

道路工程地基加固碳排放核算研究

杨鹏辉¹, 刘睿^{2*}, 万传风², 张海啸¹, 周叶飞¹, 卢春颖³

(1. 河南交投商罗高速公路有限公司, 河南 郑州 450016; 2. 北京交通大学, 北京市 100091;

3. 交通运输部科学研究院, 北京市 100029)

摘要: 为了应对日趋严重的全球变暖问题, 贯彻中国“碳达峰、碳中和”目标, 应加快推动建筑业实现节能减排。该文从道路工程中的地基处理工程入手, 采用碳排放因子法, 参考地基处理工程的预算消耗量定额, 核算出地基处理工程中各分项工程的碳排放量, 并根据工程造价标准计算出各分项工程的造价, 结合碳排放量和工程造价两方面进行数据分析, 挖掘地基处理工程中的减排潜力。结果表明: 在地基加固工程中, 材料是最主要的碳排放来源, 主要来自水泥、钢筋等高碳排放材料。对于分项工程来说, 夯填桩工程排放占比最高(达72.6%)。通过对比分析造价与碳排放量之间的关系, 发现换填砂、石屑、块石的工程造价与碳排放比值最高。为经济高效地控制地基加固工程碳排放, 可优先选择造价与碳排放量比值低且碳排放量低的分项工程, 如夯填桩工程、换填土工程和水泥稳定土工程。该研究基于分析结果提出了节能减排的对策建议, 为道路工程碳排放统计核算提供了方法参考和数据支持。

关键词: 道路工程; 地基加固; 碳排放核算; 碳减排; 工程造价; 绿色环保

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

Research on Carbon Emission Accounting for Road Engineering Foundation Reinforcement

YANG Penghui¹, LIU Rui^{2*}, WAN Chuanfeng², ZHANG Haixiao¹, ZHOU Yefei¹, LU Chunying³

(1. Henan Transportation Investment Shang Luo Expressway Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450016, China; 2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100091, China; 3. China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: To cope with the increasingly serious global warming and implement China's carbon peak and carbon neutrality goals, the promotion of energy conservation and emission reduction in the construction industry should be accelerated. Starting with the foundation treatment project in road engineering, this study used the carbon emission factor method. According to the budget consumption quota of the project, the carbon emissions of each sub-project in the project were calculated. Then, the cost of each sub-project was calculated based on the engineering cost standard. From the perspectives of carbon emissions and engineering costs, data analysis was conducted to explore the project's emission reduction potential. The results indicate that materials are the primary source of carbon emissions in foundation reinforcement projects, mainly from high carbon emitting materials such as cement and steel bars. For sub-projects, the proportion of emissions from compacted pile engineering is the highest (72.6%). By comparing the relationship between costs and carbon emissions, it is found that the ratio of engineering costs to carbon emissions of replacing sand, stone chips, and crushed stone projects is the highest. To economically and efficiently control carbon emissions in foundation reinforcement projects, priority can be given to sub-projects with a low ratio of engineering costs to carbon emissions and low carbon emissions, such as compacted pile engineering, replacement soil engineering, and cement stabilized soil engineering. The proposed energy conservation and emission reduction measures based on the analysis results can provide method references and data support for carbon emission accounting in road engineering.

Keywords: road engineering; foundation reinforcement; carbon emission accounting; carbon reduction; engineering cost; green and eco-friendly

收稿日期: 2024-07-24 修回日期: 2025-05-09

基金项目: 河南省交通运输厅科技项目(编号: 2022-5-2); 甘肃省科技计划项目(编号: 21ZD8JA003)

作者简介: 杨鹏辉, 男, 高级工程师. E-mail: 595071321@qq.com

*通信作者: 刘睿, 男, 博士, 副研究员. E-mail: liuruiliyu@sina.com

0 引言

目前,全球气候变暖问题日益严峻,如何有效控制温室气体排放量已成为当今国际社会关注的热点^[1]。在此背景下,中国明确提出力争于2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和的目标^[2],这对各行业的低碳转型提出了紧迫要求。

