

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyh.2024.12.002

山地城市道路交通碳排放计算研究

——以重庆解放碑商圈路网为例

陈俊成^{1,2}, 龚华凤^{1,2}, 赵聪霄^{1,2}, 何易非^{1,2}, 刘庆^{1,2}

(1.林同棧国际工程咨询(中国)有限公司,重庆市 401121; 2.重庆市山地城市可持续交通工程技术研究中心,重庆市 401121)

摘要: 随着国内交通行业开展碳排放量化设定和配额管理工作的进一步深化,精确量化城市交通的温室气体排放将有助于增强交通碳排放的有效监管,提升城市交通系统整体可持续性。山地城市地理形态特殊,目前尚无针对性的交通碳排放测算体系。通过对于山地城市的路网特征和交通特征的研究,根据“自下而上”法构建了适用于重庆的交通运营阶段碳排放计算模型,明确了道路线形、车辆种类、能源油耗、行驶速度等关键参数与排放因子的关系,构建了山地城市交通碳排放因子数据库并生成交通碳排放计算软件。研究以重庆解放碑商圈道路为例,根据获取的交通流与路网数据,计算得到解放碑商圈的 CO₂ 排放当量为 4.4 万 t。其中,碳排放量与 2023 年重庆市相关规划数据估算结果相近,验证了计算模型的有效性。本研究建立的山地城市交通碳排放计算方法和计算软件可基于路网运行数据计算较为精准的碳排放结果,为不同交通规划方案的碳排放情况提供量化指标。

关键词: 山地城市;城市交通;碳排放计算;排放因子

中图分类号: U491

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)12-0006-06

0 引言

全球气候变化的严峻形势以及碳排放对气候变化的直接影响使得对城市交通碳排放的研究变得尤为紧迫。据国际能源署(IEA)最新数据显示,交通运输业是全球第三大温室气体排放行业,碳排量占比高达 25%,其中公路运输的碳排放超过 85%,各大城市及区域的交通碳排放问题在近年来受到广泛关注。山地城市由于地势起伏、道路曲折,其交通碳排放特点与平原城市有较大区别,需要有针对性地进行研究。

当前阶段,最通用的道路交通碳排放核算方法是由联合国政府气候变化专门委员会(IPCC)提供的碳排放系数法。系数法又可进一步分为“自上而下”法和“自下而上”法两种计算方法^[1]。

“自上而下”法是指在某一城市或地区范围内,统计交通工具所使用的不同燃料消耗量,再利用碳

排放系数得到碳排放总量。大量国内学者采用该方法,根据不同地区特点对碳排放进行测算。吴雯等^[2]对我国中部六省的交通运输业碳排放影响因素进行了分析,经济增长为碳排放增加的主要原因;李健等^[3]以绿色发展为背景,对京津冀地区的交通碳排放进行了分析和测算,研究表明能源结构与交通碳排放有着密切的关联;戈秋虞等^[4]基于 GDIM 法对福建省的碳排放进行了分析,得出能源消耗量是导致碳排放增加的主要原因。但综合来看,目前的“自上而下”法对于核算边界的确定和活动数据的获取来源仍有待进一步明确。

一方面,“自下而上”法则是将碳排放量按照能源消耗、交通方式、车辆类型和行驶距离等因素通过数据统计进行分解和计算。学者们从机动车运行状态的角度出发,对交通碳排放计算方法进行了更深入的研究。Gomez 等^[5]基于交通活动,利用交通流量数据、平均速度和单位距离的排放因子等参数来估算排放量。该方法考虑了不同车型、燃料类型和时段的差异。Nyhan 等^[6]采用广泛测量的交通数据和微观尺度排放模型,对高分辨率的车辆排放进行预测,该方法可提供更为精细化的排放数据,能较好地反映不同地点、不同时段排放特征。另一方面,Liu 等^[7]将模拟得到

收稿日期: 2024-03-22

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(CSTB2022NSCQ-MSX 0268)

作者简介: 陈俊成(1994—),男,硕士,工程师,从事可持续道路交通设计工作。

通信作者: 赵聪霄(1987—),女,博士,高级工程师,从事可持续道路交通设计工作。电子信箱: zhaocongxiao@tylin.com.cn

的车辆行驶速度与修正后的单位里程排放因子相结合,计算出不同路段的排放量,该方法避免了对交通状态的简单假设,能更精确地估算出交通排放。综上,“自下而上”法相对于“自上而下”法而言,可以通过具体数据信息,得到精度更高的碳排放量计算结果。

