

黄山倩, 黄学文, 高硕晗, 等. 基于LCA的高速公路建设全过程碳排放核算[J]. 交通运输研究, 2022, 8(6): 72-80.

HUANG S Q, HUANG X W, GAO S H, et al. Carbon emission calculation of whole expressway construction phase based on LCA theory[J]. Transport Research, 2022, 8(6): 72-80.

DOI: 10.16503/j.cnki.2095-9931.2022.06.008

# 基于LCA的高速公路建设全过程碳排放核算

黄山倩<sup>1</sup>, 黄学文<sup>2</sup>, 高硕晗<sup>1</sup>, 卢春颖<sup>1</sup>, 车承志<sup>2</sup>, 孔亚平<sup>1</sup>

(1. 交通运输部科学研究院, 北京 100029; 2. 安徽省交通控股集团有限公司, 安徽 合肥 230088)

**摘要:** 为加强高速公路建设碳核算, 给“双碳”背景下公路建设行业的碳减排提供理论支撑, 采用基于排放清单的过程生命周期评价分析方法, 探究高速公路建设全过程的碳排放特征, 明确核算系统边界和分析流程, 提出碳排放量核算模型和碳排放强度指数, 并选择新建高速公路典型路段进行碳排放量核算。研究结果显示, 该典型路段建设全过程碳排放总量和碳排放强度分别是146.8万 tCO<sub>2</sub>e、1.63万 tCO<sub>2</sub>e/km, 碳排放总量中88.6%集中在材料生产阶段, 道路施工阶段和材料运输阶段分别占7.9%、3.5%。在所有单位工程中, 超过90%的碳排放量来源于交叉工程、路基工程和桥涵工程, 其中交叉工程产生的碳排放量最高, 桥涵工程的碳排放强度最高。此外, 筑路材料碳排放主要来源为钢材、水泥和生石灰等, 运输或施工机械碳排放主要来源为自卸车、推土机、拌和机。因此, 在高速公路建设时需重点关注上述筑路材料和施工机械的节能减排技术措施, 以获得最大的节能降碳效益。

**关键词:** 碳排放核算; 公路建设; 高速公路; 新建工程; 生命周期评价

中图分类号: U411

文献标识码: A

文章编号: 2095-9931(2022)06-0072-09

## Carbon Emission Calculation of Whole Expressway Construction Phase Based on LCA Theory

HUANG Shan-qian<sup>1</sup>, HUANG Xue-wen<sup>2</sup>, GAO Shuo-han<sup>1</sup>, LU Chun-ying<sup>1</sup>,  
CHE Cheng-zhi<sup>2</sup>, KONG Ya-ping<sup>1</sup>

(1. China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100092, China;

2. Anhui Transportation Holding Group Co., Ltd., Hefei 230088, China)

**Abstract:** In order to strengthen the carbon calculation of expressway construction and provide theoretical basis for carbon emission reduction in the road construction industry under the background of "carbon peaking and carbon neutrality", this study proposed a carbon emission calculation model and carbon emis-

收稿日期: 2022-09-13

基金项目: 交通运输行业重点科技项目(2021-MS5-131); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(20190613); 安徽省交通控股集团科技项目(JKKJ-2020-06)

第一作者: 黄山倩(1990—), 女, 江西九江人, 博士, 助理研究员, 研究方向为交通环境保护。

E-mail: huangsq@motcats.ac.cn

通讯作者: 孔亚平(1976—), 女, 山东金乡人, 硕士, 研究员, 研究方向为绿色低碳交通发展。

E-mail: ypkong@163.com

sion intensity index via adopting the process life cycle analysis method based on emission inventory, exploring the carbon emission characteristics of the whole process of expressway construction, and clarifying the boundary of calculation system and analysis process. The typical section of newly-built expressway was selected for carbon emission calculation. The research results showed that the total carbon emission and carbon emission intensity of this typical road section in the whole process of highway construction were 1.468 million tCO<sub>2</sub>e and 16 300tCO<sub>2</sub>e/km, 88.6% of the total carbon emission was concentrated in the material production stage, while the road construction stage and material transportation stage accounted for 7.9% and 3.5% respectively. Among all the unit projects, more than 90% of the carbon emissions came from the intersection project, subgrade project, and bridge and culvert project, among which the intersection project generated the highest carbon emissions while the bridge and culvert project had the highest carbon emission intensity. In addition, carbon emissions from road construction materials mainly came from steel, cement and quicklime, while carbon emissions from construction transportation or machinery mainly came from dump trucks, bulldozers, mixers. In order to obtain the maximum energy-saving and carbon-reducing benefits, it is necessary to focus on the energy-saving and emission-reduction technical measures of above-mentioned road construction materials and machinery during the expressway construction process.

