

# 建筑工程施工阶段碳排放测算模型构建及其减排途径分析

林志煌

温州市高速公路资产经营有限公司 浙江 温州 325000

**摘要：**建筑业作为我国国民经济的支柱产业，同时也是能源消耗和碳排放的主要来源之一。在国家“双碳”（碳达峰、碳中和）战略目标的引领下，对建筑全生命周期进行碳排放管控已成为行业发展的必然趋势。相较于运营阶段，施工阶段的碳排放具有周期短、强度高、来源复杂等特点，但其精准量化与有效减排路径研究尚不充分。本文聚焦于建筑工程施工阶段，系统梳理了碳排放的主要来源，包括建材生产与运输、施工机械运行、现场作业活动及临时设施能耗等。在此基础上，创新性地构建了一个基于“清单法”与“过程分析法”相结合的精细化碳排放测算模型，并引入了动态修正因子以提升模型的准确性与适应性。最后，从技术、管理、政策三个维度，深入探讨了施工阶段的碳减排潜力与具体实施路径，旨在为建筑企业实现绿色低碳转型、政府制定科学有效的碳排放监管政策提供理论支撑与实践参考。

**关键词：**建筑工程；施工阶段；碳排放；测算模型；减排途径；双碳目标

## 引言

全球气候变化是21世纪人类面临的严峻挑战，中国2020年提出“双碳”目标，正全力推动经济社会绿色转型。建筑业在其中扮演双重角色，既是国民经济重要支柱，又是资源能源消耗和温室气体排放大户。长期以来，学术和业界多关注建筑运营节能与建材生产绿色制造，对施工阶段碳排放重视不足。但随着装配式建筑、智能建造等新型建造方式兴起，施工过程的技术革新与管理优化成为挖掘碳减排潜力的新方向。精准高效测算施工阶段碳排放，是识别减排环节、评估措施效果、制定管理策略的前提。因此，构建科学实用可操作的施工阶段碳排放测算模型，提出系统性减排途径，对推动建筑业绿色低碳高质量发展、助力国家“双碳”战略目标实现，意义重大。

## 1 建筑工程施工阶段碳排放源解析

建筑工程施工阶段的碳排放来源复杂多样，可系统划分为四大类。其一为建材相关碳排放，主要指各类建材（如钢材、水泥、预制构件等）从工厂运输至工地过程中消耗燃料所产生的排放，以及现场二次加工（如混凝土泵送、钢筋切割）的能耗排放。其二是施工机械与设备运行排放，这是最核心的排放源，包括以柴油为动力的挖掘机、起重机等移动机械产生的直接排放（Scope 1），以及依赖电网电力的塔吊、施工电梯等固定设备产生的间接排放（Scope 2）。其三为现场作业活动排放，涵盖焊接过程中保护气体逸散及金属氧化反应的直接排

放，同时需注意新浇筑混凝土碳化会吸收CO<sub>2</sub>，核算时应作为负排放项扣除<sup>[1]</sup>。其四则是临时设施与生活区的能耗排放，包括办公住宿区的照明、空调、炊事等活动所消耗的电力与燃气产生的排放。全面、准确地识别这四类排放源，是构建科学测算模型并制定有效减排策略的先决条件。

## 2 施工阶段碳排放测算模型构建

针对上述复杂的排放源，本文提出一个“双核驱动、动态修正”的精细化测算模型。

### 2.1 模型总体框架

本模型的核心思想是将施工过程分解为可计量的基本单元——“碳排放活动单元”（Carbon Emission Activity Unit, CEAU）。每个CEAU对应一项具体的施工任务或资源消耗行为，如“使用1台履带式液压挖掘机工作1小时”、“运输1吨钢筋行驶1公里”等。模型的计算公式如下：

$$CE_{total} = \sum_{i=1}^n (Q_i \times EF_i \times CF_i)$$

其中：

CE<sub>total</sub>为施工阶段总碳排放量（kgCO<sub>2</sub>e）；

n为碳排放活动单元的总数；

Q<sub>i</sub>为第i个活动单元的量化指标（如机械台班数、运输吨公里数、用电量kWh等）；

EF<sub>i</sub>为第i个活动单元的标准碳排放因子（kgCO<sub>2</sub>e/单位量化指标）；

CF<sub>i</sub>为第i个活动单元的动态修正因子（无量纲）。

## 2.2 关键参数确定

### 2.2.1 量化指标(Q)的获取

量化指标是模型的基础数据,其准确性直接决定了测算结果的可靠性。理想的数据来源是项目的BIM模型和智慧工地管理系统。BIM模型可精确提取各分部分项工程的工程量(如混凝土方量、钢筋吨数),并关联到相应的施工机械和工艺。智慧工地系统通过物联网(IoT)传感器,可以实时采集施工机械的运行时间、燃油消耗、电力消耗等数据;通过GPS可以追踪运输车辆的行驶轨迹和里程<sup>[2]</sup>。若缺乏上述条件,则可依据施工组织设计、机械台班消耗定额、材料进场台账等资料进行估算。

