

# 基于 LCA 的城市道路碳排放测算与敏感性分析

牛凯,左贵强,张兴宇,朱晓东

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司,天津市 300074)

**摘要:**开展城市道路碳排放测算与分析是服务“双碳”目标、推进交通可持续发展的关键举措。依托“重庆市广阳大道生态修复及品质提升”项目,基于全生命周期评价方法构建城市道路建设阶段的碳排放测算模型,依据模型的计算结果对新建城市道路碳排放关键输入参数进行敏感性分析。从建设材料、施工机械燃料及电力等角度识别碳排放量的主要影响因素,为碳减排策略的提出提供理论技术支持,有助于实现道路建设从设计到施工全过程的绿色发展。

**关键词:**全生命周期;碳排放;城市道路;敏感性

**中图分类号:** TU997

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2024)01-0023-04

## 0 引言

在生态文明建设及绿色道路发展和交通强国建设要求下,国家陆续出台了碳达峰、碳中和相关的政策。这些政策文件均提出了减碳、节能、增绿的碳达峰与碳中和路径选择与目标,因此,开展双碳相关研究对促进生态文明建设具有十分重要的意义。

交通领域碳排放占我国碳排放总量的 11%,其中 73.3%~85%集中在道路运输与建养方面,是落实国家战略的主战场,许多学者围绕该问题进行了学术研究。刘圆圆<sup>[1]</sup>构建了基于 LCA(Life Cycle Assessment)的公路碳排放理论框架,从建设、养护两个方面构建了碳排放测算模型。毛睿昌<sup>[2]</sup>不仅考虑了道路,还围绕地铁、桥梁等交通基础设施构建了相应模型,评价了不同交通基础设施对碳排放的贡献情况。彭波等<sup>[3]</sup>从能源燃烧和沥青高温分解等角度构建了碳排放测算模型,并对结果进行深入研究。张海涛等<sup>[4]</sup>研究了沥青路面设计过程中不同参数选取对碳排放量的影响。徐金俊等<sup>[5]</sup>采用 LCA 模型构建了再生混凝土建筑的计算模型与边界,并就再生混凝土建筑的关键影响参数进行了敏感性分析。可以看出,现有研究对公路碳排放测算方法与影响因素的研究偏多,而有关城市道路碳排放的研究偏少,同时对道路建设碳排放敏感性分析缺乏深入研究。

本研究依托“重庆市广阳大道生态修复及品质

提升项目”工程,以 LCA 的道路建设阶段碳排放测算模型为基础,结合生态文明建设和绿色道路发展目标,对新建城市道路建设阶段碳排放关键输入参数进行敏感性分析,对碳排放主要来源进行分析,为提出碳减排思路提供理论技术支持,促进城市道路绿色可持续发展。

## 1 测算模型

道路建设过程的碳排放来源主要来自于原材料生产、场外加工、运输及现场施工四个阶段<sup>[6]</sup>,本文测算模型不考虑车辆和施工机械的生产及设备投入过程中的碳排放量,具体碳排放测算范围和计算过程如图 1 所示。