**Key words:** carbon emission calculation; highway construction; expressway; newly built project; life cycle assessment

## 0 引言

人类活动产生的二氧化碳等温室气体排放造成全球气候变暖, 导致热浪、山火、洪涝等与极端天气有关的灾害频发, 引起国内外对碳排放问题的高度关注<sup>[1]</sup>。目前, 已有超过127个国家做出了碳中和承诺<sup>[2]</sup>, 我国也提出了“2030年碳达峰”与“2060年碳中和”的目标, 并发布了行动方案。碳排放的统计核算是推动相关工作的重要依据, 电力、钢铁、石化、建筑等重点行业均在加速编制或修订相关核算方法。我国公路建设规模已达全球第一, 公路建设过程会大量消耗能源、原材料以及相关成品或半成品, 有研究显示公路建设已成为交通行业温室气体排放的重要来源<sup>[3]</sup>, 其碳排放量不容小觑。但目前, 整个公路建设行业尚未形成统一的碳核算方法, 不能有效支撑行业绿色低碳转型, 因此亟需加强公路建设碳核算的相关研究。

目前, 国际上已建立基于生命周期评价理论(Life Cycle Assessment, LCA)的碳足迹核算标准、认证体系、管理制度体系, 公路领域在此基础上

研究形成了完整的公路生命周期评价理论框架和丰富的数据库, 可用于量化公路建设的二氧化碳排放<sup>[4-6]</sup>。公路LCA的研究范围涵盖产品原材料获取、材料或能源生产、产品制造和使用维护以及最终处置等环节<sup>[7]</sup>, 通过对公路项目全生命周期的输入、输出进行清单分析, 可从不同阶段对路基、路面、桥涵、隧道及附属工程等不同专业二氧化碳排放开展定量研究, 识别二氧化碳排放的主要环节和来源, 综合量化相关技术措施的节能减排效益和成本损益, 服务于公路基础设施建设的决策支持<sup>[8-9]</sup>。值得注意的是, 核算边界的划分、排放因子的选取等差异会显著影响碳核算结果和结论<sup>[4]</sup>, 而应用主流软件和数据库可减少相关误差<sup>[10]</sup>。现阶段国际上已研发了数款公路碳排放评价软件, 其中, 国际道路联盟研发的公路温室气体排放评价计算器CHANGER, 主要测算公路建设产生的温室气体排放; 美国研发的公路工程排放评价软件PE-2, 主要测算原材料生产、建设、养护施工阶段的温室气体排放; 加拿大研发的ATHENA, 主要测算材料生产、运输、资源循环利用、机械设备使用等活动对环境的影响

响<sup>[11]</sup>。此外，挪威公路管理局研发了公路碳核算软件 VegLCA，应用于公路项目的前期规划、项目决策、方案比选、设计、招投标、施工和运营维护等过程<sup>[9]</sup>。

国内公路 LCA 碳排放研究仍处于起步阶段，研究对象主要集中在路面、隧道、桥梁等单项工程的低碳工艺或材料比选，研究范围主要包括原材料生产、运输和现场施工等，主要分析不同设计参数对碳排放特征化结果的影响程度<sup>[12]</sup>，而针对整条高速公路基于 LCA 进行实例研究的相对较少。例如，针对国内不同等级公路混凝土路面、沥青混凝土路面碳排放的研究显示，两种路面结构的单位里程单车道公路建设二氧化碳排放量分别为 500t 和 1 250t<sup>[13]</sup>；对沥青路面施工过程碳排放的定量分析显示，集料加热和沥青加热占路面施工总能源消耗的 92%，沥青碾压和铺装是二氧化碳直接排放的主要施工环节<sup>[6]</sup>。虽然我国已形成了中国生命周期基础数据库 CLCD (Chinese Life Cycle Database) 和通用型生命周期评价软件 eBalance<sup>[14]</sup>，但其缺乏符合公路建设特征的相关模块和流程，无法直接用于公路建设项目中，已发布的公路碳核算相关软件以路面的建管养为主<sup>[11]</sup>。

总体而言，我国公路建设行业需加速构建标准化的碳核算体系框架，形成统一的核算方法和流程，以支撑碳减排技术研发与管理措施制定。鉴于此，本研究将从数据清单构建、排放因子选取、核算范围界定、核算边界划分、核算模型建立等方面提出标准化的核算流程，对典型公路项目建设全过程开展碳排放核算，获得具有可比性的、更接近实际排放的高速公路碳排放指标和统计数据，对重点环节进行来源解析，以期有效识别复杂公路建设系统中重点碳排放环节及其影响，为形成统一的公路建设碳排放核算体系框架、制定节能降碳措施提供理论支撑。

## 1 数据来源

### 1.1 工程数据清单

本研究所选路段为安徽省平原微丘区某沥青

混凝土路面双向四车道高速公路新建工程，路线总长 89.96km，其中路基长 83.58km，路基宽 26m，桥梁长 6.38km，共有 8 座互通立交，无隧道。

筑路材料、运输车辆和施工机械等各工程量数据主要来源于施工图设计文件、预算文件以及相关定额标准等，采用月度能耗调查表统计实际工程量进行数据标定。根据各单位工程施工工序的相关性进行归类，将各单位工程的核算范围及工程量归纳至表 1。

