

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.01.007

# 津石高速公路碳减排测算与特征规律研究

何佳<sup>1</sup>,朱晓东<sup>1</sup>,张兴宇<sup>1</sup>,陈永昊<sup>1</sup>

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司,天津市 300202)

**摘要:**立足双碳目标发展新形势,重点聚焦绿色公路建设阶段碳排放测算研究,依托津石高速天津西段工程,通过构建碳排放测算模型,实现从多层级进行不同颗粒度的绿色公路建设碳排放量化计算,并对其排放特征进行分析,统计发现碳排放量较大的材料主要为水泥、钢类和生石灰,分别占到材料总碳排放的32.27%、41.09%和23.48%,总占比超95%;消耗量较大的材料主要为矿土料,占总消耗量比例超85%;回旋钻机及自卸汽车为排放最大的机械设备,分别占到总体排放的22.28%及19.84%,累计占比超过40%;消耗量最大的机械为电动卷扬机,消耗台班量占到总台班量的20.99%。

**关键词:**碳排放;测算模型;公路;绿色

**中图分类号:** U491

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2024)01-0030-05

## 0 引言

二氧化碳(CO<sub>2</sub>)是大气中最重要的人为温室气体,对全球总辐射强度的贡献达到63.5%,并且其辐射强度逐渐增强。中国作为迅速发展中的大国又是世界第一大碳排放国,在持续增长的经济条件下面临着大量能源需求,降低CO<sub>2</sub>已成为最紧迫的任务之一。

公路交通是我国交通运输的主体,也是我国最主要的交通碳排放来源。虽然近年来公路运输过程碳排放通过车辆技术改进和车用能源清洁化等方式得到改善,但是作为水泥、钢材、沥青等高耗能、高碳密度建筑材料和化石燃料驱动施工机械的重要消费端,公路建设活动的碳排放还未得到足够关注和有效控制。大规模的建设活动消耗巨量的水泥、钢铁、沥青等高耗能、高碳密度材料,使用大量的柴油驱动施工机械,所排放的二氧化碳不容忽视。尽管对公路建设制定了大量的标准和技术规程,但由于种种原因,业界对于公路建养活动的环境影响并没有清晰且统一的认识,结合碳排放理论评价公路新技术应用减排效果方面也鲜有研究。为顺应当前国家、天津市交通建设领域“双碳”行动要求,研究公路生命周期碳排放量化方法,摸清公路建设碳排放底数,从技术角度减少公路建养产生的碳排放、能源消耗成为

破解当前公路碳排放量大的重要途径。

## 1 研究区域概况

津石高速公路天津西段(编号为G0211)工程位于天津市静海区,道路整体呈东西走向。项目东起胡辛庄互通立交,与津石高速天津中段相接,西与津石高速公路河北段相接。建成后,不仅是南部港区通往石家庄及西部腹地的便捷通道,更是天津市连接滨海新区和京津冀地区的一条东西向通道,在加强天津市辐射带动能力的同时,可带动滨海新区以及静海区等区域经济快速发展,也是推进京津冀区域交通一体化的重要举措。

道路区位如图1所示,项目路线全长约12.508 km,双向6车道,设计速度120 km/h,路基总宽度34.5 m。断面布置为:0.75 m(土路肩)+3.0 m(硬路肩)+3×3.75 m(车行道)+0.75 m(左侧路缘带)+3.0 m(中央分隔带)+0.75 m(左侧路缘带)+3×3.75 m(车行道)+3.0 m(硬路肩)+0.75 m(土路肩)=34.5 m。