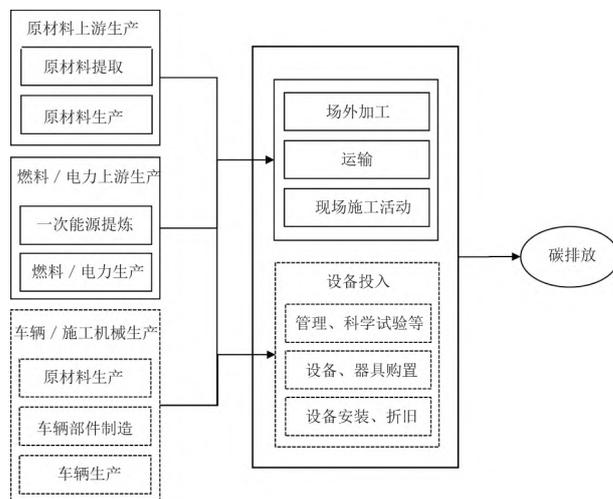


图 1 碳排放测算范围示意图

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (1)$$

式中:Q 为碳排放总量;Q<sub>1</sub> 为原材料生产排碳量;Q<sub>2</sub>

收稿日期:2023-05-12

作者简介:牛凯(1993—),男,硕士,工程师,从事道路交  
通科研设计相关工作。

为场外加工排碳量; $Q_3$ 为运输排碳量; $Q_4$ 为施工排碳量。

其中,原材料生产阶段碳排放量计算方法为<sup>[7]</sup>:

$$Q_1 = \sum_{i=1}^n M_i \times f_m^i \quad (2)$$

式中: $M_i$ 为第*i*种材料的消耗量; $f_m^i$ 为第*i*种原材料碳排放因子。

场外加工阶段碳排放量计算方法:

$$Q_2 = \sum_{ij} T_{ij} \times A_{ij} \times f_i^j \quad (3)$$

式中: $T_{ij}$ 为第*i*种机具的总台班; $A_{ij}$ 为第*i*种机械设备单位台班内第*j*种能源的消耗量; $f_i^j$ 为第*j*种能源的碳排放因子。

运输碳排放量计算方法为:

$$Q_3 = \sum_{ij} M_i \times S_{ij} \times f_s^j \quad (4)$$

式中: $M_i$ 为第*i*种材料的消耗量; $S_{ij}$ 为第*i*种材料第*j*种运输方式运距; $f_s^j$ 为第*i*种材料第*j*种运输方式单位周转排碳量。

施工阶段碳排放量计算方法:

$$Q_5 = \sum_{ij} T_{ij} \times A_{ij} \times f_i^j \quad (5)$$

式中: $T_{ij}$ 为第*i*种机具的总台班; $A_{ij}$ 为第*i*种机械设备单位台班内第*j*种能源的消耗量; $f_i^j$ 为第*j*种能源的碳排放因子。

## 2 案例分析

本研究依托于重庆市广阳大道生态修复及品质提升项目,广阳大道项目全长 13.08 km,改建约 8.69 km,新建约 4.39 km。全线含新建桥梁 1 座,通道改桥 1 座,新建生物绿桥 1 座,加固改造旧桥 2 座,新建小净距隧道 1 条。新建人行地下通道 4 座。

### (1) 项目排放总体特征

根据广阳大道各单位工程材料数量和机械台班实际使用情况,基于上述的碳排放测算模型,最终得到项目总体排放情况,具体见表 1。

广阳大道项目总碳排放量为 138 894.03 t,其中材料、机械总碳排放量分别为 118 463.56 t 和 20 430.47 t。广阳大道项目施工总长度为 13.084 km,车道数为 4,由此可得碳排放量为每公里 10 615.56 t,每车道每公里排放量为 2 653.89 t。

桥涵工程占总体排放值最大,为 32%,隧道工程、道路工程、排水工程、土石方工程、电力工程排放占比较大,其余工程排碳量相对较低。

### (2) 材料部分总体特征

表 1 项目总体排放情况

单位工程	材料碳排放量 占比 /%	机械碳排放量 占比 /%	总碳 排放量 /t
拆除工程	0.01	5.87	1 212.71
土石方工程	0.25	40.22	8 515.99
道路工程	20.59	10.07	26 443.90
排水工程	8.12	12.52	12 182.89
桥涵工程	35.38	11.11	44 179.22
隧道工程	27.57	15.43	35 813.45
电力工程	6.09	2.66	7 763.52
喷灌工程	0.10	0.22	157.53
海绵工程	0.60	1.35	983.42
绿化工程	0.83	0.21	1 029.69
道路及景观照明	0.46	0.34	611.71
总计	100	100	138 894.03