表 1 各单位工程的碳排放核算范围及工程量

单位工程	工程内容	工程量
临时工程	拌和站、安全设施、交通管制、临时便道或便桥等	全线/ 89.96km <sup>a</sup>
路基工程	土石方、防护排水、特殊路基处理、石灰改善土、挖除旧路面旧建筑物等	非全线/ 83.58km <sup>a</sup>
路面工程	垫层、面层、基层、底基层、路肩加固、路面排水等	全线/ 89.96km <sup>a</sup>
桥涵工程	基础、下部结构、上部结构、桥面铺装、桥面防水及排水、护栏、支座、伸缩缝、搭板以及圆管涵、盖板涵、箱涵等	非全线/ 6.38km <sup>a</sup>
交叉工程	车行天桥、通道、分离式或互通式立体交叉等	全线/ 193座 <sup>b</sup>
管线工程	收费、通信、监视监控、供电及照明等系统设施	全线/ 89.96km <sup>a</sup>
绿化工程	绿化带、声屏障、服务区污水处理设施等环保绿化设备	全线/ 89.96km <sup>a</sup>

注：<sup>a</sup>表示各单位工程的里程，<sup>b</sup>表示交叉工程的数量。

### 1.2 排放因子清单

本研究中碳排放量采用国际通用单位二氧化碳当量 (Carbon Dioxide Equivalent, CO<sub>2</sub>e)，包含甲烷、氧化亚氮等非二氧化碳温室气体排放量，以表征温室气体总排放量。通过调研 Ecoinvent、SimaPro、VegLCA、CLCD 数据库，以及相关标准和学术论文等，比选符合我国公路工程特点的主要碳排放因子，详见表 2。

表 2 主要碳排放因子及应用范围

材料类型	碳排放/kg	应用范围
大型钢材/t	4 339 <sup>[15]</sup>	型钢、钢箱梁及桥面板、模数式伸缩缝等
中小型钢材/t	3 589 <sup>[15]</sup>	钢带、钢板、钢管、钢模板等
线材/t	3 551 <sup>[15]</sup>	钢筋、钢绞线、钢纤、钢丝绳等

表2 (续)

材料类型	碳排放/kg	应用范围
铁/t	2 155 <sup>[16-17]</sup>	铸铁、铁件、镀锌铁件、铁钉、铁丝、铁皮、铝合金等
水泥 (P·I 52.5)/t	1 041.56 <sup>[18]</sup>	52.5级水泥
水泥 (P·O 42.5)/t	920.03 <sup>[18]</sup>	42.5级水泥
水泥 (P·S 32.5)/t	677.68 <sup>[18]</sup>	32.5级水泥
沥青/t	248 <sup>[16-17]</sup>	石油沥青、改性沥青等
乳化沥青/t	221 <sup>[19]</sup>	改性乳化沥青、乳化沥青等
矿粉/t	84.4 <sup>[14]</sup>	矿粉
粉煤灰/t	84 <sup>[14]</sup>	粉煤灰
电缆/m	4.49 <sup>b</sup>	光缆、尾纤、电缆、电线等
油漆/kg	3.6 <sup>[20]</sup>	油漆、防水涂料
砂石/m <sup>3</sup>	3.11 <sup>[16-17]</sup>	砂、黏土、石、石渣、碎石、玄武岩等
炸药/kg	2.65 <sup>b</sup>	硝酸炸药
塑料/kg	1.38 <sup>b</sup>	环氧树脂、聚丙烯纤维、PVC阻燃塑料管、塑料软管等
生石灰/kg	0.8 <sup>[14]</sup>	生石灰
砖/kg	0.14 <sup>[21]</sup>	青(红)砖
木材/kg	0.026 <sup>[14]</sup>	原木、板材、枕木等

表2 (续)

材料类型	碳排放/kg	应用范围
电/(kW·h)	0.723 <sup>a</sup>	电
柴油/kg	3.34 <sup>[17]</sup>	柴油
汽油/kg	2.93 <sup>[17]</sup>	汽油
燃料油/kg	3.27 <sup>[17]</sup>	燃料油
精煤/kg	2.39 <sup>[17]</sup>	精煤

注: <sup>[1]</sup>表示数据来源于参考文献, <sup>a</sup>表示数据来源于华东地区电网平均值, <sup>b</sup>表示数据来源于欧洲行业平均值。

## 2 碳排放核算方法

### 2.1 理论框架与核算边界

基于生命周期评价相关的国内外标准要求, 结合高速公路实际建设特征, 将高速公路建设期确定为从工程施工开始直至通车运营这一时间区间, 将建设全过程划分为材料生产、材料运输以及道路施工三个阶段。根据公路建设的工程构成、工程计价、施工特点确定各阶段的核算边界, 详见图1。