图1 道路区位图

全线设大桥4座(共1772.9 m),中桥5座(共369.3 m),互通式立交2座,通道4处,服务区1处,

收稿日期:2023-08-07

作者简介:何佳(1995—),女,硕士,工程师,从事道路交通设计及科研工作。

匝道收费站1处。

## 2 工程建设期碳排放核算

### 2.1 碳排放核算方法

公路建设期碳排放核算采用全寿命周期评价方法进行建模<sup>[1-3]</sup>。公路工程建设活动复杂多变,但由于公路工程各基础设施施工期间的时空组织较为规范,工序顺序也大体有迹可循。因此,本文通过分析公路建设活动碳排放要素,对公路建设阶段进行分部分项解构,再自下而上递推汇总,基于全寿命周期建模完成各分部分项碳排放测算,最终汇总得到公路项目建设阶段总体碳排放。该过程即为公路项目建设阶段结构化碳排放通用性测算模型构建过程<sup>[4-6]</sup>,如图2所示。

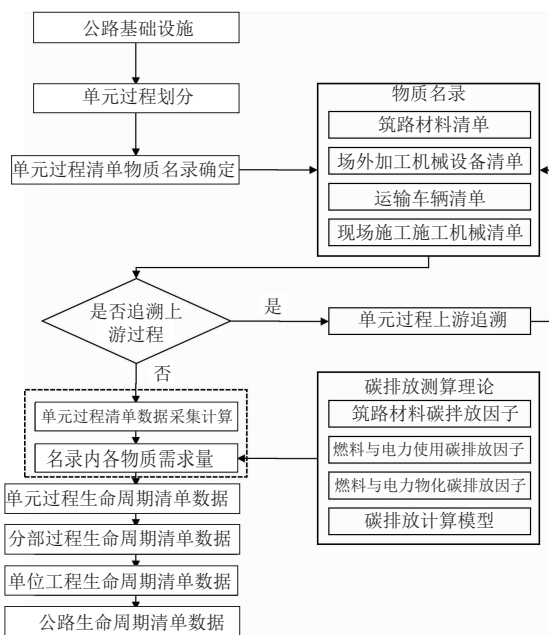


图2 公路工程建设阶段建模思路

### 2.2 公路建设阶段碳排放测算模型

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<sup>[7-8]</sup>,其计算公式可表示为:

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

式中: $E$  为公路建设全过程的碳排放量,  $tCO_2e$ ;  $i$  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,  $tCO_2e/t$ ;  $D_i$  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,  $tCO_2e/(t \cdot km)$ ;  $j$  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,  $h$ ;  $P_j^k$

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,  $tCO_2e/(t \cdot h)$ 。

### 2.3 公路建设阶段碳排放因子清单分析

为准确、合理地计算出由于能源和资源消耗所排放的二氧化碳量,综合公路建材生产、场外加工、运输以及现场施工四个公路生命周期过程,对各碳排放来源进行相关因素整合,将公路生命周期排放因子归纳为公路建材碳排放因子、运输过程碳排放因子、机械设备碳排放因子和能源碳排放因子<sup>[9-10]</sup>四类。

#### (1) 筑路材料碳排放因子

通过对已有数据库以及大量文献资料调研,同时充分考虑我国使用燃料的类型和成分、燃烧条件、技术设备发展状况等因素,提取来源、技术、年份和地理等数据代表性特征<sup>[4]</sup>,梳理形成了符合我国公路建设特征的筑路材料碳排放因子,并以此来表征单位数量建材的生产而产生的碳排放量,部分筑路材料的碳排放因子如表1所示。

表1 部分筑路材料的碳排放因子

材料类型	碳排放因子	单位
石油沥青	174.24	Kg/t
改性沥青	295.91	Kg/t
乳化沥青	221	Kg/t
生石灰	1180	Kg/t
水泥(P.O.42.5)	920.03	Kg/t
水泥(P.S.32.5)	677.68	Kg/t
水泥(P.I.52.5)	1 041.56	Kg/t
聚氯乙烯塑料	1.39	Kg/kg
青(红)砖	0.14	Kg/kg
矿粉	84.4	Kg/t