近20年来,土建行业是中国发展的重点领域。建筑行业一直是全球最大的碳排放行业之一,其对二氧化碳排放总量影响不可忽视。据统计,2021年中国房屋建筑全过程碳排放总量为40.7亿tCO₂,占中国能源相关碳排放总量的38.2%^[3]。其中,建材生产阶段碳排放为17.0亿tCO₂,建筑运行阶段碳排放为23.0亿tCO₂。建筑业的原材料如钢筋和混凝土,以及建设施工所使用的大型机械,都会产生大量的二氧化碳排放。因此,加强建筑行业的碳排放管理至关重要。

为此,国内外研究人员针对建筑行业碳排放已开展了广泛研究。任艳^[4]通过建筑碳排放计算,总结了住宅老旧小区碳排放的构成及特点,提出了住宅老旧小区减少碳排放的设计策略;刘荣辉等^[5]通过碳排放分析软件与手算相结合的方式对拆除高层住宅进行碳排放量的计算,并从能源替换、采用施工效率更高的器械、完善相关从业人员的专业技能培训体系以及规范器械铭牌的审查监管制度4个方面给出减排建议;李德智等^[6]将碳排放计算的清单分析法与建筑工程的施工工艺结合,建立了建筑工程施工阶段碳排放的基元化计算方法。在隧道工程中,王琳等^[7]以黄土隧道为研究对象,采用生命周期评价理论,从碳排放源、时间和空间3个层面分析了黄土隧道施工阶段碳排放特点,提出了黄土隧道施工阶段碳减排建议。为保障软弱易滑地层中隧道进洞施工安全,张涵等^[8]提出了两种低碳节能的施工工法,可以大量减少碳的排放并节省不少投资。在道路工程方面,李佳慧等^[9]以工程量清单为依据,利用碳排放因子法研究市政道路工程初步设计阶段碳排放量,评估市政道路工程建设对环境的影响;吴昊等^[10]以大理市某高速公路项目为例,采用基于全生命周期评价理论的碳排放量核算方法,构建碳排放核算模型,计算出各单位工程产生的碳排放量;张晓悦等^[11]从原材料生产、原材料运输、现场施工3个阶段对公路绿化工程进行了碳排放量的计算,为建设绿色低碳公路提供了新的思路。此外,研究人员还针对沥青路面的节能减碳技术和方案开展了大量研究^[12-14]。

综上所述,国内外学者对道路工程的碳排放已经进行了许多研究,但是大部分的研究集中在公路与城市道路之中,很少有研究关注城市高速公路地基工程的碳排放。

为深入分析道路工程碳排放特征和节能减碳潜力,本研究从地基加固工程入手,借鉴建筑行业碳排放核算方法,结合地基加固工程特点,基于碳排放因子法建立碳排放核算方法,计算得到总价与碳排放量的比值。根据碳排放量核算情况,分析分项工程碳排放特征和主要来源;结合碳排放和造价关系,挖掘地基处理工程的减排潜力。在此基础上,系统提出地基加固工程节能减排对策建议。本研究可为道路工程节能减排工作提供方法依据和数据支撑。

1 研究方法

1.1 核算方法

本研究借鉴建筑行业碳排放核算方法^[15-16],结合地基加固工程特点,采用碳排放因子法建立了碳排放核算方法,具体核算流程见图1,计算公式见式(1)。地基加固工程碳排放主要来源于原材料消耗、施工机械使用和人工。根据全球大气研究排放数据库(EDGAR)给出的数据^[17],2018年中国的人均年碳排放量为8.0t,将其换算为每个工作日(按8h计算)的人均碳排放量约为7.30kgCO₂/(人·工日)。核算结果表明,人工碳排放量在总碳排放量中的占比小于1%。同时,人工碳排放量受工作环境、工作效率、使用工具和设备等因素影响,核算时易忽略人工碳排放的影响,仅考虑材料消耗和施工机械消耗而造成的碳排放。

$$E = E_{\text{scp1}} + E_{\text{scp2}} \quad (1)$$

式中: E 为地基加固碳排放总量; E_{scp1} 为地基加固材料碳排放量; E_{scp2} 为地基加固机械碳排放量。

1.1.1 地基加固材料碳排放量

地基加固过程中,材料消耗造成的碳排放量应按照公式(2)计算,即由材料消耗量和碳排放因子计算得出碳排放量。

$$E_{\text{scp1}} = \sum_{i=1}^n q_{\text{mat},i} \cdot C_{\text{mat},i} \quad (2)$$