根据排放量和工程消耗量对工程内所用材料分别进行归类、单位转换及排序工作,最终得到累计占材料部分总排放量和总消耗量前 90%的材料类别见表 2。

表 2 材料分类排放量

规格分类	总碳排放量 /kg	占比 /%	总消耗量 /kg	占比 /%
PVC	274 163.0	0.23	9 492.2	0.001
砂石料	1 222 842.1	1.03	455 105 463.3	38.81
水稳层	6 016 688.1	5.08	237 895 969	20.29
钢类	46 304 066.1	39.09	3 898 648.13	0.33
水泥	8 454 548.3	7.14	9 679 974.97	0.83
水泥混凝土	40 864 636.3	34.50	295 179 237.5	25.17
沥青混合料	1 845 497.5	1.56	143 580 260.37	12.24
钢筋混凝土	594 643.6	0.50	1 497 080.39	0.13
漆类	277 199.1	0.23	76 999.75	0.001
铝类	1 149 092.3	0.97	62 791.93	0.001
砂浆类	461 211.5	0.39	2 912 970	0.025
塑料	74 982.6	0.06	8 721.72	0.001
其他	10 923 993.6	9.22	25 403 483.52	2.167
总和	118 463 564.08	100	1 172 288 118	100

由图 2 知,碳排放量较大的材料主要为钢类和水泥混凝土,分别占到材料总排放的 39.638% 和 34.981%,总占比超 70%;消耗量较大的材料主要为砂石料、水泥混凝土、水稳层,总占比超 85%。比较同种材料的排放量及消耗量可知,消耗量大的材料如砂石料、水稳层等排放占比极小,总计不超过 6%;而消耗量小的材料如钢类、水泥等碳排量占比极大,消耗占比小于 1%,排放占比却接近 50%。

排放量大小除与消耗量数值密切相关外,也受到碳排放因子的影响。具体碳排放因子取值见表 3。

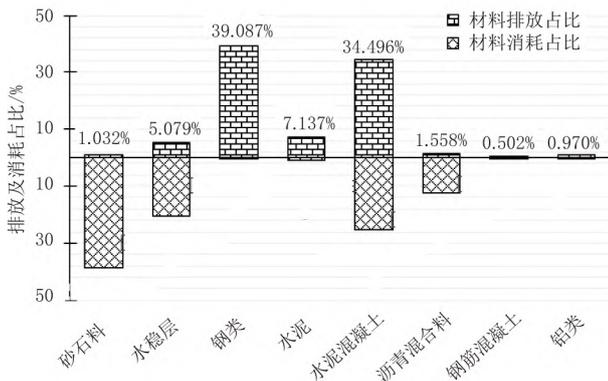


图2 材料消耗及碳排放

表3 典型材料碳排放因子取值集合

材料类别	碳排放因子主要取值集合/(kgCO <sub>2</sub> ·t)
砂石料	{2.43}
水稳层	{34.83}
钢类	{3551, 3589, 4339}
水泥	{677.68, 920.03, 1041.56}
水泥混凝土	{116.9, 129.41, 171.37}

综合上述典型材料排放因子取值集合及材料消耗量可知,同等消耗下,在碳排放量级上:钢类>水泥>水泥混凝土>水稳层>砂石料。其余未提及材料排放特征与几种典型材料均可对应,此处不再赘述。

### (3) 机械部分总体特征

根据排放量和台班消耗量,对工程内所用机械和运输设备分别进行归类、台班能耗查询及排序工作,最终得到累计占机械部分总排放量和总消耗量前90%的机械类别见表4。

由图3可直观看出,机械设备产生的排放与台班量基本呈正比关系,其中履带式液压岩石破碎机是台班使用量及排放最大的机械,分别占到了17.57%和36.21%;台班消耗量略低于履带式液压岩石破碎机的电动夯实机和风动凿岩机,排放量不显著,与整体的正比关系有较大出入。

机械碳排放量大小不仅与台班量有关,也与能源消耗量及排放因子有关,具体排放系数见表5。

综合上述平均台班排放系数的计算结果,可观察到此类机械多使用电能或无台班耗能而不是柴油等化石能源,因此即使在消耗同等甚至更多台班数量下排放量也远低于其他如履带式推土机等类型机械。

