

考虑电网端的城市交通碳排放核算方法

修高群, 晁叶

(北京清华同衡规划设计研究院有限公司, 北京 100085)

摘要: 城市交通碳排放核算并无统一标准, 有必要通过科学评估交通活动研究行之有效的碳排放核算方法。首先, 总结现状各类碳排放核算方法的特征、适应性及输入输出参数, 剖析不同方法的应用情景及优劣势。统筹考虑上游电网端及下游消费端交通活动全生命周期碳排放, 基于城市内部交通和对外交通活动水平数据分别构建燃油交通工具和电动交通工具碳排放核算模型, 提出城市交通尺度碳排放核算方法。通过烟台市案例验证该核算方法的有效性和实操性, 并从私人汽车电动化、提升公共交通出行品质、鼓励货运公转铁3方面提出减碳工作思路。

关键词: 城市交通; 碳中和; 碳达峰; 碳排放核算方法; 电动交通工具

Carbon Emission Accounting Method of Urban Transportation Considering Power Grid Impact

XIU Gaoqun, CHAO Ye

(Beijing Tsinghua Tongheng Urban Planning & Design Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: Since there is no unified standard for urban transportation carbon emission accounting, it is necessary to scientifically assess transportation activities to study effective carbon emission accounting methods. Firstly, this paper summarizes the characteristics, adaptability, and both input and output parameters of existing carbon emission accounting method. The application scenarios, advantages and disadvantages of different methods are analyzed. Considering the life cycle carbon emissions of upstream power grid and downstream consumption end transportation activities in a coordinated manner, carbon emission accounting models for fuel-powered and electric vehicles are proposed based on the data of urban internal and external transportation activities, respectively. Then the corresponding carbon emission accounting method at the urban transportation scale is established. The effectiveness and practicality of the proposed method are further verified through the case study of Yantai, and thoughts in carbon reduction are put forward from three aspects: improving private car electrification, enhancing the quality of public transportation service, and encouraging the transfer of freight transportation from road to rail.

Keywords: urban transportation; carbon neutrality; carbon peak; carbon emission accounting method; electric vehicles

收稿日期: 2023-01-01

作者简介: 修高群(1994—), 女, 山东烟台人, 硕士, 工程师, 研究方向为交通运输规划与管理, 电子邮箱910408666@qq.com。

交通运输业是中国实现“碳中和、碳达峰”(以下简称“双碳”)目标的重要领域之一。2018年, 中国交通部门能耗占全国终端能源消耗量的10.7%, 未来交通部门能耗和碳排放仍将随着经济高速发展而快速增加^[1]。城市交通碳排放的核算不仅面临所需数据众多、核算标准不统一等问题, 目前碳排放领域的研究对电动交通工具的关注尤其不足, 多数忽视电网端碳排放, 将电动交通工具作为零碳工具, 没有完整反映电动交通工具在全生命周期的实际碳排放情况。因此

快速准确地对上游电网端及下游消费端交通活动全生命周期碳排放进行核算, 包括对燃油交通工具及电动交通工具不同阶段碳排放的把握, 成为新时期交通规划工作的重要课题。

1 城市交通碳排放特征分析

1.1 城市碳排放占主体, 交通部门碳排放增速快、达峰慢

中国处于城镇化进程关键时期, 社会经

济发展及都市圈经济一体化发展带来了出行距离和出行强度的持续提升。近年来,碳排放整体增长速度有一定放缓,主要体现在碳排放总量较大的电力和电热生产工业部门,而交通部门碳排放年均增速仍维持在5%以上,已经成为温室气体排放增加最快的部门(见图1)。交通领域碳达峰通常晚于工业、居住和商业等部门,国家发展和改革委员会能源研究所预测中国交通部门碳排放将在2030年后不久达峰,晚于建筑和工业部门。

2020年,中国城市承载了63.9%的人口,产生了70%以上的碳排放^[2]。对于城市交通领域,机动化出行产生的尾气是碳排放的主要来源。根据预测,2030年中国的城镇化率将达到70%左右,大约有10亿人生活在城市里,机动化仍处于高速发展阶段,伴随城市发展规模的持续扩大,交通碳排放仍将处于持续增长阶段^[3]。

对于区域交通领域,公路运输(含社会车辆、营运车辆)是交通领域碳排放的重点方面,碳排放量占交通领域碳排放总量的86.76%。水路运输碳排放量占6.47%,民航运输占6.09%,铁路运输占0.68%。其中,公路运输中重型货车的碳排放量最大,占公路运输碳排放总量的54%^[4]。

