

城市公交车辆碳排放量测算与线网分配方法*

闫晟煜, 郝时杰, 王赏军, 赵成龙, 赵凌煜

长安大学汽车学院, 陕西 西安 710018

摘要: 提出了一种基于“自上而下”法的车辆碳排放量测算与路网分配方法。利用公交企业车辆能耗统计数据与碳排放因子, 研究了 BEV、PHEV 和传统燃料车辆的碳排放量测算方法。依托高频 GPS 数据中经纬度和车辆速度参数, 以 15 km/h 作为行驶状态判定阈值, 基于驱动系数和附属设备时间惩罚系数, 确定每个轨迹点的相对碳排放惩罚权重; 利用空间拥堵惩罚系数修正路段属性, 运用改进的网络核密度函数对公交线网的路段赋值, 通过计算各路段的归一化权重, 将车辆碳排放总量按照权重分配到公交线网上, 确定各路段的碳排放强度。研究表明: 经实例验证, 本文提出的公交车辆碳排放量测算与线网分配方法可行; 实例城市 2024 年公交车辆碳排放量为 20.43 万 t, 中型 BEV、大型 BEV 的每 100 km 碳排放量分别仅为同等车长 CNG 燃料车型的 59.10%、65.35%; 当车速低于 15 km/h 时, 相对碳排放惩罚权重呈非线性拖尾分布特征; 高碳排放区域显著集中于车流量大、站点密、线网密度高、信号灯密集的拥堵路段。研究成果可支撑面向绿色低碳的公交线网优化与局部高碳排放路段治理。

关键词: 城市公交车辆; 自上而下法; 碳排放因子; 核密度估计

中图分类号: U121 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(XXXX)XX-0001-08

Measurement and allocation methods for carbon emissions from vehicles

Yan Shengyu, Hao Shijie, Wang Shangjun, Zhao Chenglong, Zhao Lingyu

School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710018, China

Abstract: A top-down approach for measuring vehicle carbon emissions and allocating them to the road network was proposed. Utilizing the statistical energy consumption data of vehicles from public transit enterprises and carbon emission factors, calculation methods for Battery Electric Vehicles (BEVs), Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs), and traditional fuel vehicles were studied. Relying on the longitude, latitude, and vehicle speed parameters from high-frequency GPS data, 15 km/h was set as the threshold for determining the driving state. Based on the driving coefficient and the auxiliary equipment time penalty coefficient, the relative carbon emission penalty weight for each trajectory point was determined. Furthermore, the spatial congestion penalty coefficient was utilized to correct road segment attributes, and an improved network kernel density function was applied to assign values to the road segments of the transit network. By calculating the normalized weight of each road segment, the total carbon emissions of vehicles were allocated to the transit network according to the weights, thereby determining the carbon emission intensity of each road segment. The results indicate that the proposed measurement and network allocation method for public transit vehicle carbon emissions is feasible, as verified by a case study. The total carbon emissions of public transit vehicles in the example city in 2024 are 204 300 tons. The carbon emissions per 100 km of medium-sized BEVs

* 收稿日期: 2026-04-15

录用日期: 2026-05-12

网络首发日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 陕西省重点研发计划(2025CY-YBXM-064); 中央高校基本科研业务费(300102224206)

作者简介: 闫晟煜(1987年生), 男; 研究方向: 智慧交通工程; E-mail: ysy@chd.edu.cn



ZR20260096

and large BEVs account for only 59.10% and 65.35% of those of Compressed Natural Gas (CNG) vehicles of the same length, respectively. When the vehicle speed is lower than 15 km/h, the relative carbon emission penalty weight exhibits a non-linear heavy-tailed distribution characteristic. High carbon emission areas are significantly concentrated in congested road segments characterized by heavy traffic volume, dense transit stops, high network density, and frequent traffic lights. The research results will support the optimization of green and low-carbon public transit networks and the targeted governance of local high-carbon-emission road segments.

Key words: urban public transportation vehicles; top-down approach; carbon emission factor; kernel density estimation

当前,公路运输占全国交通领域碳排放的70%以上(吕晨等,2021)。随着城市化进程加快及机动车保有量持续攀升,精准核算公交系统碳排放并探明其时空分布演变,已成为制定精细化减排政策、推动行业绿色转型的迫切需求。目前,交通减排研究主要聚焦于“治理优化”与“量化测算”两方面。在治理优化层面,已有研究通过构建差异化通行费折扣等双层规划模型(闫晟煜等,2025),尝试利用价格杠杆引导路网流量重分配,为主动式减排提供了干预路径。在量化测算层面,学术界主要依赖“自下而上”与“自上而下”两套体系。