式中: $q_{\text{mat},i}$ 为材料 i 的消耗量; $C_{\text{mat},i}$ 为材料 i 所产生的温室气体排放潜势值。

1.1.2 地基加固机械碳排放量

在地基加固过程中机械设备造成的碳排放量按照公式(3)进行核算。根据中国统一施工机械台班费用定额^[18]获得机械施工时的能源消耗,再由能源

碳排放因子计算出碳排放量。

$$E_{scp2} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n q_{match,j,k} \cdot C_{match,j,k} \quad (3)$$

式中： $q_{match,j,k}$ 和 $C_{match,j,k}$ 分别为施工机械 j 的第 k 种能源消耗量和能源温室气体排放潜势值。

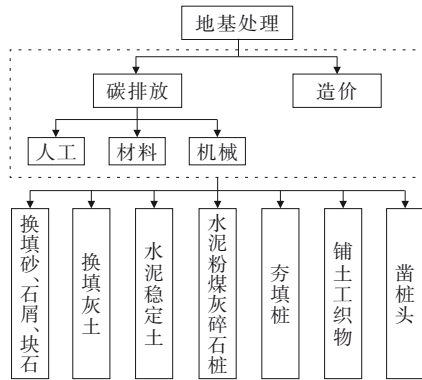


图 1 核算流程图

Figure 1 Accounting flowchart

1.2 核算依据

1.2.1 活动水平数据

根据地基处理流程和特点,将地基加固工程分为7个分项工程,分别是:①换填砂、石屑、块石;②换填灰土;③水泥稳定土;④水泥粉煤灰碎石桩;⑤夯填桩;⑥铺土工织物;⑦凿桩头。分别收集7个过程中主要材料和机械设备的消耗数量,如表1、2所示。

表 1 地基加固过程材料消耗量

Table 1 Material consumption during foundation reinforcement process

工程类别	材料名称	单位	消耗量
换填砂、石屑、块石	砂子中粗砂	kg	1 854.2
	石屑	kg	2 413.0
	碎石	kg	1 789.5
换填灰土	白灰	kg	442.0
	素土	m ³	5.59
水泥稳定土	水泥(综合)	kg	173.334
	素土	m ³	2.84
水泥粉煤灰碎石桩	水泥粉煤灰碎石混合料	m ³	2.346
夯填桩	钢护筒	t	0.01
	方木	m ³	0.008
	预拌混凝土 C30	m ²	1.21
	岩棉板 30 mm	m ³	0.408
	碎石	kg	1 905
铺土工织物	土工布	m ²	1.115
	土工格栅	m ²	1.1

表 2 地基加固过程机械消耗量

Table 2 Mechanical consumption during foundation reinforcement process

工程类别	机械设备名称	单位	消耗量
换填砂、石屑、块石	电动夯实机 20~62 kg/m	台班	0.240 0
	电动夯实机 20~62 kg/m	台班	0.160 0
换填灰土	履带式推土机 75 kW	台班	0.030 0
	光轮压路机(综合)	台班	0.034 0
水泥稳定土	光轮压路机(综合)	台班	0.014 0
	履带式推土机 75 kW	台班	0.020 0
	平地机 HP90	台班	0.007 0
水泥粉煤灰碎石桩	螺旋钻机 800 mm	台班	0.092 1
	螺旋钻机 600 mm	台班	0.098 6
夯填桩	轮胎式装载机 1 m ³	台班	0.127 6
	振动沉管钻机 ZTJ-4	台班	0.144 0
凿桩头	手持式风动凿岩机	台班	0.218 0
	电动空气压缩机 3 m ³ /min	台班	0.218 0