### 2.2.2 标准碳排放因子(EF)的选取

标准排放因子是连接物理量与碳排放量的桥梁。本文建议优先采用国家或地方权威机构发布的最新数据。

(1)能源类:电力排放因子采用项目所在地省级电网的平均排放因子;柴油、汽油等化石燃料采用IPCC(政府间气候变化专门委员会)或《省级温室气体清单编制指南》中的推荐值。(2)建材运输:可采用《中国区域电网基准线排放因子》中关于货运的排放因子,或根据车型、载重、路况进行细分。(3)特殊工艺:如焊接、混凝土碳化等,需查阅专业文献或行业研究报告获取特定的排放因子。

### 2.2.3 动态修正因子(CF)的引入

这是本模型的创新点,旨在解决传统模型“一刀切”的弊端,使其能适应不同项目、不同地域、不同技术水平的实际情况。(1)地域气候修正因子(CF<sub>climate</sub>):寒冷地区冬季施工,机械效率降低、预热时间延长,导致单位工作量的能耗增加,CF>1;炎热地区空调负荷大,生活区用电排放增加。(2)施工技术修正因子(CF<sub>tech</sub>):采用先进工法(如逆作法、跳仓法)或高效设备(如电动工程机械、变频塔吊)可显著降低能耗,CF<1;反之,采用落后工艺则CF>1。(3)管理水平修正因子(CF<sub>mgmt</sub>):优秀的项目管理能减少机械闲置、优化运输路线、杜绝浪费,从而降低实际排放,CF<1。(4)材料替代修正因子(CF<sub>material</sub>):使用低碳建材(如高炉矿渣水泥、再生骨料)虽不影响施工过程本身的能耗,但会影响建材相关碳排放的计算,可在计算Q×EF后乘以此因子进行调整。动态修正因子可通过专家打分法、层次分析法(AHP)或机器学习方法,基于历史项目数据进行标定。

## 2.3 模型实施流程

项目分解:依据施工图纸和进度计划,将整个工程分解为若干分部分项工程。

识别CEAU:针对每个分部分项工程,识别出所有相关的碳排放活动单元。

数据采集:通过BIM、IoT、定额、台账等多种渠道,收集每个CEAU的量化指标Q。

参数匹配:为每个CEAU匹配相应的标准排放因子EF和动态修正因子CF。

计算与汇总:代入模型公式,计算每个CEAU的碳排放量,并逐级汇总得到总排放量。

敏感性分析:识别对总排放量影响最大的关键CEAU,为后续减排提供靶向。

## 3 施工阶段碳减排途径分析

### 3.1 技术创新路径

#### 3.1.1 推广绿色低碳建材与部品

通过提高建材的本地化采购率,可以有效缩短运输半径,直接削减运输环节的碳排放。同时,扩大装配式建筑的应用规模,能够将大量高能耗、高排放的施工作业转移到环境可控的工厂内完成,这不仅能显著提升材料利用率、减少建筑垃圾,更能从根本上降低现场施工的强度和能耗。此外,积极研发与应用新型低碳胶凝材料,例如利用粉煤灰、矿渣微粉等工业固废部分替代传统高碳排的水泥,可以从源头上大幅降低混凝土制品的隐含碳,为整个建筑行业的绿色转型提供坚实的材料基础。

#### 3.1.2 推动施工装备电气化与智能化

在电网条件和项目特点允许的工地上,应大力推广使用电动挖掘机、电动装载机、电动搅拌车等新能源工程机械,以实现现场作业的“零排放”,彻底消除移动机械的直接碳排放。与此同时,借助人工智能和大数据技术,开发并应用智能调度与监控系统,可以对工地上的所有机械设备进行全局优化,动态规划最优作业路径,减少设备间的相互等待和空驶时间。通过远程实时监控,管理人员还能及时发现并纠正操作人员的高能耗习惯,将节能降耗的理念贯穿于每一个操作细节之中。

#### 3.1.3 优化施工工艺与组织

采用如跳仓法替代传统的后浇带工艺,可以减少模板和支撑体系的材料用量,从而降低相关建材的生产和运输排放。运用逆作法施工,则能有效缩短整体工期,相应地减少临时设施的运行时间及其伴生的碳排放<sup>[3]</sup>。进一步发展模块化、集成化技术,将机电管线、卫浴、厨房等功能单元在工厂内高度集成后整体吊装,能够极大地减少现场的交叉作业和返工现象,不仅提升了建造效率和质量,也同步降低了全过程的碳足迹,实现了效率与环保的双赢。