目前,针对山地城市碳排放的研究相对缺乏,山地城市的坡度、道路长度和转弯频率等因素对碳排放有显著影响。周涛等^[8]对山地城市道路对碳排放的影响进行了研究,研究表明与平原城市相比,山地城市碳排放因子对于坡度的敏感度更高。因此需要进一步研究和开发适用于山地城市的交通碳排放计算方法。

基于此,本研究将采用“自下而上”法,考虑机动车的行驶状态与山地城市的地形特征,对交通碳排放计算方法进行深入研究,确定出符合山地城市特征的交通碳排放因子与碳排放计算模型。并以重庆解放碑商圈路网为例,进行碳排放计算,为山地城市道路交通碳排放计算提供理论依据和实践价值。

1 交通碳排放计算模型的建立

1.1 研究边界

本文研究的碳排放计算方法主要应用于道路车辆行驶过程中的温室气体排放。《京都议定书》中针对温室气体的范围,主要包括以下6种:一氧化二氮 N_2O 、甲烷 CH_4 、二氧化碳 CO_2 、六氟化硫 SF_6 、全氟碳化合物 PFC_s 、氢氟碳化合物 HFC_s 。其中前三种气体含量较大,且有效控制的难度较大,因此是本文的道路交通碳排放测算研究对象为 N_2O 、 CH_4 、 CO_2 三种气体。

本研究专注于车辆运营阶段,对车辆在道路行驶过程中的尾气排放和能源消耗情况进行了分析,主要评估道路交通对大气环境的直接影响。为确保各种车型碳排放测算的一致性,本研究不涉及间接碳排放,包括油气生产、运输及电力生产等产生的碳排放。

1.2 研究对象

本文将分别对会产生碳排放的不同燃料种类及对应的不同交通方式对山地城市的碳排放测算进行研究。本研究参考了国家统计局发布的全国交通运输业所消耗的能源,从中选取了汽油、柴油和天然气这三类直接产生碳排放的主要燃料类型,不考虑由电力生产等的电动车辆间接碳排放。针对不同交通

工具产生的碳排放则选择了小汽车、公交车、货车和摩托车这四类常见的交通工具。

1.3 碳排放计算模型构建

1.3.1 碳排放计算方法

本研究依据交通道路数据进行碳排放计算的微观建模。首先,根据文献、调研等方式量化不同温室气体的排放因子以及车辆因素对碳排放的差异性影响;其次,明确山地城市环境下道路与交通运行特征及关键因素;最后,根据实测交通数据,明确路网中车辆类型及出行方式的使用情况、能源消耗情况以及行驶距离等信息,得出交通阶段碳排放量。

采用“自下而上”方法计算交通碳排放时,需要考虑各种交通工具的行驶里程,以及每单位行驶距离对应的燃料消耗量。其基本计算公式见式(1)。

$$E = \sum_{j,k} d_i \times Q_{j,k} \times e_{j,k} \quad (1)$$

式中: E 为交通碳排放量,g; d_i 为第*i*种交通方式的行驶里程,km; $Q_{j,k}$ 为第*j*种交通方式下*k*种燃料的单位里程消耗量,t/km; $e_{j,k}$ 为第*j*种交通方式下*k*种燃料的排放因子,g/t。

1.3.2 机动车排放模型

传统“自下而上”排放计算方式主要依赖车辆燃料消耗及对应排放系数,但这种方法存在明显缺陷。一般情况下,排放系数与燃料耗量密切相关,却难以反映不同行车工况下的实际排放状况。为更精准描述机动车尾气排放特性,需构建基于驾驶行为及影响因素的新型排放计算模型。

该模型旨在获取各种驾驶工况下的排放系数,厘清机动车排放与诸多影响因子间的关系,从而较为准确地估算出行碳排放水平。车辆行驶状态对排放影响显著,尤其是速度影响最为明显。现有基于速度的排放模型如MOBILE、COPERT等^[9],采用平均车速调整排放系数,再乘以行驶里程计算总排放量。基于车辆行驶速度的排放模型见式(2)。

$$E = L \times e(v) \quad (2)$$

式中: E 为交通碳排放量,g; L 为总行驶里程,km; $e(v)$ 为速度修正后的排放因子,g/km。

1.3.3 COPERT 能耗与排放模型

车速是影响机动车排放的关键因素,业内普遍采用基于车速的排放估算模型。其中,欧洲环境署开发的COPERT模型备受推崇。该模型通过回归分析车速与里程数,估算不同车型在各种路况下的污染物(如 CO 、 NO_x 、 HC 、 PM)及能耗排放水平。