面对交通碳排放增速快、达峰慢的实际情况,需要重视交通领域的减碳。作为交通碳排放的主要贡献者,城市是实现“双碳”目标的主战场,应将城市交通减碳研究摆在首要地位,明确城市交通碳排放核算方法,探索城市交通的减碳策略。

1.2 燃油交通工具与电动交通工具碳排放链条不同

据中国汽车技术研究中心有限公司核算,汽车碳排放量占中国交通领域碳排放量

80%以上,占全社会碳排放总量7.5%左右。交通领域产生的温室气体主要包含两部分:一是人或物在移动过程中由交通工具产生的温室气体直接排放,即油箱/电池到车轮阶段的碳排放;二是来自上游能源生产阶段产生的间接排放,包括油井到油箱阶段、电厂到电池充放电阶段的碳排放。2020年,汽车使用阶段碳排放量7.2亿t,约占汽车碳排放总量的九成^[5],因此燃油汽车交通活动减碳应重点关注使用阶段即油箱到车轮阶段的直接碳排放。

电动交通工具在使用阶段没有产生直接碳排放,但是上游电力生产阶段会通过化石燃料燃烧或其他方式发电产生碳排放(绿电除外),属于交通活动间接产生的主要碳排放。因此,电动交通工具交通活动主要相关的碳排放为电厂到电池充放电阶段的碳排放,这与燃油汽车刚好相反。城市交通领域的碳排放核算忽略了这部分碳排放,没有完全反映电动交通工具在全生命周期碳排放实际情况,影响对电动交通工具交通活动在全行业碳排放中重要程度的判断。

近年来,电动汽车保有量在国家政策扶持下快速增长。根据公安部最新统计,截至2023年底,全国新能源汽车保有量达2 041万辆,占汽车总量的6.07%;其中纯电动汽车保有量1 552万辆,占新能源汽车保有量的76.04%。新注册登记新能源汽车数量从2019年120万辆到2023年743万辆,呈高速增长趋势。随着电动汽车占比日益增高,只有充分考虑电厂到电池充放电阶段碳排放才能真正反映全行业交通活动实际碳排放水平。

2 城市交通领域碳排放核算方法梳理

城市交通领域现有的碳排放核算方法分为两类:1)自上而下,通过全行业能源消耗核算碳排放;2)自下而上,通过具体交通活动水平数据来核算交通碳排放总量。前者数据获取相对简单,适合全行业碳排放数据统计;后者数据获取相对复杂、难度较大,适用于精细尺度、交通细分领域碳排放数据统计。自下而上的核算方法还可以细分为周转量法、保有量法和出行需求预测法。

1) 自上而下法。

自上而下法是指根据能源消耗量核算碳排放,基于国家或区域尺度开展碳排放核算。该方法通过各能源品种的消耗量与CO₂

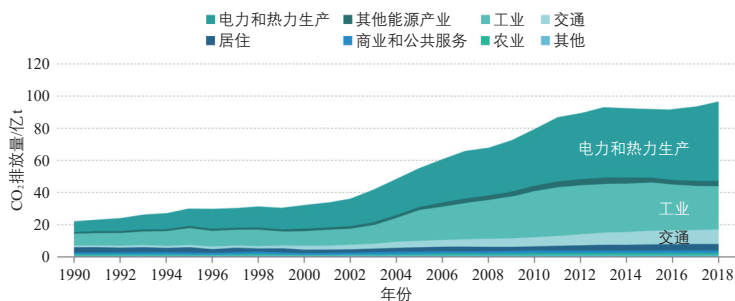


图1 1990—2018年中国分行业CO₂排放量变化

Fig.1 China's CO₂ emissions by industry from 1990 to 2018

资料来源:国际能源署(International Energy Agency, IEA)。

排放因子的乘积来核算不同行业的碳排放量,其中能源消耗(实物)量来自能源平衡表,CO₂排放因子采用联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的公开数据或地区政府部门的统计数据。能源平衡表中交通运输行业统计对象只包含营运车辆,非营运车辆如私人汽车、货车、摩托车等均未纳入统计,在对交通系统碳排放开展单独分析时存在一定偏差,不能准确体现分方式出行碳排放量的占比及重要程度。能源平衡表在中国的实际应用中将交通运输、仓储和邮政业作为一类进行统计,核算的交通系统碳排放量多于实际数据,应将仓储、邮政行业剔除。此方法数据获取渠道明确,获取难度较小,可应用于全行业碳排放核算中。

2) 周转量法。

周转量法通过各交通方式客货周转量与单位周转量碳排放强度的乘积来核算交通领域碳排放。客货周转量主要指对外交通,城市内部交通并未涵盖,利用此种方法核算城市交通碳排放亦存在一定偏差。周转量数据获取较为简单,可通过政府官方发布的周转量统计数据获得,在核算国家级、省级、区域性较大尺度交通碳排放时可采用此方法。

