

姚婷, 章莹莹, 杨莉. 基于出租车轨迹数据的居民出行碳排放测算模型研究与应用[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(10): 70-78. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.241009

基于出租车轨迹数据的居民出行碳排放测算模型研究与应用

姚婷¹, 章莹莹¹, 杨莉²

(1 南京邮电大学 物联网学院, 南京 210003; 2 南京邮电大学 管理学院, 南京 210003)

摘要: 搭乘出租车是居民出行的主要方式之一, 出租车行驶产生的碳排放是交通碳排放的重要组成部分。研究改进了碳排放测算模型, 对改进前后的碳排放测算模型进行了对比, 并使用济宁一周内的出租车轨迹数据进行了居民出租车出行碳排放量的测算。结果表明: (1) 使用欧式距离和 Haversine 距离计算的出行距离均对出行距离和 CO₂ 的排放有所低估, 对 CO 的排放有所高估。考虑怠速阶段的碳排放至关重要, 尤其是对于 CO 而言, 其绝大多数排放处于怠速阶段, 对于不考虑怠速阶段的碳排放测算模型测算的碳排放会对碳排放有所低估。(2) 济宁市一周的居民出行中, 不同日期的出行特征存在周期性, 各工作日、休息日内的出行特征随时间的变化规律相似; 各工作日、休息日内的碳排放的分布趋势相似; CO 排放受出行时间影响更大, CO₂ 排放受出行距离影响更大; 碳排放热点区域主要位于商业中心、交通枢纽、医院、学校附近, 热点路段主要位于任城区道路网密集以及道路交叉分布的路段。

关键词: 居民出行; 碳排放测算; 轨迹; 网格碳排放; 测地线

中图分类号: X24

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)10-0070-09

Research and application of carbon emission calculation model for residential travel based on taxi trajectory data

YAO Ting¹, ZHANG Yingying¹, YANG Li²

(1 School of Internet of Things, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2 School of Management, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Taking taxis is one of the main modes of transportation for residents, and the carbon emissions generated during taxi rides constitute a significant portion of overall transportation-related carbon emissions. The study improves the carbon emission measurement model, compares the carbon emission measurement model before and after the improvement, and uses the taxi-trail data of Jining in a week to measure the carbon emission of residents' travel. The results indicate: (1) Travel distances calculated using both Euclidean and haversine distances underestimate travel distances and CO₂ emissions and overestimate CO emissions. It is important to consider carbon emissions during the idling phase, especially for CO, where the majority of emissions are during the idling phase, and carbon emissions measured by models that do not consider the idling phase will underestimate carbon emissions. (2) In a week of residential travel in Jining, there is a periodicity in the travel characteristics of different dates, and the change pattern of travel characteristics over time is similar within each weekday and rest day. Comparable distribution trends of carbon emissions are observed within different workdays and weekends. CO emissions are more influenced by travel time, while CO₂ emissions are more affected by travel distance. Carbon emissions hotspots are predominantly situated near commercial centers, transportation hubs, hospitals and schools. Key road segments are concentrated in the densely connected road networks and intersections within Rencheng District.

Key words: residents travel; carbon emission measurement; trajectory; grid carbon emissions; geodesic line

0 引言

根据能源署(IEA)最新数据, 交通运输行业已

为全球第二大碳排放行业。出租车作为城市交通系统的重要组成部分, 不仅行驶里程长、空载率高, 而其碳排放也已经成为交通领域碳排放不可忽视的一

基金项目: 江苏省高校哲学社会科学研究重大项目(2023SJZD021); 江苏“紫金文化人才培养项目”社会科学人才计划((2020)II-024); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX22_0979, SJCX22_0234)。

作者简介: 姚婷(1999-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 交通碳排放; 章莹莹(1999-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 土地利用碳排放。

通讯作者: 杨莉(1977-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 环境规划与管理。Email: yangli@njupt.edu.cn

收稿日期: 2024-02-15

哈尔滨工业大学主办 ◆ 学术研究与应用

部分。如何更为精准地获取出租车碳排放,从而为居民出行、相关部门决策提供更为有效的减排方案,已经迫在眉睫。

现有研究对出租车碳排放的测算,按照研究内容分为 2 个方面。一是采用问卷调查数据或轨迹大数据来测算出行产生的碳排放,包括不同人群^[1]、不同区域^[2]的碳排放测算及对比。这部分的研究时间段都较短,一般以小时、天、月测算。此方面的研究多使用 2020 年前的数据,2020 年之后的研究多使用调查数据。二是使用统计年鉴、交通发展年度报告或实测数据测算碳排放清单^[3-4],此部分的研究时间段较长,以年测算,且研究最多。

按照研究方法分为 2 种,一是实测法^[5-6],二是间接统计法^[7-8]。其中,实测法主要用来模拟和测量排放系数,对于新提出的机动车排放计算方法进行性能评价或者与其他方法进行比较分析,其成本较高。间接统计法又包括自上而下和自下而上的方法。具体来说,自上而下的方法主要用于全球、国家、省份、经济区、城市群尺度的碳排放影响因素及预测研究^[9-10]等。自下而上的方法主要用于微观尺度的碳排放测算^[11]、碳排放预测^[12]、影响因素分析^[13]等。在使用自下而上的方法进行的研究中,多数研究对于车辆的碳排放计算仅考虑车辆正常运行阶段,并未计算车辆怠速阶段的碳排放。

出租车作为居民出行的重要载体,其碳排放与居民出行特征密切相关。现有的研究在居民出行特征方面成熟,以往研究按照数据源的不同分为 2 类,一是采用传统的调查数据,二是采用 GPS 轨迹数据,两者对于居民出行特征方面的研究差异不大,多