研究发现,与其他模型相比,COPERT的排放因子更能反映我国实际车辆排放状况,在公路交通领域具有卓越的估算准确性和效能^[10]。模型考虑了车辆种类、燃料类型、路面条件等多方面影响,排放计算公式灵活可靠。

因此,本研究选择应用COPERT模型,根据路段车速等参数计算CO₂排放因子。该模型通过建立车速、里程与排放之间的函数关系,能较为精准地评估出不同工况下的碳排放水平。计算公式见式(3)。

$$E = \sum_{i,j} q_i \times d_i \times e_{c,i,k} \quad (3)$$

式中: E 为交通碳排放量, g ; q_i 为第*i*种交通方式的流量; d_i 为第*i*种交通方式的行驶里程, km ; $e_{c,i,k}$ 为*c*种气体在第*j*种交通方式下*k*种燃料的排放因子, g/t 。

1.3.4 山地城市碳排放计算模型

在山地城市中,车辆在上、下坡时的燃料消耗量和碳排放量与平路时存在明显差异。因此将城市道路纵坡坡度作为道路线形因素引入到计算模型中,可以更加准确地计算山地城市交通碳排放量。最终将所有的碳排放量汇总,即可得到整个区域或城市的碳排放量。

综合平均速度排放模型和COPERT能耗与排放模型,并综合山地城市的坡度因素,本研究构建的山地城市交通碳排放计算模型见式(4)。

$$E_c = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L e_{v,c,j,k,h} \times q_{i,j,k} \times d_i \quad (4)$$

式中: E 为区域路网总碳排放量, g ; c 为排放气体种类; N 为区域路网中的道路条数; M 为某条道路上交通方式的种类数; L 为某种交通方式的燃料类型数; $e_{v,c,j,k,h}$ 为针对*j*种交通方式类型,*k*类燃料类型,以*v*平均速度行驶在坡度为*h*的道路上时,*c*气体的排放因子, g/km ; $q_{i,j,k}$ 为在第*i*条路,采用*j*种交通方式和*k*类燃料类型的流量, pcu ; d_i 为第*i*条路的长度, km 。

该计算方法考虑了不同车辆类型和出行方式的使用情况、能源消耗情况以及行驶距离等信息。根据交通数据,结合碳排放因子,可以对每个交通方式、车辆类型和出行方式的碳排放量进行计算,得到整个区域或城市的碳排放量。

2 碳排放因子的确定

2.1 碳排放因子概述

交通碳排放因子是车辆行驶单位距离所产生的二氧化碳当量($gCO_2e \cdot km^{-1}$),碳排放因子数据库的

建立是计算交通碳排放量的关键。交通碳排放因子的影响因素众多,Singer基于车辆行驶的能耗建立了排放模型,模型中的碳排放因子与能耗参数直接相关^[11]。COPERT的指南也指出,CO₂的排放与能源消耗系数密切相关。因此,能耗参数是确定碳排放因子的关键。

本研究以油耗与排放的关系为基础,针对山地城市地形特征,建立山地城市交通碳排放因子数据库,用于碳排放的计算。

2.2 能耗与碳排放因子的关系的计算

在计算车辆行驶能耗的时候,需要先将不同的燃料类型转换为可以互相比较分析的计算指标。本研究以标准油为单位将产生碳排放的主要的燃料种类:汽油、柴油、天然气能源转换成可以跨燃料种类分析的油当量。油当量参数参考了《近似转换系数——世界能源统计回顾》^[12],具体取值见表1。

表1 各能源油当量

能源类别	油当量参数
汽油(gasoline)	0.866 7
柴油(diesel)	0.977 8
天然气(gas)	0.855

本研究根据当前最新能耗标准,结合美国内华达大学雷诺校区团队设计的“车辆运行成本计算器”^[13]对在坡度为0%的路面上行驶的车辆能耗参数进行了计算。本研究选取了国内常用的行驶车辆类型和能源种类进行了计算,最终汇总得到针对三种能源、四种车辆类型的能耗数据(见图1)。

