

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.077



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基于挣得碳值的施工现场碳排放追踪模型

宋广翰^a, 卢昱杰^{a,b}, 王娜^a, 李佩娴^{c,d}

(同济大学 a. 土木工程学院; b. 工程结构性能演化与控制教育部重点实验室; c. 建筑与城市规划学院; d. 高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 土木工程施工过程中温室气体排放集中且强度大, 亟需监测和控制其环境绩效。然而, 当前施工碳排放评估多在施工前或竣工后开展, 很少关注施工过程中环境绩效监测问题。基于施工定额理论、物联感知技术及挣值管理模型, 开发了挣得碳值管理(earned carbon value management, ECVM)碳绩效评估模型, 用于评估项目施工过程中的碳排放绩效, 提升施工场地碳排放管理的精度和效率。该模型将施工碳排放与工程完成量、资源消耗量关联, 提出 3 个关键参数和 4 个关键指标。将模型应用于上海市某建筑主体工程项目, 评估发现, 在施工进行至第 20 天时, 项目的碳排放偏差(emission variance, EV)为 $-105.46 \text{ kgCO}_2\text{e}$, 而施工进度(schedule variance, SV)偏差为 $-215 \text{ kgCO}_2\text{e}$, 表明当前施工进度延误, 碳排放超出了配额值。然而, 当施工进行至第 30 天时, 项目的 EV 和 SV 分别为 -2603.18 、 $555.39 \text{ kgCO}_2\text{e}$, 表明经过适度纠偏后, 施工进度控制达到了良好的效果, 但其碳排放仍然超出了配额值, 还需进一步采取碳排放纠偏措施。案例表明, ECVM 能在施工过程中分析施工进度与碳排放之间的关系, 并根据碳排放绩效指标分析偏差产生的原因, 提出针对性的纠偏措施, 具有通用性, 可用于任何施工项目的碳排放管理。

关键词: 施工碳排放; 挣得碳值; 施工进度; 纠偏管理; 施工机具

中图分类号: TU71; X506 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)04-0172-11

Carbon emission tracking model for construction sites based on earned carbon values

SONG Guanghan^a, LU Yujie^{a,b}, WANG Na^a, LI Peixian^{c,d}

(a. College of Civil Engineering; b. Key Laboratory of Performance Evolution and Control for Engineering Structures of Ministry of Education; c. College of Architecture and Urban Planning; d. China Key Laboratory of Ecology and Energy-saving Study of Dense Habitat, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: Carbon emissions from construction sites exhibit distinct traits of spatial concentration and temporal intensity, which underscores the pressing need for effective monitoring and regulation of their environmental impacts. However, many construction site carbon assessments are carried out before or after project

收稿日期: 2023-03-24

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3801700); 国家自然科学基金(52078374、52108090)

作者简介: 宋广翰(1989-), 男, 博士生, 主要从事低碳建造与废弃物管理研究, E-mail: 20240132@lut.edu.cn。

卢昱杰(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: lu6@tongji.edu.cn。

Received: 2023-03-24

Foundation items: National Key R & D Program of China (No. 2022YFC3801700); National Natural Science Foundation of China (Nos. 52078374, 52108090)

Author brief: SONG Guanghan (1989-), PhD candidate, main research interests: low-carbon construction and solid waste management, E-mail: 20240132@lut.edu.cn.

LU Yujie (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: lu6@tongji.edu.cn.

