

高速公路运营期车辆碳排放量化方法研究

涂志敏¹, 张玉娇², 罗赞¹

(1. 广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510507; 2. 广东交通职业技术学院, 广东 广州 510650)

摘要: 高速公路联网收费数据具有监测设备完善、统计数据精度高及样本量全等特征。基于高速公路联网收费数据, 融合车辆燃料类型数据, 综合考虑不同车型交通量、不同车型基准能耗值等因素, 构建基于路网颗粒度的高速公路碳排放计算方法, 并以广东省为例进行实例分析。从总量分布来看, 碳排放较高的路段主要出现在珠三角地区及货车比例较高的出省通道上, 从单公里碳排放强度来看, 碳排放强度较高的路段基本在珠三角和乐广高速。

关键词: 高速公路; 碳排放; 联网收费数据; 能耗值

中图分类号: U 415.1; X 322

文献标识码: A

Research on Quantitative Methods for Vehicle Carbon Emissions during Expressway Operation Period

TU Zhiming¹, ZHANG Yujiao², LUO Yun¹

(1. Guangdong Province Communications Planning & Design Institute Co., Ltd, Guangzhou 510507, Guangdong, China;

2. Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou 510650, Guangdong, China)

Abstract: The online toll collection data of expressway has the characteristics of complete monitoring equipment, high statistical data accuracy, and full sample size. Based on the online toll collection data of expressway and the fusion of vehicle fuel type data, taking into account factors such as traffic volume of different vehicle models and benchmark energy consumption values of different vehicle models, a calculation method for expressway carbon emissions based on road network granularity is constructed. Taking Guangdong Province as an example, from the perspective of total distribution, the sections with high carbon emissions mainly appear in the Pearl River Delta region and the provincial passages with a high proportion of trucks; from the perspective of carbon emission intensity per kilometer, the sections with higher carbon emission intensity are mainly located in the Pearl River Delta and Lechang-Guangzhou Expressway.

Key words: expressway; carbon emissions; the online toll collection data; energy-consumption value

全球气候变化是人类社会可持续发展面临的重大挑战, 温室气体排放是导致全球变暖等环境问题的主要原因之一。为应对二氧化碳等温室气体过量排放带来的环境问题, 2020年9月, 我国提出“3060”目标, 即二氧化碳力争在2030年前达到峰值, 2060年前实现碳中和。交通运输是燃料消费的重点行业, 是温室气体和大气污染排放的主要来源之一, 我国交通碳排放占全国排放9%, 其中公路运输碳排放占交通运输行业碳

排放总量的86.76%^[1], 占比最大, 高速公路运输又是整个公路运输的主力, 因此控制和减少高速公路使用期间的碳排放是推进公路运输行业落实碳减排的重要领域。在整个高速公路碳减排过程中, 碳排放统计核算是做好碳达峰碳中和工作的重要基础, 是制定政策、推动工作、开展考核、谈判履约的重要依据。

目前国内碳排放计量方法有排放因子法、物料平衡法和实测法, 其中交通运输行业主要以排

收稿日期: 2023-11-01

作者简介: 涂志敏, 助理工程师, 硕士, 研究方向为交通大数据及交通碳排放

放因子法为主,排放因子法根据核算路径主要分为“自上而下”和“自下而上法”。目前政府部门多采用“自上而下”的车辆保有量法、燃料总量法等方法,可较为便捷地计算总量,但计算结果的颗粒度不足,对于精细化减排措施支撑力度不足。关于高速公路“自下而上”的碳排放计算,李苑君^[2]基于交通流数据进行了高速公路碳排放计量,但是对于电动汽车的间接二氧化碳未提供统计方法;林旭坤^[3]通过统计每类车型的平均运行次数、里程及能耗等数据,进行高速公路碳排放量的测算;林培群^[4]融合多源数据实现对运营车辆的实时监测,进而测算碳排放量,并采用vissim进行计算结果校验。

本研究重点关注高速公路运营期运行车辆产生的碳排放量,基于高速公路联网收费数据、车辆能耗数据、车辆运行速度、环境温度等多源数据,构建改进的“自下而上”的高速公路网碳排放量计算模型,研究不同车型、不同路段高速公路车辆碳排放量特性,为高速公路碳排放管控策略提供计量基础。

1 研究对象及数据基础

1.1 研究对象

本次研究对象为高速公路运行车辆的直接和间接碳排放量,其中直接排放为车辆运行过程中使用化石燃料燃烧而产生的碳排放,间接排放为车辆运行所消耗的外购电力的生产而间接造成的