1.2.2 碳排放因子数据

本研究中主要材料的碳排放因子源于相关标准^[19],能源碳排放因子主要来源于 CLCD 数据库^[20]。其中,电力的碳排放因子来源于《企业温室气体排放核算方法及报告指南——发电设施》^[21]。为方便核算与分析,所有的能源碳排放因子单位都已转化为 kg CO₂eq。研究发现,道路工程地基加固过程中主要消耗了柴油和电力,其采用的碳排放因子如表 3 所示。

本次核算的定额信息来自《北京市建设工程计价依据——预算消耗量标准》^[22],主要采用城市轨道交通土建工程中地基加固处理的部分。

工程造价的标准来自参考文献[23]。

表 3 能源碳排放因子

Table 3 Energy carbon emission factor

能源名称	碳排放因子
柴油	4.00 kg CO ₂ eq/kg
电	0.581 kgCO ₂ eq/(kW·h)

2 结果分析与讨论

2.1 碳排放特征分析

经过核算,本项目地基加固过程碳排放总量达到 980 kgCO₂eq,分项工程碳排放量和占比情况分别如图 2、3 所示。

总的来说,夯填桩工程的碳排放总量最高(711

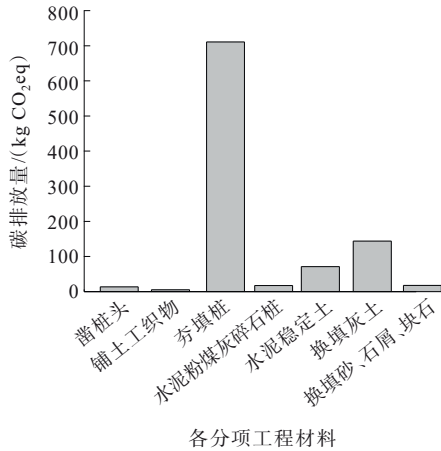


图2 地基加固各分项工程碳排放量

Figure 2 Carbon emissions of each sub-project for foundation reinforcement

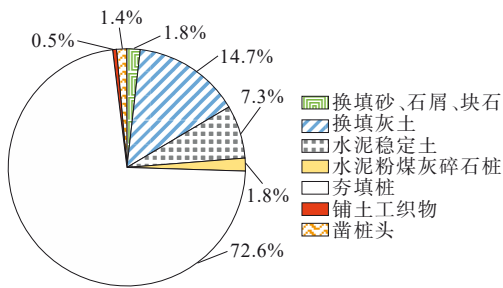


图3 地基加固各分项工程碳排放占比

Figure 3 Carbon emission proportion of each sub-project for foundation reinforcement

kg CO₂eq),且碳排放占比最大(72.6%)。其次,换填灰土和水泥稳定土工程碳排放量较高,分别为14.7和71.1 kg CO₂eq,碳排放占比分别为14.7%和7.3%。而其余工程碳排放量很低,为5.27~17.8 kg CO₂eq,碳排放占比为0.5%~1.8%。在地基加固过程中,夯填桩工程的碳排放量最高,主要是因为该工程消耗了大量钢护筒、预拌混凝土和碎石等材料,并且机械台班较多。

本文进一步分析了地基加固工程中材料碳排放和机械碳排放占比情况。核算结果表明,整个工程中材料碳排放量达到了901 kg CO₂eq,占碳排放总量的92.0%;机械施工碳排放总量为78.3 kg CO₂eq,仅占碳排放总量的8.0%。这表明材料是地基加固工程最主要的碳排放来源。

地基加固分项工程中材料碳排放和机械碳排放情况分别如图4、5所示。

从图4、5可以看出:凿桩头工程和水泥粉煤灰碎石桩工程中,机械碳排放占比分别为100%和87%,机械碳排放占比显著高于材料碳排放占比。对于换

填砂、石屑、块石工程、换填灰土工程、水泥稳定土工程、夯填桩工程和铺土工织物工程而言,材料碳排放占比超过了87%,远高于机械碳排放占比。通过分析材料和机械使用情况发现,凿桩头工程机械碳排放高是因为在施工过程中使用了风动凿岩机和电动空气压缩机,没有涉及材料消耗过程;水泥粉煤灰碎石桩工程机械碳排放高是因为使用了少量水泥粉煤灰碎石混合料,大量使用了螺旋钻机;其余5个工程在施工过程中,使用了大量的石屑、碎石、砂子、钢护筒等材料,因此造成了材料大量碳排放。综上所述,减少地基处理碳排放应从减少材料碳排放入手。