#### (2) 运输阶段碳排放因子清单分析

计算过程中从实际情况出发,以公路运输为主,针对其原材料运输方式,进行了碳排放因子的选取和特征化标定。本研究通过实地调研,统计了不同载重相同运距的耗能情况,得出85%的能源消耗状况符合计算设计的限值,与《重型商用车辆燃料消耗量限值》(GB 30510—2018)的耗量限值相比上下浮动范围合理(在受具体现场环境和施工情况影响的程度范围内),因此最终确定了各车型单公里耗能数据。根据不同车型的平均结果及相关文献的资料统计,不同运输方式的碳排放因子如表2所示。

#### (3) 机械设备碳排放因子清单

表2 不同运输方式的碳排放因子表

运输方式	碳排放因子 / [kgCO <sub>2</sub> ·(10 <sup>4</sup> t·km) <sup>-1</sup> ]	运输方式	碳排放因子 / [kgCO <sub>2</sub> ·(10 <sup>4</sup> t·km) <sup>-1</sup> ]
公路运输 (汽油)	2 004	航空运输	10 907
公路运输 (柴油)	1 983	水路运输	183
铁路运输	91.3		

计算各种施工机械的台班 CO<sub>2</sub> 排放系数,收集了公路工程项目中常用的施工机械工作表(以津石高速项目采用的类型为主),并基于《公路工程机械台班费用定额》(JTG/T 3833—2018)等资料对每台机械的单位台班能耗类型进行了调查,总结了多种设备机械及其对应的 CO<sub>2</sub> 排放系数,部分机械设备碳排放系数如表 3 所示。

表3 部分机械设备碳排放量

机械设备类型	能源类型	每台班能源消耗量(kg/台班或 kwh/台班)	台班碳排放系数 (kgCO <sub>2</sub> /台班)
75 kW 以内履带式推土机	柴油	54.97	201.74
135 kW 以内履带式推土机	柴油	98.06	359.88
0.6 m <sup>3</sup> 履带式单斗挖掘机	柴油	37.45	137.44
1.0 m <sup>3</sup> 履带式单斗挖掘机	柴油	74.91	274.92
2.0 m <sup>3</sup> 履带式单斗挖掘机	柴油	91.93	337.38
1.0 m <sup>3</sup> 轮胎式装载机	柴油	49.03	179.94
2.0 m <sup>3</sup> 轮胎式装载机	柴油	92.86	340.80
3.0 m <sup>3</sup> 轮胎式装载机	柴油	115.15	422.60
120 kW 以内平地机	柴油	82.13	301.42
6~8 t 光轮压路机	柴油	19.20	70.46
8~10 t 光轮压路机	柴油	23.20	85.14
12~15 t 光轮压路机	柴油	40.00	146.80
0.6 t 手扶式振动碾	柴油	3.20	11.74
10 t 以内振动压路机	柴油	59.20	217.26
夯击功 200~620 N·m	电能	17.34	12.34
机动液压喷播机	柴油	21.03	77.18

(4)能源碳排放因子清单分析

能源的生命周期碳排放主要包括能源上游阶段和能源使用阶段。能源上游阶段碳排放指能源开采、运输和加工等阶段产生的碳排放;能源使用阶段碳排放指机械设备和运输车辆在运行过程所消耗的汽油、柴油、重油等燃烧产生的碳排放。各类能源单位碳排放因子如表 4 所示。

3 津石高速碳排放数据分析

(1)项目排放总体特征

表4 各类能源单位碳排放因子表

能源种类	燃烧阶段 CO <sub>2</sub> 排放 / (Kg·单位 <sup>-1</sup> )	生产阶段 CO <sub>2</sub> 排放 / (Kg·单位 <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> 排放因子 / (Kg·单位 <sup>-1</sup> )
标煤 /Kg	2.83	0.06	2.89
原煤 /Kg	1.44	0.03	1.47
洗精煤 /Kg	2.29	0.06	2.35
焦炭 /Kg	2.74	0.20	2.94
原油 /Kg	3.00	0.21	3.21
汽油 /Kg	2.93	0.57	3.50
煤油 /Kg	3.02	0.24	3.26
柴油 /Kg	3.10	0.57	3.67
燃料油 /Kg	3.17	0.57	3.74
油田天然气 /m <sup>3</sup>	2.16	0.20	2.36
液化石油气 /Kg	3.10	0.68	3.78
焦炉煤气 /m <sup>3</sup>	0.67	0.12	0.79
炼厂干气 /Kg	2.60	0.20	2.80

