



# 武汉市出租车轨迹二氧化碳排放的 时空模式分析

贾涛<sup>1</sup> 李琦<sup>1</sup> 马楚<sup>2</sup> 李雨芊<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

<sup>2</sup> 湖北省测绘工程院,湖北 武汉,430072

**摘要:**车辆尾气是道路交通二氧化碳(CO<sub>2</sub>)排放的重要来源,目前的研究主要集中在区域CO<sub>2</sub>排放清单的计算和分析上,鲜有从微观层面上进行CO<sub>2</sub>排放的反演分析。采用微观尾气排放模型对出租车行程轨迹的CO<sub>2</sub>排放量进行定量反演,进而从点、线、面3个粒度对武汉市出租车行程轨迹CO<sub>2</sub>排放的时空模式进行分析。研究表明,利用出租车轨迹可以有效地反演出出租车CO<sub>2</sub>排放量,并发现其不同日期和时段具有明显的规律性。通过时空聚类技术发现了点粒度下的出租车CO<sub>2</sub>排放的类簇数目存在一定的时空变化规律,采用数据场模型展示了线粒度下的道路路段出租车CO<sub>2</sub>排放强度存在明显的时空分布规律,利用时空自相关技术揭示了面粒度下的区域出租车CO<sub>2</sub>排放量具有较高的时空正相关性。研究成果可以为城市减排措施制定等提供辅助支持。

**关键词:**出租车轨迹数据;二氧化碳排放;综合尾气排放模型;时空分布格局

**中图分类号:**P208

**文献标志码:**A

随着城市社会经济的发展,城市交通产生的大量二氧化碳(CO<sub>2</sub>)使得城市环境污染问题越来越严峻。目前国内外对交通CO<sub>2</sub>排放的研究主要集中在区域CO<sub>2</sub>排放清单的估算、时空分布规律研究及其排放政策制定等方面<sup>[1-2]</sup>。研究采用的宏观CO<sub>2</sub>排放估算模型包括:计算道路运输排放量的计算机程序(computer programme to calculate emissions from road transport, COPERT)<sup>[3]</sup>、国际汽车排放(international vehicle emission, IVE)和综合移动源排放(motor vehicle emission simulator model, MOVES)模型<sup>[4]</sup>。文献[5]采用MOVES模型研究了海口市机动车的尾气排放因子;文献[6]利用IVE模型计算分析了2004年上海市高排放机动车的排放总量;文献[7]采用COPERT模型建立了我国1980—2005年的排放清单;文献[8]采用COPERT模型对我国广东省的污染物排放清单进行计算,并对比分析了珠三角与非珠三角区域污染物排放的时空差异;文献[9]论述了我国CO<sub>2</sub>排放的现状和发展趋势;文献

[10]研究了我国车辆温室气体排放清单的能源政策与控制问题。

随着无线通讯技术、卫星定位技术和互联网技术的发展,便携式全球定位系统(Global Positioning System, GPS)和车载GPS等具有空间定位功能的设备得到普及,产生大量的轨迹数据<sup>[11]</sup>。这些轨迹数据记录了人们的日常活动,蕴含着城市交通状况和人们出行规律的信息,具有时空动态性等特点<sup>[12-14]</sup>。轨迹数据提供了一种定量反演出行CO<sub>2</sub>排放量的新思路,因此,对轨迹数据中的CO<sub>2</sub>进行定量反演并对其时空模型进行精细化研究成为一个重要的研究内容。相关研究对交通规划管理和智慧城市发展有重要的意义<sup>[15]</sup>。

目前,国内外利用海量出租车轨迹数据计算反演CO<sub>2</sub>排放量,进而对其时空模式进行分析的研究较少<sup>[16]</sup>。相关研究主要集中在采用微观尾气排放模型方面,如综合尾气排放模型(comprehensive modal emission model, CMEM)<sup>[17-18]</sup>。文

收稿日期:2018-10-23

项目资助:国家自然科学基金(41401453)。

第一作者:贾涛,博士,副教授,主要从事地理信息系统及科学、时空轨迹数据分析与挖掘、复杂网络分析与建模以及人类动力学研究。

tao.jia@whu.edu.cn

通讯作者:马楚,硕士,工程师。machu0123@163.com

献[19]建立了北京市客运交通排放量的计算方法;文献[20]从微观视角研究了郑州市居民交通CO<sub>2</sub>排放;文献[21]利用瑞典达拉纳地区的志愿者轨迹数据反演CO<sub>2</sub>排放量,研究了该地区商业设施的低碳选址问题;文献[22]对上海市出租车轨迹数据进行计算,得到其能耗、排放及其时空分布特征。

由此可见,国内外文献针对道路交通CO<sub>2</sub>排放的研究侧重于宏观层面排放清单的计算分析,而从微观层面利用车辆轨迹数据进行CO<sub>2</sub>排放反演计算的研究较少。对道路交通CO<sub>2</sub>排放的时空模式分析大多集中在区域面粒度,且研究区域主要是北京、上海等一线城市。针对这一研究现状,本文尝试采用微观尾气排放模型反演出租车行程轨迹中的CO<sub>2</sub>排放量,并从轨迹点、道路线段、城市区域3个粒度,深入分析武汉市出租车行程轨迹的CO<sub>2</sub>排放量的时空模式。研究结果将为减排策略制定、出租车调度管理、基础设施优化选址和低碳出行等提供决策支持。