3) 保有量法。

保有量法通过各类交通工具的活动水平、燃料消耗强度和出行强度核算不同类型交通工具的碳排放强度,具体核算公式为:碳排放量=交通工具保有量×单位里程能耗强度×平均行驶里程×CO₂排放因子。该方法核算的颗粒度细,可用来分析城市级、社区级等精细尺度的交通碳排放,能够直观反映不同交通方式的碳排放差异,为城市交通规划策略提供碳排放核算的支撑。但数据获取较复杂,需各交通部门的精细分类,并同步开展居民出行调查及其他细分交通调查方可获得全部数据。

4) 出行需求预测法。

出行需求预测法通过模型预测结果获得特定年限的交通活动水平数据来估算碳排放。在实际交通规划项目中,存在某些出行数据无法获得或须判断规划年出行数据的情况。该方法需要结合人口、用地、交通特征数据,开展交通需求预测,确定各类交通方式活动水平及出行强度,从而确定城市交通的碳排放强度。这种方法的数据来源本质上为交通模型预测结果,与规划理念及策略目标的制定结合紧密,可作为规划年城市交通

碳排放核算方法,亦可通过此方法判断不同交通策略的减碳效益。

3 城市交通尺度碳排放核算方法构建

3.1 总体核算方法

总结现有方法的优劣势,将保有量法与周转量法结合,考虑电动交通工具的上游能源生产,建立燃油交通工具与电动交通工具的碳排放核算模型,提出一种适应城市交通尺度、综合考虑全生命周期的碳排放核算方法,为科学评估现状及合理预测未来碳排放提供基础。该方法只考虑与交通运行阶段相关性较强的碳排放,范围包含燃油交通工具的油箱到车轮阶段、电动交通工具的电厂到电池充放电阶段,其他燃料生产、车辆生产阶段的碳排放不在本文研究范围内。在研究边界方面,包含城市内部交通及对外交通,过境交通不在本文考虑范围内。区分不同出行类型、不同交通工具,分别构建碳排放核算模型,核算公式为

$$\begin{aligned} C_{\text{总}} &= C_d + C_y, \\ C_d &= C_{de} + C_{dn}, \\ C_y &= C_{ye} + C_{ym}, \end{aligned}$$

式中: $C_{\text{总}}$ 为某城市出行碳排放总量/kg; C_d 为燃油交通工具碳排放总量/kg; C_y 为电动交通工具碳排放总量/kg; C_{de} 和 C_{dn} 分别为燃油交通工具对外交通、内部交通产生的碳排放总量/kg; C_{ye} 和 C_{ym} 分别为电动交通工具对外交通、内部交通产生的碳排放总量/kg。

3.2 燃油交通工具碳排放核算模型

内部交通碳排放核算公式为

$$C_{dn} = \sum_i^n (V_i \times L_i \times e_i),$$

式中: V_i 为第 i 种燃油交通工具的保有量/辆,可通过当地环保部门或交管部门获得数据; L_i 为第 i 种燃油交通工具的平均行驶里程/km,营运车辆的活动水平信息可通过运营单位统计数据获取,非营运车辆的活动水平信息可通过交管部门或城市交通运行模型获取; e_i 为第 i 种燃油交通工具行驶过程的CO₂排放因子/(kg·辆⁻¹·km⁻¹),可通过当地环保部门或交管部门获取; n 为燃油交通工具种类。

为进行碳排放的核算,需要不同交通方式营运部门的旅客周转数据。由于交通方式众多、出行终端多样、管理部门不统一等客

观条件, 可利用居民出行调查或城市交通模型获取城市交通出行分担率及出行特征, 进一步获取旅客相关出行信息。

对外交通碳排放核算公式为

$$C_{de} = C_{dep} + C_{def},$$

$$C_{dep} = \sum_i^n \left(\frac{T_i}{Z_i} \times e_i \right),$$

$$C_{def} = \sum_i^n \left(\frac{F_i}{C_i} \times f_i \right),$$

式中: C_{dep} 和 C_{def} 分别为燃油交通工具对外客货运交通碳排放量/kg; T_i 为第 i 种燃油交通工具对外交通的旅客周转量/(人次·km), 可从交通部门统计数据获取; Z_i 为第 i 种燃油交通工具平均载客量/(人·辆⁻¹), 可从交通部门统计数据获取; e_i 为第 i 种燃油交通工具载客状态的排放因子/(kg·辆⁻¹·km⁻¹); F_i 为第 i 种燃油交通工具对外交通的货运周转量/(t·km), 可从交通部门统计数据获取; C_i 为第 i 种燃油交通工具平均载货吨数/(t·辆⁻¹), 可从交通部门统计数据获取; f_i 为第 i 种燃油交通工具的货运 CO₂ 排放因子/(kg·辆⁻¹·km⁻¹)。