### 3.2 精益管理路径

#### 3.2.1 构建碳排放全过程管理体系

首要任务是构建覆盖项目全周期的碳排放管理体系。这意味着需要将碳排放控制提升到与成本、进度、质量同等重要的战略高度,设定明确的碳排放预算和考核指标,并将其融入日常的项目管理流程之中。在此基础上,应广泛应用BIM与碳管理平台的集成技术,在三维可视化的BIM模型中动态嵌入碳排放数据,真正实现“所见即所排”,为施工方案的比选优化、过程中的实时监控以及竣工后的绩效评估提供强大的数字化支持,使碳管理变得直观、透明且可操作。

#### 3.2.2 强化供应链协同管理

项目方应致力于建立绿色供应链,要求上游供应商提供产品的环境产品声明(EPD),披露其碳足迹信息,并在采购决策中优先选择低碳产品,从源头上把控项目的碳排放水平。同时,通过与物流服务商进行深度合作,推行集中配送、共同配送等先进物流模式,可以显著提高运输车辆的满载率,有效减少无效运输里程,从而在保障供应的同时最大限度地降低物流环节的碳排放。

#### 3.2.3 提升人员意识与技能

应系统性地开展面向一线工人和管理人员的碳管理培训,普及碳排放知识,阐明其对环境和企业发展的深远影响,培养其节能降耗的操作意识和良好习惯。配套设立合理的激励机制,对那些在实践中提出有效减排建议或取得显著成效的团队与个人给予表彰和奖励,能够充分激发全员参与碳减排的积极性和创造性,将绿色理念内化为企业文化的一部分。

### 3.3 政策与市场驱动路径

#### 3.3.1 完善法规标准体系

在法规标准层面,国家和行业主管部门应加快完善相关体系,尽快制定并发布施工阶段碳排放核算的统一标准或指南,规范测算方法和边界,确保不同项目间碳排放数据的可比性。同时,可以考虑推行强制性的碳信息披露制度,要求大型公共建筑或特定规模以上的商业项目,在竣工验收阶段提交详尽的施工阶段碳排放报告,以此增强企业的社会责任感和透明度,形成良性的市场竞争环境。

#### 3.3.2 创新经济激励与约束机制

在经济杠杆方面,应积极探索将建筑业纳入全国碳排放权交易市场的可行性,或对碳排放强度超标的项目

征收碳税或附加费,利用市场的无形之手倒逼企业主动寻求减排技术和管理方案<sup>[4]</sup>。反之,对于积极采用先进减排技术并取得实效的项目,政府应通过绿色金融工具,如提供低息贷款、税收减免或专项补贴等方式,给予实实在在的经济激励,降低企业绿色转型的初期成本和风险,形成“谁减排、谁受益”的良性循环。

#### 3.3.3 加强示范引领与能力建设

政府可以通过资金引导和政策扶持,精心打造一批“近零碳工地”的示范项目,系统总结其在技术集成、管理创新和政策应用等方面的成功经验和技術路径,形成可复制、可推广的模式,为全行业提供标杆和样板。行业协会和科研机构则应牵头构建一个覆盖全国、分类精细的行业碳数据库,持续收集、整理并定期更新关于建材、机械、工艺等各方面的碳排放因子,为全行业的碳核算与管理提供权威、便捷的公共服务,从而全面提升我国建筑业的绿色低碳发展水平和国际竞争力。

## 4 结语

本文聚焦建筑工程施工阶段碳排放问题展开系统性研究。先全面解析施工阶段四大类碳排放源,为精准测算打基础。接着创新构建融合“清单法”与“过程分析法”优势、引入动态修正因子的精细化测算模型,结合现代信息技术,能更真实细致反映项目实际碳排放水平。在此基础上,从技术创新、精益管理、政策驱动三维度,提出涵盖绿色建材、装备升级等多方面的系统性减排途径。研究表明,施工阶段在建筑生命周期占比小但减排潜力大,见效快、可操作性强。未来,数字化、智能化深度融合将推动碳排放管理精细化、自动化。本研究构建的模型与提出的路径,能为建筑企业践行绿色发展、政府部门制定“双碳”政策提供决策支持,助力建筑业高质量发展。

## 参考文献

- [1]林源.建筑工程施工阶段减碳措施与碳排放管理分析[J].散装水泥,2025,(01):7-9.
- [2]胡海涛,王建平,魏宏亮.建筑工程施工阶段碳排放计算方法适用性分析[J].绿色建筑,2024,16(02):125-128.
- [3]马莹.建筑工程施工阶段碳排放研究进展[J].山西建筑,2023,49(23):23-28.
- [4]姜茜.低碳视角下建筑工程施工阶段碳排放管理研究[D].新疆大学,2023.