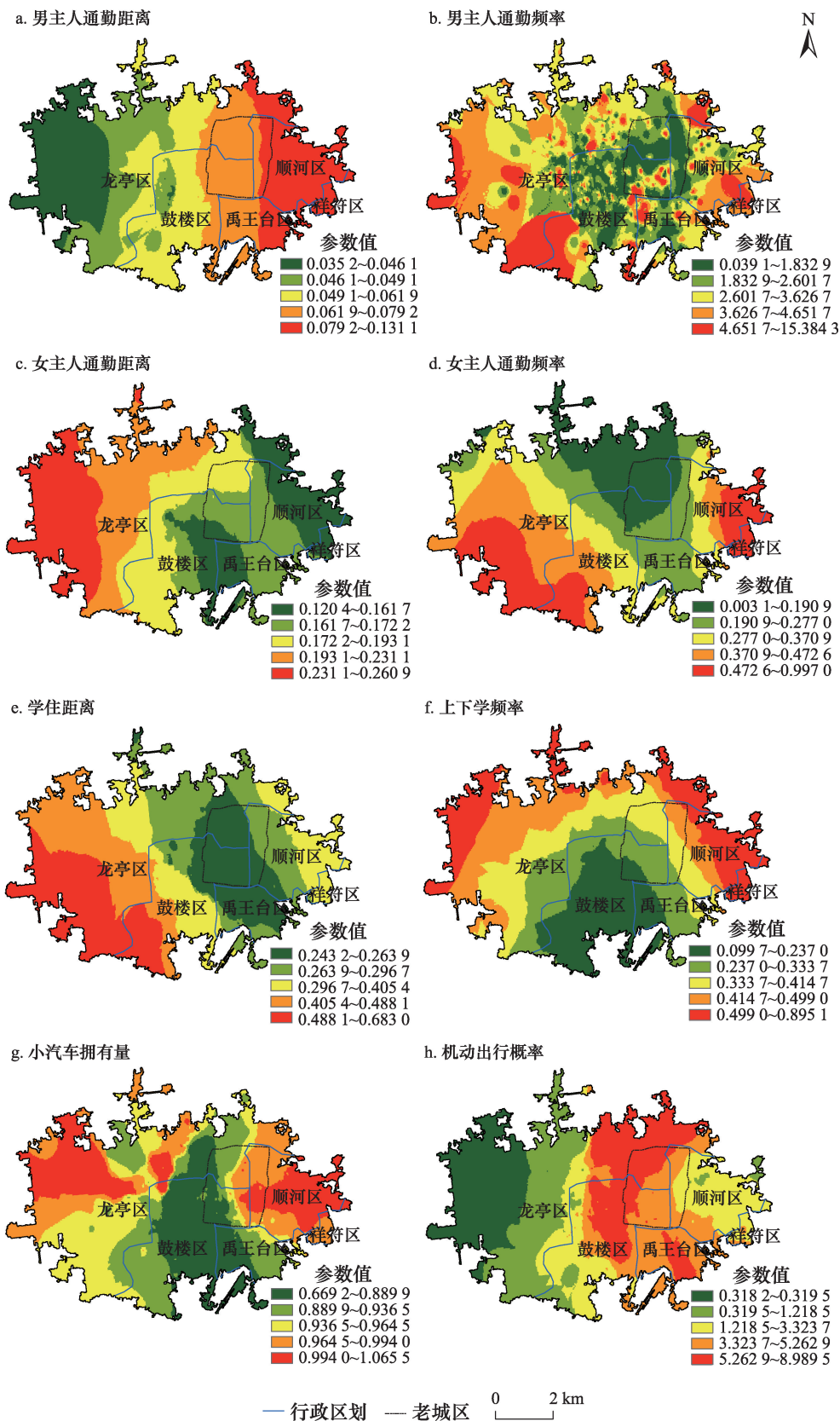


图4 开封市家庭日常出行碳排放GWR参数估计空间分布示意

Figure 4 Nutus of the spatial distribution of regression coefficients of household travel carbon emissions in Kaifeng