completion, with little attention paid to monitoring environmental performance during the construction process. This paper develops a performance assessment model called Earned Carbon Value Management (ECVM) based on construction quota theory, internet of things technology and earned value theory to assess the performance of carbon emissions during construction and improve the accuracy and efficiency of the carbon emissions management at construction sites. The model links construction carbon emissions with project completion volume and resource consumption, proposing three key parameters and four key indicators. The development model was applied to a construction project of a building in Shanghai, and the evaluation revealed that at the 20-day mark of construction, the project had an emission variance (EV) of $-105.46 \text{ kgCO}_2\text{e}$, while the schedule variance (SV) was $-215 \text{ kgCO}_2\text{e}$. This indicates significant delays in the current construction progress, with carbon emissions exceeding the allocated limit. However, when construction progressed to 30 days, the EV and SV of the project were $-2\,603.18 \text{ kgCO}_2\text{e}$ and $555.39 \text{ kgCO}_2\text{e}$, respectively. This demonstrates the positive impact of a moderate progress adjustment, resulting in effective control of the construction schedule. Nevertheless, the carbon emissions still exceeded the allotted limit, necessitating further measures to mitigate carbon emissions. The case demonstrates that ECVM can analyze the relationship between construction progress and carbon emissions during the construction process analyze the causes of deviations and propose targeted corrective measures based on carbon emission performance indicators. The model presented in this paper is generic and can be used for any construction project that aims to reduce carbon emissions.

Keywords: construction carbon emission; earned carbon value management; construction progress; deviation management; construction machinery

在“双碳”目标背景下,施工机具碳排放精细化管理逐渐成为新的研究热点。建筑物化过程中温室气体排放集中且强度大,已有相关研究强调评估这一阶段碳排放的重要性^[1-2]。建筑物化阶段的碳排放主要来源于建材消耗,其导致的隐含碳排放通常占整个物化阶段碳排放总量的92%~94%^[3],已有很多学者关注施工建材的碳排特征和减碳方案^[4-5]。除建材隐含碳排放外,施工机具的使用也将导致短时间内大量温室气体排放。此外,智能建造的兴起导致自动化施工机具和信息化管控设备的应用逐渐增加,进而加剧了施工场地的上述排放。相比物化碳排放和运维碳排放,尽管建筑全生命周期由施工机具产生的碳排放占比较小,但面对当前中国基础设施不完善、还需进行长期投资建设的大背景,深入研究该类型碳排放特征、挖掘减排潜力并提出切实可行的减碳方案十分必要。

施工现场碳排放主要是由施工机具消耗能源所致,其碳排放量不仅受工程量的影响,还受到机具性能、台班安排、耗能类型等方面的影响。实现施工现场碳排放精细化管理的前提是实时量化评估施工碳排放量。当前业界多关注施工前的碳排放配额和竣工后的碳排放结算,但对于施工过程中的碳排放评估关注不足。碳排放配额多根据工程量与施工定额进行估算,适用于施工前建设单位与设计单位对碳排放的前瞻把控^[6]。碳排放结算多根据项目能源消耗统计清单进行计算,适用于建设

单位和施工单位对竣工项目碳排放的总结评估^[7]。施工过程碳排放关注不足的主要原因是难以实时获取能源消耗清单。随着信息技术的发展,基于信息物理系统(cyber-physical systems, CPS)的施工场地实时能耗数据感知传输系统可用于施工场地碳排放的监测^[8]。在实时监测的基础上,挖掘实际碳排放量与施工场地资源消耗量、工程产出量、施工进度与碳排放配额量等要素间的耦合关系有助于实时掌握施工碳排放态势,并针对性采取相关减碳措施。

基于上述背景,笔者结合施工定额理论、物联网感知技术及挣值管理模型开发了一个针对施工碳排放与工程进度的绩效评估模型。该模型将施工碳排放与工程完成量、资源消耗量关联,提出3个关键参数和4个关键绩效指标。该模型可作为动态评估碳排放的工具,可用于提升施工场地碳排放管理的精度和效率。

1 相关研究

1.1 施工碳排放核算

碳排放核算方法通常包括投入产出法、实测法和碳排放系数法。投入产出法是一种自上而下的方法,需对投入和产出数据进行全面统计,具有较高的时间与工作成本^[7],且其结果不确定性偏高、难以对细节过程进行针对性分析^[9],适用于建筑行业等宏观尺度的碳排放估算^[10-11]。实测法是指采用标