## 1 出租车行程轨迹CO<sub>2</sub>排放计算和时空模式分析方法

### 1.1 出租车行程轨迹提取方法

出租车行程轨迹由运行状态一致的连续轨迹点构成。根据运行状态的取值,可以分为载客(重车)出租车行程轨迹与非载客(空车)出租车行程轨迹。出租车行程轨迹可以反映出出租车的启停状态,是采用微观尾气排放模型反演轨迹点CO<sub>2</sub>排放量的基础。因此,本文基于轨迹点的载客状态打断出租车轨迹,提取出租车行程轨迹,如图1所示。

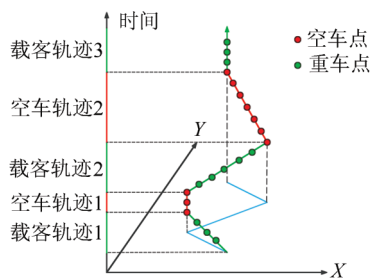


图1 出租车轨迹示意图

Fig.1 Sketch Map of Taxi Trajectory

采用探索性时空统计方法对每辆出租车的连续轨迹数据建模,根据轨迹点的运行状态字段(0代表空车,1代表重车),识别出租车轨迹数据的乘客上车点和下车点,将连续的出租车轨迹打

断成若干个出租车行程轨迹,提取出每一条出租车轨迹所包含的所有出租车行程轨迹,并将每一辆车的载客行程和非载客行程按照时间顺序存储。

### 1.2 轨迹CO<sub>2</sub>排放计算方法

本文采用CMEM模型反演出租车行程轨迹中轨迹点的CO<sub>2</sub>排放量。模型通过输入车辆参数和模型参数,模拟计算车辆每秒尾气排放量和油耗。研究表明CMEM模型在尾气排放计算上具有可用性<sup>[23]</sup>。

武汉市出租车轨迹数据的采样时间间隔主要为10 s和60 s,其中10 s间隔的轨迹点占64.7%。为了保证CO<sub>2</sub>排放计算的精度,选取时间间隔为10 s的出租车行程轨迹作为研究对象。对轨迹点处的车速进行三次样条插值<sup>[24]</sup>,得到每条出租车行程轨迹每秒的速度值。此外,武汉市出租车型号(车型:爱丽舍;燃油类型:天然气/汽油;排放控制装置:三元催化剂;质量:1 496 kg;排量:1.6 L)属于CMEM模型中第6类车辆(基本参数:三元催化剂,电喷,总行驶距离小于80 000 km,功率/质量小于0.039 kW/kg)。

将出租车行程轨迹的微观行驶数据(速度、时间、载客状态)和车辆属性数据(车辆类别)输入到CMEM模型中,得到出租车行程轨迹中每个轨迹点的CO<sub>2</sub>排放量和整个行程的CO<sub>2</sub>排放总量。结果显示武汉市出租车的CO<sub>2</sub>排放因子为523.96 g/km,与实测值498.13 g/km相近<sup>[25]</sup>,偏差在5%以内,一定程度上验证了CMEM模型对武汉市出租车行程轨迹CO<sub>2</sub>排放计算的可靠性。

### 1.3 时空模式研究方法

出租车行程轨迹CO<sub>2</sub>排放的时空模式分析是本文的研究重点。现有研究大多从区域面的粒度上进行分析<sup>[6-9]</sup>,缺乏对其时空模式的全面深入分析,本文从点、线、面3个粒度进行整体分析。

点粒度分析就是以出租车行程轨迹点CO<sub>2</sub>排放为基本分析单元,研究其时空聚类规律。本文采用基于密度的空间聚类(density-based spatial clustering of applications with noise, DB-SCAN)算法<sup>[26]</sup>,按照出租车行程轨迹点CO<sub>2</sub>排放量的高低进行时空聚类,探索聚类簇的时空变化规律。

线粒度分析是以道路线段的出租车CO<sub>2</sub>排放量为基本分析单元,研究其时空分布规律。本文

利用出租车行程轨迹点 CO<sub>2</sub> 排放量,采用数据场模型<sup>[27]</sup>与核密度插值方法,计算城市道路线段的出租车 CO<sub>2</sub> 排放量,探索城市路网中出租车 CO<sub>2</sub> 排放强度的时空分布规律。

面粒度分析是以面域出租车 CO<sub>2</sub> 排放量为基本单元,研究其时空自相关规律。本文采用时空自相关模型,一方面将研究区域作为整体,对区域出租车 CO<sub>2</sub> 排放量在不同日期进行全局时空自相关分析;另一方面将研究区域划分为格网单元,对格网单元内出租车 CO<sub>2</sub> 排放量在不同日期和时段进行局部时空自相关分析。

### 1.3.1 DBSCAN 密度聚类

DBSCAN 是基于密度的聚类算法,可以识别并处理噪声点,发现任意形状的簇。其基本思想是通过输入所有轨迹点的集合,对目标轨迹点进行聚类,判断该点是否为核心点,若该点为核心点,则找出该点邻域中的所有直接密度可达点,然后通过直接密度可达点的传递闭包找到各个核心点的所有密度可达点,从而得到密度相连点的最大集合,并将此定义为一个簇,直到所有轨迹点都处理完毕。

### 1.3.2 数据场模型

数据场是物体之间的相互作用在数域空间的体现,将数据场的理论应用于出租车行程轨迹 CO<sub>2</sub> 排放分布模式研究中,可以模拟交通状况导致的 CO<sub>2</sub> 排放强度变化。

本文利用轨迹数据场来描述轨迹点之间的空间相关性。数据场中任意一点  $x$  的势值可认为是与之相关的所有点在这一点产生的势值累计之和,即

$$\phi(x) = \sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{\|x-x_i\|^2}{\sigma}\right) \cdot m_i \quad (1)$$