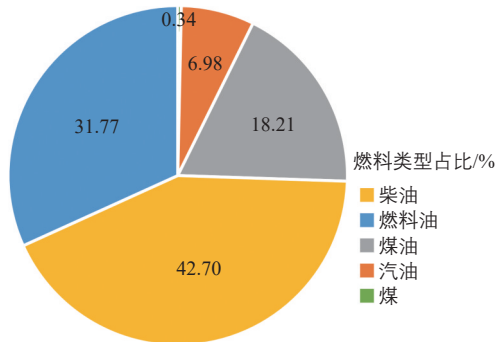


图2 交通运输、仓储和邮政业标准能源消耗量占比
Fig.2 Proportion of standard energy consumption in transportation, warehousing and postal services industry

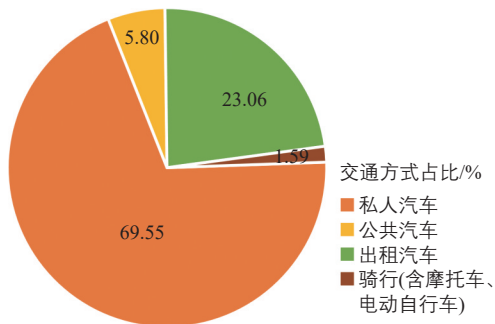


图3 城市内部交通碳排放结构
Fig.3 Carbon emission structure of urban internal transportation

3.3 电动交通工具碳排放核算模型

电动交通工具出行过程碳排放核算加入了与电动汽车能耗相关的参数, 包括充放电效率、电力传输的线路损耗等^[6]。内部交通碳排放核算公式为

$$C_{ym} = \frac{\sum_j^m v_j l_j \alpha_j P_j}{1-y},$$

式中: v_j 为第 j 种电动交通工具保有量/辆; l_j 为第 j 种电动交通工具平均行驶里程/km; α_j 为第 j 种电动交通工具的 CO₂ 排放因子/(kg·kWh⁻¹), 即发电过程的 CO₂ 排放因子, 可根据能源结构核算不同配电区域电力碳排放因子^[7]; P_j 为第 j 种电动交通工具单位距离电力消耗/(kWh·100 km⁻¹·辆⁻¹), 通常指车辆百公里能耗, 该指标对车辆行驶过程的影响较大, 可从车辆企业获取, 但通常因车型、季节和交通情况的不同而改变, 可根据实际情况分析确定; J_j 为第 j 种电动交通工具的充电效率/%, 充电效率受到车辆功率、电池性能、充电桩性能、环境温度等多重参数影响, 实际核算时应结合充电桩建设布局情况确定充电桩性能, 根据车辆类型确定车辆功率、电池性能(可从车辆企业获取), 环境温度可从气象部门获取, 经综合评判最终确定充电效率; y 为输配电损失/%, 可从电力部门获取; m 为电动交通工具种类。

对外交通碳排放核算公式为

$$C_{ye} = C_{yep} + C_{yef},$$

$$C_{yep} = \frac{\sum_j^m t_j \alpha_j P_j}{1-y},$$

$$C_{yef} = \frac{\sum_j^m h_j \alpha_j P_j}{1-y},$$

式中: C_{yep} 和 C_{yef} 分别为电动交通工具对外客货运交通碳排放量/kg; t_j 为第 j 种电动交通工具对外交通的旅客周转量/(人次·km); z_j 为第 j 种电动交通工具平均载客量/(人·辆⁻¹); h_j 为第 j 种电动交通工具对外交通的货运周转量/(t·km); c_j 为第 j 种电动交通工具平均载货吨数/(t·辆⁻¹)。

4 案例实证

利用上述方法, 以烟台市为例对城市交通碳排放进行核算, 验证核算方法的有效性

及实操性，研判烟台市交通碳排放结构和各类交通方式碳排放的差异，并据此对烟台市未来交通系统减碳工作提出思路。

4.1 自上而下的碳排放核算

依照地区统计的标准能源消耗量，对地区进行自上而下的碳排放核算，交通运输、仓储和邮政业共计约产生碳排放量 349.91 万 t，主要以柴油(42.70%)、燃料油(31.77%)的消耗为主(见图 2)。利用该方法能进行快速的总量核算，但无法对交通运输行业细分领域进行核算。

