

文章编号: 1005-0523(2022)04-0041-07



交通运输业不同方式碳排放因子水平比较研究

吴雪妍^{1,2}, 毛保华^{1,2}, 周琪^{1,2}, 黄俊生^{1,2}, 童瑞咏^{1,2}

(1. 北京交通大学中国综合交通研究中心, 北京 100044; 2. 北京交通大学综合交通运输大数据应用技术交通运输行业重点实验室, 北京 100044)

摘要: 交通部门的温室气体排放在全球约占 24% 左右, 控制交通部门碳排放对于实现碳中和具有重要意义。在分析各交通方式碳排放过程的基础上, 提出了交通碳排放因子的影响因素, 通过不同运输方式的碳排放因子测算模型, 比较了各种方式碳排放因子的水平。研究表明: 航空碳排放因子显著高于其他运输方式, 其次为公路、铁路和水路运输。与美国相关碳排放因子的比较表明: 除航空货运外, 我国各方式客运和货运碳排放因子均低于美国; 我国铁路换算运输密度是美国的 4.4 倍, 货运和客运碳排放因子是美国的 50% 和 81.56%。

关键词: 碳中和; 交通运输行业; 碳排放因子; 单位周转量

中图分类号: U491.1 **文献标志码:** A

本文引用格式: 吴雪妍, 毛保华, 周琪, 等. 交通运输业不同方式碳排放因子水平比较研究[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(4): 41-47.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20220727.003

Comparative of Carbon Emission Factor Levels in Different Modes of Transportation Industry

Wu Xueyan^{1,2}, Mao Baohua^{1,2}, Zhou Qi^{1,2}, Huang Junsheng^{1,2}, Tong Ruiyong^{1,2}

(1. Intergrated Transport Research Center of China, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Key Laboratory of Transport Industry of Big Data Application Technologies for Comprehensive Transport, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The transportation sector is responsible for about 24% of global greenhouse gas emissions. Controlling the carbon emissions from the transportation sector is of great significance to achieve carbon neutrality. Based on analyzing the carbon emission process of various transportation modes, this paper analyzes the influencing factors of carbon emission factors of different transportation modes. Through the calculation model of carbon emission factors of different transportation modes, the size of carbon emission factors of various modes is analyzed. The research showed that the carbon emission factor of air transport is significantly higher than other modes of transport, followed by road, railway and water transport. Compared with the United States, the carbon emission factors of passenger transportation and freight transportation in China are all lower than those in the United States except air freight, China's railway transport density is 4.4 times than that of the United States, and the carbon emission factor of freight and passenger transport is 50% and 81.56% of that of the United States.

Key words: carbon neutral; transportation industry; carbon emission factor; unit turnover

Citation format: WU X Y, MAO B H, ZHOU Q, et al. Comparative of carbon emission factor levels in different modes of transportation industry[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(4): 41-47.

收稿日期: 2021-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71971021); 北京交通大学基本科研业务费科研学术活动资助项目(2019JBM334)

交通碳排放因子一般指完成单位工作量产生的碳排放量,体现了不同运输方式的碳排放效率。碳中和(Carbon neutrality)是指某区域在一定时间内直接或间接产生的温室气体排放总量可以通过在该区域内植树造林等形式来吸收与抵消,从而实现二氧化碳的“零排放”。

国家主席习近平2020年9月在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布,我国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和。国务院2021年10月印发的《2030年前碳达峰行动方案》中提出,到2025年非化石能源消费比重达到20%左右,到2030年达25%左右。交通运输是社会经济发展的重要组成部分,能源消耗和温室气体排放均占有较大比重。根据国际能源署数据显示,全球交通部门温室气体排放约占24%左右。根据北京绿色创新发展中心《2020能源数据》,我国交通部门2018年能源消耗量占全国的18%,交通部门的CO₂排放量约占全国总排放量的10%左右^[1]。“碳达峰、碳中和”目标的提出对我国交通运输行业的发展提出了新的要求,准确掌握不同方式碳排放因子水平及其影响因素,对于降低交通部门碳排放、促进碳中和目标的实现具有重要意义。