根据津石高速天津西段各单位工程材料数量汇总表和机械台班汇总表统计,共使用建材 220 种,机械和运输车辆 109 种。各单位工程的材料、机械整体碳排放情况如表 5 所示,各单位工程碳排放占比如图 3 所示。

表5 项目总体排放情况

单位工程	材料碳排放 /tCO <sub>2</sub>	机械碳排放 /tCO <sub>2</sub>	总碳排放量 /tCO <sub>2</sub>
临时工程	2 313.04	1 140.60	3 453.64
路基工程	30 601.19	2 214.50	32 815.68
路面工程	6 181.21	620.23	6 801.44
桥涵工程	66 693.95	3 519.22	70 213.17
交叉工程	339 736.67	17 841.32	357 577.99
公路设施及预埋管线工程	62 401.21	4 681.38	67 082.58
绿化及环境保护工程	0.00	96.63	96.63
管理、养护及服务房屋	11 133.65	839.15	11 972.80
总计	519 060.91	30 953.02	550 013.93

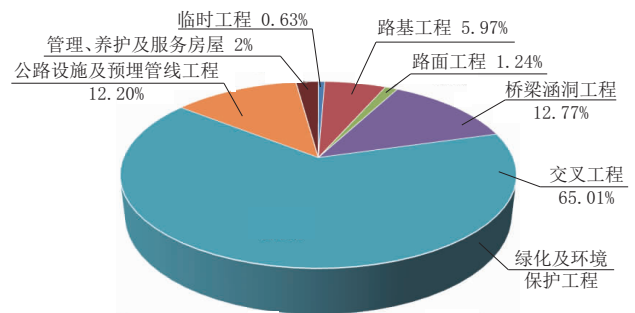


图3 津石高速天津西段各单位工程碳排放占比

由表 5 可知,津石高速天津西段项目总碳排放量为 550 013.93 t,其中材料、机械总排放分别为

519 060.91 t 和 30 953.02 t。津石高速天津西段项目施工总长度为 12.508 km,车道数为 6,由此可得单公里碳排放量为 43 972.97 t,单车道单公里碳排放量为 7 328.83 t。

由图 3 可知,交叉工程占总体排放值最大为 65%,桥涵工程、公路设施及预埋管线工程及路基工程碳排放占比较大,其余工程总碳排放量占比均低于 5%。

(2)材料部分总体特征

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、单位转换及排序等工作,最终得到各类材料排放量和消耗量情况如表 6 所示。

表 6 材料分类排放

规格分类	总碳排放量 /tCO <sub>2</sub>	总消耗量 /tCO <sub>2</sub>
钢类	213 307.10	58 635.52
水泥	167 495.48	194 009.32
生石灰	121 896.16	151 990.23
矿土料	7 270.64	2 787 203.40
支座	4 383.95	396.89
沥青类	2 515.84	10 190.52
PVC 材料	56.44	11.75
电线电缆	9.96	131.55
其他	2 125.33	20 385.32
总计	519 060.91	3 222 954.49

为更准确的分析材料部分排放特征,在数据处理分析过程中采取以下操作:

一是水及绿化工程内植被等不计排放,在计算分析消耗量时不考虑;

二是部分材料消耗量或排放量均低于 0.5%,样本量不充分,归为“其他”类别进行整体研究;