2018年6月

总体而言,各因素对家庭出行碳排放影响强度的空间渐进规律明显。其中,职住距离和学住距离对家庭出行碳排放的影响在东西方向上呈带状分布,男主人的通勤距离参数呈现出自西向东递减的趋势,女主人的通勤距离参数恰好相反,由此说明,居民在向西部新城区搬迁以改善居住条件时,对女主人的职住距离较为重视。而学住距离参数的低值区域刚好和老城区范围一致,这与老城区内分布大量的优质资源有较大关联。男主人的通勤频率对家庭出行碳排放的影响破碎化程度相对较高,但大面积的高值区仍然分布在城市的最外圈层。上下学频率对出行碳排放的影响则呈环拱型分布,最北圈层估计值最高,这是因为开封城北区域的优质教育资源数量最少,一般而言每次上下学消费的能源较多,因此上下学频率的影响会更为凸显,而整个建成区的中间南部区域估计值最低的原因在于该区域拥有重点基础教育资源,使多数家庭上下学出行距离控制在步行和自行车能够达到的范围内,因此频率的影响就会削弱。小汽车拥有量对出行碳排放的作用规律是以西城墙周边的带状区域为中心向东西两侧不断加强,这与居住区区位在整个建成区中的拓扑关系紧密相关,即中部通达性较好,即使拥有小汽车,其行驶距离很有可能普遍没有东西边缘区域大,因此影响程度会较低。机动出行概率参数值的高值区域在空间上的西城墙一带,因为这一区域的可达性和公共服务供给相对较好,居民出行相对便利的,出行习惯的差异造成了该区域的估计值较高。

## 5 结论与讨论

### 5.1 结论

从居民日常出行碳排放核算结果来看,居民出行碳排放的极值差异和变异系数较大,验证了交通不均衡性的存在。在出行碳排放结构方面,通勤和上下学产生的碳排放是城市居民出行碳排放的主要构成。而开封作为中小城市的典型代表,与北京、上海等大城市的实证研究相比,其人均出行碳排放水平较低,可以在一定程度上验证城市规模与出行碳排放的正向作用关系。

(1)从居民日常出行碳排放的空间差异来看,居民出行碳排放空间依赖性特征明显,一方面验证

了“自选择”理论在居民选择住区领域的适用性,即伴随着市场力量对城市居住区空间重构影响的增强,相似社会经济属性的家庭会选择相似建成环境的社区;另一方面验证了居住区建成环境对居民的出行行为具有一定的锁定效应,尤其是城市基础设施建设不均衡和滞后发展是造成空间差异的重要因素。其中通勤碳排放的空间差异反映出了在城市扩张过程中,城市外圈层的新建商品房居住区出现了较严重的职住分离现象,对比而言,同样是在郊区化过程中建造的单位家属院可以较好的缓解这一问题。而上下学出行碳排放则反映出城市内部教育资源分布不均衡以及其建设速度滞后于城市扩张的速度,城市的绝大部分优质教育资源依然分布于发展缓慢的老城区,而随着建成区的扩展人口密度不断增大的新开发区教育设施配套不足,优质教育资源紧缺。同时,随着小汽车时代的到来和中国居民对教育的越发重视,一部分家长放弃居住片区内的学校而选择综合评价较好学校亦成为增加出行距离从而导致碳排放增加的一个越来越重要的原因。此外,购物出行碳排放方面的发现在于,大型购物场所的建设受市场导向,其敏感程度优于政府公共服务设施建设,因此,与城市急速扩张方向相反的发展缓慢的城郊区域反而大型购物场所短缺,进而造成居民购物出行距离最长,碳排放增加。

(2)从居民出行碳排放的作用机理来看,社会经济因素主要聚焦于居民的家庭特征、出行距离、出行方式和出行频率方面。汽车普及使居民出行模式发生实质性的变化,而收入并非是家庭出行碳排放的决定性因素。职住距离、教育出行距离、通勤和上下学出行频率、机动车出行概率对家庭出行碳排放有显著的正向影响。其中幼儿园和中小学教育出行距离比成年人职住距离对居民出行碳排放的影响更大,由此凸显了合理布局优质基础教育资源的重要性。在空间分异机制方面,除男主人出行频率对出行碳排放的影响空间破碎化程度较高外,其余影响因素的作用强度均存在明显的东西方向上空间渐进规律,这与城市形态和扩展的主要方向相一致。