交通运输行业碳排放的研究主要集中于两个方面。一是测算交通建设和运营期间产生的碳排放,如陈进杰等^[2]将高速铁路全生命周期分为建材生产、施工建设、运营维护和报废4个阶段,并计算产生的碳排放量。二是研究交通基础设施的建设和运行直接产生的二氧化碳排放,或通过影响经济活动间接产生的二氧化碳排放^[3]。如马慧强等^[4]研究表明单位交通周转量的能耗是促进旅游交通碳排放增长的主要影响因素之一。国内外学者测算交通碳排放时多采用自上而下或自下而上两种方法^[5]。自上而下法基于燃料消耗和燃料碳排放系数测算,如曾晓莹等^[6]采用自上而下法研究了省域交通碳排放时空分布特征。自下而上法基于单位里程产生的碳排放测算,如闫琰等^[7]根据各运输方式油耗特征测算了终端能源消耗量,并估算了整个交通运输行业碳排放量;王成新等^[8]测算了不同交通运输方式的百公里能耗和碳排放,发现高速铁路百公里人均碳排放约为航空的0.2倍、高速公路的0.3倍;徐龙等^[9]研究不同速度区间下公交车的百公里CO₂排放强度,发现液化天然气车的碳排放强度高于柴油

车,且其差距随速度增大而增大;王雪然等^[10]基于百公里能耗测算了公交车运营期碳排放,认为电动公交车全生命周期每百公里可减排61.2%。李利军等^[11]结合上述两种方法测算了京津冀公路和铁路货运碳排放。国外的欧盟道路碳排放因子模型(HBEFA)^[12]和综合移动源排放模型(MOVES)^[13]同样基于自下而上的原理测算道路交通排放因子。

以各种客、货运交通方式运营期的碳排放为对象,考虑了客货运能源消耗量未知情况下不同运输方式的客货换算系数,提出了单位周转量交通碳排放因子测算方法。最后,由于国内现有统计数据种类少、数据来源分散,缺少对社会及私人汽车、摩托车等的能耗数据^[14],本文在可比口径上对比了客运和货运不同交通方式碳排放因子水平。

1 交通碳排放因子影响因素

从全生命周期看,交通运输行业碳排放涉及建设、运营维护、报废拆除等阶段。本文主要研究各交通方式运营期间产生的碳排放,包括消耗化石能源产生的直接碳排放和在发电端供电时产生的间接碳排放。根据运营期各交通方式碳排放过程,交通碳排放因子的影响因素包括以下两方面。

1) 能源结构,尤其是清洁能源占比。研究表明,能源强度对碳排放有反向抑制作用,生物燃料、电力、氢能等清洁能源的使用,将影响该运输方式因燃烧化石能源产生的直接碳排放。目前我国能源结构中煤电发电量占比较高,约占60%以上^[12],而煤电发电的碳排放系数远高于其他(如气电、核电等)方式。发电结构、发电端能耗效率将引起电力碳排放系数的变化,从而影响以电力驱动的交通方式运营时产生的间接碳排放。

2) 运输工具的效率。交通碳排放因子是通过完成的运输工作量与该过程产生的碳排放量测算的。生产效率越高,一定碳排放量情景下完成的客货运输量越大,碳排放因子越低。一般来说,营运性公共运输车辆的效率普遍高于非营运性车辆,其排放因子更低。

2 交通碳排放因子测算模型

2.1 测算模型构建

本文以交通方式单位周转量产生的碳排放量作为不同方式的碳排放因子。基于自上而下法构建的交通碳排放因子模型可分别测算运营期间客运

和货运不同运输方式交通碳排放因子。

1) 碳排放因子。交通运输行业客、货运不同运输方式碳排放因子测算方法如下

$$e_{ik} = \frac{E_{ik}}{T_{ik}}, k=1,2 \quad (1)$$

式中: T_{i1} 为第 i 种运输方式的货运周转量, $t \cdot km$; T_{i2} 为第 i 种运输方式的旅客周转量, $人 \cdot km$; E_{i1} , E_{i2} 分别为第 i 种运输方式的货运和客运碳排放量, $kgCO_2$ 。