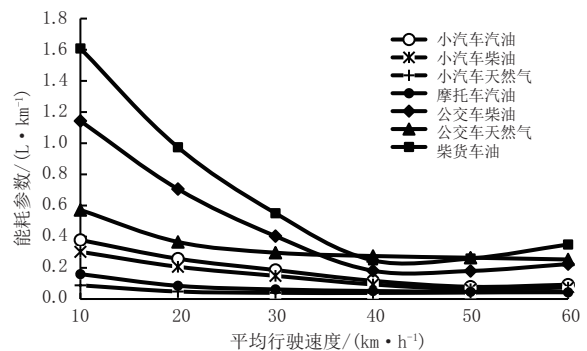


图1 车辆能耗参数

2.3 坡度对能耗参数的影响

山地城市有着地形起伏的特点,车辆在坡道路面行驶的纵坡阻力对能耗影响显著,因此在计算能耗参数的时候需要考虑到纵坡因素。本研究利用AVL cruise软件对能耗与坡度的关系进行了研究。AVL cruise是一款燃油经济性以及排放性能的仿真

软件,可以用于车辆的动力性、燃油经济性以及排放性能的仿真。根据山地城市的坡度特点,将不同交通方式、不同燃料、不同纵坡下行驶车辆的能耗进行了模拟,得出了关系曲线。以小汽车的汽油能耗参数为例,不同纵坡下的能耗参数见图2。

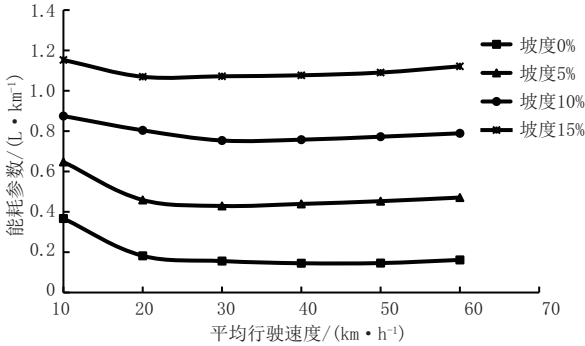


图2 小汽车不同坡度汽油能耗参数

2.4 碳排放因子的计算

本研究利用每种燃料在山地城市地形因素下的燃料消耗参数,结合英国交通能源报告《Moving Britain Ahead: Transport Energy Model Report》^[14]与COPERT模型^[15],对气体排放因子进行了计算。根据测算,N₂O与CH₄的排放参数均为常数,与行驶速率和地形因素无关。根据机动车常用能源种类,这两种气体对应的排放因子见表2和表3。

表2 各运具各能源N₂O排放因子 单位:g/km

运具类型	汽油	柴油	天然气
小汽车	0.039	0.234	0.022
摩托车	0.25	—	—
公交车	—	10.852	0.7
货车	—	6.175	—

表3 各运具各能源CH₄排放因子 单位:g/km

运具类型	汽油	柴油	天然气
小汽车	0.103	0.103	0.103
摩托车	0.491	—	—
公交车	—	0.210	0.210
货车	—	0.394	—

CO₂的排放因子与车辆运行状态有关。本研究针对CO₂这种主要的排放气体,根据不同速率及不同坡度的变化,利用COPERT模型对排放的影响进行了研究^[15]。

COPERT模型建立了车速与污染物排放之间的模型,能够针对不同车速工况,采用相应的排放系数。其中,二氧化碳的排放量如公式(5)所示。

$$E_{CO_2} = 44.011 \times \frac{E_{EC}}{12.011 + 1.008 \times r_{H:C}} \times r_{E,EC} \quad (5)$$

式中: E_{CO_2} 为CO₂的排放因子量,g/km; E_{EC} 为车辆单位公里能源消耗系数,g/km; $r_{H:C}$ 为不同类型燃料的碳氢比值,具体可以参考COPERT指南的建议值; $r_{E,EC}$ 为燃料消耗系数与能耗系数的关系,可参考COPERT指南。