碳排放。

1.2 数据来源及获取

1.2.1 车型分类

车型分类以《收费公路车辆通行费车型分类》(JT/T 489—2019)为基础,客车按座位数量分为1~4类,货车按车轴数的规模分为1~6类,见表1。

表1 高速公路车型分类

客车分类	核定载人数/人	货车分类	总轴数(含悬浮轴)
1类客车	≤9	1类货车	2(车长<6 m,最大允许总质量<4500 kg)
2类客车	10~19	2类货车	2(车长≥6 m,最大允许总质量≥4500 kg)
3类客车	≤39	3类货车	3
4类客车	≥40	4类货车	4
		5类货车	5
		6类货车	6

1.2.2 不同车型能耗数据的获取

本次研究车辆能耗以“中国汽车能源消耗量查询(miit.gov.cn)”数据为基础,根据各类典型车辆的油耗分布,输出平均油耗作为能耗基准值。根据广东省公安交管部门统计数据,车辆燃料类型主要分为汽油、柴油、电、天然气及其他等5类,其他类车辆占比较小,因此统计汽油、柴油、电及天然气的能耗值;5类和6类货车基本以柴油为准,因此只提供柴油值,见表2。

表2 各车型百公里能耗参考值

客车分类	能源分类	能耗参考值		货车分类	能源分类	能耗参考值	
		数值	单位			数值	单位
1类客车	汽油	7.1	L/100 km	1类货车	汽油	7.7	L/100 km
	柴油	8.5	L/100 km		柴油	10.8	L/100 km
	电	13.5	kWh/100 km		电	22.1	kWh/100 km
	天然气	6.9	L/100 km		天然气	30.1	L/100 km
2类客车	汽油	11.9	L/100 km	2类货车	汽油	14.1	L/100 km
	柴油	12.1	L/100 km		柴油	17.9	L/100 km
	电	33.1	kWh/100 km		电	28.5	kWh/100 km
	天然气	17.9	L/100 km		天然气	35.4	L/100 km
3类客车	汽油	16.2	L/100 km	3类货车	汽油	21.2	L/100 km
	柴油	21.9	L/100 km		柴油	22.9	L/100 km
	电	53.9	kWh/100 km		电	38.5	kWh/100 km
	天然气	48.7	L/100 km		天然气	46.3	L/100 km
4类客车	汽油	20.1	L/100 km	4类货车	汽油	25.3	L/100 km
	柴油	27.2	L/100 km		柴油	27.6	L/100 km
	电	66.9	kWh/100 km		电	45.8	kWh/100 km
	天然气	60.3	L/100 km		天然气	54.3	L/100 km
				5类货车	柴油	30.3	L/100 km
				6类货车	柴油	36.1	L/100 km

1.2.3 排放因子

本次研究化石燃料碳排放因子以《陆上交通运输企业温室气体排放核算方法与报告指南（试行）》^[5]中的取值为基础，见表3。外购电力二氧

化碳排放因子以中国区域电网二氧化碳排放因子研究（2023）^[6]中的取值为基础，即2020年广东省电网平均二氧化碳排放因子为0.445 tCO₂/（MW·h）。

表 3 移动排放源的化石燃料燃烧排放因子参数

化石燃料品种	低位发热量		单位热值含碳量/（tC/GJ）	碳氧化率/%	排放因子		密度/（kg/m ³ ）
	数值	单位			数值	单位	
汽油	44.800	GJ/t	18.90×10 ⁻³	98	0.0679	tCO ₂ /GJ	775
柴油	43.330	GJ/t	20.20×10 ⁻³	98	0.0726	tCO ₂ /GJ	845
液化石油气	47.310	GJ/t	17.20×10 ⁻³	99	0.0624	tCO ₂ /GJ	580
液化天然气	41.868	GJ/t	15.30×10 ⁻³	99	0.0555	tCO ₂ /GJ	440

2 交通碳排放量化方法研究

2.1 计算思路

本文采用“自下而上”的能耗排放因子法计算高速公路道路区间的碳排放量（见图1），初始公式为车辆运行能耗乘以能耗排放因子，车辆运行能耗采用分段统计的模式，即统计高速公路各立交区间的运行能耗：