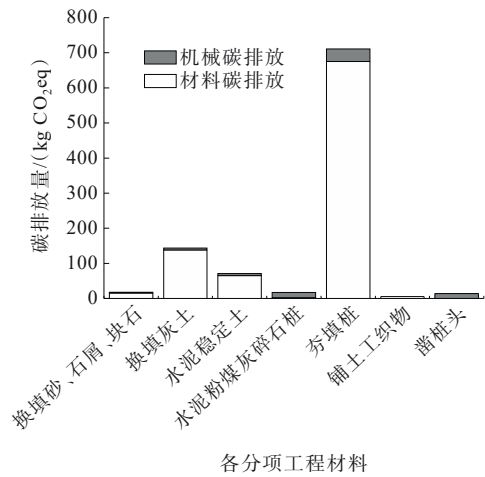


图4 地基加固各分项工程材料和机械碳排放量

Figure 4 Carbon emissions from materials and machinery in each sub-project for foundation reinforcement

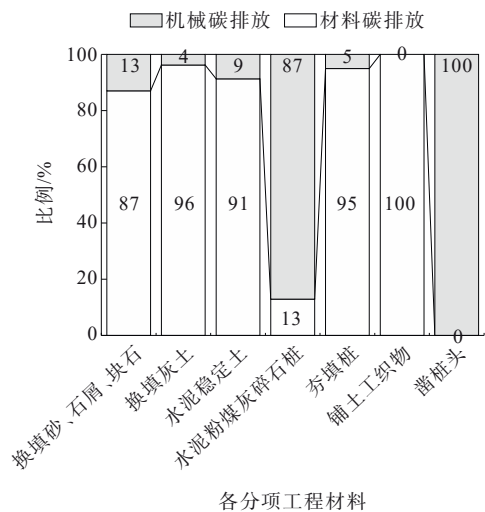


图5 地基加固各分项工程材料和机械碳排放占比

Figure 5 Proportion of carbon emissions from materials and machinery in each sub-project for foundation reinforcement

2.2 碳排放与造价关系

为定量分析分项工程中造价与碳排放量之间的关系,本文计算了分项工程总价与碳排放量的比值,结果如表4和图6所示。造价与碳排放量的比值代表着每排放1 kg的二氧化碳当量的支出。在相同碳排放量情况下,该值越高则表明本项工程成本支出越高。

表4 各分项工程造价与碳排放量比值

分项工程名称	工程造价/元	碳排放量/(kg CO ₂ eq)	排放比值/[元·(kg CO ₂ eq) ⁻¹]		
			造价与碳	材料部分造价与碳	机械部分造价与碳
凿桩头	53.56	13.616	3.93	—	3.933
铺土工织物	114.10	5.272	21.64	21.642	—
夯填桩	2 006.14	710.959	2.82	2.774	3.705
水泥粉煤灰碎石桩	526.41	17.16	30.68	200.126	5.497
水泥稳定土	149.35	71.139	2.10	1.846	4.265
换填灰土	176.56	143.737	1.23	1.117	4.050
换填砂、石屑、块石	2 628.57	17.814	147.56	169.149	2.988
总计	5 651.69	979.697	5.77	5.910	4.134