式中,  $\|x-x_i\|$  代表空间位置  $x$  与轨迹点  $x_i$  之间的欧氏距离;  $m_i$  代表  $x_i$  处的瞬时 CO<sub>2</sub> 排放量;  $\sigma$  代表相邻轨迹点的影响程度。

### 1.3.3 时空自相关模型

本文选取了 Moran's I 作为 CO<sub>2</sub> 排放全局自相关指标,用来衡量整个研究区域内不同日期出租车行程轨迹 CO<sub>2</sub> 排放之间的空间自相关性。存在  $n$  个轨迹点的情况下,全局 Moran's I 指数的定义为:

$$I = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}\right) \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中,  $x_i$  为第  $i$  个轨迹点的 CO<sub>2</sub> 排放值;  $\bar{x}$  为  $x_i$  的平均值;  $w_{ij}$  为空间权重矩阵,表示所有轨迹点之间的拓扑关系。

本文选用局部 Moran's I 指数来衡量格网空间下的 CO<sub>2</sub> 排放时空自相关性。存在  $n$  个格网单元的情况下,第  $i$  个格网单元的局部 Moran's I 指数计算如下:

$$I_i = \frac{g_i - \bar{g}}{S^2} \sum_{j=1}^n w_{ij} (g_j - \bar{g}) \quad (3)$$

式中,  $g_i$  为第  $i$  个格网单元的 CO<sub>2</sub> 排放值;  $S^2$  表示  $g_i$  的方差;  $w_{ij}$  为空间权重矩阵,表示格网单元之间的拓扑关系;  $\bar{g}$  为平均排放值。

## 2 武汉市出租车行程轨迹 CO<sub>2</sub> 排放时空模式实例分析

### 2.1 研究区域和数据

本文研究区域为武汉市,数据采用出租车行驶产生的轨迹数据和道路网数据。由于出租车轨迹数据存在一定的时空误差,本文首先对轨迹数据进行异常值清理和地图匹配等预处理。

#### 2.1.1 武汉市出租车轨迹数据

轨迹数据由武汉市 8 000 多辆出租车上的 GPS 接收机采集,包含 2015 年 2 月 1 日至 2 月 15 日共 15 d 的轨迹点,每一个轨迹点记录含有时间、经纬度、速度、方向、运行状态(分为空车和重车)等属性信息。轨迹数据采集全天 24 h 不间断,因此,一条出租车轨迹由研究期间内的一系列按照时间先后顺序排列的轨迹点构成。

受出租车车载 GPS 精度的影响,轨迹数据存在一定的空间误差。为保证 CO<sub>2</sub> 排放时空模式研究的准确性,首先剔除了轨迹数据中的异常数据,然后设置 15 m 缓冲区将轨迹数据与武汉市道路网进行地图匹配<sup>[28]</sup>,结果如图 2 所示。

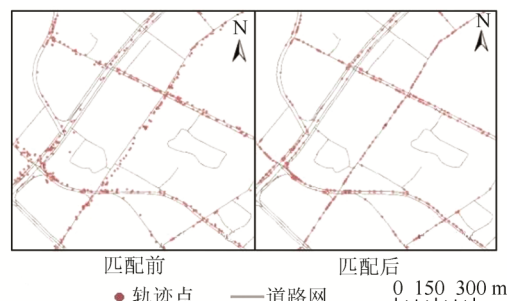


图2 轨迹数据与路网匹配

Fig.2 Matching the Trajectory Data to the Road Network



### 2.1.2 武汉市道路网数据

武汉市道路网数据包含丰富的几何和属性信息,具备完整的拓扑结构,由主干道、次干道和支路组成,包含7万多条道路和5万多个道路节点。本文中,武汉市道路网主要用于线粒度下的出租车行程轨迹的CO<sub>2</sub>排放量的时空分布模式分析。

### 2.2 出租车行程轨迹CO<sub>2</sub>排放的基本统计

图3显示的是2015年2月出租车行程轨迹的CO<sub>2</sub>单日排放量。可以看到,研究采用的6 000辆出租车的单日CO<sub>2</sub>排放总量为 $1.6 \times 10^5 \sim 2.6 \times 10^5$  kg,其中单辆出租车日均CO<sub>2</sub>排放量为27~41 kg,与实际情况相符(32~40 kg)。此外,统计结果显示,休息日、现代中国销售商业热捧的2月14日(国外的圣瓦伦丁节)的出租车CO<sub>2</sub>排放总量明显高于工作日。

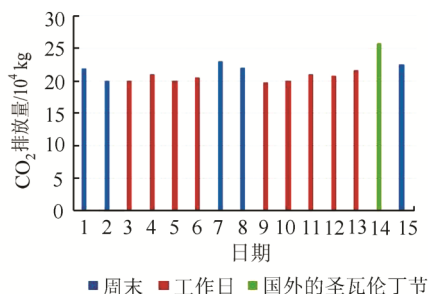


图3 出租车行程轨迹的CO<sub>2</sub>单日排放总量

Fig.3 Total Amount of Carbon Dioxide Emissions from Taxi Trajectory per Day

图4显示的是出租车行程轨迹在2月1日(周末)、6日(工作日)、14日(国外的圣瓦伦丁节)的CO<sub>2</sub>小时排放量。可以看到,出租车行程轨迹的CO<sub>2</sub>小时排放量在这3天具有不同的分布规律。如国外的圣瓦伦丁节晚间出租车行程轨迹的CO<sub>2</sub>排放量明显偏高,特别是在23:00出现回升;工作日则是早上8:00、晚间18:00左右出租车行程轨迹的CO<sub>2</sub>排放量出现明显峰值。