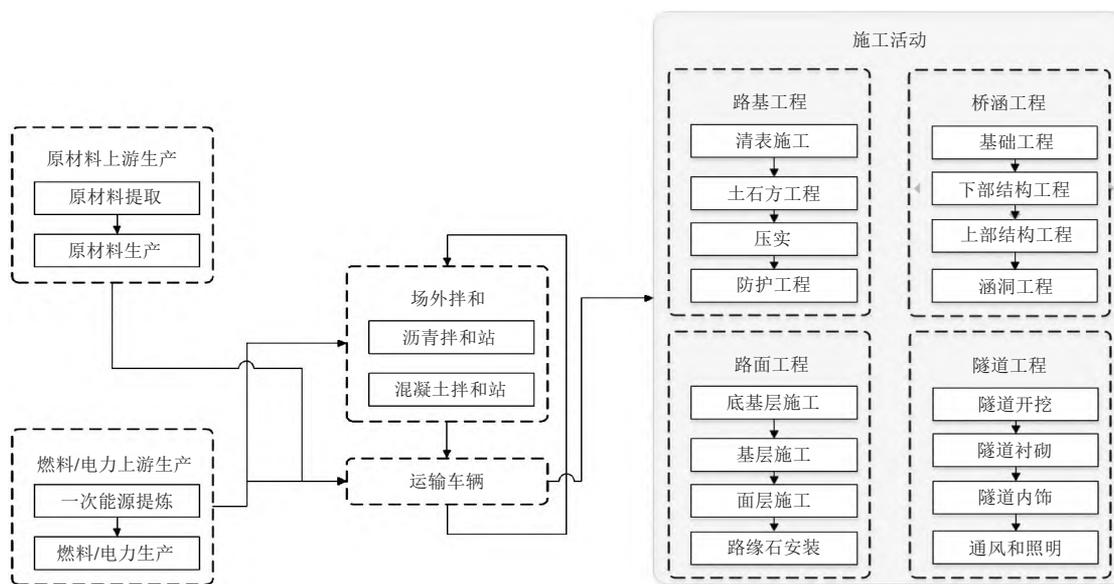


图1 高速公路建设过程碳排放核算范围

### 2.2 核算模型

由于公路建设过程中温室气体直接排放源为施工机械和运输车辆, 间接排放源为筑路材料,

本研究采用基于排放清单的过程生命周期评价分析方法<sup>[22]</sup>, 通过工程数据清单和主要碳排放因子计算各阶段各单位工程筑路材料和施工机械产生

的碳排放总量，建立基于生命周期评价的高速公路建设全过程碳排放核算模型。

高速公路建设全过程碳排放量  $E$  为材料生产阶段、材料运输阶段和道路施工阶段的筑路材料和施工机械的碳排放量总和，其计算公式<sup>[23-24]</sup>可表示为：

$$E = \sum_{i=1}^n Q_i F_i + \sum_{i=1}^n Q_i D_i f_i + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l T_j P_k^j f_k \quad (1)$$

式 (1) 中： $E$  为公路建设全过程的碳排放量 (tCO<sub>2</sub>e)； $i$  为筑路材料类型， $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ； $Q_i$  为第  $i$  种筑路材料的总消耗量 (t)； $F_i$  为第  $i$  种筑路材料生产过程的碳排放因子 (tCO<sub>2</sub>e/t)； $D_i$  为  $i$  种筑路材料平均运输距离 (km)； $f_i$  为单位重量的第  $i$  种筑路材料单位运输距离产生的碳排放因子 (tCO<sub>2</sub>e/(t·km))； $j$  为施工机械类型， $j = 1, 2, 3, \dots, m$ ； $k$  为能源类型， $k = 1, 2, 3, \dots, l$ ； $T_j$  为使用第  $j$  种施工机具耗费的工作时间总和 (h)； $P_k^j$  为单位工作时间内第  $j$  种施工机具使用第  $k$  种能源的消耗量 (t)； $f_k$  为第  $k$  种能源产生的碳排放因子 (tCO<sub>2</sub>e/(t·h))。

### 2.3 公路建设碳排放强度

由于公路项目里程长、施工工序复杂、影响因素众多，碳排放总量无法反映重点耗能单元的排放特征，且工程管理中通常采用里程作为进度

指标，因此为评估各耗能单元的碳排放水平，提出公路建设碳排放强度 ED，其计算公式为：

$$ED = \frac{E}{D} \quad (2)$$

式 (2) 中： $E$  的含义同前； $D$  为与核算范围对应的公路里程 (km)；ED 为单位里程高速公路建设全过程产生的碳排放量，即每公里碳排放量 (tCO<sub>2</sub>e/km)，除以车道数或路基宽度可以直接转化为单位车道里程或单位面积里程碳排放量等指标，可与其他项目进行比较。

## 3 高速公路各建设阶段碳排放数据统计

### 3.1 材料生产阶段

材料生产阶段碳排放主要包含公路建设所使用的筑路材料从原材料提取、生产、加工到运离生产厂等整个物化过程的全部碳排放。

经统计计算，本研究所选取的典型路段建设过程的主要材料及其消耗量分别为砂石 505 万 m<sup>3</sup>、水泥 47.8 万 t、生石灰 34.7 万 t、钢材 22.9 万 t、沥青 4.7 万 t、矿粉 4.8 万 t。其中，建设过程使用钢材而产生的碳排放量为 37.8 万 tCO<sub>2</sub>e，水泥为 33.6 万 tCO<sub>2</sub>e，生石灰为 27.8 万 tCO<sub>2</sub>e，砂石为 1.51 万 tCO<sub>2</sub>e，如图 2 所示。