排放量 = 车辆运行能耗 × 能耗排放因子
车辆运行能耗 = 车辆百公里油耗 × 路段长度 × 车辆数

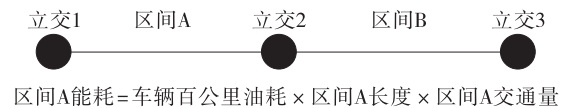


图 1 区间能耗计算示意图

2.2 计算模型

2.2.1 基础分类

由于化石燃料燃烧的直接碳排放和电能驱动的间接碳排放存在不同的排放机理，因此采用不同的计算方法。直接排放车辆包括汽油、柴油、天然气、混动等车型，间接排放为以电能驱动的汽车，见表4。根据广东省公安交管部门车辆注册数据，各车型燃料类型的比例如表5所示。

表 4 本文计算模型的车辆分类

一级分类	二类分类	排放类型
客车：1类客车、2类客车、3类客车、4类客车 货车：1类货车、2类货车、3类货车、4类货车、5类货车、6类货车	化石燃料：汽油、柴油、天然气、混动等	化石燃料直接排放
	纯电动车型：以电能驱动的汽车	电能间接排放

表 5 广东省各类车辆燃料类型占比

一级分类	二级分类	车型比例/%	一级分类	二级分类	车型比例/%
1类客车	汽油	91.70	2类货车	汽油	1.10
	柴油	0.70		柴油	93.40
	电	7.60		电	5.50
	天然气	0.00		天然气	0.00
2类客车	汽油	62.70	3类货车	汽油	0.00
	柴油	35.30		柴油	99.60
	电	1.00		电	0.00
	天然气	1.00		天然气	0.40
3类客车	汽油	14.80	4类货车	汽油	0.00
	柴油	65.10		柴油	96.60
	电	16.10		电	2.90
	天然气	4.00		天然气	0.50
4类客车	汽油	0.60	5类货车	汽油	0
	柴油	48.80		柴油	100
	电	42.00		电	0
	天然气	8.60		天然气	0
1类货车	汽油	35.70	6类货车	汽油	0
	柴油	55.10		柴油	100
	电	9.20		电	0
	天然气	0.00		天然气	0

注：混动车型归类到使用的化石燃料车型中。

2.2.2 化石燃料直接碳排放计算模型

本文以《2006年IPCC国家温室气体清单指南》（2019年修订）的计算方法为基础，采用化石燃料直接碳排放通过估算燃料与二氧化碳排放因子相乘来计算二氧化碳排放^[7]，石燃料j燃烧产生的二氧化碳排放量计算公式如下：

$$E_{bu-CO_2,j} = FC_j \times EF_j \times NCV_j \tag{1}$$

其中，E_{bu-co₂,j}为化石燃料j燃烧产生的二氧化碳排放量，单位为tCO₂；FC_j为第j种化石燃料的消耗量，对固体或液体燃料，单位为t；对气体燃料，单位为万标立方米（×10⁴Nm³）；

EF_j 为化石燃料 j 的二氧化碳排放因子,单位为 tCO_2/GJ ; NCV_j 为化石燃料 j 的平均低位发热量,对固体或液体燃料,单位为 GJ/t ; 对气体燃料,单位为吉焦每万标立方 ($\text{GJ}/10^4\text{Nm}^3$)。

结合高速公路的特性,考虑车辆类型和道路区间等因素后,第 i 类车型使用化石燃料 j 行驶在道路区间 r 的二氧化碳排放量计算模型如下所示:

$$E_{bu-\text{CO}_2,i,j,r} = OC_{i,j,r} \times D_r \times V_{i,j,r} \times \rho_j \times EF_j \times NCV_j \times 10^{-8} \quad (2)$$

其中, $E_{bu-\text{CO}_2,i,j,r}$ 为第 i 类车型使用化石燃料 j 行驶在路段 r 的二氧化碳排放量,单位为 tCO_2 ; $OC_{i,j,r}$ 为第 i 类车型使用化石燃料 j 在路段 r 上的单车百公里能耗值,单位为 $\text{L}/100\text{km}$; D_r 为路段 r 长度,单位为 km ; $V_{i,j,r}$ 为通过路段 r 的使用化石燃料 j 的第 i 类车型数量,单位为辆; ρ_j 为化石燃料 j 的密度,单位为 kg/m^3 ; EF_j 为化石燃料 j 的单位能耗二氧化碳排放因子,单位为 tCO_2/GJ ; NCV_j 为化石燃料 j 的平均低位发热量,对固体或液体燃料,单位为 GJ/t ; 对气体燃料,单位为 $\text{GJ}/10^4\text{Nm}^3$ 。