本研究利用计算结果,参考COPERT指南,针对不同交通方式的不同能源类型,对速率、纵坡与CO₂排放参数之间的关系进行了拟合,得出在不同速度、不同纵坡与四种交通方式在各自主要燃料类型下的排放因子,所有拟合模型的R²均在95%以上。排放因子模型见式(6),参数取值见表4。

$$c = (av^3 + bv^2 - cv + d) \times (eh^2 + fh + g) \quad (6)$$

式中: c 为排放因子,g·km⁻¹; v 为车辆运行速度,g·km; h 为道路坡度,%。

表4 碳排放计算模型参数表

燃料类型	a	b	c	d	e	f	g
小汽车汽油	-0.01	0.95	-56.03	1 226.20	0.01	0.19	1.00
小汽车柴油	-0.01	1.34	-59.86	1 100.10	0.01	0.23	0.97
小汽车天然气	-0.01	1.38	-61.69	1 133.70	0.01	0.12	1.01
摩托车汽油	-0.01	1.22	-46.91	667.64	0.01	0.18	1.00
公交车柴油	-0.05	6.97	-319.16	5 435.70	0.03	0.10	1.04
公交车天然气	-0.06	7.81	-357.46	6 088.00	0.01	0.24	1.00
火车柴油	-0.07	10.04	-456.49	7 677.10	0.01	0.24	0.96

3 解放碑路网交通碳排放计算

3.1 研究区域概述

解放碑商圈位于重庆市主城区渝中半岛的中心地带,是当前重庆市发展最成熟的商业中心。解放碑商圈研究区域道路网面积约3.5 km²,主要包括5条主干道,13条次干道,29条支路,道路总长为39.43 km^[16]。受地形与高差影响,该区域路网密集,坡度起伏,具有山地城市的道路特点。重庆解放碑商圈研究区域见图3。

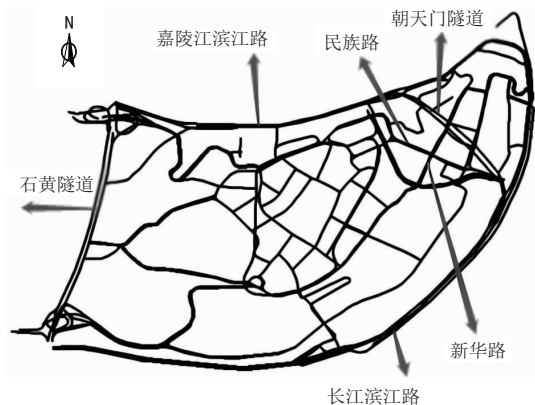


图3 重庆解放碑商圈路网

3.2 研究路段数据获取

本研究于2023年7月对重庆市解放碑道路进行了交通调查,共获取了5条主干道,10条次干道以及13条次干路,共计40个点位的相关信息。首先,利用微波装置获取了7月1日到7月30日,共计30d的交通数据。对研究路段一天的车辆平均通行速度和流量进行了统计。其次,通过Open Street Map (<https://www.openstreetmap.org>) 获取了解放碑商圈道路网 ArcGIS(地理信息系统)数据,得到了微波装置所在路段的道路坡度与长度信息。最后,通过交通调查,对不同车辆类型、不同燃料类型的占比进行了统计。数据获取结果见表5、表6。

3.3 研究路段碳排放计算结果

根据所获数据,利用计算得出的碳排放因子与获取的交通、道路信息数据,带入研究构建的山地城市道路交通碳排放计算模型,对研究路段的不同车辆类型、不同燃料类型的碳排放进行了计算。并根据解放碑路网总长度、车辆保有量与研究路段的比值,对整个解放碑商圈的年交通碳排放量进行了估算。计算结果见表7。

根据研究结果,对山地城市交通碳排放进行坡度考虑后,得出的年CO₂排放量为31 239.5 t,N₂O排放量为41.6 t,CH₄排放量为18.3 t。根据IPCC的评估,N₂O的CO₂当量(gCO₂eq/MJ)为298,CH₄为25,计算得出总碳排放量为4.4万t。相比之下,不考虑坡度时的碳排放量为3.3万t。结果的差异凸显了地形因素在山地城市交通碳排放计算中的重要性,考虑坡度能够更准确地反映交通碳排放的实际情况。