“自下而上”法侧重于微观活动数据的累加。现有研究广泛涵盖了多类交通场景的精细化测算,包括常规轨道交通与道路运输的能耗评估(闫晟煜等,2025;Liu et al., 2023);基于高频车辆轨迹解析微观驾驶行为的精细化排放量(Alam et al., 2017);针对海陆联运枢纽和城市居民日常出行的超高分辨率核算模型构建(Pallavidino et al., 2014; Ke et al., 2025);以及依托联网收费数据的省域高速公路路段级碳排放追溯(何榕健等,2023)。这类方法虽能深刻揭示微观维度的排放细节,但依赖底层数据质量与获取的连续性。

“自上而下”法基于宏观能源消耗统计账单,更适用于大尺度区域的总量把控。该方法的应用主要从以下几个维度展开:构建多层级估算体系,致力于打通从省级到市级的能源消耗与碳排放换算壁垒(闫晟煜等,2024);构建宏观排放规模预测,通过建立特定行业或关中平原城市群等区域级预测模型,前瞻性探讨碳达峰路径(景侨楠等,2019;田泽源等,2024);研究时空演变与驱动因素,重点揭示区域交通碳排放的动态轨迹及成因(Ren et al., 2023);针对纯电动公交,基于全生命周期视角量化上游电力生产结构对间接碳排放因子的决定性影响(Guan et al., 2025);还有结合GPS数据反向探讨

驾驶行为与宏观能耗关联的尝试等(张文会等,2026)。在具体测算实践中,现有研究未能厘清“城市公交”与“城市交通”的本质差异。对于城市交通,由于缺乏单车能耗的闭环数据,学术界普遍采用“单车行驶工况+保有量”或“行驶里程+交通量”的“自下而上”法,但城市公交的运行工况存在特殊性,其高频启停、低速行驶以及车内附属设施的高负荷运转,使得车辆在怠速状态下依然会产生不可忽视的能耗,传统的里程算法易造成估算失真。城市公交有别于分散式的私家车,具有企业化集中管理的特点,其燃油、天然气或电力加注均存在精确的财务账单记录,没必要采用“自下而上”法。

鉴于此,本文依托能耗量为基准的“自上而下”核算方法和公交企业逐月逐车的能耗数据,构建了“宏观总量核算+微观时空挖掘”分析框架,精准核算了2024年碳排放总量。考虑到公交车辆低速行驶、频繁启停和站点停靠等运行特征会导致碳排放在线网空间上的差异,仅依靠宏观能耗总量难以识别局部高排放路段。本文进一步引入高频GPS轨迹数据,用于刻画车辆运行状态与线网空间分布特征,将宏观总量核算结果与路段尺度空间分配相衔接,为公交线网低碳优化和局部高排放路段治理提供方法支撑。

1 公交车辆碳排放量测定

1.1 测算思路

采用“自上而下”法,基于公交企业的车辆能耗统计数据,形成如图1所示的测算思路。

基于公交企业能耗台账和车辆台账识别车辆能源类型与车型,分别采用传统燃料碳排放因子和电网碳排放因子,计算传统燃料车辆和BEV的碳排放量,并汇总得到研究范围内公交车辆碳排放总量。利用高频GPS轨迹数据提取车辆位置与速度信息,结合基础驱动能耗、附属设备时间能耗以及