4.2 城市交通尺度碳排放核算

1) 内部交通。

城市内部交通的碳排放量约为 249.78 万 t。私人汽车、出租汽车、公共汽车、骑行(含摩托车、电动自行车)分别占碳排放总量的 69.55%，23.06%，5.80%和 1.59%。整体上以小汽车运行(私人汽车、出租汽车)为主，碳排放量占 92.61%，公共交通及铁路客运集约化减碳优势尚未体现(见图 3)。从不同能源类型的碳排放结构来看，电动交通工具产生的碳排放量在城市内部交通碳排放总量中仅占 3.90%，其中私人汽车碳排放中电动交通工具占比最低，仅为 0.33%(见图 4)。

2) 对外交通。

城市对外交通的碳排放量约为 121.10 万 t。公路货运、铁路货运、公路客运、铁路客运分别占 70.57%，5.18%，21.26%和 2.99%，其中，客运占 24.25%，货运占 75.75%(见图 5)。公路客运、公路货运电动交通工具产生的碳排放占比极低，分别为 0.12%和 0.02%(见图 6)。

4.3 交通碳排放分析及减碳工作思路

烟台市城市交通的碳排放量达 370.88 万 t，略高于使用自上而下法核算的结果。其中内部交通占 69.86%，对外交通占 30.14%(见图 7)。碳排放占比最高的分别为私人汽车和公路货运。在客运服务方面，因存在单车出行距离长、承载率低等问题，公路客运碳排放占比高于城市公共交通及铁路客运。据此本文提出相关建议如下：

1) 电动交通工具的推广对减碳有一定效果，可从公共用车及专用车入手，鼓励私人汽车电动化，同时配置完善的能源补给设

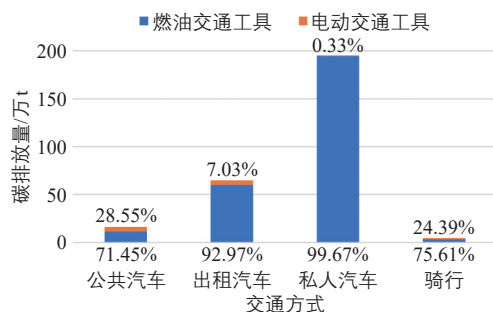


图4 城市内部交通燃油与电动交通工具碳排放结构
Fig.4 Carbon emission structure of fuel-powered and electric vehicles for urban internal transportation

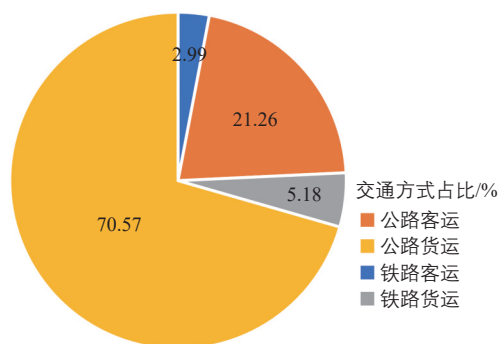


图5 城市对外交通碳排放结构
Fig.5 Carbon emission structure of urban external transportation

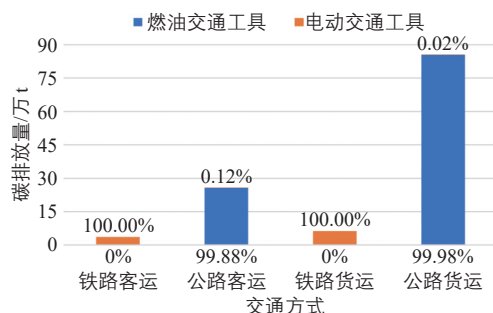


图6 城市对外交通燃油与电动交通工具碳排放结构
Fig.6 Carbon emission structure of fuel-powered and electric vehicles for urban external transportation

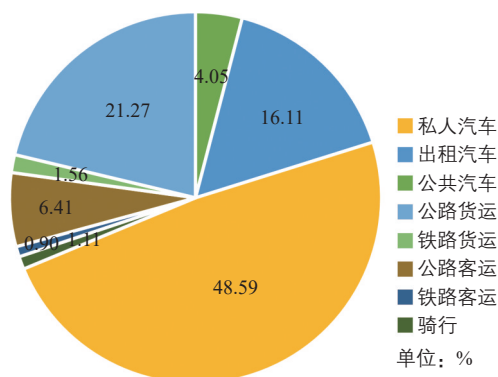


图7 城市各类交通方式碳排放占比
Fig.7 Proportion of carbon emissions from varied urban transportation modes

(下转第 6 页)