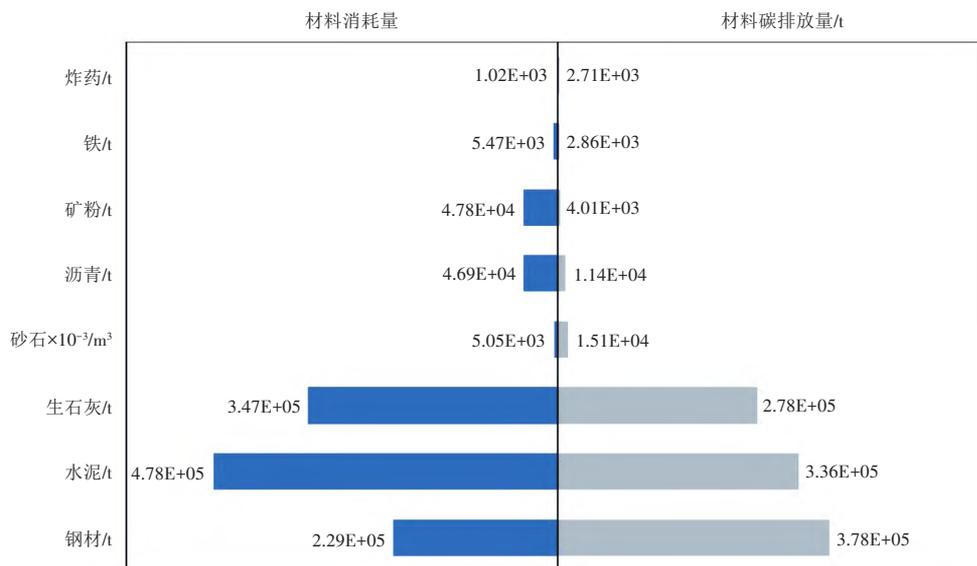


图2 典型路段材料生产阶段主要材料消耗量和碳排放量

### 3.2 材料运输阶段

材料运输阶段碳排放主要包含筑路材料运输到场外场站进行二次加工, 加工后运至施工现场, 以及场内运输车辆的全部碳排放。

本研究路段材料运输车辆主要包括各种载重的载货汽车和自卸汽车, 共使用23.2万台班, 产生的碳排放总量为5.12万tCO<sub>2</sub>e, 统计结果见表3。其中, 自卸汽车碳排放量占比为96.3%, 15t以内自卸汽车占比为95.3%。

表3 典型路段材料运输车辆台班数和碳排放量

运输车辆类型	台班数	碳排放量/tCO <sub>2</sub> e
15t以内自卸汽车	215 193	48 794.42
10t以内载货汽车	8 040	1 339.61
5t以内自卸汽车	4 684	483.86
5t以内载货汽车	3 543	312.53
20t以内载货汽车	674	182.66
15t以内载货汽车	310	63.9



### 3.3 道路施工阶段

道路施工阶段碳排放主要包含场外场站和施工现场的机械设备运行过程的碳排放, 其中场外场站的碳排放主要指场外拌和站、加工厂、预制厂等机械设备运转过程中产生的碳排放。

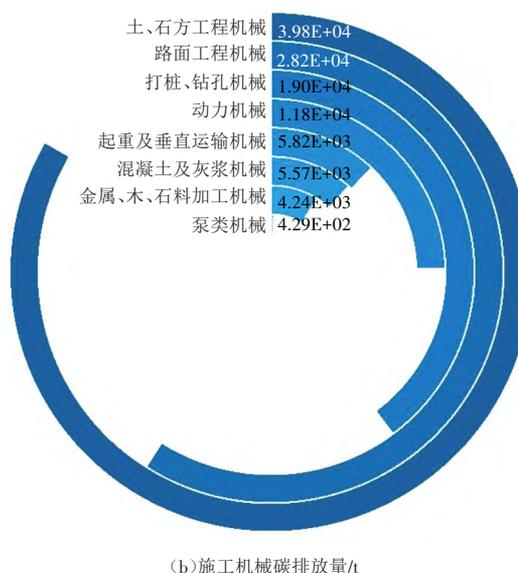
本研究路段道路施工阶段产生碳排放的主要施工机械类型、数量及碳排放量为:

(1) 土、石方工程机械, 主要包括推土机、挖掘机、装载机、平地机、光轮压路机、强夯机械等, 共使用20.2万台班, 共产生3.98万tCO<sub>2</sub>e;

(2) 路面工程机械, 主要包括拌和机、拌和设备、摊铺机、沥青洒布车、铺筑机、压路机等, 共使用2.25万台班, 共产生2.82万tCO<sub>2</sub>e;

(3) 打桩、钻孔机械, 主要包括冲击钻机、泥浆搅拌机、回旋钻机、振动打拔桩锤等, 共使用5.4万台班, 共产生1.9万tCO<sub>2</sub>e。

所有施工机械分项碳排放量统计详见图3。



(a) 施工机械台班数

(b) 施工机械碳排放量/t

图3 典型路段道路施工阶段施工机械台班数和碳排放量

## 4 高速公路建设全过程碳排放统计结果与分析

### 4.1 碳排放统计结果

对本研究典型高速公路各建设阶段各单位工程的碳排放量和碳排放强度进行分类统计, 结果如表4所示。经计算, 本研究路段建设全过程的

碳排放总量和碳排放强度分别是146.8万tCO<sub>2</sub>e, 1.63万tCO<sub>2</sub>e/km。其中材料生产阶段碳排放量和强度最高, 分别是130.2万tCO<sub>2</sub>e (约占总量的88.6%), 1.45万tCO<sub>2</sub>e/km; 道路施工阶段次之, 分别是11.6万tCO<sub>2</sub>e (约占总量的7.9%), 1 285.78tCO<sub>2</sub>e/km; 材料运输阶段最低, 分别是5.1万tCO<sub>2</sub>e (约占总量的3.5%), 568.89tCO<sub>2</sub>e/km。