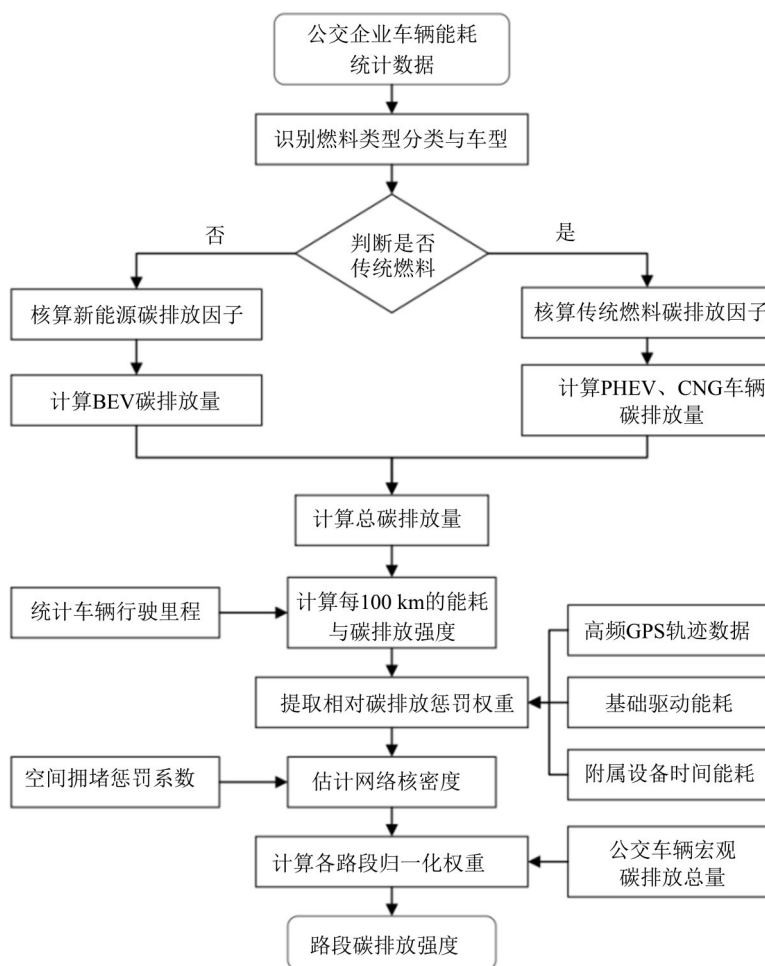


图1 城市公交车辆碳排放量测算与分配逻辑

Fig. 1 Calculation and distribution logic for carbon emissions of urban public vehicles

路段长度、宽度等空间属性,构建轨迹点相对碳排放惩罚权重和路段空间拥堵惩罚系数。采用改进网络核密度估计方法计算各路段相对碳排放浓度积分,并归一化得到路段分配权重;在总量守恒条件下,将公交车辆宏观碳排放总量分配至公交线网路段,得到路段碳排放量及单位长度碳排放强度。

1.2 公交车辆碳排放模型

城市公交车辆碳排放总量 E 为

$$E = E_t + E_e,$$

式中 E_t 为传统燃料车辆的碳排放量; E_e 为新能源公交车 CO_2 排放量。

传统燃料车辆的燃料类型涵盖 CNG、LNG, 其 CO_2 排放量为

$$E_t = \sum_t Q_t g_t,$$

式中 t 为传统燃料类型; Q_t 为 t 类燃料消耗量; g_t 为 t 类传统燃料的碳排放因子。

新能源公交车辆涵盖纯电动公交车辆 (BEV)、氢燃料电池公交车辆等。氢燃料电池公交车辆的

排放物为水和热量,不产生直接 CO_2 排放;氢气虽可由电解水、灰氢等途径制取,但其制取的用电属于上游环节,其碳排放量宜在能源生产端核算,不纳入城市公交运营重复计算。截至 2024 年,中国氢燃料电池公交车运营规模约 7 147 辆,占全国公共汽车总量约 1.09% (Du et al., 2023),仍属于低占比示范应用形态,不单独测算其碳排放。

BEV 在运行阶段无尾气直接排放,其碳排放间接来源于为车辆充电的电网。2024 年我国电网中火电发电量占比为 63.2% (Wang et al., 2026), BEV 的间接碳排放量由其终端耗电量与区域电网的平均火力发电排放因子确定,即 $E_e = Q_e g_e$, Q_e 为新能源公交耗电量, g_e 为电力碳排放因子。

2 碳排放因子标定

2.1 传统燃料碳排放因子

排放因子是碳计量模型的基础参数。《国家温室气体清单指南》虽提出了标准化的排放因子参数

体系(刘志强等,2025),但我国能源供应链具有鲜明的区域特征,实际燃料组分及燃烧工况条件与上述假设之间存在差异性,因此构建了适配中国区域特征的本土化CO₂排放因子。即:

$$g_i = \frac{44}{12} h_i c_i d_i,$$

其中44/12为碳转化为CO₂的分子量比; h_i 、 c_i 和 d_i 分别为*t*类燃料的低位发热值、单位热值含碳量和碳氧化率。

各类燃料的依据《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2020)确定(国家市场监督管理总局等,2020)。各类燃料的和取自生态环境部《大气污染物与温室气体融合排放清单编制技术指南(试

行)》,具体数值见表1。

通过计算,得到了传统燃料的碳排放因子。结果如表2所示。

表1 燃料参数取值

Table 1 Fuel parameter values

参数类型	d_i /%	h_i /(kJ·kg ⁻¹)	c_i /(tC·TJ ⁻¹)
煤炭	96	20 934	25.8
汽油	98	43 124	18.9
柴油	98	42 705	20.2
LNG	98	51 498	17.2
CNG	99	49 200	15.3