为基本出行信息的分析^[14-15](包括出行频率、时间、距离、目的地等)、出行行为的预测^[16]、道路交通情况的评估^[17]等。相比前者,后者所包含的数据更为全面和准确,能够更细粒度地挖掘居民出行特征,且对于居民出行行为及各种出行特征的预测方面更为准确。此外,在出行特征中的距离计算方面,现有研究多使用的是欧式距离和 haversine 距离^[15,18-19],较少甚至没有使用测地线距离进行的计算。

针对现有研究存在的数据源陈旧、碳排放测算不准确等问题,本研究使用 2023 年济宁市的出租车轨迹数据,使用了 Karney 测地线并考虑车辆怠速和正常运行两种出行情况,改进了以往的碳排放测算模型,更准确地测算了碳排放。研究结果有利于降低出租车空驶里程和空驶时间,减少道路资源不必要的浪费,对缓解交通拥堵、能源浪费及环境污染问题至关重要,对提高乘客出行效率、出租车运营公司的管理水平和减少城市道路交通压力方面具有重要意义。

1 数据来源和研究方法

1.1 数据来源

研究中采用的出租车数据来源于山东公共数据开放网上的公开数据《济宁出租车 GPS 数据》,研究数据选取的 2023 年 4 月 3 日至 4 月 9 日 7 天的济宁市 10 家出租车公司的出租车轨迹记录。该数据集一天平均统计车辆数为 1 300 辆左右,日平均记录数为 3 383 485 条记录,数据字段包括轨迹点的车牌号、出租车公司、车型、设备编号、方向、纬度、经度、速度、运营状态、GPS 时间,平均采样间隔为 30 s 一次,24 h 全天采样。部分原始数据见表 1。

表 1 出租车部分原始数据

Table 1 Partial raw data of taxis

车牌号	出租车公司	车型	设备编号	方向	经度	纬度	速度	运营状态	GPS 时间
鲁 HT××38	交运	新捷达	64625127984	260	116.608 5	35.414 9	38.2	空车	21:16:24
鲁 HT××86	交运	悦动	64625127795	116	116.487 4	35.309 3	0.0	空车	21:16:24
鲁 HT××05	联运	比亚迪秦	64600942098	89	116.580 1	35.426 6	41.9	载客	21:16:25
鲁 HT××99	交运	新桑塔纳	64625128167	40	116.683 9	35.365 3	0.0	空车	21:16:25

1.2 数据预处理

(1)剔除不完全记录、重复行记录、区域外记录、速度长时间为 0 或大于 120 km/h 的记录。

(2)参考济宁市路网数据,剔除不适合出租车行走的道路网,对轨迹点进行邻近分析,对于距离道路大于 20 m 的记录删除,对于同一出租车不同时段同一位置的多条数据合并时间段,对于同一时刻同一设备编号多条记录取平均值。

(3)将属性列的运营状态改为数值型变量(1 表示载客,0 表示空车)并提取上下车点,使用 Python3.8 遍历每条轨迹点记录提取运营状态变化的记录,运营状态由 1 变为 0 记为下车点,由 0 变为 1 记为上车点。

(4)对每辆出租车记录的相邻轨迹点按照时间顺序连接成轨迹段,计算每个轨迹段的行驶时间、速度、距离,使用 Karney 测地线^[20]计算轨迹段的

距离。

1.3 传统的碳排放测算模型

现有的机动车排放模型大致可以分为基于平均速度的排放模型(如 MOBILE、COPERT 等)和基于行驶工况的排放模型(如 CEME、IVE、MOVES 等)。其中,COPERT 模型已经被证明更适合中国的机动车排放研究,因此以往研究多采用此模型进行碳排放的测算。模型的主要计算公式如下:

$$Q_{p,i} = E_{p,i} \times l_i \quad (1)$$

$$E_{p,i} = (\alpha_p \times v_i^2 + \beta_p \times v_i + \gamma_p + \delta_p/v_i) / (\varepsilon_p \times v_i^2 + \theta_p \times v_i + \tau_p) \quad (2)$$

其中, $Q_{p,i}$ 表示 i 轨迹段上污染物 p 的排放量,单位为: g; l_i 表示机动车在轨迹段 i 的行驶里程,单位为: km; $E_{p,i}$ 表示轨迹段 i 上污染物 p 的排放因子,单位为: g/km; v_i 表示机动车在轨迹段 i 上的平均速度,单位为: km/h; $\alpha_p, \beta_p, \gamma_p, \delta_p, \varepsilon_p, \theta_p, \tau_p$ 为燃油消耗量计算参数。

传统的碳排放测算模型多使用 COPERT 模型计算车辆正常运行过程中产生的碳排放,对于碳排放的阶段考虑不全;就模型的计算参数而言,排放因子和出行距离与碳排放量直接相关,这 2 个参数的准确性决定了碳排放测算量的准确性,以往研究多使用欧式距离和 Haversine 距离计算出行距离,未考虑地球椭球体形状及曲率的影响,计算的与地面的真实距离有所差异,对碳排放的测算不够准确。

1.4 改进的碳排放测算模型

本文针对以往研究存在的不足,参考现有研究成果,在 COPERT 模型的基础上增加了怠速阶段碳排放的测算,并对 COPERT 模型中的出行距离参数进行了优化,选取了与以往研究不同的距离计算方法—Karney 测地线距离,该距离计算方法更接近地面的真实距离,对碳排放的测算更准确且全面。

改进的碳排放测算模型中,碳排放测算阶段包含车辆怠速阶段和正常运行阶段,怠速阶段又分为原地怠速和拥堵怠速两个阶段。按照不同阶段对轨迹点进行划分,将速度大于 5 km/h 的点记为正常运行的点,小于等于 5 km/h 的点为车辆怠速点。若怠速点连成的轨迹段中,轨迹段的移动距离为零,则此段轨迹段被记为原地怠速段,相反则为拥堵怠速段。