2.2.3 纯电动车辆间接碳排放量计算模型

纯电动车型的二氧化碳排放即消耗外购电力碳排放计算模型如下,采用车辆消耗用电量乘以区域电网平均二氧化碳排放因子的方式计算间接碳排放。

$$E_{e-\text{CO}_2} = AD_e \times EF_e \quad (3)$$

式中: $E_{e-\text{CO}_2}$ 为纯电动车型使用电力 e 驱动时对应产生的间接碳排放量,单位为 tCO_2 ; AD_e 为净购入电量,单位为兆瓦时 ($\text{MW} \cdot \text{h}$); EF_e 为区域电网平均二氧化碳排放因子,单位为吨二氧化碳每兆瓦时 [$\text{tCO}_2/(\text{MW} \cdot \text{h})$]。

结合高速公路的特性,考虑车辆类型、道路区间及交通量等因素后,第 i 类车型使用电力 e 驱动行驶在路段 r 上的碳排放应按下式计算:

$$E_{e-\text{CO}_2,i,r} = EC_{i,r} \times D_r \times V_{i,e,r} \times EF_e \times 10^{-5} \quad (4)$$

式中: $E_{e-\text{CO}_2,i,r}$ 为第 i 类车型使用电力驱动行驶在路段 r 的二氧化碳间接排放量,单位为 tCO_2 ; $EC_{i,r}$ 为第 i 类车型使用电力驱动行驶在路段 r 上的百公里耗电量,单位为 $\text{kWh}/100\text{km}$; D_r 为路段 r 的长度,单位为 km ; $V_{i,e,r}$ 为通过路段 r 的使用电力 e 驱动方式的第 i 类车型数量,单位为辆; EF_e 为区域电网平均二氧化碳排放因子,单位为 $\text{tCO}_2/(\text{MW} \cdot \text{h})$ 。

3 实证分析

3.1 数据基础

本案例以广东省高速公路网为基础,截至2022年底广东省高速公路总里程达到11 211公里,主线门架超过3000个,门架数据可以完整地计入车辆途经门架的时间、车型、货车载重等信息。

3.2 碳排放空间分布特征

将全省各道路区间的碳排放总量分为低 ($0 \sim 50\text{t/d}$)、中 ($50 \sim 100\text{t/d}$)、高 (大于 100t/d) 三个等级,其中高排放总量的路段主要集中在珠江东岸、粤港澳大湾区通往粤东西北的通道,见图2。

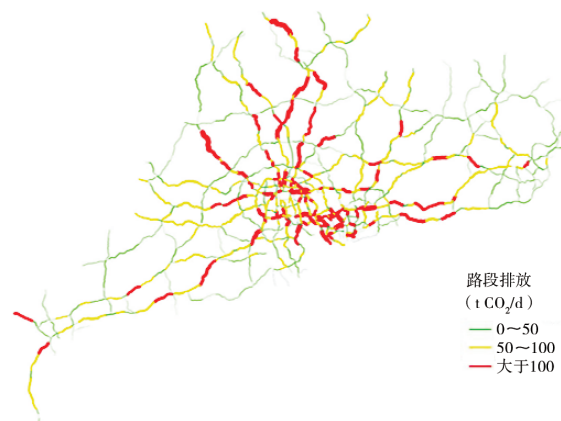


图2 广东省高速公路立交区间碳排放总量分布示意图

将全省各道路区间的碳排放强度 (单公里碳排放量) 分为低 $0 \sim 5 [\text{t}/(\text{km} \cdot \text{d})]$ 、中 $5 \sim 10 [\text{t}/(\text{km} \cdot \text{d})]$ 、高大于 $10 [\text{t}/(\text{km} \cdot \text{d})]$ 三个等级,其中碳排放强度较高的路段主要集中在珠三角核心区和广乐高速公路上,见图3,主要原因是珠三角道路的断面交通量较大,同时广乐高速公路流量及货车比例较大。

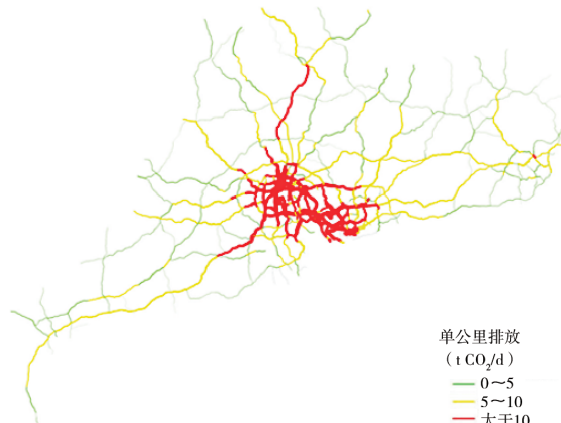


图3 广东省高速公路立交区间碳排放强度分布示意图

(下转第86页)