## 5.2 讨论

综上,可以从以下方面进行低碳交通的分区构建和治理:

(1)城市郊区化区域提倡建设单位家属院或单位团购住宅,以解决职住分离问题;

(2)城市教育资源应及时跟进城市扩张,在居民向外圈层迁移的过程中,优质教育资源可部分外迁或增建分校,以解决教育资源不均衡和滞后问题;

(3)城市发展缓慢区域,应保障居民拥有购物、娱乐的基础公共服务供给设施,以解决居民低碳宜居问题;

(4)老城区土地利用混合度较高区域,应营造步行环境,加大低碳出行的宣传力度,而城市东西最外圈层的居住区则可以提高2辆以上的停车位价格或租金,并配套完善的公交系统,从而提供低碳出行的有利条件。

本研究从居民出行碳排放视角探讨了城市空间拓展和出行机动化对城市环境的影响,为城市可持续发展及居民低碳出行方式的构建提供了理论和实践支撑。但研究也存在一定的局限性:一方面,因数据获取难度较大,本研究仅分析了时间截面的空间分异规律,未来若实现家庭行为时间维度的跟踪调查或将得出更丰富的结论;另一方面,研究虽然在一定程度上验证了居住区建成环境对出行碳排放的影响,但社区形态、家庭特征和行为偏好间的多层嵌套影响机制仍需进一步探索。

## 参考文献(References):

- [1] 秦耀辰,荣培君,杨群涛,等.城市化对碳排放影响研究进展[J].地理科学进展,2014,33(11): 1526-1534. [Qin Y C, Rong P J, Yang Q T, et al. Research progress of impact of urbanization on carbon emissions [J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(11): 1526-1534.]
- [2] Yang S, He L Y. Fuel demand, road transport pollution emissions and residents' health losses in the transitional China[J]. *Transportation Research Part D*, 2016, 42: 45-59.
- [3] 马海涛,康雷.京津冀区域公路客运交通碳排放时空特征与调控预测[J].资源科学,2017,39(7): 1361-1370. [Ma H T, Kang L. Spatial and temporal characteristics and prediction of carbon emissions from road traffic in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Resources Science*, 2017, 39(7): 1361-1370.]
- [4] Han H, Geng Y, Wang H, et al. Regional disparity of urban passenger transport associated GHG (greenhouse gas) emissions in China: a review[J]. *Energy*, 2014, 68(8): 783-793.
- [5] Peng B B, Fan Y, Xu J H. Integrated assessment of energy efficiency technologies and CO<sub>2</sub> abatement cost curves in China's road passenger car sector[J]. *Energy Conversion & Management*, 2016, 113: 195-212.
- [6] Cai H, Jia X, Chiu A S F, et al. Siting public electric vehicle charging stations in Beijing using big-data informed travel patterns of the taxi fleet[J]. *Transportation Research Part D*, 2014, 33: 39-46.
- [7] Cai H, Xu M. Greenhouse gas implications of fleet electrification based on big data-informed individual travel patterns[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(16): 9035-9043.
- [8] Wang J J, Liu Q. Understanding the parking supply mechanism in China: a case study of Shenzhen[J]. *Journal of Transport Geography*, 2014, 40: 77-88.
- [9] Barr S, Gilg A. Sustainable lifestyles: Framing environmental action in and around the home[J]. *Geoforum*, 2006, 37(6): 906-920.
- [10] Wang Q, Feng X, Liu Y, et al. Urban travel mode split optimization based on travel costs[J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2014, 138: 706-714.
- [11] Asamer J, Reinthaler M, Ruthmair M, et al. Optimizing charging station locations for urban taxi providers[J]. *Transportation Research Part A*, 2016, 85: 233-246.
- [12] Tu W, Li Q, Fang Z, et al. Optimizing the locations of electric taxi charging stations: a spatial-temporal demand coverage approach [J]. *Transportation Research Part C*, 2016, 65: 172-189.
- [13] 秦萍,陈颖翔,徐晋涛,等.北京居民出行行为分析:时间价值和交通需求弹性估算[J].经济地理,2014,34(11): 17-22. [Qin P, Chen Y A, Xu J T, et al. Travel behavior analysis for the residents in Beijing: value of time and travel demand elasticity estimates[J]. *Economic Geography*, 2014, 34(11): 17-22.]
- [14] Wang Z, Chen F, Fujiyama T. Carbon emission from urban passenger transportation in Beijing[J]. *Transportation Research Part D*, 2015, 41: 217-227.
- [15] Tang T Q, Xu K W, Yang S C, et al. Impacts of SOC on car-following behavior and travel time in the heterogeneous traffic system[J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2016, 441: 221-229.
- [16] Lécué F, Tallei-Diotallei S, Hayes J, et al. Smart traffic analytics in the semantic web with STAR-CITY: scenarios, system and lessons learned in Dublin City[J]. *Web Semantics Science Services & Agents on the World Wide Web*, 2014, 28(2): 26-33.
- [17] Calegari G R, Celino I, Peroni D. City data dating: emerging affinities between diverse urban datasets[J]. *Information Systems*, 2015, 57: 223-240.
- [18] 曹小曙,杨文越,黄晓燕.基于智慧交通的可达性与交通出行碳