改进的碳排放测算模型在怠速阶段的碳排放测算公式如下^[21-22]:

$$P_i = (Q \times T \times (K + 1) \times A_g \times (\rho/60)) / (1.29 \times 60) \quad (3)$$

$$P_{i,CO} = P_i \times C_{CO} \times F_{CO} \times 1\,000 \quad (4)$$

$$A = Q \times T \times A_g / 3\,600 \quad (5)$$

$$P_{CO} = A \times H_{CO_2} \times 1\,000 \quad (6)$$

机动车在正常运行过程中产生的碳排放计算公式如下^[23]:

$$Q_{CO} = E_{CO} \times l \quad (7)$$

$$E_p = (\alpha_p \times v^2 + \beta_p \times v + \gamma_p + \delta_p/v) / (\varepsilon_p \times v^2 + \theta_p \times v + \tau_p) \quad (8)$$

$$Q_{CO_2} = 44.011 \times (E_{EC} / (12.011 + 1.008 \times 1.86)) \times 22.86 \times l \quad (9)$$

其中, CO_2 的排放量的计算与 CO 有所不同,需要通过能耗因子 (EC) 转化得到。主要的模型参数及取值见表 2。

表 2 模型参数表

Table 2 Model parameters table

阶段	参数	定义	取值
怠速	P_i / kg	i 类型车辆的怠速排放量	/
阶段	$P_{i,CO}$ / kg	i 类型车辆 CO 的怠速排放量	/
段 ^[24]	Q / 辆	怠速的交通量	/
	T / s	怠速时间	/
	K	空燃比	12
	A_g / (L · h ⁻¹)	怠速的燃油消耗量	1.50(原地怠速); 12.00(拥堵怠速)
	ρ / (kg · L ⁻¹)	燃油密度	0.73
	C_{CO} / %	容积比	4.07
	F_{CO}	容积与质量换算系数	1.25
	A / L	怠速的燃油消耗量	/
	H_{CO_2} / (kg · L ⁻¹)	每升燃油 CO ₂ 排放量	2.25 ^[25]
正常	Q_p / g	污染物 p 的排放量	/
运行	l / km	行驶里程	/
	E_p / (g · km ⁻¹)	污染物 p 的排放因子	/
	v / (km · h ⁻¹)	速度	/
阶段 ^[23]	α_p		EC CO ₂ 0.004 8 0.000 5
	β_p		-0.253 3 -0.102 1
	γ_p		20.951 6 6.876 9
	δ_p	燃油消耗量计算参数	0.000 0 10.383 9
	ε_p		0.000 8 0.001 6
	θ_p		0.091 3 -0.437 6
	τ_p		3.512 6 30.337 3

依据目前相关资料,出租车原地怠速的燃油消耗量为 1~2 L/h^[26],因此本研究原地怠速的燃油消耗量取均值 1.5 L/h。2023 年符合中国第五阶段排放标准(国 V)限值的汽油车占比较高,因此模型输

入的车辆类型为小型乘用车,燃料类型为汽油,排放标准为欧 5。

1.5 改进的碳排放测算模型的计算过程

步骤 1 数据处理。首先对数据进行预处理,得到连续且无异常值的轨迹点数据,其次将轨迹点数据连成线,得到各个轨迹段数据,将这些数据作为研究的基础数据。

步骤 2 获取模型输入参数。分述如下:

(1) 查找车辆信息,包括车辆排放标准、车辆类型、燃油类型、油耗情况,查找符合车辆标准的燃料消耗系数;

(2) 计算出行距离 L 、出行时间 T 、出行速度 v 。

步骤 3 划分轨迹段。按照速度 v 划分每个轨迹段,为每个轨迹段添加标签,添加标签的方式为:

$$label = \begin{cases} 1, & v > 5 \\ 2, & v \leq 0 \text{ and } L = 0 \\ 3, & v \leq 5 \text{ and } L \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中, $label$ 为 1 时,表示该轨迹段的车辆处于正常运行阶段; $label$ 为 2 时,表示该轨迹段的车辆处于原地怠速阶段; $label$ 为 3 时,表示该轨迹段的车辆处于拥堵怠速阶段。

步骤 4 分类计算不同阶段的碳排放。根据不同的 $label$ 计算不同阶段的碳排放: $label$ 为 1 时,使用式(7)~式(9)计算碳排放; $label$ 为 2 和 3 时,使用式(3)~式(6)计算碳排放。具体而言,对于单个轨迹段,若其出行距离为 L ,出行速度为 v ,出行时间为 T ,测算此轨迹段产生的碳排放的计算流程如下:

(1) 如果该轨迹段的 $label$ 为 1,则此轨迹段产生的碳排放为:

$$E_{CO} = (0.0005 \times v^2 + (-0.1021) \times v + 6.8769 + (10.3839/v)) / (0.0016 \times v^2 + (-0.4376) \times v + 30.3373) \quad (11)$$

$$Q_{CO} = E_{CO} \times L \quad (12)$$

$$E_{EC} = ((0.0048 \times v^2 + (-0.2533) \times v + 20.9516) / (0.0008 \times v^2 + 0.0913 \times v + 3.5126)) \quad (13)$$

$$E_{CO_2} = (44.011 \times E_{EC} \times 22.86) / (12.011 + 1.008 \times 1.86) \quad (14)$$

$$Q_{CO_2} = E_{CO_2} \times L \quad (15)$$

其中, E_{CO} 表示 CO 的排放因子, E_{CO_2} 表示 CO₂ 的排放因子。

(2) 如果该轨迹段的 $label$ 为 2,则此轨迹段产生的碳排放为:

$$Q_{CO} = ((T \times 13 \times 0.01825) / (1.29 \times 60)) \times$$

$$4.07/100 \times 1.25 \times 1000 \quad (16)$$

$$Q_{CO_2} = (2.34 \times T \times (1.5/3600)) \times 1000 \quad (17)$$

(3) 如果该轨迹段的 $label$ 为 3,则此轨迹段产生的碳排放为:

$$Q_{CO} = ((T \times 13 \times 0.146) / (1.2960)) \times 4.07/100 \times 1.25 \times 1000 \quad (18)$$

$$Q_{CO_2} = (2.34 \times T \times (1.5/3600)) \times 1000 \quad (19)$$

其中, Q_{CO} 表示 CO 的排放, Q_{CO_2} 表示 CO₂ 的排放。

步骤 5 汇总碳排放。总的碳排放为不同阶段的碳排放之和。

2 实验结果与分析

2.1 改进前后的碳排放测算结果对比

已有研究表明,使用 Karney 公式计算的测地线距离更接近实际距离,因此本文假设测地线为真实距离,使用 4 月 4 日的数据来呈现模型的拟合效果,对正常运行阶段的欧式距离和 Haversine 距离计算结果与测地线距离计算结果进行了对比,并对考虑怠速前后不同距离计算的碳排放结果进行了分析。

(1) 距离计算结果对比。对于正常运行阶段的出行距离,使用欧式距离、Haversine 距离、Karney 测地线距离三种方法计算,对每个轨迹段按照每小时统计绘制箱线图,如图 1 所示。结果表明 3 种方式计算的距离随时间变化的趋势不大,总体而言,欧式距离和 Haversine 距离计算的结果要偏小一些;距离较长的轨迹段,欧式距离和 Haversine 距离与测地线距离的差异较为明显,且这种差异变化并不稳定,时高时低。总之距离较短的轨迹段,欧式距离和 Haversine 距离与测地线距离的差异小;距离较长的轨迹段,欧式距离和 Haversine 距离与测地线距离的差异大,欧式距离和 Haversine 距离计算的大多数轨迹段的距离要小于 Karney 测地线距离计算的轨迹段距离。

对每小时不同距离方法计算的轨迹段进行汇总统计如图 2 所示。结果表明 3 种距离计算方法统计的轨迹段距离每小时的变化趋势一样,但欧式距离和 Haversine 距离每小时计算的轨迹段距离总量均小于测地线距离计算的轨迹段距离总量,且在距离波峰值时三者差异最大。欧式距离与测地线距离计算结果比 Haversine 距离与测地线距离计算结果差异更大,即使用欧式距离和 Haversine 距离计算出行距离均对出行距离有所低估,欧式距离低估更为明显;单个轨迹段距离越长或轨迹段越多,欧式距离和 Haversine 距离与真实距离差异越大,计算的出行距离越不准确。

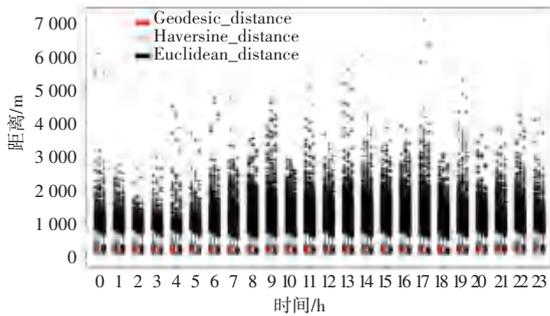


图1 每小时不同距离方法计算得到的每个轨迹段的距离

Fig. 1 Distance of each trajectory segment calculated by different distance methods per hour

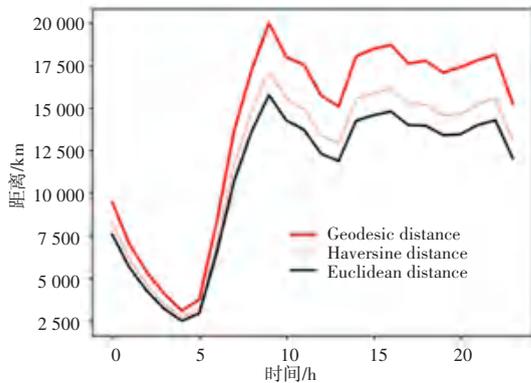
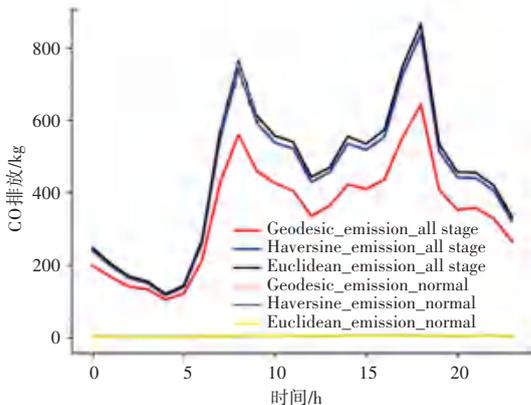


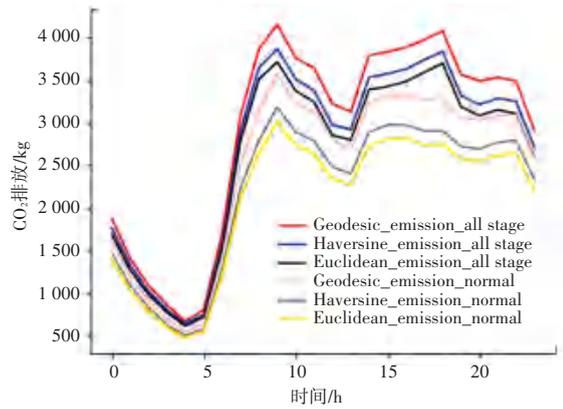
图2 每小时不同距离计算结果统计

Fig. 2 Hourly statistics for different distance calculations

(2) 碳排放测算结果对比。使用3种不同的距离计算方法,计算出行距离、出行速度,依据出行速度划分轨迹段,将轨迹段按阶段分为正常运行阶段和怠速阶段,对不同阶段的轨迹段使用碳排放测算模型计算碳排放。对不同距离方法计算的碳排放以及考虑和不考虑怠速阶段的碳排放进行统计如图3所示。图3中,深色的为考虑怠速后的3种距离计算得到的碳排放,浅色的为未考虑怠速阶段的碳排放,即正常运行阶段的碳排放,结果表明:



(a) 每小时 CO 排放计算结果对比



(b) 每小时 CO₂ 排放计算结果对比

图3 每小时碳排放计算结果对比

Fig. 3 Comparison of the results of hourly carbon emission calculations

① 考虑怠速阶段前后的碳排放结果对比。对于考虑怠速阶段前后的碳排放而言,CO 的排在考虑怠速阶段前后变化很大,在正常运行阶段的 CO 排放相对较少,怠速阶段的 CO 排放较多,占据总的 CO 排放的 90%以上;CO₂ 的排在考虑怠速后有所增加,但增量不大,其变化趋势在考虑怠速阶段前后相似,怠速阶段的 CO₂ 排放对总的 CO₂ 排放的影响比怠速阶段 CO 排放对总的 CO 排放的影响小。总之,考虑怠速阶段的碳排放至关重要,尤其是对于 CO 而言,其绝大多数排放处于怠速阶段,对于不考虑怠速阶段的碳排放测算模型测算的碳排放会对碳排放有所低估。

② 不同距离计算得到的碳排放结果对比。对于3种距离计算方法计算得到的碳排放而言,在考虑怠速阶段后,测地线距离计算的 CO 排放比其余2种距离计算得到的碳排放要低,而对于 CO₂ 而言则正好相反。原因在于 CO 的排在怠速阶段更多,其受距离的影响更小,另外在划分不同阶段时,由于欧式距离和 Haversine 距离计算的轨迹段距离要比测地线计算的短,在相同的出行时间下,欧式距离和 Haversine 距离计算得到的速度要更低,按照速度划分的阶段中划分为怠速阶段的单个轨迹段更多,导致二者计算的 CO 排放比使用测地线方法计算的 CO 高;而 CO₂ 的排在正常运行阶段更多,其与出行距离成正比,而测地线距离计算的出行距离要比欧式距离和 Haversine 距离要高,导致测地线距离计算的碳排放要比其余2种距离计算方法计算得到的碳排放要高。

2.2 基于改进的碳排放测算模型的应用

本节使用2023年4月3日至4月9日共7天的济宁市轨迹数据,应用改进的碳排放测算模型进行居民出行碳排放测算并分析一周内居民出行碳排

放的时空分布特征。

2.2.1 居民出行特征分析

在进行碳排放测算之前,需要对居民出行特征进行统计分析,来获取碳排放测算所需要的参数,并可以据此来研究出行特征与碳排放之间的关联关系。对预处理的数据统计一周内居民出行的频率、上下车点、车流量、时间、距离、速度等出行特征,研究居民在不同日期、不同时间段的出行需求。4月3日至4月9日为周一至周日,其中4月5日为清明节,属于休息日。每天的出行频率统计结果如图4所示。

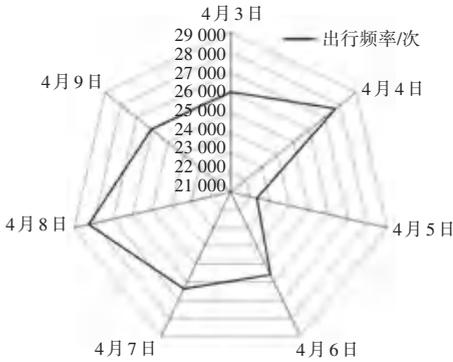


图 4 居民出行频率分布情况

Fig. 4 Distribution of residents' travel frequency

结果表明,在一周的出行中,周六的出行频率最高,周三的出行频率最低,周六的出行频率和周二相当,即一周中,周三对出租车的需求最低,周二和周六的需求最高。

不同日期的出行特征存在周期性,各工作日、休息日内的出行特征随时间的变化规律相似,如图5所示。在所有的出行特征中,车流量在不同日期的变化趋势差异最小且高峰时段最为明显,高峰时段分布在7:00~8:00、14:00~15:00、21:00~22:00,这表明这些时段运营的出租车比其余时段多,这些时段也是居民对出租车需求最高的时段。在整个白天,上下车点数、出行距离、出行时间均较高,且存在多个波峰,这表明白天居民出行活动频繁,且居民出行不局限于车流量高峰时段。工作日速度较低的时段(速度的高峰时段)为7:00~8:00、17:00~18:00,休息日为10:00~11:00、17:00~18:00,这些时段车辆运行速度不高,道路拥堵;工作日出行距离高峰时段为9:00~10:00、18:00~19:00,休息日为11:00~12:00、18:00~19:00;工作日出行时间的高峰时段为8:00~9:00、18:00~19:00,休息日为11:00~12:00、18:00~19:00;出行时间和距离的高峰时段比速度最低的时段晚了1~2 h。