2) 客货运碳排放量。在客运和货运碳排放量两项数据未知的情况下, 由于换算周转量与各运输方式运营期间的碳排放量呈正相关关系^[5], 可利用各种运输方式的换算周转量和运营期间碳排放数据测算客货运碳排放量, 测算方法如下

$$E_{ik} = \frac{T_{ik} \alpha_{ik}}{T_{ih}} E_i, k=1,2 \quad (2)$$

$$T_{ih} = \sum_{i,k} \alpha_{ik} T_{ik}, k=1,2 \quad (3)$$

式中: α_{ik} 为第 i 种运输方式的客货换算系数; T_{ih} 为第 i 种运输方式的换算周转量, $t \cdot km$; E_i 为第 i 种运输方式的总碳排放量, $kgCO_2$, 测算方法如下

$$E_i = \sum_{j=1}^n W_{ij} f_j + W_{id} f_d \quad (4)$$

$$f_j = \frac{44}{12} D_j C_j O_j \quad (5)$$

式中: W_{ij} 为第 i 种运输方式的第 j 种化石能源的碳消耗量, t ; W_{id} 为第 i 种运输方式的电力能源的消耗量, $kW \cdot h$; f_j 为第 j 种化石能源的碳排放系数 $kgCO_2/t$; f_d 为电力碳排放系数, $kgCO_2/(kW \cdot h)$; D_j 为第 j 种化石能源的平均低热值, GJ/t ; C_j 为第 j 种化石能源的单位热值含碳量, kgC/GJ ; O_j 为第 j 种化石能源燃

烧过程的碳氧化率。

3) 客货换算系数。我国现有统计制度规定的客货换算系数多基于运输 $1 t \cdot km$ 和 $1 人 \cdot km$ 所需人力和物力投入, 并不适用于碳排放的测算。排放视角下的客货换算系数应根据客、货单位工作量产生的排放量比值来确定。由于我国部分数据不完备, 这里以美国的客货运数据为参照, 考虑中、美客货运部分参数的差异, 对美国客货换算系数 α'_{ik} 按折算值 γ_i 修正后作为我国客货换算系数 α_{ik} , 方法如下

$$\alpha_{ik} = \begin{cases} 1, & k=1 \\ \alpha'_{ik} \gamma_i, & k=2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: α'_{ik} 为美国第 i 种运输方式的客货换算系数, 即货运和客运第 i 种运输方式碳排放因子的比值。 γ_i 为折算值, 与美国和我国交通工具单位排放、运载能力等因素有关。假设美国客运和货运发动机技术水平一致, 我国的技术水平虽低于美国, 但客货运技术水平差距较小, 客货换算系数折算值为两国客运和货运载运量之比, 测算方法如下

$$\gamma_i = \frac{K_{ic}/K_{im}}{H_{ic}/H_{im}} \quad (7)$$

式中: K_{ic} 为我国第 i 种运输方式每车载客量, $人/车$; K_{im} 为美国第 i 种运输方式每车载客量, $人/车$; H_{ic} 为我国第 i 种运输方式每车载货量, $t/车$; H_{im} 为美国第 i 种运输方式每车载货量, $t/车$ 。

2.2 数据来源与处理

参照能源基金会《2020 能源数据》中各运输方式能源消耗量数据以及 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南(表 1)的化石能源碳排放系数, 测算以

表 1 碳排放系数计算参数值
Tab.1 Carbon emission coefficient calculation parameter value

Category	Low heating value/(GJ/t)	Carbon content per unit calorific value/(kgC/GJ)	Carbon oxidation rate/%
Gasoline	43.070	189	98
Diesel oil	42.652	202	98
Fuel oil and diesel	41.816	211	98
Kerosene	43.070	196	98
LPG	50.179	172	98

2018年我国交通运输行业碳排放为研究对象,我国电力排放系数取 $0.637 \text{ kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。各运输方式周转量数据来源于国家统计局。

我国和美国换算系数折算值根据载运量之比计算,数据如表2所示,其中美国各方式碳排放因子数据来源于美国环境保护署官方报告。根据相关统计数据,同一运输方式的载运率应采用相同计算方法和统计口径。美国铁路和公路客运、货运载运率可通过人英里、吨英里、车英里测算;我国公路客

运、货运载运量可通过总吨位与载客、载货汽车数量测算;我国铁路客运载运量可通过普速铁路、高速铁路车厢数量、定员、平均客座率测算。对于航空运输,中美航空运输折算值根据客座利用率和货邮载运率(收入客公里或货运吨公里与可用座公里或货运吨公里的比值)计算。此外,由于船舶的载运量较大,约为万吨级以上,水运载运能力近似,折算值接近于1。我国客货换算系数测算结果如表3所示。