## 3 敏感性分析

通过开展碳排放的测算研究可识别城市道路建设阶段的关键碳排放源,并采取相应的减排措施来

表4 机械分类排放

规格分类	总台班量	总碳排放/kg
履带式液压岩石破碎机	32 452.78	7 398 859.98
电动夯实机	28 642.33	272 012.198
风动凿岩机	16 404.44	—
钢轮压路机	15 126.11	3 050 528.67
自卸汽车	14 992.35	2 481 169.48
交流弧焊机	10 291.85	554 087.16
电动空气压缩机	7 395.15	1 553 785.80
履带式液压挖掘机	6 626.8	1 466 467.75
锥形螺纹车	4 335.66	22 919.18
钢筋弯曲机	4 205.1	142 623.88
汽车式起重机	3 113.72	346 906.04
洒水车	3 103.88	328 152.76
直流弧焊机	2 759.64	147 525.29
木工圆锯机	2 746.02	37 680.34
轴流风机	2 407.5	222 163.45
履带式推土机	2 306.18	584 894.02
载重汽车	2 233.09	240 015.41
木工刨床	1 980.83	12 588.85
其他	23 617.95	1 568 086.15
总计	184 741.38	20 430 466.44

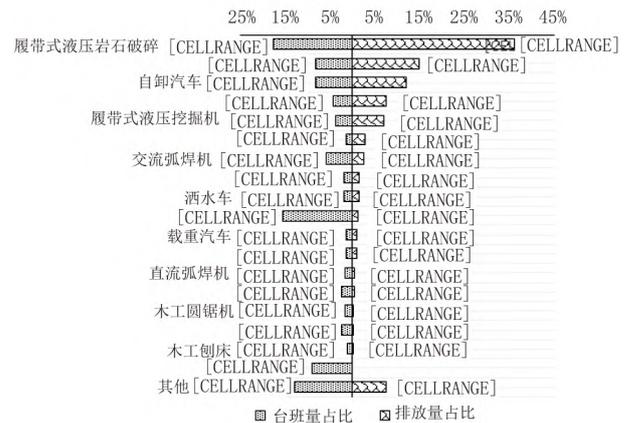


图3 机械碳排放量及台班量占比

表5 典型机械设备能源及台班排放系数

机械类别	能源类型	能源排放因子 (kgCO <sub>2</sub> /kg 或 kg CO <sub>2</sub> /kWh)	平均台班能源消耗 (kg/台班或 kWh/台班)	平均台班碳排放系数 (kgCO <sub>2</sub> /台班)
履带式推土机	柴油	3.67	84.35	309.57
风动凿岩机	—	—	—	—
交流弧焊机	电能	0.572 1	78.4	44.85
电动夯实机	电能	0.572 1	16.6	9.5