准计量工具对碳源实时监测获取碳排放的方法。实测法的监测结果理论上最接近碳排放实际值,但其对检测实体的代表性和精确性都有较为苛刻的要求,且其检测成本相对高昂^[12]。碳排放系数法的计算方法相对简单,适用范围最广泛,可应用于建筑全寿命周期内各个阶段的测算^[13]。综合考虑上述3种方法的优点和局限性,本研究采用碳排放系数法进行施工碳排放量的核算。

碳排放系数法的核心是能准确获取施工活动数据清单。参考国际政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)提供的计算方法,碳排放系数法可以理解为活动数据与碳排放因子的乘积。在施工碳排放计算过程中,活动数据清单主要是指施工过程中能源消耗清单。根据消耗时间,能源消耗清单可以划分为应用于施工前估算阶段的定额清单、应用于施工期间的近实时消耗清单和应用于竣工阶段的能源消耗结算清单。

1) 定额清单。施工定额是指在合理的施工条件下,以工序为测定对象而规定的完成单位合格产品所需消耗的人工、材料和施工机具台班标准数量。Fang等^[6]提出了基于定额的碳排放追踪模型,用于帮助施工管理者确定低碳施工方法与运输计划,最大限度减少了施工阶段碳排放。

2) 消耗清单。施工期间材料消耗清单与竣工阶段的结算清单多通过人工统计等传统方式获取,该方式需大量的人力和时间成本,且统计细粒度较低。已有学者试图使用CPS等信息技术手段进行施工活动数据的自动化近实时统计。例如,Li等^[14]提出了一种基于YOLOv3检测器的深度学习方法,通过图像自动检测和计数统计施工场地钢筋消耗数量。Liu等^[15-16]应用CPS实时感知施工过程中的机具能耗数据,进而核算并可视化追踪施工场地碳排放。

由于工程设计和施工实践的不确定性、碳排放测量误差等原因,定额碳排放和实测碳排放之间的偏差难以避免。及时评估碳排绩效偏差并开展针对性纠偏举措对于施工场地碳排放的精细化管理至关重要。

1.2 基于挣值法的碳排放管理

挣值管理法(earned value management, EVM)是一种将项目成本和进度进行集成管理和控制的项目管理方法。EVM将时间尺度信息依据一定的规则转化为货币尺度,用同一套货币指标系统来系统度量项目进度和项目成本绩效,是表征绩效差距

的有力工具,广泛应用于项目进度和成本的监测和控制^[17-19]。

已有研究试图将EVM扩展至项目施工的温室气体管理领域。Abdi等^[20]基于EVM逻辑开发了一个衡量项目温室气体绩效指标模型,在项目执行阶段,项目管理人员应用该模型可实现施工场地环境性能监测和控制。不过该研究缺乏具体的方法论细节,例如没有详细论述对模型有效性至关重要的数据收集方法等核心信息。Kim等^[21]利用EVM开发了一个集成CO₂、成本与进度管理(integrated CO₂, cost and schedule management, ICCSM)的系统,便于管理人员根据施工进度对碳排放和成本进行调度、监测、评估和预测。上述系统的具体实现和操作流程不明确,仍需进一步探索和研究。Liu等^[22]开发了基于挣值管理理论的绿色价值管理(earned green value management, EGVM)模型,用于改善预制和模块化建筑项目的碳排放管理。不过该模型基于传统方式采集施工过程中的活动数据,导致其施工过程中的碳排放监测与绩效评估结果相对滞后,不利于管理者即时评估、进而采取针对性减碳措施。上述基于挣值逻辑的碳排放管理模型有效应用的前提是能高效且合理地预配碳排放额度和近实时顺利追踪项目进度百分比及碳排放量。总体而言,上述针对施工进度和碳排放综合度量的研究还不充分,特别是预期碳排放配额和实测碳排放的数据获取体系还不完善。