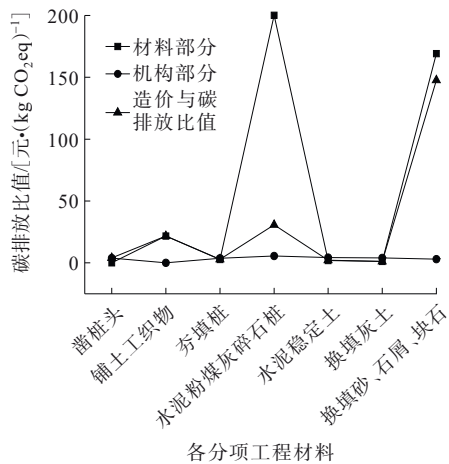


图6 各分项工程造价与碳排放量比值

Figure 6 Ratio of engineering costs to carbon emissions for each sub-project

从各分项工程来看,换填砂、石屑、块石工程造价与碳排放比值最高,达到了147.56元/(kg CO₂eq);其次为水泥粉煤灰碎石桩工程和铺土工织物工程,分别为30.68元/(kg CO₂eq)和21.64元/(kg CO₂eq);其余分项工程比值较小,为1.23~3.93元/(kg CO₂eq)。从材料与机械方面来看,不同分项工程中,材料部

分造价与碳排放比值差异很大。其中,水泥粉煤灰碎石桩工程和换填砂、石屑、块石工程材料造价与碳排放比值最高,分别为200.126元/(kg CO₂eq)和169.149元/(kg CO₂eq),其余工程比值较小;机械部分造价与碳排放比值波动较小,均为3~6元/(kg CO₂eq)。总的来说,地基加固工程中控制碳排放应综合考虑造价和碳排放量的关系,为经济高效地控制地基加固工程碳排放,可优先选择造价与碳排放量比值低且碳排放量低的分项工程,如夯填桩工程、换填土工程和水泥稳定土工程。

2.3 碳减排建议

研究表明,地基加固工程中碳排放主要来自上游材料制备过程中的碳排放和机械设备碳排放,根据地基加固工程中材料消耗和施工的特点,提出的碳减排对策建议如下:

(1) 降低材料使用量。通过更为科学的计算,减少不必要的材料消耗和能源消耗。合理布局建筑结构,减少冗余的支撑结构和材料,改进施工工艺,引入先进的施工设备和技术,提高施工效率,缩短施工周期,从而减少能源消耗和碳排放。

(2) 采用低碳排放材料。例如:严格筛选再生材料或能够生物降解的材料,这不仅可以减少对自然资源的消耗,还能有效降低上游材料生产阶段的碳排放,同时,对循环经济的促进作用也比较明显。

(3) 实现工程机械使用的电气化。虽然机械设备的使用造成的直接碳排放在整个地基加固工程项目中的比例仅为8.0%,但作为排放源的主要构成部分,除极特殊设备要求条件下,机械设备电气化可以有效提高机械的使用效率,减少能源消耗。

(4) 合理利用太阳能、风能等可再生能源,减少对化石燃料的依赖。例如,利用太阳能分布式电站为施工设备提供电力等措施,可以有效地减少排放,满足电力供应过程中的能源效率最大化需求。

(5) 注重材料的回收利用和处理。可回收材料应进行分类回收再利用,以减少对新材料的需求。对于不可回收的废弃物,应尽量采用环保的处理方式,如安全填埋或高温焚烧,以最大程度地减少对环境的污染^[24]。

3 结论

本文以地基加固工程为切入点,选取典型案例核算了分项工程碳排放量,并进一步分析了碳排放与造价的关系,挖掘了项目减排潜力。得到以下主

要结论:

(1) 在地基加固分项工程中,夯填桩工程碳排放占比最高(72.6%),主要是因为该工程消耗了大量钢护筒、预拌混凝土和碎石等材料,并且机械台班较多。

(2) 在地基加固工程中,材料是最主要的碳排放来源,占比达到了92%,主要是由于水泥、钢筋等材料的碳排放量过大。

(3) 通过对比分析造价与碳排放量之间的关系,发现换填砂、石屑、块石工程造价与碳排放比值最高。为经济高效地控制地基加固工程碳排放,可优先选择造价与碳排放量比值低且碳排放量低的分项工程,如夯填桩工程、换填土工程和水泥稳定土工程。

(4) 根据地基加固工程碳排放特点,提出降低材料使用量,采用低碳排放材料,实现工程机械使用的电气化,合理利用可再生能源,注重材料的回收利用和处理的碳减排建议。

参考文献:

References:

- [1] 乌婕,赵佳虹,叶子欣,等.考虑碳排放控制的建筑废弃物运输系统优化[J].交通科技与经济,2024,26(1):1-8.
WU Jie, ZHAO Jiahong, YE Zixin, et al. The optimization of construction waste transportation system considering carbon emission control[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2024, 26(1): 1-8.
- [2] 习近平.继往开来,开启全球应对气候变化新征程:在气候雄心峰会上的讲话[N].人民日报,2020,12,13(002).
XI Jinping. Continuing the past and opening up the future, embarking on a new journey of global response to climate change: Speech at the Climate Ambition Summit[N]. People's Daily, 2020, 12, 13(002).
- [3] 中国建筑节能协会.中国建筑能耗与碳排放研究报告2023[R],2023.
China Association for Building Energy Efficiency. Research report on energy consumption and carbon emissions of Chinese buildings 2023[R], 2023.
- [4] 任艳.住宅老旧小区改造低碳设计研究[J].暖通空调,2023,53(增刊2):431-433.
REN Yan. Study on low-carbon design of old residential quarter reconstruction[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2023, 53(sup 2): 431-433.
- [5] 刘荣辉,于清泉.高层住宅拆除全过程碳排放评估实践[J].江苏建筑,2023(6):144-146,151.
LIU Ronghui, YU Qingquan. Carbon emission assessment practice of the whole process of high-rise residential demolition[J]. Jiangsu Construction, 2023(6): 144-146,151.
- [6] 李德智,汪洋,李朝智,等.建筑工程施工阶段碳排放基元化计算[J].江苏建筑,2023(增刊1):109-114.
LI Dezhi, WANG Yang, LI Chaozhi, et al. Basic calculation of carbon emission in construction stage of building engineering[J]. Jiangsu Construction, 2023(sup 1): 109-114.
- [7] 王琳,杨木言,高钰强.黄土隧道施工阶段碳排放计算与分析[J].环境工程,2023,41(10):99-107,172.
WANG Lin, YANG Muyan, GAO Yuqiang. Calculation and analysis of carbon emission in construction stage of loess tunnel[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(10): 99-107,172.
- [8] 张涵,邹逸伦.软弱易滑地层隧道成套低碳技术安全进洞研究[J].现代隧道技术,2022,59(增刊1):825-831.
ZHANG Han, ZOU Yilun. Study on safe entry of tunnel in soft and slippery strata with complete low-carbon technology[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(sup 1): 825-831.
- [9] 李佳慧,刘辉,刘耀坤.基于工程量清单的市政道路工程碳排放研究[J].公路与汽运,2023(4):153-158.
LI Jiahui, LIU Hui, LIU Yaokun. Study on carbon emission of municipal road engineering based on bill of quantities[J]. Highways & Automotive Applications, 2023(4): 153-158.
- [10] 吴昊,方留杨,刘天逸,等.山区高速公路建设期碳排放核算探究[J].中国公路,2023(9):103-104.
WU Hao, FANG Liuyang, LIU Tianyi, et al. Study on carbon emission accounting during expressway construction in mountainous areas[J]. China Highway, 2023(9): 103-104.
- [11] 张晓悦,孙侃.高速公路绿化工程施工阶段碳排放计算研究[J/OL].交通节能与环保,1-7(2024-01-22)[2024-05-06].
<https://link.cnki.net/urlid/10.1261.U.20240122.0911.002>.
ZHANG Xiaoyue, SUN Kan. Study on calculation of carbon emission in expressway greening project construction stage[J/OL]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 1-7(2024-01-22) [2024-05-06].
<https://link.cnki.net/urlid/10.1261.U.20240122.0911.002>.
- [12] 杨彦海,崔宏,杨野,等.沥青路面厂拌热再生技术使用效果分析与评价[J].中外公路,2023,43(1):63-68.
YANG Yanhai, CUI Hong, YANG Ye, et al. Analysis and evaluation of application effect of hot mix plan regeneration technology in asphalt pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(1): 63-68.
- [13] 宋庄庄,朱洪洲.沥青路面全寿命周期节能减排策略案例研究[J].中外公路,2020,40(5):36-42.
SONG Zhuangzhuang, ZHU Hongzhou. Case study on energy conservation and emission reduction strategy of asphalt pavement in life cycle[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(5): 36-42.