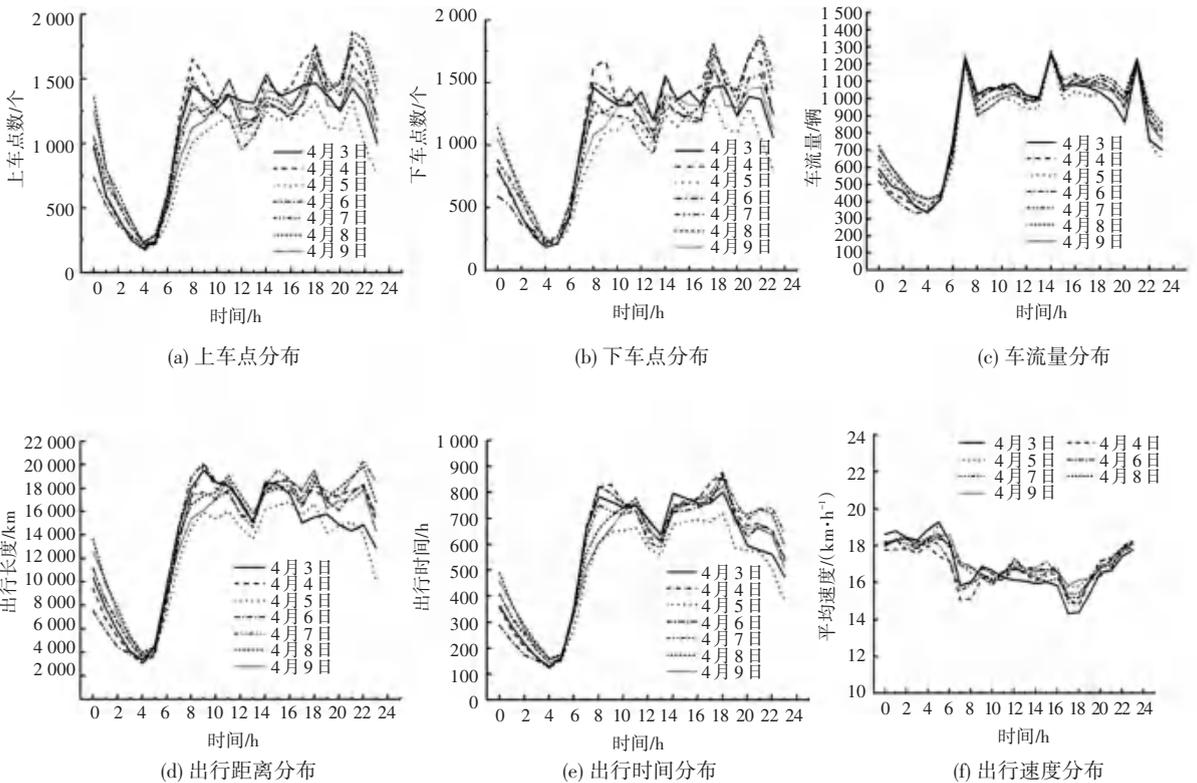


图 5 每日出行特征分布

Fig. 5 Distribution of daily travel characteristics

2.2.2 碳排放的时间分布特征

研究采用改进后的碳排放测算模型,测算不同日期的碳排放,如图6所示。研究所说的碳排放为CO和CO₂排放。研究表明,CO和CO₂的总量相差较大,两者的变化趋势相似,且与出行频率的变化趋势相同。4月5日为一周中碳排放最少的日期,这与出行频率一样。

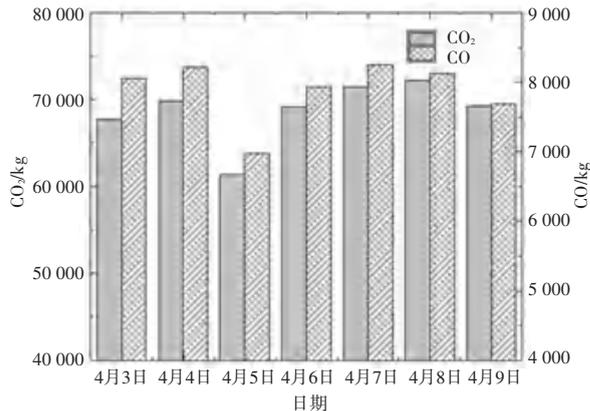
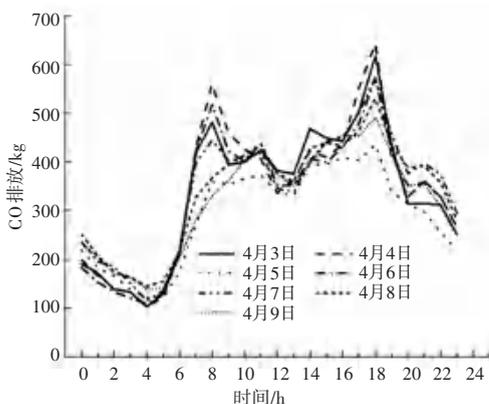


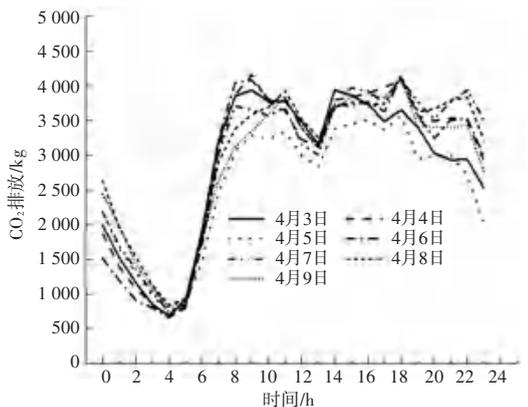
图6 不同日期的碳排放测算结果

Fig. 6 Carbon emission calculation results for different dates

测算不同日期分小时的碳排放量,如图7所示。由图7可知,CO的排放存在2个很明显的波峰,分别位于8:00~9:00和18:00~19:00时段。CO₂的波峰并不明显,在整个白天排放均较高,且波动不大。一天中,碳排放最多的时段基本位于18:00~19:00时段。碳排在4:00~5:00时段最少,从4:00~5:00开始持续上升,CO在工作日的8:00~9:00时段达到一天中的第一个高峰值,CO₂在工作日的9:00~10:00达到一天中的第一个高峰值,碳排在休息日的11:00~12:00时段达到一天中的第一个高峰值。之后碳排放随时间有轻微波动,在18:00~19:00达到第二个高峰值,即全天最高碳排放时段。