基于上述背景,基于EVM逻辑,结合施工定额理论与物联感知技术开发了一个碳排偏差近实时评估模型,以实现施工进度、碳排放水平的协同管理与精细化管控。

2 方法

2.1 系统边界

基于“三个范围”的相关逻辑确定了施工现场碳排放核算的系统边界。“三个范围”的概念于2021年首次被正式引入到《温室气体议定书》(Kyoto Protocol)的企业报告准则中,成为评估企业温室气体排放的常用方法。范围1排放是指来自实体拥有或控制的资源导致的直接排放,范围2排放是指实体外购能源所导致的间接排放;范围3排放是指实体价值链中所发生的间接排放。对应建筑物化过程,本研究认为,Kyoto Protocol的范围1是指施工现场挖掘机、运输车等机具消耗燃料型能源所导致的直接碳排放;范围2是指塔吊、电梯等应用电力能源所导致的间接碳排放;范围3是指建材生产、建材

和机具场外运输等导致的间接碳排放。主要关注范围1与范围2的施工碳排放,即燃料型能源消耗导致的直接碳排放(范围1)和过程性能源消耗所导致的间接性排放(范围2)。为了聚焦于施工现场的碳排放,不包括建材生产和建材、机具等场外运输、人员安排等所导致的碳排放,也不包括施工现场工作人员办公、生活所导致的碳排放(范围3)。

2.2 模型开发

图1展示了挣得碳值管理(ECVM)的绩效评估模型框架。该模型由3部分组成:基于施工定额与工程量开展施工碳配额估算;基于物联感知技术进行施工现场能-碳近实时测算;基于EVM逻辑进行碳排偏差分析。

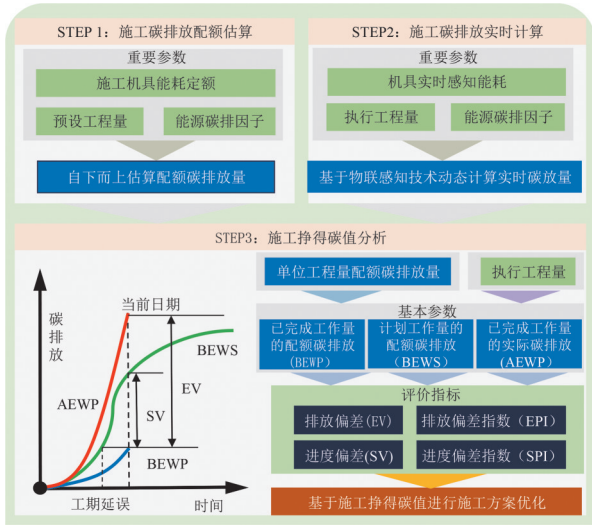


图1 基于挣值管理的施工碳排放追踪管理模型框架

Fig. 1 A model framework for managing construction carbon tracking based on earned value management

2.2.1 施工碳排放配额

施工碳排放配额基于施工定额理论通过自下而上的方式进行估算。由于施工期碳排放与工程量、工程进度、特定类型施工机具在单位时间内完成的工作与其材料消耗密切相关,因此,选取时间定额进行活动数据统计。工作分解结构(work breakdown structure, WBS)可以将施工项目工作细化到分部分项工程并基于分部分项工程进行碳定额^[23]。施工现场的碳排放配额基于工程量、机具消耗定额和施工机具所消耗能源的碳排放因子确定,其中计划单位工程的碳定额(carbon quota for unit work scheduled, CQUWS)计算方法如式(1)所示。

$$CQUWS_p = \sum_m QM_{p,m,i} \times QC_{m,e} \times EF_{m,e} \quad (1)$$

式中: $CQUWS_p$ 为完成单位工程量分部分项工程 p 所需的碳配额(carbon quota); $QM_{p,m,i}$ 为完成单位工程量分部分项工程 p 所涉及的 m 种类施工机具的定