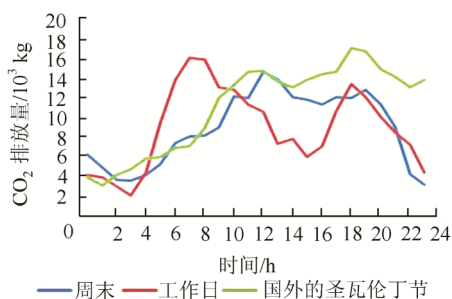


图4 周末、工作日、国外的圣瓦伦丁节出租车行程轨迹的CO<sub>2</sub>小时排放量

Fig.4 Carbon Dioxide Emissions from Weekend, Working Day and the Valentine's Day

### 2.3 出租车行程轨迹CO<sub>2</sub>排放的时空模式分析

#### 2.3.1 点粒度下的出租车行程轨迹的CO<sub>2</sub>排放聚类簇的时空变化分析

将国外的圣瓦伦丁节、工作日、周末分别对应的4个典型时段(如图4中不同曲线所对应的高峰时段、低峰时段等)中具有较高CO<sub>2</sub>排放量(排放量 $E > 0.5$  g)的出租车轨迹点进行DB-SCAN聚类,聚类结果如图5所示。从图5可以看出:

1)不同日期类型和典型时段中的轨迹点聚类簇主要分布在特定区域,如交通主干道、商圈、景点、高校、火车站等地。

2)不同典型时段轨迹点聚类簇的数量存在显著差异。高峰时段形成聚类簇的数目比低峰时段多,且聚类簇中的轨迹点数量也更多。

3)不同日期类型轨迹点聚类簇的分布存在差异。在国外的圣瓦伦丁节,人们出行强度达到顶峰,一整天都处于高度聚集状态,聚类簇的数目分布较为均匀;在工作日,除了早、晚高峰,其余时间轨迹聚类簇的数目较少,特别是晚上;在周末,早高峰有滞后现象,晚高峰时段聚类簇的数目较多,出行达到峰值。

#### 2.3.2 线粒度下的道路线段出租车CO<sub>2</sub>排放强度的时空分布规律

首先,针对国外的圣瓦伦丁节、工作日、周末3种不同日期,分别选取典型时段的出租车行程轨迹CO<sub>2</sub>排放量。然后利用轨迹数据场模型计算单个出租车行程轨迹点的势值。接着,结合武汉市道路网,对轨迹点的势值进行核密度插值,得到不同道路线段的出租车CO<sub>2</sub>排放强度。最后,采用自然分类法将道路线段的出租车CO<sub>2</sub>排放强度划分为5个等级,即低、较低、中等、较高、高,各等级对应的排放强度如图6所示。可以看到,道路线段的出租车CO<sub>2</sub>排放强度在3种不同日期的不同时段之间存在明显的空间分布差异。

1)早高峰时段的道路线段出租车CO<sub>2</sub>排放强度在工作日普遍偏高,而在周末普遍偏低。这是因为工作日早上出行轨迹增加,而周末的出行存在滞后现象。

2)从整体上看,大部分道路线段的出租车CO<sub>2</sub>排放强度较低,而少部分出租车CO<sub>2</sub>排放强度较高的道路线段主要分布在商圈、景点、高校、火车站附近。