表4 典型路段各单位工程各阶段碳排放量和碳排放强度统计

单位工程	材料生产阶段		材料运输阶段		道路施工阶段	
	碳排放量 /tCO <sub>2</sub> e	碳排放强度 /(tCO <sub>2</sub> e·km <sup>-1</sup> )	碳排放量 /tCO <sub>2</sub> e	碳排放强度 /(tCO <sub>2</sub> e·km <sup>-1</sup> )	碳排放量 /tCO <sub>2</sub> e	碳排放强度 /(tCO <sub>2</sub> e·km <sup>-1</sup> )
交叉工程	471 993.30	5 246.70	10 769.79	119.72	37 166.08	413.14
路基工程	391 518.35	4 684.35	33 859.10	405.11	35 818.21	428.55
桥涵工程	323 949.39	50 775.77	562.61	88.18	18 755.14	2 939.68
管线工程	69 839.40	776.34	2 642.81	29.38	4 152.20	46.16
路面工程	30 464.42	338.64	3 282.39	36.49	18 599.38	206.75
临时工程	13 681.07	152.08	24.32	0.27	1 000.44	11.12
绿化工程	352.39	3.92	36.49	0.41	177.74	1.98

在整个建设过程中，各单位工程碳排放强度由高至低依次是桥涵工程>交叉工程>路基工程>管线工程>路面工程>临时工程>绿化工程。交叉工程产生的碳排放总量最高，为51.9万tCO<sub>2</sub>e（约占研究路段碳排放总量的35.4%），其次为路基工程，

共产生46.1万tCO<sub>2</sub>e（约占研究路段碳排放总量的31.4%），桥涵工程产生34.3万tCO<sub>2</sub>e（约占研究路段碳排放总量的23.3%）且碳排放强度最高。各阶段各单位工程碳排放量占比和碳排放强度占比如图4所示（仅标示了部分比值较大者的具体数据）。

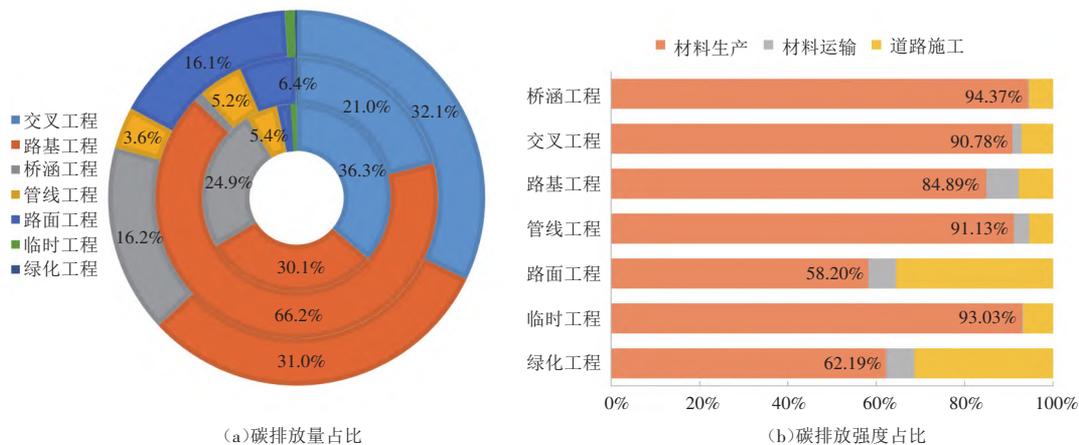


图4 各阶段各单位工程碳排放量占比和碳排放强度占比

注：碳排放量占比中，最外环表示道路施工阶段，中间环为材料运输阶段，最内环为材料生产阶段。

#### 4.2 重点环节分析与建议

从不同阶段来看，材料生产阶段产生的碳排放量最大<sup>[25-26]</sup>，并且减排潜力也最大<sup>[3]</sup>，本阶段碳排放主要来源为钢材、水泥和生石灰。而其他阶段产生的碳排放仅占总量的11.4%，其中，施工机械碳排放主要来源为土石方工程机械及路面工程机械，运输车辆碳排放主要来源为15t以下的自卸汽车。因此，在平原微丘区公路建设的节能降耗管理中，需重点关注上述筑路材料和施工机械的节能减排技术措施，在确保工程质量与安全