(a) CO 排放的时间分布



(b) CO₂ 排放的时间分布

图7 碳排放的时间分布

Fig. 7 Time distribution of carbon emissions

各工作日之间的碳排放随时间的变化趋势相似,各休息日之间的碳排放随时间的变化趋势相似,这与出行特征的规律一样。CO排放随时间的变化与出行时间随时间的变化规律接近,CO₂排放随时间的变化与出行距离随时间的变化规律接近,即CO排放受出行时间影响更大,CO₂排放受出行距离影响更大。具体来说,CO排放主要与燃料燃烧的过程相关,通常是由于燃料不完全燃烧产生的,出行时间越长,车辆处于低速或怠速状态的频率越高,燃料燃烧越不充分,CO排放越多。CO₂排放主要与燃料的消耗和行驶距离有关,行驶距离越长、燃料消耗越多,CO₂排放越多。

2.2.3 碳排放的空间分布

创建500 m×500 m的网格,将预处理后的轨迹段按网格断开,并计算网格内轨迹段的距离、平均速度、时间,网格内轨迹段的行驶时间按照比例分配。对不同日期的CO和CO₂的空间分布情况进行分析,如图8、图9所示。由图中可知,结合道路网的分布情况,结果表明:

(1)每日碳排放的空间分布相似,主要位于济水大道内环高架路、济宁大道内环高架路、任城大道内环高架路、宁安大道内环高架路这4条高架路所围成的区域内,也是济宁市市中心所在区域。

(2)碳排放热点路段主要位于共青团路、琵琶山路、太白楼中路、宁安桥北路、建设路、火炬路,主要为道路网密集以及道路交叉分布的路段,碳排放热点区域主要位于商业中心、交通枢纽、医院、学校、交叉路口附近。

(3)碳排放量从市中心向外逐层递减,即碳排放最多的区域为市中心,此区域道路网密集且拥有大量的商业和服务业活动,车流量及人流量多。

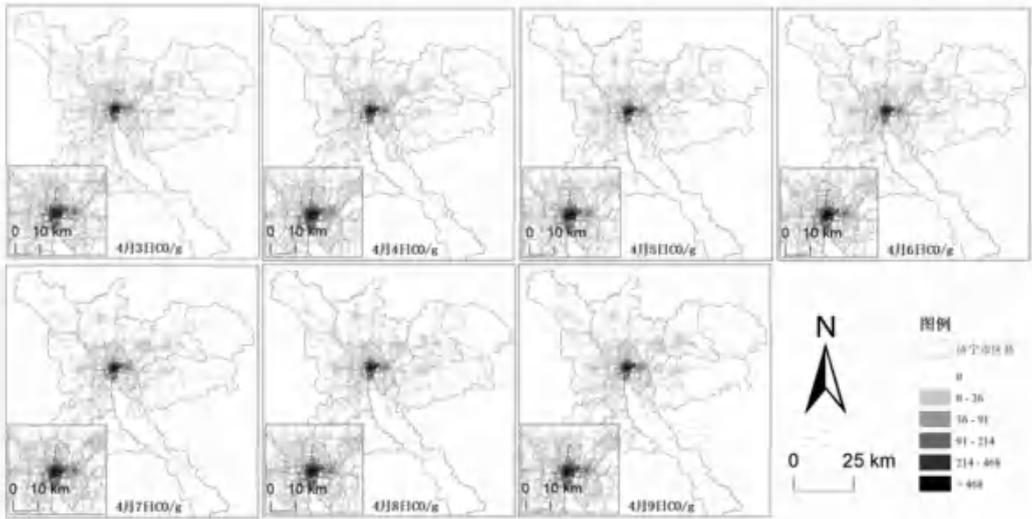
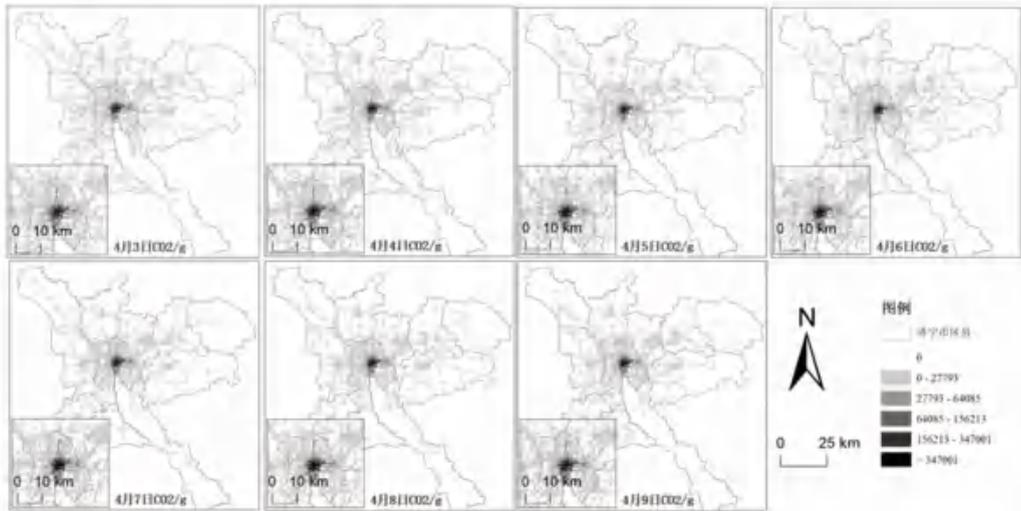


图 8 不同日期 CO 排放的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of CO emissions on different dates

图 9 不同日期 CO₂ 排放的空间分布Fig. 9 Spatial distribution of CO₂ emissions on different dates

3 结束语

研究改进了碳排放测算模型,并使用改进后的碳排放测算模型进行了济宁市的出租车碳排放的测算,得到的结论如下:

(1)对于不同距离计算方法而言,使用欧式距离和 Haversine 距离计算出行距离均对出行距离和 CO₂ 的排放有所低估,对 CO 的排放有所高估。单个轨迹段距离越长或轨迹段越多,欧式距离和 Haversine 距离与测地线距离差异越大,两者计算的出行距离越不准确。考虑怠速阶段的碳排放至关重要,尤其是对于 CO 而言,其绝大多数排放处于怠速阶段,对于不考虑怠速阶段的碳排放测算模型测算的碳排放会对碳排放有所低估。