表2 燃料碳排放因子

Table 2 Fuel carbon emission factors

燃料类型	柴油	汽油	LNG	CNG	煤炭
g_i	3.099 8 kg/kg	2.928 7 kg/kg	3.182 9 kg/m ³	2.732 5 kg/m ³	1.898 9 kg/kg

2.2 电网碳排放因子

电力碳排放因子是核算间接碳排放量的重要参数。为提升区域适配性,应选择供给研究对象所在地区的发电数据,考虑发电量的电力碳排放因子为 $g_{ei} = s_i/m_i$,其中 g_{ei} 为电力碳排放因子, s_i 为某省份在*i*年火电消耗煤炭而排放的CO₂, m_i 为某省份在*i*

年的总发电量。

鉴于市级层面缺乏独立的电网碳排放核算边界数据,故在测算市域电网碳排放因子时采用省域电力结构数据。查询省份统计年鉴,得到了火力发电能耗量和发电量(见表3)。

表3 陕西火电消耗及电网碳排放因子

Table 3 Shaanxi thermal power consumption and grid carbon emission factor

类型	燃料量	CO ₂ 碳排放量/万t	比例/%
煤炭	11 228.86 万t	21 322.482 3	99.910 2
石油	0.56 万t	1.688 0	0.007 9
天然气	0.58 10 ⁻⁸ ·m ⁻³	17.482 7	0.081 9

由表3可见:实例省份火电CO₂碳排放总量为21 341.652 9 万t,基于2 789.85 × 10⁸ kWh的火力发电量,核算出省域的 g_{ei} 为0.764 6 kgCO₂·kWh⁻¹,客观地量化了发电端的BEV车辆碳足迹强度。

3 碳排放量的线路分配

3.1 数据基础与处理

选用某市公交系统的高频GPS轨迹数据作为基础。原始数据集以.csv格式进行存储,完整记录了公交车辆在特定瞬时的时间、空间坐标及运动学状态。使用的关键字段如表4所示。

车载GPS轨迹数据由于信号遮挡或设备故障,

存在漂移和异常值。根据城市地理范围,分别剔除经度和纬度超出城市域内的无效数据,校验原始轨迹数据后,识别出分配线路上当日未按照既定路线行驶的所有车辆,确保时间字段统一为标准时间戳,并将速度字段清洗为Float型,空缺值填充为0,最终保留有效的高频轨迹点。

3.2 路段碳排放量分配

提出一种基于车辆速度的自上而下碳排放空间分配框架。为实现碳排放总量向路网的分配,引入质量守恒分割机制,城市公交车辆碳排放总量为*E*,计算各路段的归一化权重 P_j ,将总量按比例分配至路段排放量 E_j ,计算单位路段碳排放强度 I_j ,具体测算方法为

表4 城市公交车辆GPS数据字段内容
Table 4 Content of GPS data fields for urban public vehicles

字段名称	格式	具体含义	在分配过程中的用途
Bus_ID	Varchar(20)	车辆唯一标识编码	筛选异常数据,按时间序列排序,隔离不同车辆轨迹
Route_ID	Varchar(20)	公交线路唯一标识	将离散的轨迹点聚类至特定公交线网
Terminal_time	String	时间戳	结合空间坐标序列,推算车辆加减速工况
Longitude/Latitude	Float	车辆瞬时空间地理坐标	划定经纬度几何边界,承载底层排放权重,支撑高碳排放区域的“点-轴”形态渲染
Speed	Float	车辆运行速度(单位:km/h)	决定该轨迹点在地理空间KDE映射时所分担的碳排放浓度

$$\begin{cases} P_j = D_j / \sum_{k=1}^m D_k, \\ E_j = EP_j, \\ I_j = E_j / L_j, \end{cases} \quad (1)$$

式中 m 为路段数量; P_j 为 j 路段分配宏观总量的归一化权重; D_j 为 j 路段的微观碳排放累积密度; L_j 为 j 路段的实际长度。

为获取式(1)中的 D_j , 引入改进的网络核密度估计(KDE, kernel density estimation)模型, 将离散的公交GPS轨迹点归纳到实际路网拓扑图中, 使微观碳排放权重仅沿物理连通的街道网络进行分配。对于路段 j , 其微观碳排放累积密度由轨迹点相对碳排放惩罚权重 q_i 、路段空间拥堵惩罚系数 ω_j 以及轨迹点到路段的网络距离衰减共同决定, 计算式为

$$D_j = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^n [q_i \omega_j K(d_{ij}/r)], \quad (2)$$

式中 r 为搜索半径, 取 500 m; n 为半径内轨迹点总数; d_{ij} 为第 i 个GPS轨迹点到路段 j 的最短网络拓扑距离。高斯核函数

$$K(d_{ij}/r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(d_{ij}/r\right)^2\right).$$