三是材料部分内存在部分种类能源如电、柴油、汽油等的消耗数据,与机械或运输设备排放计算及特征分析内数据重合,故在分析材料排放特征时忽略不考虑。

不同种类材料总碳排放量及总消耗量占比如图 4 所示,可知排放量较大的材料主要为水泥、钢类和生石灰,分别占到材料总碳排放的 32.27%、41.09% 和 23.48%,总占比超 95%;消耗量较大的材料主要为矿土料,占总消耗量比例超 85%。比较同种材料的排放量及消耗量可知,消耗量大的材料,如矿土料等排放占比极小,总计不超过 2%;而消耗量小的材料如钢类等排放占比极大,消耗占比小于 2%,排放占比却超过 40%。

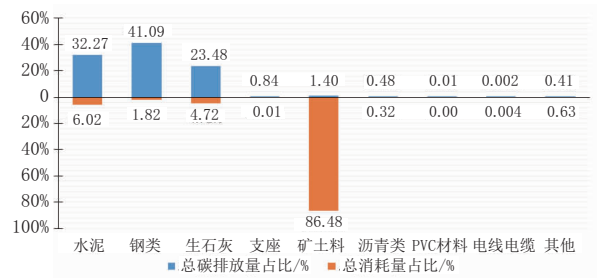


图 4 不同种类材料总碳排放量及总消耗量占比

(3)机械部分总体特征

根据排放量和工程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%的机械类别如表 7 所示,机械碳排放量及台班量占比如图 5 所示。

表 7 机械分类排放表

类别	总碳排放量 /tCO <sub>2</sub>	占比	总消耗量 /台班	占比
回旋钻机	6 910.64	22.28%	16 744.52	7.47%
自卸汽车	6 153.29	19.84%	24 747.84	11.04%
压路机	3 075.41	9.92%	21 134.19	9.43%
弧焊机	2 138.51	6.90%	35 084.67	15.66%
拌和机	1 865.77	6.02%	2 911.92	1.30%
电动卷扬机	1 658.16	5.35%	47 042.42	20.99%
起重机	1 540.86	4.97%	12 150.71	5.42%
平地机	1 422.09	4.59%	4 718.02	2.11%
装载机	921.67	2.97%	3 543.70	1.58%
混凝土搅拌运输车	737.46	2.38%	3 632.37	1.62%
洒水汽车	722.70	2.33%	6 048.16	2.70%
履带式推土机	616.95	1.99%	2 743.84	1.22%
水泥混凝土搅拌站	526.23	1.70%	1 079.47	0.48%
履带式单斗挖掘机	425.24	1.37%	1 859.50	0.83%
预应力拉伸机	186.07	0.60%	7 891.91	3.52%
搅拌机	151.55	0.49%	6 923.12	3.09%
强夯机械	105.96	0.34%	8 583.72	3.83%
机动破碎机	93.61	0.30%	2 656.89	1.19%
机动翻斗车	70.98	0.23%	2 149.10	0.96%
其他	1 688.89	5.45%	12 437.69	5.55%
总计	31 012.04	100.00%	224 083.74	100.00%

由图 5 可知,回旋钻机及自卸汽车为排放最大的机械设备,分别占到总体排放的 22.28% 及 19.84%,累计占比超过 40%;消耗量最大的机械电动卷扬机,消耗台班量占到总台班量的 20.99%。