2018年6月

- 排放-理论与实证[J]. 地理科学进展, 2015, 34(4): 418-429. [Cao X S, Yang W Y, Huang X Y. Accessibility and CO<sub>2</sub> emissions from travel of smart transportation: theory and empirical studies[J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(4): 418-429. ]
- [19] Togawa T, Fujita T, Liang D, *et al.* Integrating GIS databases and ICT applications for the design of energy circulation systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 114: 224-232.
- [20] Luo X, Dong L, Dou Y, *et al.* Analysis on spatial-temporal features of taxis' emissions from big data informed travel patterns: a case of Shanghai, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 142: 926-935.
- [21] 赵莹, 柴彦威, 关美宝, 等. 中美城市居民出行行为的比较-以北京市与芝加哥市为例[J]. 地理研究, 2014, 33(12): 2275-2285. [Zhao Y, Chai Y W, Guan M B, *et al.* Comparison of urban residents' travel behavior in China and the U. S. : a case study between Beijing and Chicago[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(12): 2275-2285. ]
- [22] 杨上广, 王春兰, 刘淋. 上海家庭出行碳排放基本特征、空间模式及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(6): 148-153. [Yang S G, Wang C L, Liu L. Study on basic characteristics, spatial pattern and influence factors of Shanghai family commuting carbon emission[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(6): 148-153. ]
- [23] Ding C, Wang D, Liu C, *et al.* Exploring the influence of built environment on travel mode choice considering the mediating effects of car ownership and travel distance[J]. *Transportation Research Part A Policy & Practice*, 2017, 100: 65-80.
- [24] 柴彦威, 谭一洺. 中国西部城市居民时空行为特征研究-以西宁市为例[J]. 人文地理, 2017, 32(4): 37-44. [Chai Y W, Tan Y M. Examining the space-time behavior patterns of residents in cities of the western China: evidence from Xining[J]. *Human Geography*, 2017, 32(4): 37-44. ]
- [25] 徐婷, 蓝臻, 胡大伟, 等. 出行成本对居民出行方式的影响[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(1): 91-97. [Xu T, Lan Z, Hu D W, *et al.* Influence of trip cost on trip mode for resident[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2013, 13(1): 91-97. ]
- [26] Wang Z, Liu W. Determinants of CO<sub>2</sub> emissions from household daily travel in Beijing, China: individual travel characteristic perspectives[J]. *Applied Energy*, 2015, 158: 292-299.
- [27] Ma J, Mitchell G, Heppenstall A. Exploring transport carbon futures using population microsimulation and travel diaries: Beijing to 2030[J]. *Transportation Research Part D*, 2015, 37: 108-122.
- [28] Bruck B P, Incerti V, Iori M, *et al.* Minimizing CO<sub>2</sub> emissions in a practical daily carpooling problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2017, 81: 40-50.
- [29] 梁凯丽, 曹小曙, 黄晓燕. 基于知识图谱的公共自行车出行研究进展[J]. 地理科学进展, 2017, 36(6): 762-773. [Liang K L, Cao X S, Huang X Y. Research progress on bike sharing travel based on cite space[J]. *Progress in Geography*, 2017, 36(6): 762-773. ]
- [30] 周素红, 宋江宇, 宋广文. 广州市居民工作日小汽车出行个体与社区双层影响机制[J]. 地理学报, 2017, 72(8): 1444-1457. [Zhou S H, Song J Y, Song G W. Examining the dual-levels impact of neighborhood and individual variables on car use on weekdays in Guangzhou[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(8): 1444-1457. ]
- [31] Reichert A, Holz-Rau C, Scheiner J. GHG emissions in daily travel and long-distance travel in Germany: social and spatial correlates[J]. *Transportation Research Part D*, 2016, 49: 25-43.
- [32] 开封市统计局. 开封市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000-2016. [Kaifeng Statistical Bureau. Kaifeng City Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2000-2016. ]
- [33] 黄经南, 高浩武, 韩笋生. 道路交通设施便利度对家庭日常交通出行碳排放的影响-以武汉市为例[J]. 国际城市规划, 2015, 30(3): 97-105. [Huang J N, Gao H W, Han S S. The effect of traffic facilities accessibility on household commuting caused carbon emission: a case study of Wuhan City[J]. *China Urban Planning International*, 2015, 30(3): 97-105. ]
- [34] 马静, 柴彦威, 刘志林. 基于居民出行行为的北京市交通碳排放影响机理[J]. 地理学报, 2011, 66(8): 1023-1032. [Ma J, Chai Y W, Liu Z L. The mechanism of CO<sub>2</sub> emissions from urban transport based on individuals' travel behavior in Beijing[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(8): 1023-1032. ]
- [35] Glaeser E L, Kahn M E. The greenness of cities: Carbon dioxide emissions and urban development[J]. *Nber Working Papers*, 2008, 67(3): 404-418.
- [36] 李治, 李培, 郭菊娥, 等. 城市家庭碳排放影响因素与跨城市差异分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(10): 87-94. [Li Z, Li P, Guo J E, *et al.* Impact factors estimation and research on the differences across cities of residential CO<sub>2</sub> emissions in Chinese major cities[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2013, 23(10): 87-94. ]
- [37] Ye H, He X Y, Song Y, *et al.* A sustainable urban form: the challenges of compactness from the viewpoint of energy consumption and carbon emission[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 93: 90-98.
- [38] Allinson D, Irvine K N, Edmondson J L, *et al.* Measurement and analysis of household carbon: the case of a UK city[J]. *Applied Energy*, 2016, 164: 871-881.