ω_j 的取值由路宽与路长共同决定。以路宽阈值 w_0 和路长阈值 l_0 作为连续流与受信号灯干扰的间断流的空间分界点, 较窄的 w_0 与较短的 l_0 会加剧碳排放的局部聚集效应, 其表达式为

$$\omega_j = \lambda_1(w_0/w_j) + \lambda_2(l_0/l_j),$$

式中 w_j 、 l_j 分别为路段 j 的实际宽度、长度; λ_1 、 λ_2 为拓扑属性的敏感度权重。

分配过程中, 轨迹点初始权重的精准度决定空间分配的合理性。高频GPS轨迹的运行速度能够较好地预测单位里程能耗(Kholod et al., 2016; Aga et al., 2025)。城市公交车辆的能耗特性受环境温度与低速拥堵工况影响。其总能耗可分驱动能耗和附属设备能耗(包括暖风、电池热管理等系统)。

在冬季低速场景下, BEV平均能耗较夏季高40%~45%(Vehvilainen et al., 2022)。在标准工况下, 附属设备能耗约占总能耗的50%, 冬季该比例可升至70%(Bartlomiejczyk et al., 2020); 其线性回归分析进一步表明, 附属设备能耗与运行速度呈显著负相关, 交通拥堵可使总能耗增加约60%。城市低速区域HVAC暖风系统与电池加热系统是能耗增量主要来源(Gu et al., 2025)。

在低速或拥堵工况下, 车辆行驶单位里程所需时间显著延长, 附属设备能耗的时变特性对单位里程能耗的影响较大。基于此机理, 定义第 i 个轨迹点的相对碳排放惩罚权重 q_i 为

$$q_i = \alpha + \beta/v_i, \quad (3)$$

式中 v_i 为该轨迹点的车辆速度; α 为驱动系数; β 为附属设备时间惩罚系数。

4 模型实例分析

4.1 实例与碳排放量测算

2024年, 某城市公交企业拥有营运车辆7934辆, 线路总长9560 km。根据各类能耗统计数据及各能源碳排放因子, 得到3种燃料类型的公交每月的碳排放总量, 如表5所示。

每100 km的能耗与碳排放, 如图2所示。由图可知: 2024年该市公交车辆的碳排放总量为20.43万t。其中, BEV、PHEV和CNG车辆的碳排放量分别占81.27%、6.61%和12.12%。对比相同车型不同燃料类型的单车碳排放量, 中型BEV、大型BEV的每100 km碳排放量分别仅为同等车长CNG燃料车的59.10%、65.35%, 而PHEV的碳排放量处于CNG燃料车和BEV之间。

4.2 碳排放强度分配

依据我国《城市综合交通体系规划标准(GB/T 51328—2018)》(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2018), 城市公共汽电车的运送速度下限为

表5 某市公交车车型与燃料类型结构¹⁾
Table 5 Structure and fuel types of urban public vehicles in Xi'an city

车型	燃料类型结构比例/%			碳排放量/万 t			总计/万 t
	CNG车辆	PHEV	BEV	CNG车辆	PHEV	BEV	
中型轿车	3.42	0.00	3.30	0.67		0.13	
中型巴士	7.35	0.00	0.00	0.90			20.43
大型巴士	2.61	14.72	67.15	0.89	1.34	16.21	
双层巴士	0.00	0.00	1.45			0.29	