4 结 语

本研究结合公路生命周期特征,重点对公路建设阶段碳排放测算方法、建设阶段的碳排放因子清

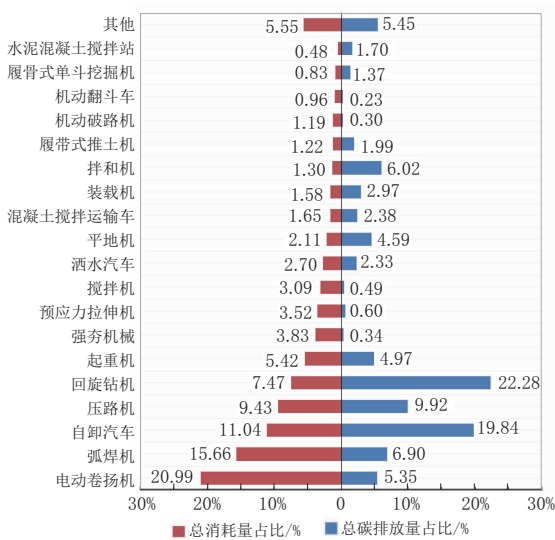


图5 机械碳排放量及台班量占比

单及低碳减排测算开展深入研究,基于公路建设工程计量单元过程划分标准,按照“分单位-分部-分项”的施工时序和层级对公路建设阶段进行划分和建模,得到了材料生产、材料场外加工、材料运输以及施工阶段的单元过程碳排放测算模型。针对公路工程,在确定公路建设碳源的基础上,利用国内外现有权威碳排放数据库及相关文献研究成果进行了理论分析,分别得出能源、筑路材料、机械与运输车辆等单位碳排放因子清单,依托津石高速公路天津西段项目,搜集工程建设阶段材料及机械使用情况,对其工程排放测算及排放特征规律进行研究,主要结论如下:

(1)公路建设项目碳排放存在一定客观规律。尽管不同区域发展特征不同,自然资源禀赋和发展特征不同,公路建设项目碳排放规律和影响因素存在显著差异,但是公路建设相关筑路材料、施工机械等排放源的排放因子仅在一定分范围内波动(除去运输过程的距离参数影响),同时公路建设的单位工程、分部分项工程类似,大型构造物结构特征相近,使用的材料、机械有一定的规律,因此本次核算结果

有一定的代表性。公路建设过程存在明显的2:8定律,即消耗量为20%的材料和施工机械贡献了80%的碳排放,这主要是由于钢铁、柴油等生产过程产生了较大的碳排放,因此少量的消耗能贡献较高的排放。

(2)津石高速天津西段工程原材料生产碳排放占比最高,并且减排潜力也最大,其碳排放主要来源为钢材、水泥和生石灰。而施工机械及运输产生的碳排放仅占总量的5.6%,主要来源为打桩钻孔机械、运输机械、土石方工程机械,其中运输车辆碳排放主要来源为15t以内的自卸汽车。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,从材料节约、能源节约、工艺优化、施工管理和政策支持等层面提出了针对性的减排措施。

参考文献:

[1] 黄山倩,黄学文,高硕哈,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):72-80,89.  
 [2] 任腾,成元海,于晓晓,等.全生命周期公路建养的碳排放及环境影响[J].交通节能与环保,2022,18(6):115-119.  
 [3] 万杰.基于LCA的高速公路路面施工碳排放优化研究[D].合肥:合肥学院,2022.  
 [4] 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..  
 [5] 谢萌,朱长征.中国公路运输业碳排放影响因素研究[J].中国储运,2022(5):197-198.  
 [6] 周颖,秦双双.高速公路建设期碳排放计算与分析[J].价值工程,2022,41(8):156-158.  
 [7] 孟祥晨.沥青路面建设期能耗及碳排放量化研究[D].北京:北京交通大学,2021.  
 [8] 方海,曹子龙,凤振华,等.基于全生命周期理论的公路建设期碳排放核算方法及实证研究[J].公路工程,2021,46(1):92-97,124.  
 [9] 张新洁,张鑫洁,张爱琳.内蒙古寒旱地区公路施工阶段碳排放因子测算研究[J].内蒙古科技大学学报,2023,42(2):170-175.  
 [10] 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.

(上接第29页)

[3] 李馨,刘明辉,贾思毅,等.民用建筑工程施工期碳排放评估[J].建设科技(建设部),2018(13):67-71.  
 [4] 张欢,贺延壮,赵晓宇.办公楼建筑碳排放计算与分析[J].智能建筑,

2022(10):40-46.  
 [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市道路工程设计规范,CJJ-37-2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.