## The spatial diversity of household daily travel carbon emissions in Kaifeng

RONG Peijun<sup>1,2</sup>, ZHANG Lijun<sup>2</sup>, LIU Rongzeng<sup>1</sup>, QIN Yaochen<sup>2</sup>, ZHENG Zhicheng<sup>2</sup>

(1. *Tourism and Exhibition College of Henan University of Economics and Law/ Collaborative Innovation Center on Urban and Rural Harmonious Development of Henan Province, Zhengzhou 450052, China;*

2. *School of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China)*

**Abstract:** In the context of global warming and rapid urbanization, sustainable traffic problems are receiving more attention. We took the city of Kaifeng as a case study as it is a typical small to medium-sized city in China. Using large sample survey data, high-resolution remote sensing images, spatial autocorrelation analysis, standard deviation ellipse analysis and geographical weighted regression we studied the spatial characteristics and influencing factors of daily travel carbon emissions. We found that high-value agglomeration areas of household travel carbon emissions were observed in new urban development zones. Built-up areas are expanding faster in the outer layers of the city, and to some extent validated the driving effect of urban sprawl on the increasing carbon emissions of residents. Spatial differences in household travel carbon emissions reflected living separation phenomenon and was serious in the new commercial housing community in rapid urban expansion areas. Public service supply did not match urban development and slow development areas lack convenient service facilities such as one-stop shopping places. Imbalance in family travel carbon emissions is significant, but income is not a determining factor and travel to places of education has even more influence than the distance to employment. The lagging and uneven development of education resources is needed to improve the family's constant attention to education. The coefficient of the male host job-live distance has a higher space fragmentation degree. The effect strength of other factors is obvious in the spatial distribution pattern of zonal gradients, consistent with the main direction of urban development.

**Key words:** travel carbon emission; differentiation mechanism; standard family; GWR; influencing factors; Kaifeng City