1) 空格表示无数值。

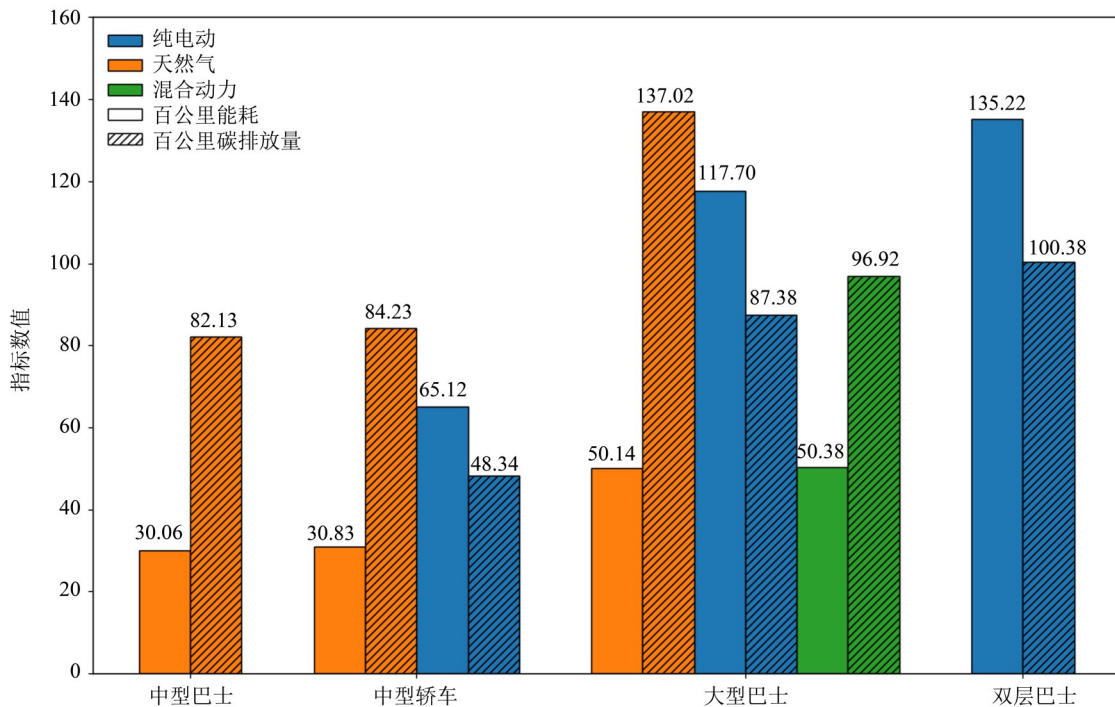


图2 各车型每 100 km 的能耗与碳排放量

Fig. 2 Energy consumption and carbon emissions per 100 km by vehicle types

15 km/h, 本文将作为识别公交车辆低速拥堵运行状态的经验阈值。设定 $\alpha = 20, \beta = 300$, 当 $v_i = 15$ km/h 时, 时间惩罚项 β/v_i 的分配权重为 20, 与基础驱动项保持同一量级, 表示车辆在拥堵临界状态下同时受到驱动能耗和附属设备能耗的影响; 当 $v_i < 15$ km/h 时, β/v_i 随速度降低呈反比例非线性增大, 从而强化低速、频繁启停及附属设备持续运行对碳排放空间分配权重的影响。该设定主要用于提高低速拥堵轨迹点识别的敏感性和模型分配结果的稳定性。

如图 3 所示, q_i 的测算结果呈现非线性离散与聚集特征, 反映了核心参数的约束条件。即:

1) 高碳排放区 ($v_i < 15$ km/h)。散点沿纵轴呈发散与拖尾分布特征, 表明在低速工况下式(3)对

车辆能耗赋予了较高的空间分配权重, 车速降低会使惩罚权重显著增加。

2) 平稳收敛区 ($v_i \geq 15$ km/h)。 β/v_i 迅速减少, 离散度被大幅压缩, 表明 q_i 在畅通工况下将稳定收敛于 α 的基准水平。

采集 2024 年 12 月 30 日该市 5 条干线公交线路上车辆的高频 GPS 轨迹数据, 包含公交车辆 99 辆, 共 381 079 个有效轨迹点。轨迹点能够反映通勤早晚高峰和冬季公交车辆高能耗的特征, 并体现“节前诱发性拥堵”的叠加状态。按照 Longitude、Latitude 字段范围, 剔除高频 GPS 轨迹数据中超出该市主城区地理范围的数据。对原始轨迹数据进行校验后, 识别出一些车辆临时任务数据, 因未在日常按照既定路线行驶, 予以剔除, 最终保留的有

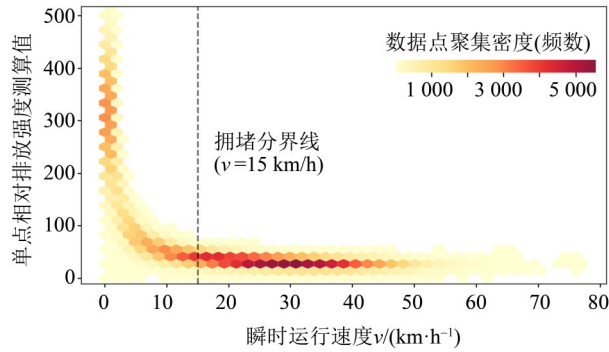


图3 速度与排放强度数据点聚集密度的关系

Fig. 3 The relationship between speed and the density of emission intensity data points

效高频轨迹点为380 360个。

路段宽度反映道路横断面条件,较窄路段更容易受到路侧停车、非机动车、公交停靠和出入口干扰,导致车辆运行稳定性下降;路段长度反映城市路网分割尺度,较短路段通常对应更高的交叉口、信号灯或站点干扰密度,车辆更易出现低速、停车与再启动工况。路网密度(路长)均是影响道路网络宏观性能的关键结构变量(Ma et al., 2025),但二者对拥堵的相对贡献机制尚不明确。在缺乏实测样本标定其权重的情况下,本文暂采用等权假设作为初步简化,即 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$,表示二者在初步空间分配中具有相同重要性。