根据《2023年中国城市绿色出行及其碳排放分析报告》显示,重庆市的年均交通碳排放量估计为1 200万t;根据《2023重庆市中心城区交通发展年度报告》,2023年重庆市中心城区汽车总行驶里程为5 358.9万车 km/d。通过解放碑地区的交通数据、路网数据与全市进行对比分析后,计算得出解放碑地区的碳排放量应约为5.6万t。与碳排放计算模型的计算结果4.4万t相比,验证了本研究所构建的碳排放计算模型的有效性。

4 结论

交通运输业作为我国低碳发展的关键,其碳排放直接影响我国“双碳”目标的达成。山地城市的道路交通碳排放缺乏针对性的计算模型和排放因子。本研究结合山地城市交通特征进行分析,主要有以

表5 研究区域交通道路信息

微波点位信息	平均运行速度/(km·h ⁻¹)	交通量/(pcu·h ⁻¹)	坡度/%	路段长度/m
长滨路72号(出城)	46.80	6 240	0.1	1368
千厮门路口(进城)	50.83	3 420	0.2	1718
魁星桥下口(进城)	33.77	8 220	5.6	580
大溪沟嘉滨路加油站(进城)	44.99	6 360	0.6	495
长江大桥复线桥入口	51.99	11 400	2.6	943
湖广会馆大门对面	35.35	2 520	12	144
石黄隧道出口	45.61	5 040	11.6	353
和平路金汤街路口(进城)	25.41	2 520	10.3	144
朝天门隧道千厮门出口	46.68	2 280	1.8	861
观音岩刘一手路口(进城)	31.73	5 340	10.4	144
北区路平安保险路口(进城)	27.06	6 720	2.9	254
一号桥出城车站(出城)	35.98	8 700	1.7	352
黄花园大桥南端(出城)	37.19	6 060	5.4	1130
北区路家家喜调头处弯道(进城)	36.98	5 880	6.9	946
临江路国泰中心对面	25.40	7 320	11.5	259
临江支路公交车站(下行)	29.92	4 500	9.1	111
中山一路新德村路口(进城)	38.65	5 820	2.5	278
和平路新华大厦(下行)	33.36	8 220	6.7	313
民生路重宾路口(出城)	31.46	5 340	1.9	305
临江路大同巷(出城)	21.89	8 040	3.5	345
中兴路冻库(出城)	42.48	10 920	0.8	576
石黄隧道入口	32.62	5 280	2.6	949
解放西路响水桥路口(出城)	24.21	2 100	0	145
解放东路文化街路口出城100 m	23.10	2 520	0.2	469
解放东路水产市场(进城)	20.65	960	5.5	273
陕西路食品大楼(下行)	26.52	2 760	1	499
新华路骨科医院前30 m	31.67	5 220	4.1	270
新华路长城大厦(进城)	34.26	4 140	5.3	245
新华路农业银行(上行)	26.85	4 980	6.9	403
北区路一号桥(下行)	39.30	5 040	6.9	946
民生路花市(下行)	22.69	1 260	11.5	165
五一路帝都广场(出城)	24.05	2 640	8.3	145
中华路神仙路口(上行)	26.70	1 680	8.7	103
中兴路旧货市场(进城)	30.87	7 380	9.9	314
中兴路清真寺(上行)	34.11	7 620	5.6	351
凯旋路电梯下口(下行)	30.89	2 760	6.6	424
五一路中段	25.99	5 580	8.3	228
中华路NOVO(下行)	24.95	3 480	9.2	91
民生路大同路口(下行)	26.42	3 540	11.7	150
新民街鲁祖庙	18.29	2 640	5.1	169

表6 研究区域车辆类型比例

单位:%

车辆类型	有排放						无排放	
	小汽车			客车		货车	摩托车	新能源车
燃料类型	汽油	柴油	天然气	天然气	柴油	柴油	汽油	电
比例	37.1	2.4	8.3	1.2	1.8	0.1	12.4	36.9

表7 解放碑商圈交通年碳排放量

单位:t

车辆类型	小汽车			公交车		大货车	摩托车	总量
	汽油	柴油	天然气	柴油	天然气	柴油	汽油	
考虑坡度的 CO ₂ 排放	20 308.1	1 154	2 003.6	1 979.6	2 877.1	288.6	2 628.7	31 239.5
不考虑坡度的 CO ₂ 排放	12 710.6	705.2	1 218.2	1 298.4	1 795.2	176.4	1 763.2	19 667
N ₂₀ 排放	2.4	0.8	0.2	1.4	30.4	1.4	5	41.6
CH ₄ 排放	6.2	0.4	1.4	0.4	0.6	0	9.8	18.6