3)国外的圣瓦伦丁节、周末的道路线段出租车CO<sub>2</sub>排放强度高于工作日,尤其是晚高峰时



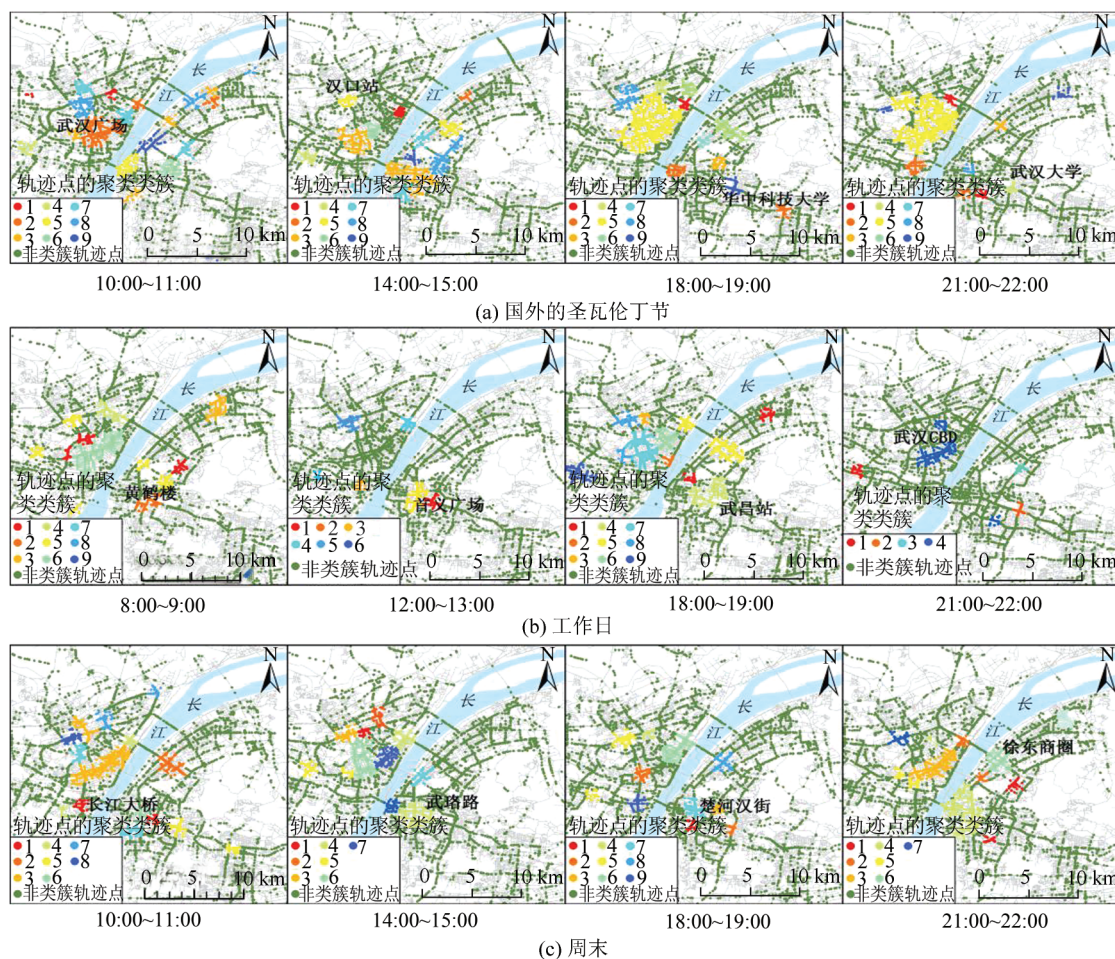
图5 典型时段出租车行程轨迹点CO<sub>2</sub>排放量的空间聚类图

Fig.5 Clusters of Carbon Dioxide Emission of Taxi Trajectory Points in Typical Periods

段。这是因为在周末或者国外的圣瓦伦丁节,人们更倾向于外出聚餐、逛街、购物,而在工作日,人们倾向于在家休息。

### 2.3.3 面粒度下的区域出租车CO<sub>2</sub>排放的时空自相关分析

时空自相关可以对时空聚集与分布进行定量研究,是对以上两个研究的深化。针对整个研究区域,以日期为单位,计算所有出租车行程轨迹点的CO<sub>2</sub>排放量的全局Moran's I值,如表1所示。可以看到,就武汉市整体而言,各个日期出租车CO<sub>2</sub>排放量的全局Moran's I值大多位于0.4~0.8之间,说明存在显著的空间正相关性,且正相关趋势具有时间稳定性。

此外,采用500 m×500 m的格网单元对研究区域16 km×17 km进行空间划分,计算每个格网单元中的出租车CO<sub>2</sub>排放量。然后,利用局部Moran's I分析格网空间出租车CO<sub>2</sub>排放的局部空间自相关性。

图7表明,在不同日期的格网单元上,呈现明显局部自相关性的区域主要分布在三环以内。

其中,汉口江滩、武广商圈、武汉中央商务区(central business district, CBD)、汉口站、街道口、徐东商圈等区域附近存在高高自相关规律,即格网单元内的出租车CO<sub>2</sub>排放量较高且分布集中,这个结果与§2.3.1和§2.3.2中的结果一致。

图8表明,在不同时间段的格网单元上,呈现明显局部自相关性的区域也不同。以国外的圣瓦伦丁节为例,在晚高峰时段18:00~19:00和21:00~22:00,呈现高高聚集状态的格网单元分布较广,数量较多。在早间时段8:00~9:00,呈现高高聚集状态的格网单元主要分布在武广商圈附近,且数量较少。这是因为在低峰时段出租车轨迹点数量较少,在区域中较分散,且道路交通畅通,因此格网单元出租车CO<sub>2</sub>排放量之间呈现较低的自相关性。