额台班数,亦可称为 m 种类施工机具时间定额; $QC_{p,m,e}$ 为应用于分部分项工程 p 的 m 种类机具的能耗 e 定额; $EF_{m,e}$ 为机具 m 消耗能源 e 的碳排放因子。分部分项工程根据具体施工内容会有多样化的工程量统计单位,例如土方工程多以体积单位“ m^3 ”进行施工量统计,而钢筋工程多以质量单位“ t ”或计量单位“根”进行统计。

可基于施工作业完成工程量和 $CQUWS_p$ 来估算相关分部工程在该施工阶段的碳排放配额量,如式(2)所示。

$$BEWS_{p,t} = CQUWS_p \times W_{p,t} \quad (2)$$

式中: $BEWS_{p,t}$ 为施工至 t 时刻时计划完成项目 p 工程量的预算碳排放(budgeted emission for work scheduled, BEWS), $W_{p,t}$ 是指至 t 时刻时分部工程 p 施工完成工程量。

对所有分部分项工程的碳概算求和可确定施工碳排放总量和任何时段的碳排放量,如式(3)、式(4)所示。

$$BEWS_{total,t} = \sum_p BEWS_{p,t} \quad (3)$$

$$BEWS_{total} = \sum_p CQUWS_p \times QW_p \quad (4)$$

式中: $BEWS_{total,t}$ 为施工至 t 时刻时建筑施工碳预算量; $BEWS_{total}$ 为建筑施工碳预算量总量; QW_p 为分部工程 p 的预计工程总量。

2.2.2 近实时碳排放测量

施工碳排放量基于物联感知技术获取的能源近实时消耗量和该类能源碳排放因子进行推算。式(5)表示了至 t 时刻完成分部分项工程的实际碳排放量(actual emission for work performed, AEWP)。

$$AEWP_{p,t} = \sum_m AE_{m,e,t} \times EF_{m,e} \quad (5)$$

式中: $AEWP_{p,t}$ 为施工至 t 时刻完成项目工程量的实际排放; $AE_{m,e,t}$ 为施工至 t 时刻分部工程 p 使用 m 种类机具所消耗的 e 种能源的量。

对某一时间段所有分部分项工程的碳排放量求和就可以确定该时段碳排放总量,如式(6)所示, $AEWP_{total,t}$ 是指施工至 t 时刻时项目的碳排放总量。

$$AEWP_{total,t} = \sum_p AEWP_{p,t} \quad (6)$$

2.2.3 进度-碳排放协同分析

参照挣值理论,采用计划完成项目工程量的预算碳排放(budgeted emission for work scheduled, BEWS)、已完成项目工程量的预算碳排放(budgeted emission for work performed, BEWP)、已完成项目工程量实际排放(actual emission for work performed, AEWP)3个参数来评估施工项目的碳排放与进度的关系。BEWP也被理解为项目的挣得

碳值(earned carbon value, ECV), 可以以分部分项工程施工完成量(work performed)和 CQUWS_p 来确定该工程在特定时间点 t 的 BEWP。

$$\text{BEWP}_{p,t} = \text{ECV}_{p,t} = \text{CQUWS}_p \times \text{AP}_{p,t} \quad (7)$$

式中: $\text{BEWP}_{p,t}$ 为实际施工至 t 时刻时分部工程 p 的碳预算量; $\text{AP}_{p,t}$ 为施工至 t 时刻时分部工程 p 实际完成工作量。

求和所有分部工程 t 时间点的 BEWP 值可以确定整个施工项目 ECV 量。

$$\text{BEWP}_{\text{total},t} = \sum_p \text{BEWP}_{p,t} \quad (8)$$

式中: $\text{BEWP}_{\text{total},t}$ 为施工至 t 时刻时完成工程量的预期配额碳排放。

基于挣值逻辑设置 4 个评价指标:

$$\text{EV}_t = \text{BEWP}_t - \text{AEWP}_t \quad (9)$$

$$\text{EPI}_t = \frac{\text{BEWP}_t}{\text{AEWP}_t} \quad (10)$$

$$\text{SV}_t = \text{BEWP}_t - \text{BEWS}_t \quad (11)$$

$$\text{SPI}_t = \frac{\text{BEWP}_t}{\text{BEWS}_t} \quad (12)$$

式中: EV_t 为施工至时间 t 时的碳排放偏差(emission variance, EV)。当 $\text{EV}_t > 0$ 时, 表示 t 时刻的实际碳排放少于计划碳排放, 反之则表示实际碳排放高于计划排放。 EPI_t 为施工至 t 时刻的碳排放绩效指数(emission performance index, EPI); SV_t 为施工至时间 t 时的进度偏差(schedule variance, SV)。当 $\text{SV}_t > 0$ 时, 表示 t 时刻施工进度超前, 反之则施工进度延误。 SPI_t 指检查时间 t 时刻进度绩效指数(schedule performance index, SPI)。

项目管理人员首先可以基于 AEWP、BEWS 和 BEWP 三个碳排放参数绘制挣得碳值曲线, 然后基于 4 个评价指标(式(9)~式(12))来判断项目进度与碳排放的关系(如表 1 所示), 进而优化纠偏管理决策, 实现进度-碳排放协同精细化管理。共有 2 个评判内容: 碳排放偏差和施工进度偏差。碳排放偏差可以细分为碳排超标和碳减排, 其中碳排放超标表示实际碳排放大于配额值, 即 AEWP 大于 BEWP, 对应于 $\text{EV} < 0$; 碳减排表示实际碳排放小于配额值, 即 AEWP 小于 BEWP, 对应 $\text{EV} > 0$ 。施工进度偏差可以细分为过于超前、超前、延误、过于延误 4 种类型: 1) 若 BEWP 大于(小于) BEWS, 且 AEWP 介于 BEWP 和 BEWS 之间, 则表示施工进度过于超前(过于延误); 2) 若 BEWP 大于(小于) BEWS, 且 AEWP 小于(大于) BEWS, 则表示施工进度超前(延误); 3) 若 BEWP 大于(小于) BEWS, 且 AEWP 大于(小于) BEWP, 则表示施工进度超前(延误)。基于碳排放和进度的绩效评估, 总结了相

关的纲领性纠偏措施(表 1)。碳排放纠偏措施的底层逻辑: 采取措施可使实际单位工程量的碳排放等于甚至小于单位工程量计划碳排放。获取到具体项目的相关细节数据后, 即可将其纲领性文件拓展为具体针对措施。

3 案例实证分析

3.1 案例介绍

以上海某房建项目的主体工程施工内容为案例验证挣得碳值模型的实用性。案例为一商业综合楼, 共 6 层, 总建筑面积为 5 747.05 m², 建筑主体高度为 24.12 m, 结构类型为框架结构。主体工程可分为砌体工程、混凝土工程、钢筋工程和模板工程。主体工程项目于 2022 年 8 月 1 日开始施工, 预设工期 62 d, 其中 1 层预设 12 d, 其他楼层每层预设 10 d。

3.2 数据收集

采集了施工至第 37 天的作业工程量和能源消耗等信息。基于挣得碳值模型所涉及的数据包括: 1) 施工机具的能耗定额; 2) 能源碳排放因子; 3) 施工机具台班数据; 4) 碳配额; 5) 能源消耗量; 6) 施工进度。

1) 施工机具能耗定额。施工机具能耗定额是指一台机具工作一个台班(8 h)所消耗的能量。施工机具能耗定额一般可通过建设工程预算定额标准体系获取。该标准体系通常由各省住房和城乡建设厅基于当地经济发展现状制定, 每 5 年更新一次。表 2 从《2018 年全国统一施工机械台班费用定额》表中筛选的施工机具能耗定额。

2) 能源碳排放因子。以往的研究多假设化石燃料能 100% 充分燃烧(IPCC, 2006)^[24], 为了提高碳排放测算精度, 采用《省级温室气体清单编制指南》中的方法对化石能源的碳排放因子进行修正^[25]。