- [14] 徐希忠, 韦金城, 闫翔鹏, 等. 长寿命沥青路面研究现状及展望[J]. 中外公路, 2023, 43(1): 36-43.
XU Xizhong, WEI Jincheng, YAN Xiangpeng, et al. Review and outlook for long-life asphalt pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(1): 36-43.
- [15] 陈彬彬, 陈婵璐, 杨建宇, 等. 施工阶段碳排放定额估算方法研究[J]. 建筑节能, 2020, 48(11): 147-150.
CHEN Binbin, CHEN Chanlu, YANG Jianyu, et al. Estimation method of carbon emission quota in construction stage[J]. Building Energy Efficiency, 2020, 48(11): 147-150.
- [16] 李静, 刘燕. 基于全生命周期的建筑工程碳排放计算模型[J]. 工程管理学报, 2015, 29(4): 12-16.
LI Jing, LIU Yan. The carbon emission accounting model based on building lifecycle[J]. Journal of Engineering Management, 2015, 29(4): 12-16.
- [17] 欧盟. 全球大气研究排放数据库[EB/OL].(2025-03-25) [2025-04-20]<https://edgar.jrc.ec.europa.eu>.
European Commission. EDGAR-emissions database for global atmospheric research[EB/OL]. (2025-03-25) [2025-04-20]<https://edgar.jrc.ec.europa.eu>.
- [18] 中华人民共和国建设部. 全国统一施工机械台班费用定额[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. National unified construction machinery unit cost quota[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑碳排放计算标准: GB/T 51366—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for building carbon emission calculation: GB/T 51366—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [20] 温室气体协议. 中国生命周期评价基础数据库(CLCD) [EB/OL]. (2025-03-18) [2025-04-20]<https://ghgprotocol.org/Third-Party-Databases/CLCD>.
Greenhouse Gas Protocol. Chinese life cycle database (CLCD) [EB/OL]. (2025-03-18) [2025-04-20]<https://ghgprotocol.org/Third-Party-Databases/CLCD>.
- [21] 中华人民共和国生态环境部. 企业温室气体排放核算方法及报告指南: 发电设施[EB/OL].(2022-12-21)[2025-03-18]https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202212/t20221221_1008430.html.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Guidelines for accounting and reporting greenhouse gas emissions of enterprises: Power generation facilities[EB/OL]. (2022-12-21) [2025-03-18] https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202212/t20221221_1008430.html.
- [22] 北京市住房和城乡建设委员会. 北京市建设工程计价依据: 预算消耗量标准[Z]. 北京: 北京市住房和城乡建设委员会, 2021.
Beijing Municipal Commission of Housing and Urban Rural Development. Valuation basis for construction projects in beijing: Budget consumption standard[Z]. Beijing: Beijing Municipal Commission of Housing and Urban Rural Development, 2021.
- [23] 北京市住房和城乡建设委员会. 北京工程造价信息. [EB/OL]. (2022-12-21) [2025-03-18] <https://zjw.beijing.gov.cn/bjjs/gcjs/zczjxx/zjxx/gczjxxj/index.shtml>.
Beijing Municipal Commission of Housing and Urban Rural Development. Beijing engineering cost information [EB/OL]. (2022-12-21) [2025-03-18] <https://zjw.beijing.gov.cn/bjjs/gcjs/zczjxx/zjxx/gczjxxj/index.shtml>.
- [24] 《中华人民共和国固体废物污染环境防治法: 附新旧条文对照》编写组. 中华人民共和国固体废物污染环境防治法[M]. 北京: 中国民主法制出版社, 2020.
The Drafting Team of the Solid Waste Pollution Prevention and Control Law of the People's Republic of China: Comparison of new and old articles. Law of the People's Republic of China on the prevention and control of solid waste pollution[M]. Beijing: China Democratic and Legal Publishing House, 2020.