容有机结合,构建教学内容、创新教学手段与方法,将“岗课赛证创”融通的教学理念践行于智能制造类专业的机器视觉及其应用技术课程教学中。实践证明,基于“岗课赛证创”融通的课程改革是高职教育高质量发展的一个非常有效的探索方向,实施“岗课赛证创”融通的课程改革有利于提升机器视觉及其应用技术课程的教学质量,提高智能制造类专业学生的培养质量,为机器视觉行业提供更多高质量的高技能人才。

参考文献:

- [1]付贵忠,牛福洲,陈浩,等.面向新时代人才培养需求的“机器视觉”课程教学改革研究[J].南方农机,2023,54(19):195-198.
- [2]刘翠翠,杨涛.机器视觉在智能制造中的应用与产业发展[J].机床与液压,2021,49(11):7.
- [3]尹仕斌,任永杰,刘涛,等.机器视觉技术在现代汽车制造中的应用综述[J].光学学报,2018,38(08):11-22.
- [4]李延浩.机器视觉在多领域内的应用[J].电子技术与软件工程,2018(1):2.
- [5]李峰峰.电子元器件的外观检测系统的研究与开发[D].广州:华南理工大学,2012.
- [6]张祺午.技能型社会建设的瓶颈与路径[J].职业技术教育,2021,42(33):1.
- [7]王菲菲,郝敏钗,陈旭凤,等.“岗课赛证”融合育人模式增强职业教育适应性的路径探究[J].教育信息化论坛,2022,6(21):42-44.
- [8]瞿晓理.“大众创业,万众创新”时代背景下我国创新创业人才政策分析[J].科技管理研究,2016,36(17):7.
- [9]江维,罗维平,薛勇.“新工科”模式项目驱动法在机器视觉教学中的应用[J].武汉轻工大学学报,2021,40(3):115-119.
- [10]范保杰,徐丰羽.邮电类高校《机器视觉与应用》课程教学改革创新与探索[J].学周刊,2020(21):3-4.
- [11]王艺璇.基于项目式教学法的OpenCV机器视觉实践教学[J].电脑知识与技术,2023,19(29):169-171.
- [12]张宇,吴立华,张冰洁.基于“岗课赛证”融通的机器视觉课程改革[J].科技风,2023(4):95-97.

(上接第67页)

4 结语

本文基于“自下而上”的能耗排放因子法,以高速公路联网收费数据中的车型分类及交通量数据为基础,同时完善不同车型的燃料类型、综合能耗及排放因子等参数,构建高速公路运营期运行车辆的碳排放量化模型。本模型能够应用于高速公路各立交区间的碳排放总量及碳排放强度测试,为高速公路运营期碳排放的管控提供量化基础;同时本文构建的不同车型燃料类型、综合能耗数据库,可为相关研究提供数据参考。

参考文献:

- [1]李晓易,谭晓雨,吴睿,等.交通运输领域碳达峰、碳中和路径研究[J].中国工程科学,2021,23(6):15-21.
- [2]李苑君,五旗韬,王长建,等.基于交通大数据的广东省高速公路碳排放计量模型与空间格局[J].热带地理,2022,42(6):952-964.
- [3]林旭坤,张扬,罗芷晴,等.高速公路网车辆碳排放测算方法研究[J].华南理工大学学报(自然科学版),2022,50(9):22-28.
- [4]林培群,张扬,罗芷晴,等.融合多源数据的高速公路路段车流碳排放精细测算方案[J].华南理工大学学报(自然科学版),2023,51(7):100-108.
- [5]国家发展改革委办公厅关于印发第三批10个行业企业温室气体核算方法与报告指南(试行)的通知(发改办气候[2015]1722号)[Z].国家发展改革委办公厅,2015.
- [6]生态环境部环境规划院.中国区域电网二氧化碳排放因子研究(2023)[R].2023.
- [7]BUENDIA E C, TANABE K. 2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [Z]. IPCC Task Force on National Greenhouse Gas Inventories,2019.