的基础上，通过招标选择碳排放量更低的筑路材料或替代材料，采用清洁能源装备和车辆，实施低碳施工组织管理，以获得最大的节能降碳效益。

从建设全过程来看，平原微丘区典型路段的碳排放有超过90%来源于交叉工程、路基工程和桥涵工程，其中，桥涵工程的碳排放强度最高。本研究针对以上重点单位工程进行碳排放组成特征分析，并提出相关节能减排技术措施建议，具体如下。

### (1) 桥涵工程

研究路段共有特大桥2座、大桥8座、中小桥11座,其中主桥、引桥主要采用钢箱组合梁,钢材、水泥等高耗能材料消耗量大。特大桥梁建设是影响道路建设活动碳排放的主要因素<sup>[27]</sup>,但桥梁仅占本研究工程总里程的8.4%,综合导致了桥涵工程碳排放强度远高于其他单位工程。因此,桥涵工程是重点控制单元,需重点关注桥梁构件、钢材、水泥等生产或加工工序,节能减排建议为:采用热轧型材等高性能与高效能结构材料,优先选用具备低碳环保工艺的原材料供应商;采用BIM+LCA技术进行规划设计<sup>[28]</sup>,指导标准化构件的设计、制造、安装等环节实现低碳建造;对高耗能预制构件(如钢箱梁、钢板组合梁等)进行集中绿色采购,优先选用运输距离短、低碳技术等级高的工厂进行生产。

### (2) 交叉工程

研究路段位于平原微丘区,沿线主要城镇交叉道路较多,且大多数是高等级公路,需采用枢纽互通、主线上跨等方式进行交叉,净高较高,需要大量填方;路段共涉及8处互通立交、21座分离立交桥等193处交叉工程,施工内容包含桥梁、路基、路面等工程,在土建标工程量中占比最大,使用的高耗能材料和大功率机械高于其他单位工程,从而导致产生的碳排放总量最高。因此,交叉工程在设计和施工过程中都应加强低碳管控措施的应用<sup>[23]</sup>,采用BIM+LCA技术从源头进行低碳优化设计<sup>[29]</sup>,在施工组织、机械设备和材料供应等方案比选过程中应采取节能降碳组合技术和措施进行综合控制。

### (3) 路基工程

路基工程中水泥、钢筋等材料消耗相对较少,但由于研究路段全线总体缺方,需采用挖方、借方等方式取土填筑路基,主要使用自卸汽车进行土石方调配,运输约11.09万m<sup>3</sup>砂石,而土石方的开挖和运输采用的设备主要消耗柴油、较少使用电力驱动,导致相关工程机械产生较高的能耗<sup>[30]</sup>,从而导致路基工程在材料运输和施工阶段碳排放量较大。因此,针对路基工程的节能

减排建议为:优先选用新能源车辆或装备进行作业;减少运输距离,采用低碳施工组织方案进行灵活调配以提高运输效率;在水土保持方案论证的基础上,合理规划取土场和弃土场的位置,充分利用废弃旧路、便道和临建场地,缩短与主要填方路段的平均运输距离。

## 5 结语

生命周期评价理论可为公路建设碳排放核算提供科学的分析框架,本研究在此基础上明确了公路建设项目碳排放数据来源,细化了核算系统边界和工程内容,建立了符合我国公路建设特征的碳排放核算模型,通过实例应用开展了典型路段各阶段各单位工程的碳排放量和碳排放强度测算,并对重点排放环节进行来源解析,辨识了平原微丘区典型公路建设的碳排放特征,提出了有针对性的节能减排技术措施建议,形成的标准化流程可为其他公路工程项目碳排放核算分析提供参考依据。随着上下游行业节能减排工作的深入开展,公路建设行业迫切需要完善公路基础设施碳核算体系,建议未来研发可推广的公路工程碳排放数据库和软件,进一步掌握碳排放底数和特征规律,指导在建或新建公路项目在设计、施工等阶段进行碳排放量控制。

## 参考文献

- [1] MORA C, MCKENZIE T, GAW I, et al. Over half of known human pathogenic diseases can be aggravated by climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2022, 12: 869-875.
- [2] 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.
- [3] LIU Q, WANG Z, ZHANG N, et al. Characterizing the impacts of highway pavement in a newly planned greater bay area economic belt in China[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2022, 26(6): 1285-1297.
- [4] LENDRA, WIBOWO M A, HATMOKO J U D.