减少总体碳排放量。城市道路建设活动涉及相对较多的建筑材料、工程机械以及施工过程,因此影响碳排放的因素也相对繁杂。通过敏感性分析识别道路

建设碳排放源对建设绿色生态型道路具有十分重要的意义。

筑路材料的碳排因子、相关机具的施工效率及工程量是影响道路建设阶段碳排放量的关键参数。本研究从上述角度开展城市道路碳排放的敏感性分析,具体规律如图4所示。

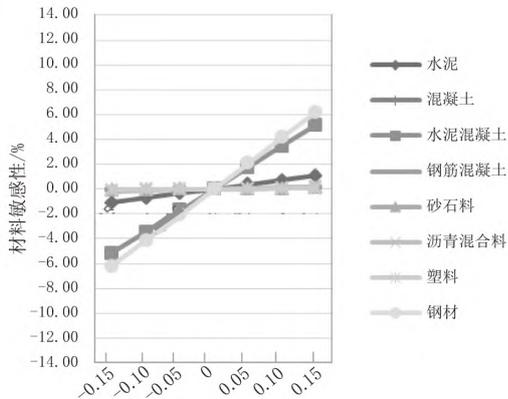


图4 材料敏感性分析

从图4可以看出,城市道路建设阶段碳排放的三大主要影响因素分别为钢材、水泥混凝土及水泥。其中,水泥混凝土二氧化碳排放因子每增加15%,约增长5.18%左右的碳排放量;钢材的碳排放因子每增加15%,约增长6.22%的碳排放量。与水泥混凝土和钢材相比,水泥的二氧化碳排放因子每增长15%所带来的道路建设阶段碳排放量变化幅度在1.09%左右。相对于这三种建设材料,其他建设材料碳排放因子每变化15%变化所引起的碳排放量的变化约维持在0.07%至0.19%之间,影响相对较低。

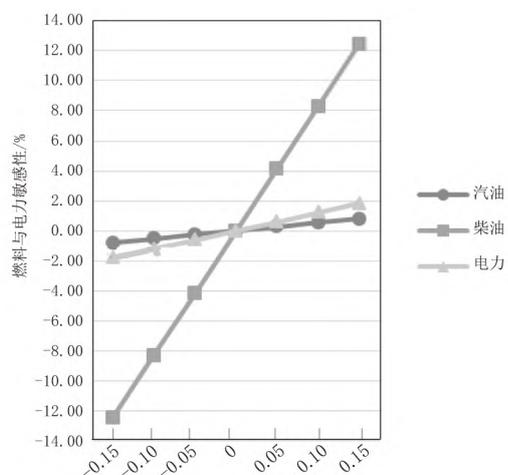


图5 燃料与电力敏感性分析

从图5可以看出,相比于其他燃料,柴油碳排放因子的变化对碳排放量的影响最为显著,柴油碳排放因子每增加15%,约增长12.47%的碳排放量,电

力二氧化碳排放因子每增长15%,增加1.81%的碳排放量。相比柴油和电力,汽油的二氧化碳排放因子每增加15%,所带来的道路建设阶段碳排放量的变化最小,不超过0.8%。因此,柴油的碳排放因子最为敏感。

## 4 结语

作为交通基础设施工程投资和建设主体,道路低碳发展是落实交通强国战略的排头兵,开展碳排放量测算与敏感性分析,对交通运输行业碳减排具有重要意义。

本研究以广阳大道项目为依托,基于全生命周期评价法,对广阳大道碳排放测算结果进行量化分析,识别影响碳排放的关键要素。分析结果表明城市道路建设阶段的碳排放量对钢材、水泥和柴油的碳排放因子最为敏感。这意味着低碳化的钢铁、水泥及柴油生产与使用对于控制城市道路建设阶段的碳排放量具有十分重要的意义。一方面钢材、水泥和柴油为道路建设过程中的主要碳排放源,寻找合适且有效的相替代的新材料及新工艺对城市道路建设过程中的降碳减排具有十分重要的作用。另一方面钢材、水泥和柴油作为碳排放测算过程中最为敏感的因素,其数据的准确性对道路建设项目碳排放的核算结果尤为重要,而敏感性相对较低的塑料、汽油等数据的准确性对实际的测算结果不会产生较大偏差。

### 参考文献:

- [1] 刘圆圆. 基于ALCA的公路生命周期二氧化碳计量理论与方法研究[D]. 西安:长安大学, 2019.
- [2] 毛睿昌. 基于LCA的城市交通基础设施环境影响分析研究[D]. 深圳:深圳大学, 2017.
- [3] 彭波, 何娟, 蔡春丽, 等. 沥青面层施工碳排放量化评价方法及其应用[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(11): 102-109.
- [4] 张海涛, 孟良, 吕丽华. 基于LCA的沥青路面设计参数对碳排放的影响[J]. 公路交通科技, 2018, 35(2): 1-7.
- [5] 徐金俊, 乌忱昊, 王浩, 等. 再生混凝土绿色建筑碳排放评价及灰色参数敏感性分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(3): 396-403.
- [6] Liu Yuanyuan, Wang Yuanqing, Lyu Pu, et al. Rethinking the carbon dioxide emissions of road sector: Integrating advanced vehicle technologies and construction supply chains mitigation options under decarbonization plans [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 321(10): 128769-128779.
- [7] 张兴宇, 朱晓东, 左贵强, 等. 基于LCA的沥青路面施工期碳排放模型及特征研究[J]. 城市道桥与防洪, 2023(1): 13-17.

in other industries or fields.