下研究成果与结论:

(1)本研究着眼于山地城市道路交通碳排放特征,考虑不同碳排放气体种类、交通出行方式、燃料使用类型以及车速、道路环境等方面,根据“自下而上”法建立了山地城市道路交通碳排放计算模型。

(2)通过研究国内外碳排放因子和不同能源的油耗量参数,结合山地城市地形特征,明确关键参数对道路线形、行驶速度等关系,构建了山地城市交通碳排放因子数据库并生成交通碳排放计算软件。(软件著作权证书号:软著登字第 10326707 号)。

(3)通过计算结果,考虑坡度因素后,山地城市交通碳排放的计算更为精确。以重庆市解放碑商圈路网为例,考虑坡度的 CO₂ 年排放量比不考虑坡度多 1.1 万 t。本研究为今后的碳排放研究和城市规划提供了可靠基础,为山地城市交通碳排放的精确估算提供了有力支持。

(4)利用构建的碳排放模型对重庆解放碑商圈路网的碳排放进行了计算,得到研究区域年 CO₂ 排放当量为 4.4 万 t。并与《2023 年中国城市绿色出行及其碳排放分析报告》提供的碳排放数据进行了比较,证实了碳排放计算模型的有效性。本研究对于全面评估和有效管理山地城市交通碳排放具有实际意义,为重庆解放碑商圈碳减排政策和可持续城市交通规划提供了数据参考。

本研究的碳排放计算模型可以对山地城市不同能源结构、交通状况等情况下的碳排放进行测算和分析,为决策者优化城市能源结构和交通方式等提供参考和建议,为山地城市的低碳发展提供科学依据。

参考文献:

- [1] IPCC.National Greenhouse Gas Inventories Programme: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M].Japan:Institute for Global Environmental Strategies(IGES),2006.
- [2] 吴雯,李玮.中部六省交通运输业碳排放影响因素分析[J].管理现代化,2019,39(1):62-65.
- [3] 李健,景美婷,苑清敏.绿色发展下区域交通碳排放测算及驱动因子研究——以京津冀为例[J].干旱区资源与环境,2018,32(7):36-42.
- [4] 戈秋虞,张兰怡,邱荣祖,等.基于 GDIM 法的福建省交通碳排放驱动因素分析[J].福建农林大学学报:自然科学版,2022,51(1):131-136.
- [5] Gomez C. D.,Gonzalez C. M.,Osses M.,et al.Spatial and temporal disaggregation of the on-road vehicle emission inventory in a medium-sized Andean city. Comparison of GISbased top-down methodologies[J].Atmospheric environment,2018,179(2):142-155.
- [6] Nyhan, M.,Sobolevsky, S.,Kang, C.,et al.Predicting vehicular emissions in high spatial resolution using pervasively measured transportation data and microscopic emissions model[J].Atmospheric Environment,2016(140):352-363.
- [7] Liu J.,Han K.,Chen X. M.,et al.Spatial-Temporal Inference of Urban Traffic Emissions Based on Taxi Trajectories and Multi-Source Urban Data[J].Transportation Research Part C Emerging Technologies,2019,106(3):145-165.
- [8] 周涛,李毅军,孙琴梅,等.大数据驱动下的山地城市道路条件对车辆碳排放影响研究[J].交通运输系统工程与信息,2023,23(5):172-183.
- [9] 沙学锋.城市道路机动车动态排放预测模型研究[D].长春:吉林大学,2007.
- [10] 徐伟嘉,黄建彰,刘永红,等.基于 PEMS 与 COPERT 的机动车尾气排放特征分析[J].环境科学与技术,2014,37(增刊1):77-81.
- [11] Singer B,Harley R.A fuel-based inventory of motor vehicle exhaust emissions in the Los Angeles area during summer 1997 [J].Atmospheric Environment,1997,34(11):1783-1795.