表2 中美换算系数折算值
Tab.2 Conversion coefficient converted value

Mode	Country	Rail	Road	Aviation
Passenger	China	46.59 passenger/vehicle	25.71 passenger/vehicle	Passenger load factor: 83.20%
	USA	23.20 passenger/vehicle	20.13 passenger/vehicle	Passenger load factor: 83.07%
Freight	China	75 t/vehicle	9.49 t/vehicle	Freight load factor: 54.50%
	USA	49.39 t/vehicle	6.67 t/vehicle	Freight load factor: 35.80%
Converted value		1.3	0.9	0.81

表3 碳排放系数计算参数值
Tab.3 Carbon emission coefficient calculation parameter value

Mode	Rail	Road	Water	Aviation
Passenger transport carbon emission factor in USA ($\text{kgCO}_2/\text{passenger}\cdot\text{mile}$)	0.058	0.054	-	0.131
Freight transport carbon emission factor in USA ($\text{kgCO}_2/\text{t}\cdot\text{mile}$)	0.022	0.211	0.036	1.16
Conversion factor in USA ($\text{t}/\text{passenger}$)	2.64	0.26	1	0.11
Converted value	1.3	0.9	1	0.66
Conversion factor in China ($\text{t}/\text{passenger}$)	3.43	0.23	1	0.08

3 交通碳排放因子测算与比较分析

3.1 我国单位周转量交通碳排放因子计算结果

按前述方法和数据,表4给出2018年我国各方式碳排放因子测算结果。不难看出,我国航空货运碳排放因子显著高于其他方式,约为铁路的128倍;公路货运亦为铁路的11.5倍;铁路和水运最低,为 $0.008 \text{ kgCO}_2/(\text{t}\cdot\text{km})$ 。客运各方式碳排放因子差距相对较小,航空运输最高,约为水运的9.6倍;其

次是铁路和公路运输,约为水运的3.4和2.6倍。

我国公路运输产生的碳排放量占比在70%以上,但由于运输量大,其单位周转量碳排放因子低于航空运输。我国铁路货运碳排放因子最低,但客运碳排放因子高于公路和水路运输,这可能与近年高速客运占比不断增大有关。从客运和货运碳排放因子的对比看,公路和航空货运碳排放因子均高于客运,但铁路客运碳排放因子高于货运,原因可能是高速铁路碳排放因子高于传统铁路^[8]。

表4 我国不同交通方式客货运碳排放因子
Tab.4 Carbon emission factors of passenger and freight transportation modes in China

Mode	Rail		Road		Water		Aviation	
	Factor	Rate	Factor	Rate	Factor	Rate	Factor	Rate
Freight (kgCO ₂ /t·km)	0.008	1	0.092	11.5	0.008	1	1.027	128.4
Passenger (kgCO ₂ /passenger·km)	0.027	3.4	0.021	2.6	0.008	1	0.077	9.6

3.2 交通碳排放因子对比分析

为分析既有碳排放因子研究结果的合理性,表5给出了本文测算的交通碳排放因子、美国环境保护署交通碳排放因子与文献[8]和文献[16]的结果。

从表5可以看出,除航空货运碳排放因子外,我国客运和货运各方式碳排放因子均低于美国。文献[8]和文献[16]与本文结果也有一定差异。分析我国与美国各交通方式碳排放因子不同的原因如下:

1) 我国客货运交通统计基于客货商业运营体系,效能较美国全行业平均水平及非营运系统更高。若以每公里线路承担的换算周转量作为换算运输密度,2018年我国铁路换算运输密度约为 $6\ 757 \times 10^4$ (t·km)/km,美国约为 $1\ 525 \times 10^4$ (t·km)/km,我国是美国的4.4倍,货运和客运铁路碳排放因子分别为美国的57%和75%。同理,我国公路换算运输密度约为美国的1.8倍,公路货运和客运碳排放因子分别为美国的70%和26%。我国交通工具效能高于美国,单位周转量交通碳排放因子较小。

2) 统计口径的差异。客货运单位排放统计原则上应基于全部车辆。我国公路运输统计时未包含非营运的个人运输车辆^[4],这部分在我国占有较大比重。我国机动车包括汽车、挂车、无轨电车、农用运输车、摩托车、机动三轮车和运输用拖拉机(包括带挂车的轮式拖拉机)以及轮式专用机械车等种类,但不包括任何在轨道上运行的车辆。2020年全国机动车保有量为3.72亿辆,其中汽车2.81亿辆。我国营运汽车1 171.54万辆,仅占汽车数量的4%。统计口径的差异可能会导致对我国公路运输排放因子的低估。