**Keywords:** carbon neutrality; zero emissions; carbon sink; carbon capture

Research on Carbon Emission Calculation and Carbon Reduction Technology in OGFC Production Process .....

..... LING Hongwei, ZHENG Xiaoguang, YAN Guojie, LU Wenliang ( 19 )

**Abstract:** Aimed at reducing the carbon emission in the process of design, production, construction and maintenance of asphalt concrete pavement, the carbon emission calculation method of OGFC asphalt mixture in the production process including raw material preparation, raw material transportation to the production base and mixing stage of the mixture is studied. The production process of OGFC asphalt mixture for drainage asphalt pavement is divided into two stages of material preparation and mixture production and mixing. Based on the mix design, material preparation scheme, production process, etc. of the mixture, the carbon emissions of each stage within the system boundary are calculated by using the emission factor method. According to the proportion of carbon emissions in each sub item, the appropriate carbon emission reduction measures are analyzed and proposed. Taking Shanghai Pudong New District High-class Road Jinhai Road Reconstruction Project as an example, the practical application of the carbon emission calculation method and carbon emission reduction technology proposed in this study is analyzed. The results show that the carbon emission reduction effect is remarkable.

**Keywords:** OGFC; carbon emissions; carbon reduction; emission factor method; computational formula

Calculation on Carbon Emission and Analysis on Sensitivity of Urban Road Based on LCA .....

..... NIU Kai, ZUO Guiqiang, ZHANG Xingyu, ZHU Xiaodong ( 23 )

**Abstract:** The calculation and analysis of urban road carbon emissions is a key measure to serve the "double carbon" goal and promote the sustainable development of transportation. Based on the Ecological Restoration and Quality Improvement Project of Guangyang Avenue in Chongqing, a carbon emission calculation model of urban road in construction stage is built based on the full life circle evaluation method. According to the calculation result of the model, the sensitivity analysis of key input parameters of carbon emission of newly built urban roads is carried out. The main influencing factors of carbon emission are identified from the perspectives of construction materials, construction machinery fuel and electricity, which provide the theoretical and technical support for the proposal of carbon emission reduction strategies and contributed to the green development of road construction from the design and construction process.

**Keywords:** full life cycle; carbon emission; urban road; sensitivity

Calculation and Analysis of Carbon Emissions from Urban Roads .....

..... YU Xifan ( 27 )

**Abstract:** Based on the evaluation method of the full life cycle of urban roads, the principles and ideas for calculating the carbon emissions of urban roads and supporting facilities are proposed. The calculation model of carbon emission of urban roads and supporting engineering in three stages of "construction stage, operation stage and demolition stage is built. Through the classified statistic of the energy consumption and carbon emission factors in the different stages, the carbon emission and carbon sink of the full life cycle of urban roads are quantitatively analyzed. Through the practical examples, the basic steps of the proposed carbon emission calculation model in carbon peaking and carbon neutrality analysis and the data needed to be collected are discussed in order to provide the technical reference for the subsequent urban roads and other municipal infrastructure construction projects to participate in carbon emission trading, carbon footprint and other works.

**Keywords:** urban roads; full life circle; carbon emission; carbon emission factor

Research on Carbon Emission Reduction Calculation and Characteristic Law of Tianjin-Shijiazhuang Expressway

..... HE Jia, ZHU Xiaodong, ZHANG Xingyu, CHEN Yonghao ( 30 )

**Abstract:** Based on the new situation of the development of dual-carbon goal, the focus is on research of the