## 3 结 语

本文采用CMEM模型对武汉市出租车行程轨迹的CO<sub>2</sub>排放进行定量反演,从点、线、面3个



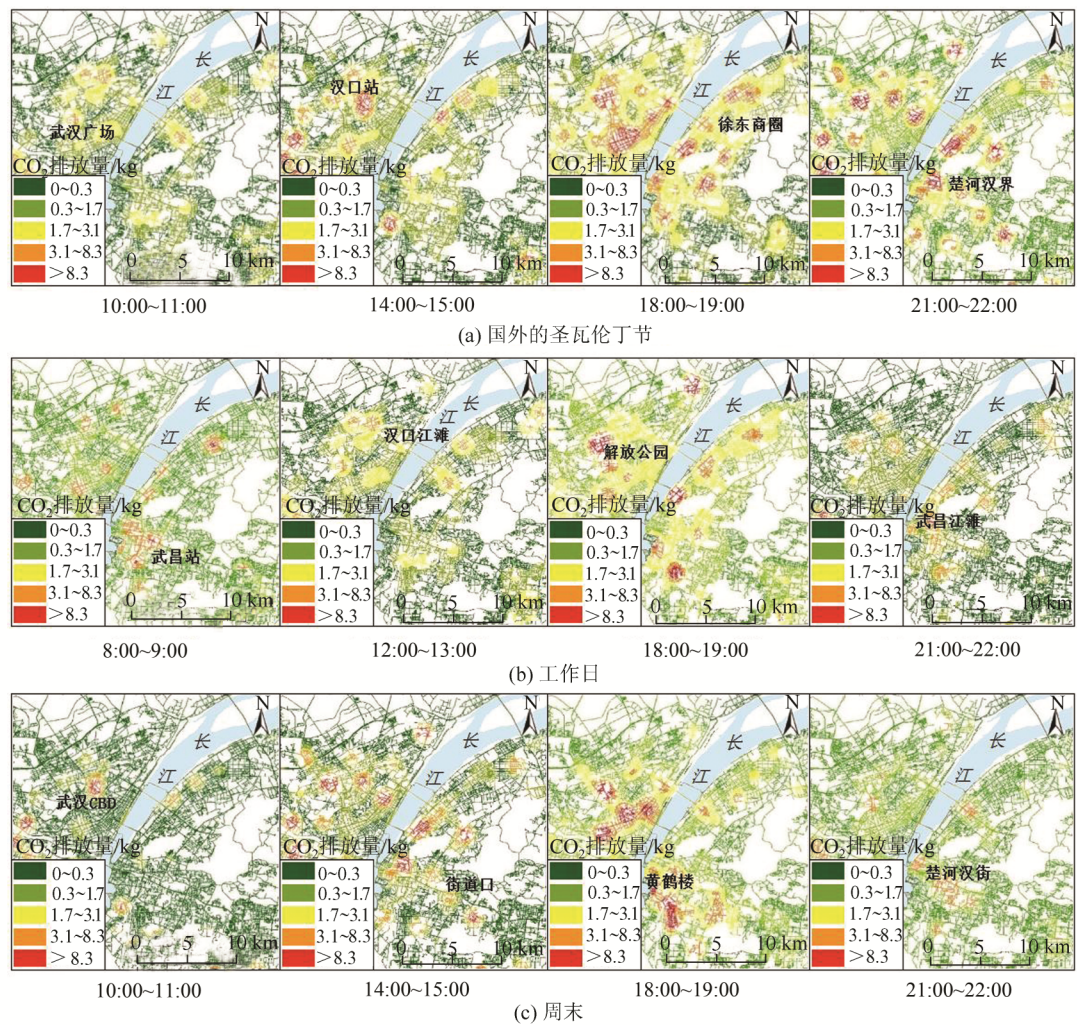


图6 典型时段道路线段的出租车CO<sub>2</sub>排放强度空间分布图

Fig.6 Spatial distribution of Carbon Dioxide Emission from Taxi Trajectory Data of Road Segments in Typical Periods

表1 不同日期CO<sub>2</sub>排放全局Moran's I值及检验

Tab.1 Overall Moran's I and Its Statistical Test at Different Dates

日期	Moran's I值	Z检验量	P值
2015-02-01	0.642 3	44.142	0.01
2015-02-02	0.602 1	28.565	0.01
2015-02-03	0.610 2	49.124	0.01
2015-02-04	0.614 5	32.120	0.01
2015-02-05	0.512 4	18.858	0.01
2015-02-06	0.541 2	26.356	0.01
2015-02-07	0.589 2	10.586	0.01
2015-02-08	0.489 6	16.258	0.01
2015-02-09	0.358 9	24.223	0.01
2015-02-10	0.512 4	36.255	0.01
2015-02-11	0.510 3	42.536	0.01
2015-02-12	0.448 7	19.255	0.01
2015-02-13	0.589 6	22.363	0.01
2015-02-14	0.711 5	34.144	0.01
2015-02-15	0.682 0	45.356	0.01

粒度研究出租车行程轨迹的CO<sub>2</sub>排放的时空模式。点粒度分析结果可以更好地认识出租车CO<sub>2</sub>排放较高的轨迹点所形成的聚类簇的时空变化规律;线粒度分析的结果有助于定量掌握出租车所贡献的城市道路路段CO<sub>2</sub>排放强度的时空分布规律;面粒度的分析结果进一步揭示了不同区域尺度下出租车行程轨迹的CO<sub>2</sub>排放量的时空自相关规律。总体来说,这些结果表明出租车行程轨迹的CO<sub>2</sub>排放量不仅存在明显的时空差异性,也呈现出显著的时空聚集特征。

在减排策略制定方面,除了执行燃油率标准之外,可以参考出租车行程轨迹CO<sub>2</sub>排放的时空模式。如相关部门可以对线粒度下的高排放道路路段进行合理管制,减少车辆拥堵时间,降低车辆CO<sub>2</sub>排放量。此外,研究结果可为出租车智能调度、基础设施优化选址、低碳出行模式推荐等应用领域提供辅助参考。

然而,本文在进行出租车行程轨迹的CO<sub>2</sub>排

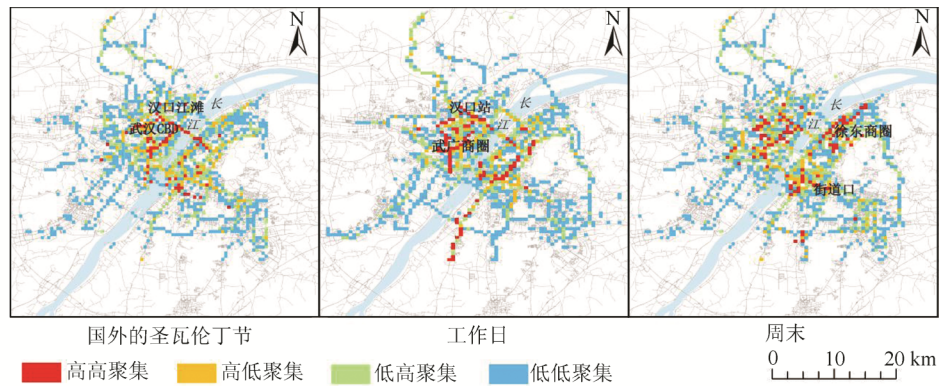
图7 不同日期格网单元出租车CO<sub>2</sub>排放的局部Moran's I值

Fig.7 Local Moran's I for the Carbon Dioxide Emission of Spatial Grid at Different Dates