3) 航空机型规模不同。航空货运中,采用全货机运输可提高单次载运量,降低单位周转量碳排放因子。从我国航空货运现状来看,全货机数量规模小,仅有160架,约70%的货运是通过客机腹舱完成的,这部分货运导致的排放增量如何分批计算需要细化研究。我国全货机数量在运输机队中占比约4.4%,低于美国的15.1%,航空货运碳排放因子高于美国。

表5 不同文献各交通方式碳排放因子对比
Tab.5 Comparison of carbon emission factors of different transportation in different literatures

Mode		Rail	Road	Water	Aviation
Freight transportation (kgCO ₂ /t·km)	China	0.008	0.092	0.008	1.027
	USA	0.014	0.131	0.022	0.721
Passenger transportation (kgCO ₂ /passenger·km)	China	0.027	0.021	0.008	0.077
	USA	0.036	0.081	-	0.081
	Literature[8]	0.015	0.046	-	0.097
	Literature[16]	-	0.026	-	-

航空客运中,支线航空飞行距离短、机型相对较小,单位周转量碳排放因子较高。美国航空客运中63%的定期客运服务由支线航空公司提供,支线客机数量占运输机队的33%以上。我国支线客机仅占运输机队的5.1%左右,支线航空规模小于美国,航空客运碳排放因子较低。

文献[8]基于百公里能耗和交通工具载客定员(实际上假设全部满载)测算了百公里人均碳排放量,其结果未考虑实际载客量对碳排放因子的影响,铁路客运碳排放因子结果低于本文;文献[8]测算公路碳排放因子时并未区分营运性车辆和非营运性车辆,本文仅测算了营运性车辆碳排放因子,公路客运碳排放因子较低;本文测算碳排放因子时考虑了运输周转量的影响,在一定碳排放量情景下完成的客运周转量越大,碳排放因子越低,由于我国航空客运周转量较高,本文航空碳排放因子测算结果较低。

文献[16]从公路运输不同速度排放因子水平角度出发,测算得到公路客运平均碳排放因子为 $0.026 \text{ kgCO}_2/(\text{人}\cdot\text{km})$,与本文结果基本一致,本文的交通碳排放因子测算模型较为合理。

4 结论

通过自上而下分析法研究了我国客货运不同方式交通碳排放因子,得出以下结论。

1) 从货运排放因子看,铁路与水运较低,民航最高。不过,由于货运量规模大,公路成为我国运输排放的主要贡献者,碳排放占比达74%。从客运看,由于高速铁路客运在铁路客运中占比较大,排放因子略高于公路,这与目前我国电力结构中煤电占比高达68.5%有关。

2) 碳排放因子与运输效率密切相关,我国的统计数据主要以客货营运车辆为主。我国铁路、公路营运车辆运输效率(如满载率)高,铁路换算运输密度是美国的4.4倍、公路是美国的1.8倍,因而单位周转量排放因子除航空货运外较美国普遍低。我国航空货运碳排放因子高于美国,原因可能与我国航空全货机机队规模较小有关,我国全货机数量占比仅为美国的30%左右。

3) 我国公路运输车辆统计中未包含非营运的个人运输,而这部分车辆在我国的占比高达96%,

由于其载客数少,单耗单排较大,这可能导致对我国公路运输排放因子的低估。

参考文献:

- [1] 毛保华,卢霞,黄俊生,等. 碳中和目标下氢能源在我国运输业中的发展路径[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(6):234-243.
MAO B H, LU X, HUANG J S, et al. On development path of hydrogen energy technology in China's transportation system under carbon neutrality goal[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(6):234-243.
- [2] 陈进杰,王兴举,王祥琴,等. 高速铁路全生命周期碳排放计算[J]. 铁道学报, 2016, 38(12):47-55.
CHEN J J, WANG X J, WANG X Q, et al. Calculation of carbon dioxide emissions in the life cycle of high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(12):47-55.
- [3] 张般若,李自杰. 高铁能促进低碳经济吗?高铁开通对城市碳排放强度的影响及机制研究[J]. 华中科技大学学报(社会科学版), 2021, 35(1):131-140.
ZHANG B R, LI Z J. Can high-speed rail promote low-carbon economy? The effect and mechanism of the opening of high-speed railway on urban carbon emission intensity [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Social Science Edition), 2021, 35(1):131-140.
- [4] 马慧强,刘嘉乐,弓志刚. 山西省旅游交通碳排放测度及其演变机理[J]. 经济地理, 2019, 39(4):223-231.
MA H Q, LIU J L, GONG Z G. Carbon emission and evolution mechanism of tourism transportation in Shanxi Province [J]. Economic Geography, 2019, 39(4):223-231.
- [5] PSARAFTIS H N, KONTOVAS C A. Green Transportation Logistics[M]. Cham: Springer International Publishing Switzerland, 2016.
- [6] 曾晓莹,邱荣祖,林丹婷,等. 中国交通碳排放及影响因素时空异质性[J]. 中国环境科学, 2020, 40(10):4304-4313.
ZENG X Y, QIU R Z, LIN D T, et al. Spatio-temporal heterogeneity of transportation carbon emissions and its influencing factors in China[J]. China Environmental Science, 2020, 40(10):4304-4313.
- [7] 闫琰,周嗣恩,杨新苗. 基于反推方法的交通运输行业碳排放评估研究[J]. 华东交通大学学报, 2012, 29(5):62-67.
YAN Y, ZHOU S E, YANG X M. Estimation of carbon emissions in transportation sectors with backcasting method

- [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2012, 29(5): 62-67.
- [8] 王成新, 苗毅, 吴莹, 等. 我国高速铁路运营的减碳及经济环境互馈影响研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(9): 171-177.
WANG C X, MIAO Y, WU Y, et al. Carbon reduction effects and interaction of economy and environment of high-speed railway transportation in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(9): 171-177.
- [9] 徐龙, 王力, 刘莹, 等. 基于多源数据的公交车能耗碳排放测算模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(3): 174-181.
XU L, WANG L, LIU Y, et al. Calculation model of bus energy consumption and CO₂ emission based on multisource data [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(3): 174-181.
- [10] 王雪然, 刘文峰, 张龙文, 等. 基于能源链的纯电动公交车全生命周期 CO₂ 减排效果研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(1): 19-25.
WANG X R, LIU W F, ZHANG L W, et al. CO₂ emission reduction effect of electric bus based on energy chain in life cycle[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(1): 19-25.
- [11] 李利军, 姚国君. 京津冀公铁货运碳排放测算研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(11): 126-132.
LI L J, YAO G J. Research on carbon emission calculation of highway and railway freight transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(11): 126-132.
- [12] FUJITA E M, CAMPBELL D E, ZIELINSKA B, et al. Comparison of the MOVES2010a, MOBILE62, and EMFAC2007 mobile source emission models with on road traffic tunnel and remote sensing measurements[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2012, 62(1): 1134-1149.
- [13] SILVIO N, CAYETANO R, FEDERICO C. Assessing carbon emissions from road transport through traffic flow estimators [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 95: 125-148.
- [14] 贾顺平, 毛保华, 刘爽, 等. 我国交通运输能源消耗水平测算与分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(1): 22-27.
JIA S P, MAO B H, LIU S, et al. Calculation and analyses of transportation energy consumption level in China[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(1): 22-27.
- [15] 张宏钧, 王利宁, 陈文颖. 公路与铁路交通碳排放影响因素[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(4): 443-448.
ZHANG H J, WANG L N, CHEN W Y. Decomposition analysis of CO₂ emissions from road and rail transport systems[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2017, 57(4): 443-448.
- [16] 吕晨, 张哲, 陈徐梅, 等. 中国分省道路交通二氧化碳排放因子[J]. 中国环境科学, 2021, 41(7): 3122-3130.
LYU C, ZHANG Z, CHEN X M, et al. Study on CO₂ emission factors of road transport in Chinese provinces[J]. China Environment Science, 2021, 41(7): 3122-3130.



第一作者: 吴雪妍(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为交通运输规划与管理, 2016年本科毕业于西南交通大学。E-mail: 20120926@bjtu.edu.cn。



通信作者: 毛保华(1963—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 北京交通大学中国综合交通研究中心执行主任; 研究方向为交通运输规划与管理、运输组织理论与方法等; 1983年本科毕业于长沙铁道学院, 1986年硕士毕业于北方交通大学, 1993年博士毕业于北方交通大学。E-mail: bhmao@bjtu.edu.cn。

(责任编辑: 吴海燕 姜红贵)