交通运输部《公交都市考核评价指标体系》将“公共交通站点500米覆盖率”作为公交都市建设考核指标之一,表明500 m是城市公交服务覆盖与站点可达性评价中的常用空间尺度。基于此,本文将搜索半径设定为500 m,用于刻画公交轨迹点对相邻路段碳排放强度的影响范围。利用式(2)生成了该市公交碳排放的空间分配结果,如图4所示。

由图4可见,当车辆行驶于高路网密度、信号灯密集、站点集中的城市核心区时,呈低速缓行与频繁启停的特征,这时提升运行速度可降低局部高碳排放量。碳排放强度最高的线路 I_j 为194.8,平均速度为10.5 km/h。这主要是因为途经高人口密度的城市建成区,而呈现典型的高碳排放强度;线路2、3、4的指标数值和平均速度相近,主要运行于次干道或商圈沿线,受信号灯周期性影响显著;线路5的 I_j 为159.4,平均速度为13.5 km/h,且其行驶于主干道、路段的信号灯协调性好,因此可维持经济工况。

5 结论

1) 提出基于“自上而下”法的车辆碳排放量测算与路网分配方法。实例城市2024年公交车辆碳

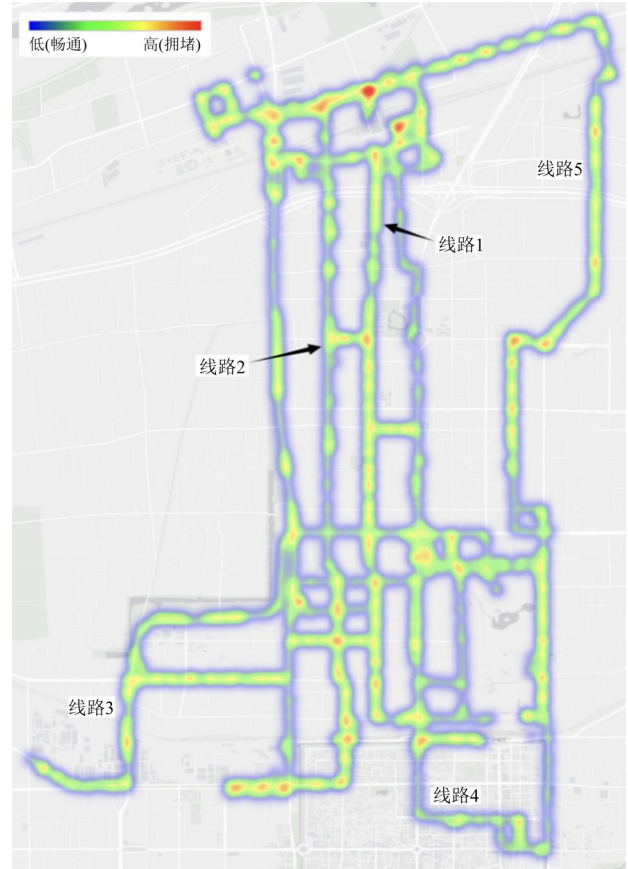


图4 5条公交线路的车辆碳排放强度分布

Fig. 4 Distribution of carbon emission intensity of urban public vehicles on 5 bus lines

排放量为20.43万t, BEV电耗的间接碳排放量占比高达81.27%。结果表明,高碳排放强度路段主要集中于城市核心区及高人口密度建成区,说明该方法能够有效识别公交线网的局部高排放区域。

2) 与私家车等分散交通主体相比,城市公交具有企业集中管理、车辆台账和能源消费记录较完整的特点。在具备能耗数据的条件下,优先采用“自上而下”方法锁定系统碳排放总量,再利用GPS轨迹数据进行空间分配,可降低单纯依赖里程、交通量或瞬时工况数据推算总量带来的累积误差。

3) 受数据范围限制,本文实例验证仅基于冬季单日5条干线公交线路的高频GPS轨迹数据,旨在检验将公交车辆碳排放总量分配至线网路段的方法的可行性。由于样本未覆盖多季节、不同日期类型和完整公交线网,本文暂未充分分离气温、客流、车辆载荷和相邻日期运行波动对能耗及分配结果的影响。后续研究将扩展至全线网、多日期和不同季节的数据,并纳入环境温度、客流负载和道路运行状态等变量,以提高碳排放线网分配结果的稳定性与外推性。