(下转第 23 页)

向减速标线可以有效地在整个交织区出口区段对车辆的速度进行调节,保障交织区交通状况的通畅和安全。

5 结论与建议

本研究对广州东圃立交上盖进行实地调研,重点考察了上盖主线及匝道出入口前后 50 m 的 8 个断面速度数据。综合这些资料,对城市立交上盖交织区交通运行特点、纵向减速标线的减速作用等进行了研究,得出如下结论:

(1)研究发现,大小车速度标准差在上盖交织区出口前 50 m 达到最大,而平均速度在出口后 50 m 达到最大。在出口后 50 m 处,车辆速度集中在中速区间,而其他断面则主要在低速区间。此外,大小车在上盖交织区出口前后 50 m 的超速率也升至最高水平。因此,上盖交织区出口前后风险系数较高,有显著的交通安全隐患。

(2)纵向减速标线不仅能有效降低断面平均速度,还能显著减少速度标准差,有助于实现速度协调,降低行车风险。因此,在城市立交上盖交织区的优化设计中,设置纵向减速标线是一种有效的策略。

(3)根据交通特征研究的结果,在上盖交织区的交通工程优化设计中,可以采用禁止变道的实线以及纵向减速标线来对车辆的变道行为和车辆的行驶速度进行约束,也可以考虑通过改善隧道内部的照明系统来缓解车辆在交织区出入口行驶时光线差异对驾驶员造成的不良影响,以达到提高交织区出口处的安全程度和流畅性的作用。

面对上盖交织区出口处行车风险较高区域的优化设计,除了通过设置禁止标线和纵向减速标线,对车辆的变道行为及速度进行调控之外,还可以结合

交通标志牌或交通动态电子屏幕等对驾驶人员进行提醒,具体的优化效果还需要通过进一步的研究确定。

参考文献:

[1] CIRILLO J A. The relationship of accidents to length of speed-change lanes and weaving areas on interstate highways[J]. Highway Research Record, 1970(49):17-32.

[2] JOEWONO P, ISHAK B, ARIFIN N, *et al.* Weaving length and lane-changing behavior at two-sided weaving section along federal road FT050: jalan kluang-ayer hitam[J]. Matic Web of Conferences, 2018(181):1-8.

[3] 江俐颖,王芬.基于元胞自动机的城市快速路冲突区交织长度仿真研究[J].中国水运(下半月),2017,17(1):84-88.

[4] YUAN J H, ABDEL-ATY M, CAI Q, *et al.* Investigating drivers' mandatory lane change behavior on the weaving section of freeway with narrow lanes: A driving simulator study[J]. Transportation Research, 2019, 62F(4):11-32.

[5] BEINUM A V, FARAH H, WEGMAN F, *et al.* Driving behaviour at motorway ramps and weaving segments based on empirical trajectory data[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018(92):426-441.

[6] 裴玉龙,程国柱.高速公路车速离散性与交通事故的关系及车速管理研究[J].中国公路学报,2004,17(1):74-78.

[7] 王晓飞,符锌砂,葛婷.高速公路立交入口区域行车风险评价模型[J].交通运输工程学报,2011,11(5):88-92.

[8] 温惠英,孙佳人,曾强,等.高速公路交通构成的安全效应计量评价[J].华南理工大学学报(自然科学版),2018,46(6):1-7.

[9] 广东省公路管理局.高速公路出入口标线设置指南[M].广州:广东省公路管理局,2020.

[10] 傅顺.基于驾驶员生理特性的隧道出入口照明研究[D].重庆:重庆交通大学.

[11] 吴焱,钱振邦,王建军,等.高速公路交通安全风险评价与敏感性分析[J].长安大学学报(自然科学版),2014,34(4):134-141.

[12] 郭延永,刘攀,梁启宇.视觉减速标线控速效果评价[J].交通信息与安全,2014,32(6):106-112.

~~~~~  
(上接第 11 页)

[12] BP, 2021. BP Statistical Review of World Energy 2021, London [R/OL].[http://www.bp.com/statisticalreview].

[13] VEHICLE OPERATING COSTS CALCULATOR [CP/OL].https://voc.engr.unr.edu/

[14] Department for Transport UK 2018, Transport Energy Model

[R/OL].[https://assets.publishing.service.gov.uk/]

[15] 何水苗.基于 GPS 数据的城市道路机动车 CO<sub>2</sub> 排放测算及时空分布特征分析[D].西安:长安大学,2020.

[16] 龚华凤,陈俊成,赵聪霄,等.路网容量计算方法研究——以重庆解放碑商圈为例[J].交通世界,2023(10):11-14.