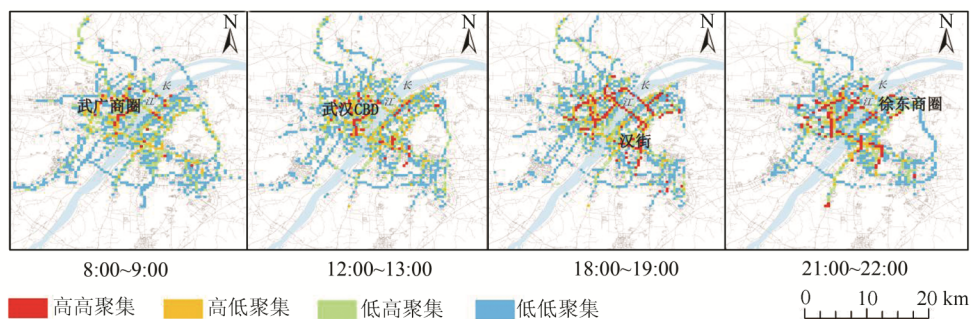
图8 不同时间段格网单元出租车CO<sub>2</sub>排放的局部Moran's I值

Fig.8 Local Moran's I for the Carbon Dioxide Emission of Spatial Grid at Different Periods

放计算时,由于CO<sub>2</sub>在空气中的实时扩散效应,导致其时空分布模式存在一定的偏差。因此,需要进一步研究出租车行程轨迹CO<sub>2</sub>排放时空中的扩散规律,并基于路网实测CO<sub>2</sub>排放数据对模型计算数据进行纠正,提高出租车行程轨迹反演CO<sub>2</sub>排放的可靠度。

### 参 考 文 献

- [1] Cheng Y H, Chang Y H, Lu I J. Urban Transportation Energy and Carbon Dioxide Emission Reduction Strategies[J]. *Applied Energy*, 2015, 157: 953-973
- [2] Zhang Lanyi, Hu Xisheng, Qiu Rongzu. A Review of Vehicle Exhaust Emission Model[J]. *World Sci-Tech R&D*, 2017(4): 355-362(张兰怡, 胡喜生, 邱荣祖. 机动车尾气污染物排放模型研究综述[J]. 世界科技研究与发展, 2017(4): 355-362)
- [3] EU EEA. COPERT5 Manual[OL]. <http://copert.emisia.com>, 2017
- [4] US EPA. Technical Guidance on the Use of MOVES 2010 for Emission Inventory Preparation in State Implementation Plans and Transportation Conformity [OL]. <https://www.epa.gov/moves>, 2009
- [5] Xie Rongfu, Chen Zhenbin, Deng Xiaokang, et al. Study on Emission Characteristics and Sharing Rate of Vehicle Pollutants in Haikou Based on MOVES2014a [J]. *Natural Science Journal of Hainan University*, 2017, 35(3): 282-289(谢荣富, 陈振斌, 邓小康, 等. 基于MOVES2014a的海口市机动车污染物排放特征及分担率研究[J]. 海南大学学报·自然科学版, 2017, 35(3): 282-289)
- [6] Wang Haikun, Chen Changhong, Huang Cheng, et al. Using IVE Model to Calculate the Emission of Vehicle Pollutants in Shanghai[J]. *Journal of Environmental Science*, 2006, 26(1): 1-9(王海鲲, 陈长虹, 黄成, 等. 应用IVE模型计算上海市机动车污染物排放[J]. 环境科学学报, 2006, 26(1): 1-9)
- [7] Cai H, Xie S. Estimation of Vehicular Emission Inventories in China from 1980 to 2005 [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(39): 8 963-8 979
- [8] Liu Y, Liao W, Li L, et al. Vehicle Emission Trends in China's Guangdong Province from 1994 to 2014 [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 512-521
- [9] Yu Yang, Chen Cai. Analysis of Time and Space Characteristics of China's Net Carbon Dioxide Emissions [J]. *Geographical Sciences*, 2013, 33(10): 1 173-1 179(于洋, 陈才. 中国二氧化碳净排放的时空特性分析[J]. 地理科学, 2013, 33(10): 1 173-1 179)
- [10] Zheng B, Zhang Q, Borken-Kleefeld J, et al. How will Greenhouse Gas Emissions from Motor Vehicles