参考文献:

- 高庆先, 2025. 温室气体清单指南历程及透明度框架的模式、程序和指南分析与展望[J]. 气候变化研究进展, 21(05): 593-601.
- 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会, 2020. 综合能耗计算通则: GB/T 2589—2020[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 何榕健, 陈立峰, 何建文, 等, 2023. 城市居民出行碳排放模型构建及其应用[J]. 复旦学报(自然科学版), 62(6): 796-806.
- 景侨楠, 侯慧敏, 白宏涛, 等, 2019. 自上而下的城市能源消耗碳排放估算方法[J]. 中国环境科学, 39(1): 420-427.
- 刘志强, 王艳召, 李云凝, 等, 2025. 我国火电行业节能降碳成效分析与“十五五”展望[J]. 中国能源, 47(10): 5-14.
- 吕晨, 张哲, 陈徐梅, 等, 2021. 中国分省道路交通二氧化碳排放因子[J]. 中国环境科学, 41(7): 3122-3130.
- 生态环境部办公厅, 2024. 大气污染物与温室气体融合排放清单编制技术指南(试行)[R]. 北京: 生态环境部.
- 田泽源, 董治, 董治宇, 等, 2024. 基于面板数据模型关中平原城市群交通碳排放峰值预测与脱钩分析[J]. 中国环境科学, 44(10): 5901-5911.
- 闫晟煜, 王钊龙, 武瑾, 等, 2024. 省域高速公路网车辆碳排放量测算方法[J]. 中国环境科学, 44(12): 7095-7104.
- 闫晟煜, 赵佳琦, 尤文博, 等, 2025. 高速公路货车差异化通行费折扣的双层规划模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 65(7): 1347-1358.
- 余昆, 2024. 纯电动公交车动力电池衰减问题的破解[J]. 城市公共交通, (10): 29-30.
- 张文会, 张玮仪, 乔晓田, 等, 2026. 纯电动公交车全生命周期碳排放测算与排放因子[J/OL]. 吉林大学学报(工学版), 1-12. [2026-04-07]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250706>.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2018. 城市综合交通体系规划标准: GB/T 51328—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- Aga A G, Arsed A N, Huluka A W, 2025. Predictive analysis of passenger vehicle emissions and fuel consumption in Addis Ababa, Ethiopia using COPERT based on vehicle growth forecasting[J]. Atmos Environ X, 28: 100385.
- Alam M S, Duffy P, Hyde B, et al, 2017. Improvement in the estimation and back-extrapolation of CO₂ emissions from the Irish road transport sector using a bottom-up data modelling approach [J]. Transp Res Part D Transp Environ, 56: 18-32.
- Bartłomiejczyk M, Kolacz R, 2020. The reduction of auxiliaries power demand: The challenge for electromobility in public transportation [J]. J Cleaner Prod, 252: 119776.
- Du X, Kang X, Gao Y, et al, 2023. Driving behavior characterization and traffic emission analysis considering the vehicle trajectory[J]. Front Psychol, 14: 1341611.
- Gu J, Liao Q, Zhang K M, 2025. Assessing the cold weather impact on battery electric transit buses[J]. Transport Res Part D-Tr E, 145: 104809.
- Guan H, Huang C, 2025. Driving effects and differences of transportation carbon emissions in the Yangtze River Economic Belt[J]. Sustainability, 17(4): 1636.
- Ke L, Ren Z, Wang Q, et al, 2025. Transport carbon emission measurement models and spatial patterns under the perspective of land - sea integration - take Tianjin as an example[J]. Sustainability, 17(7): 3095.
- Kholod N, Evans M, Gusev E, et al, 2016. A methodology for calculating transport emissions in cities with limited traffic data: Case study of diesel particulates and black carbon emissions in Murmansk [J]. Sci Total Environ, 547: 305-313.
- Liu W, Zhang J, Jin L, et al, 2023. Sustainable low-carbon layout of land around rail transit stations based on multi-modal spatial data[J]. Sustainability, 15(12): 9589.
- Pallavidino L, Prandi R, Bertello A, et al, 2014. Compilation of a road transport emission inventory for the Province of Turin: Advantages and key factors of a bottom-up approach[J]. Atmos Pollut Res, 5(4): 648-655.
- Ren G, Wang W, Wu W, et al, 2023. Carbon emission prediction model for the underground mining stage of metal mines[J]. Sustainability, 15(17): 12738.
- Vehviläinen M, Lavikka R, Rantala S, et al, 2022. Setting up and operating electric city buses in harsh winter conditions [J]. Appl Sci, 12(6): 2762.

(责任编辑 王海蓉)