- Life cycle assessment (LCA) on road infrastructure projects: A systematic mapping study[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 832(1): 1-12.
- [5] YU B, WANG S, GU X Y. Estimation and uncertainty analysis of energy consumption and CO<sub>2</sub> emission of asphalt pavement maintenance[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 189: 326-333.
- [6] PENG B, TONG X Y, CAO S J, et al. Carbon emission calculation method and low-carbon technology for use in expressway construction[J]. Sustainability, 2020, 12(8): 1-18.
- [7] ESPINOZA M, CAMPOS N, YANG R, et al. Carbon footprint estimation in road construction: La Abundancia-Florencia case study[J]. Sustainability, 2019, 11(8): 1-13.
- [8] LÜ T, GAO S H, HONG W P, et al. Application of LCA in expressway energy consumption analysis in South China[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 199(3): 032038.
- [9] 何青, 李晔, 张鑫. 道路系统全生命周期碳排放量化分析框架——基于国际标准[J]. 城市交通, 2022, 20(1): 102-109, 43.
- [10] HOXHA E, VIGNISDOTTIR R, PASSER A, et al. Life cycle assessment (LCA) to evaluate the environmental impacts of urban roads: A literature review[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 588: 1-8.
- [11] 李慧, 彭夏清, 张静晓. 公路生命周期碳排放评估及其敏感性分析[J]. 公路工程, 2021, 46(2): 132-138.
- [12] 张金喜, 苏词, 王超, 等. 道路基础设施建设中的节能减排问题及技术综述[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(3): 243-260.
- [13] LIU Y Y, WANG Y Q, LI D. Estimation and uncertainty analysis on carbon dioxide emissions from construction phase of real highway projects in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 144: 337-346.
- [14] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型[J]. 环境科学学报, 2010, 30(10): 2136-2144.
- [15] 龚志起, 张智慧. 建筑材料物化环境状况的定量评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004(9): 1209-1213.
- [16] 罗智星, 杨柳, 刘加平, 等. 建筑材料CO<sub>2</sub>排放计算方法及其减排策略研究[J]. 建筑科学, 2011, 27(4): 1-8.
- [17] YAN H, SHEN Q, FAN L, et al. Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong[J]. Building and Environment, 2010, 45(4): 949-955.
- [18] 龚志起, 张智慧. 水泥生命周期中物化环境状况的研究[J]. 土木工程学报, 2004(5): 86-91.
- [19] 张红波, 陈海涛, 徐升, 等. 橡胶改性沥青混合料路面建设能耗与碳排放评价[J]. 公路工程, 2021, 46(3): 154-164.
- [20] 俞海勇, 曾杰, 赵敏. 典型装饰装修材料生命周期能耗和碳排放量[J]. 建筑科学, 2014, 30(4): 21-25.
- [21] CAI B F, LIANG S, ZHOU J, et al. China high resolution emission database(CHRED) with point emission sources, gridded emission data, and supplementary socioeconomic data[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 129: 232-239.
- [22] 王长波, 张力小, 庞明月. 生命周期评价方法研究综述: 兼论混合生命周期评价的发展与应用[J]. 自然资源学报, 2015, 30(7): 1232-1241.
- [23] LIU Y Y, WANG Y Q, LI D, et al. Identification of the potential for carbon dioxide emissions reduction from highway maintenance projects using life cycle assessment: A case in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 219: 743-752.
- [24] LIU Y Y, WANG Y Q, LI D, et al. Life cycle assessment for carbon dioxide emissions from freeway construction in mountainous area: Primary source, cut-off determination of system boundary[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 140: 36-44.

(下转第89页)

- 100-108.
- [9] LIU X, HANG Y, WANG Q, et al. Flying into the future: A scenario-based analysis of carbon emissions from China's civil aviation[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2020, 85: 101793.
- [10] 胡荣, 王德芸, 冯慧琳, 等. 碳达峰视角下的机场航空器碳排放预测[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2021, 21(6): 257-263.
- [11] 邵帅, 张曦, 赵兴荣. 中国制造业碳排放的经验分解与达峰路径——广义迪氏指数分解和动态情景分析[J]. *中国工业经济*, 2017(3): 44-63.
- [12] 刘笑. 中国民航部门碳排放驱动因素及减排路径研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [13] MOHAMMED H, HOLGER P, DIMITRI M. Probabilistic assessment of aviation CO<sub>2</sub> emission targets[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 63: 362-376.
- [14] 中国民用航空局. 2019年民航机场生产统计公报[EB/OL]. (2021-12-21)[2022-09-14]. [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202003/t20200309\\_201358.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202003/t20200309_201358.html).
- [15] ICAO. ICAO Aircraft Engine Emissions Databank[EB/OL]. (2021-07-20)[2022-09-14]. <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank#group-easa-downloads>.
- [16] OWEN B, LEE D S, LIM L. Flying into the future: Aviation emissions scenarios to 2050[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(7): 2255-2260.
- [17] 中国民用航空局. “十四五”民航绿色发展专项规划[EB/OL]. (2021-12-21)[2022-09-14]. [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/FZGH/202201/t20220127\\_211345.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/FZGH/202201/t20220127_211345.html).

(上接第80页)

- [25] 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.
- [26] WANG F S, XIE J, WU S P, et al. Life cycle energy consumption by roads and associated interpretative analysis of sustainable policies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 141: 1-14.
- [27] HERTWICH E. Increased carbon footprint of materials production driven by rise in investments[J]. *Nature Geoscience*, 2021, 14(3): 151-155.
- [28] LIU Y Y, WANG Y Q, AN D. Life-cycle CO<sub>2</sub> emissions and influential factors for asphalt highway construction and maintenance activities in China[J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2018, 12(7): 497-509.
- [29] COSTIN A, ADIBFAR A, HU H, et al. Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure: Literature review, applications, challenges, and recommendations[J]. *Automation in Construction*, 2018, 94: 257-281.
- [30] 陈学平, 李新海, 魏明惠, 等. 我国公路建设项目取、弃土场水土保持问题与对策[J]. *中国水土保持*, 2019(3): 4-8.