- be Constrained in China Around 2030?[J]. *Applied Energy*, 2015, 156: 230-240
- [11] Shan Jie, Qin Kun, Huang Changqing, et al. Methods of Crowd Sourcing Geographic Data Processing and Analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(4): 390-396(单杰,秦昆,黄长青,等. 众源地理数据处理与分析方法探讨[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(4): 390-396)
- [12] Sun F, Zhang X, Tang L, et al. Temporal and Spatial Distribution of High Efficiency Passengers Based on GPS Trajectory Big Data [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2015, 5(4):93-101
- [13] Mazimpaka J D. Trajectory Data Mining: A Review of Methods and Applications[J]. *Journal of Spatial Information Science*, 2016, 13:61-99
- [14] Taylor J, Zhou X, Roupail N M, et al. Method for Investigating Intradriver Heterogeneity Using Vehicle Trajectory Data: A Dynamic Time Warping Approach [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2015, 73:59-80
- [15] Feng Z, Zhu Y. A Survey on Trajectory Data Mining: Techniques and Applications [J]. *IEEE Access*, 2017, 4:2 056-2 067
- [16] Lei Wei. Research on Simulation and Optimization of Urban Road Traffic Emission[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011(雷伟. 城市道路交通排放的仿真优化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011)
- [17] Wu Chaozhong, Xu Chengwei, Yan Xinping. Micro Exhaust Emission Model of Urban Traffic Based on Optimal Velocity Model [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2008, 32(2): 203-205(吴超仲, 徐成伟, 严新平. 基于优化速度模型的城市交通微观尾气排放模型[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2008, 32(2): 203-205)
- [18] Chen Kun, Yu Lei. Simulation and Example Analysis of Microscopic Traffic Tail Gas for Traffic Control Strategy Evaluation [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2007, 7(1): 93-100(陈琨, 于雷. 用于交通控制策略评估的微观交通尾气模拟与实例分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(1): 93-100)
- [19] Wang Z, Chen F, Fujiyama T. Carbon Emission from Urban Passenger Transportation in Beijing[J]. *Transportation Research Part D: Transport & Environment*, 2015, 41:217-227
- [20] Ning Xiaojun, Qin Yaochen, Lu Fengxian. Study on Traffic CO<sub>2</sub> Emission of Urban Residents in Zhengzhou[D]. Kaifeng: Henan University, 2013(宁晓菊, 秦耀辰, 鲁丰先. 郑州城市居民交通 CO<sub>2</sub>排放研究[D]. 开封: 河南大学, 2013)
- [21] Jia T, Carling K, Hakansson J. Trips and Their CO<sub>2</sub> Emissions to and from a Shopping Center [J]. *Journal of Transport Geography*, 2013, 33: 135-145
- [22] 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*, 2017, 142(2): 926-935
- [23] Xu Chengwei, Wu Chaozhong, Chu Xiumin, et al. Study on the Average Emission Factor of Light Motor Vehicle in Wuhan Based on CMEM Model [J]. *Traffic and Computer*, 2008, 26(4): 185-188(徐成伟, 吴超仲, 初秀民, 等. 基于CMEM模型的武汉市轻型机动车平均排放因子研究[J]. 交通与计算机, 2008, 26(4): 185-188)
- [24] Zhang Tao, Zhang Xin. The Application of Three Cubic Spline Interpolation in Wavelet Denoising[J]. *Computer Applications and Software*, 2016, 33(8): 88-90(张涛, 张欣. 三次样条插值在小波去噪中的应用[J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(8): 88-90)
- [25] Li Q, Jia T. Correction of Measured Taxicab Exhaust Emission Data Based on CMEM Modle [C]. International Conference on Spatial Data Mining, Wuhan, 2017
- [26] Rong Qiusheng, Yan Junbiao, Guo Guoqiang. Research and Implementation Based on DBSCAN Clustering Algorithm [J]. *Computer Application*, 2004, 24(4): 45-46(荣秋生, 颜君彪, 郭国强. 基于DBSCAN聚类算法的研究与实现[J]. 计算机应用, 2004, 24(4): 45-46)
- [27] Zhou Qing, Qin Kun, Chen Yixiang, et al. Detection Method of Hot Spot in Taxi Track Based on Data Field [J]. *Geography and Geographic Information Science*, 2016, 32(6): 51-56(周勃, 秦昆, 陈一祥, 等. 基于数据场的出租车轨迹热点区域探测方法[J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(6): 51-56)
- [28] Fu Zhongliang, Yang Yuanwei, Gao Xianjun, et al. Road Network Matching Using Multivariate Regression [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(2): 171-177(付仲良, 杨元维, 高贤君, 等. 利用多元 Logistic 回归进行道路网匹配[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(2): 171-177)

## Computing the CO<sub>2</sub> Emissions of Taxi Trajectories and Exploring Their Spatiotemporal Patterns in Wuhan City

JIA Tao<sup>1</sup> LI Qi<sup>1</sup> MA Chu<sup>2</sup> LI Yuqian<sup>1</sup>

1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Hubei Institute of Surveying and Mapping Engineering, Wuhan 430072, China

**Abstract:** The intensive usage of vehicles has led to many urban problems including the traffic jams and the environmental pollutions. To handle these problems, most previous studies have used macro-based models to estimate and analyze the CO<sub>2</sub> emission inventories, but very few studies have focused on computing vehicle CO<sub>2</sub> emissions using a micro-based model. This paper presents an in-depth study on computing the CO<sub>2</sub> emissions from taxi trajectory data and further analyzing their spatiotemporal patterns from three aspects. Taking the Wuhan city as a case study, this paper uses the comprehensive modal emission model to quantitatively compute the CO<sub>2</sub> emissions from the taxi trajectory, and statistical results suggest that CO<sub>2</sub> emissions of the entire city has experienced a remarkable regularity in times of the day and days of the week. Specifically, the spatiotemporal patterns of CO<sub>2</sub> emissions from taxi trajectories are analyzed from three different aspects. Firstly, a spatial clustering algorithm is used to aggregate the taxi trajectory points with high CO<sub>2</sub> emissions, and the number of clusters displayed a regular change pattern. For example, the cluster number is gradually increased from workdays to weekends or holidays and from normal time period to peak time period in one day. Secondly, the data field model is used to allocate the CO<sub>2</sub> emissions of taxi trajectory to the individual streets, and the emission from street network exhibited a remarkable distribution in space and time. For instance, streets with high CO<sub>2</sub> emission tend to appear in the morning peak time period of workdays and evening peak time period of weekends or holidays, and they are spatially adjacent to the universities, railway stations, or central business districts. Thirdly, a spatiotemporal autocorrelation technique is adopted to examine the concentration of taxi trajectory emissions in space, and different regions are positively auto-correlated with each other in both times of the day and days of the week. These results can help to the proposal of efficient CO<sub>2</sub> emissions reduction strategies, and they can provide guidance for taxis management, low-carbon traveling, and so on.

**Key words:** taxi trajectory; CO<sub>2</sub> emissions; comprehensive modal emission model; spatiotemporal pattern

**First author:** JIA Tao, PhD, associate professor, his research interest is focused on Geographical Information System or Science in general, but with a specification on the spatiotemporal trajectory data analysis and mining, complex networks analysis and modeling, and human dynamics. E-mail: tao.jia@whu.edu.cn

**Corresponding author:** MA Chu, master, engineer. E-mail: machu0123@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, No. 41401453.