(2)对于济宁市一周的居民出行碳排放而言,在居民出行特征方面,不同日期的出行特征存在周期性,各工作日、休息日内的出行特征随时间的变化规律相似。不同日期中,周二和周六对出租车的需求最高。不同时段中,7:00~8:00、14:00~15:00、21:00~22:00 时段居民对出租车需求最高。在居民出行碳排放方面,各工作日之间碳排放的分布趋势相似,各休息日之间碳排放的分布趋势相似。时间上,碳排放最多的时段基本位于 18:00~19:00 时段;CO 排放受出行时间影响更大,CO₂ 排放受出行距离影响更大。空间上,碳排放热点区域主要位于商业中心、交通枢纽、医院、学校附近,热点路段主要位于为任城区道路网密集以及道路交叉分布的路段。

参考文献

- [1] YANG Yuan, WANG Can, LIU Wenling. Urban daily travel carbon emissions accounting and mitigation potential analysis using surveyed individual data [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 192: 821–834.
- [2] 亓浩雲, 樊守彬, 王凯. 北京市不同功能区机动车排放特征研究 [J]. *环境污染与防治*, 2019, 41(9): 1056–1063, 1069.
- [3] 王天旻, 冯海霞, 魏代梅, 等. 济南市高精度机动车碳排放清单研究 [J]. *环境污染与防治*, 2023, 45(10): 1338–1342.
- [4] HUNEEUS N, DER V G H D, CASTESANA P, et al. Evaluation of anthropogenic air pollutant emission inventories for South America at national and city scale [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 235: 117606.
- [5] ZHANG Shaojun, WU Ye, LIU Huan, et al. Real-world fuel consumption and CO₂ (carbon dioxide) emissions by driving conditions for light-duty passenger vehicles in China [J]. *Energy*, 2014, 69: 247–257.
- [6] 郑丰, 赵海光, 吉江林, 等. 基于北京和昆明海拔条件下的国VI混合动力车实际道路排放特性研究 [J]. *环境科学研究*, 2022, 35(7): 1581–1588.
- [7] SUN Maopeng, XUE Chenlei, CHENG Yanqiu, et al. Analyzing spatiotemporal daily travel source carbon emissions based on Taxi trajectory data [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 107012–107023.
- [8] LI T, WU J, DANG A, et al. Emission pattern mining based on taxi trajectory data in Beijing [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 206: 688–700.
- [9] WANG Y, TAN D, ZHANG J, et al. The impact of urbanization on carbon emissions: Analysis of panel data from 158 cities in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(21): 7897–7907.
- [10] ZHAI J, SHE L, HAO S, et al. Projection of regional carbon emissions and analysis of emission reduction potential under multiple scenarios [J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 753–761.
- [11] 韩印, 李媛媛, 李文翔, 等. 基于轨迹数据的网约车排放时空特征分析 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2022, 22(1): 234–242.
- [12] ZHANG Na, WANG Zijia, CHEN Feng, et al. Low-carbon impact of urban rail transit based on passenger demand forecast in Baoji [J]. *Energies*, 2020, 13: 782.
- [13] KANG Jingu, OH H. Factors affecting vehicles' carbon emission in road networks [J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2016, 12: 736–750.
- [14] WANG Huihui, HUANG Hong, NI Xiaoyong, et al. Revealing spatial-temporal characteristics and patterns of urban travel: A large-scale analysis and visualization study with Taxi GPS data [J]. *Isprs International Journal of Geo-information*, 2019, 8(6): 257.
- [15] 翟文龙, 王海起, 费涛, 等. 北京市出租车 GPS 轨迹数据统计特征分析 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2020, 43(2): 79–84.
- [16] EBEL P, GÖL I E, LINGENFELDER C, et al. 2020 IEEE intelligent vehicles symposium (IV) [M] // EBEL P. Destination prediction based on partial trajectory data. Las Vegas, USA: IEEE, 2021: 1149–1155.
- [17] DENG Bin, DENMAN S, ZACHARIADIS V, et al. Estimating traffic delays and network speeds from lowfrequency GPS taxis traces for urban transport modelling [J]. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 2015, 15(4): 639–661.
- [18] ZHAO Pengxiang, KWAN M P, QIN Kun. Uncovering the spatiotemporal patterns of CO₂ emissions by taxis based on Individuals' daily travel [J]. *Journal of Transport Geography*, 2017, 62: 122–135.
- [19] NUZZOLO A, COMI A, PAPAE, et al. Understanding taxi travel demand patterns through floating car data [M]. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [20] KARNEY C. Algorithms for geodesics [J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 87: 1–13.
- [21] LI J, YANG X, CHEN Y, et al. Lecture notes in electrical engineering [M] // ZHANG Z. Analysis of stopped delay and stopped idling emissions of car of expressway toll gate. Singapore: Springer, 2022: 841–859.
- [22] 李佳贤, 陈艳艳, 杨晓光, 等. 中学校门前道路小汽车通学出行停车怠速排放特征分析 [J]. *物流科技*, 2024, 47(15): 63–69.
- [23] 何水苗. 基于 GPS 数据的城市道路机动车 CO₂ 排放测算及时空分布特征分析及时空分布特征分析 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [24] 王璐婷. 机动车怠速排放对社区大气环境的影响研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [25] 碳排放管理员. 环球网. 一升汽油的碳排放量是多少? [EB/OL]. [2024-01-26]. https://www.hqwx.com/web_news/html/2022-5/16529234051213.html.
- [26] 向乐乐. 太平洋汽车. 汽车怠速一小时费多少油? [EB/OL]. [2024-01-26]. <https://baike.pcauto.com.cn/342119.html>.