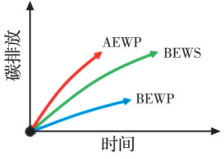
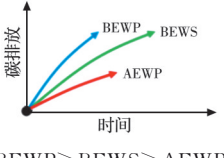
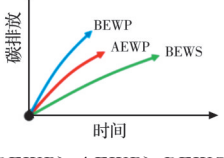
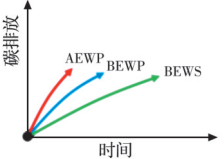
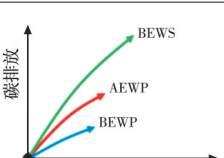
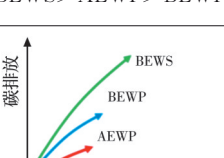
$$\text{EF}_{m,e} = \frac{44}{12} \times \text{CC}_e \times \text{OF}_{m,e} \times \text{NCV}_e \quad (13)$$

式中: CC_e 为 e 类能源的单位热值的碳含量; NCV_e 为 e 类能源单位能耗的热值; $\text{OF}_{m,e}$ 为 e 类能源在 m 类机具中的碳氧化率, 当无法获得实测数据时, 一般默认油品类能源的碳氧化率取值为 98%, 气体燃料的碳氧化率取值为 99%^[25]。对于电力能源碳排放因子, 采用由中国国家生态环境部 2022 年发布的全国电网平均排放因子^[26]。表 3 为涉及的能源特征和相关碳排放因子。

3) 施工机具台班数据和碳配额。基于《上海市建筑和装饰工程概算定额表(SH01-21—2020)》、施工项目设计工程量(总建筑面积为 5 747.05 m²)、规

表 1 挣得碳值法参数分析与对应举措

Table 1 Earned carbon value analysis and management measures

编号	图型	碳排放偏差	施工进度偏差	措施
1	 <p>AEWP>BEWS>BEWP</p>	$EV<0$ 实际碳排放大于配 额值,即碳排超标	$SV<0$ 实际进度小于计划进 度,即进度延误	增加熟练机械工人投入,规范施工人员设备操作过 程,减少设备空转和无效作业,提高清洁能源应用比 例,降低电力浪费,以降低单位实际碳排放量 增加人员投入,优化施工方案,加强施工方案执行和 监控,提升施工进度
2	 <p>BEWP>BEWS>AEWP</p>	$EV>0$ 实际碳排放小于配 额值,即有减碳	$SV>0$ 实际进度大于计划进 度,即进度超前	达到进度提前、节能减排的理想状态,维持现状
3	 <p>BEWP>AEWP>BEWS</p>	$EV>0$ 实际碳排放小于配 额值,即有减碳	$SV>0$ 实际进度大于计划进 度,即进度(过于)超前	控制施工进度,提升项目规划执行水平 保持现有单位工程量实际碳排放量
4	 <p>AEWP>BEWP>BEWS</p>	$EV<0$ 实际碳排放大于配 额值,即排超标	$SV>0$ 实际进度大于计划进 度,即进度超前	增加熟练机械工人投入,规范施工人员设备操作过 程,减少设备空转和无效作业,提高清洁能源应用比 例,降低电力浪费,以降低单位量实际碳排放量 达到进度提前的理想状态
5	 <p>BEWS>AEWP>BEWP</p>	$EV<0$ 实际碳排放小于配 额值,即碳排放超标	$SV<0$ 实际进度小于计划进 度,即进度(过于)延误	增加熟练机械工人投入,规范施工人员设备操作过 程,减少设备空转和无效作业,提高清洁能源应用比 例,降低电力浪费,以降低单位量实际碳排放量 增加大量人员投入,优化施工方案,提升项目规划执 行水平,追赶工期
6	 <p>BEWS>BEWP>AEWP</p>	$EV>0$ 实际碳排放小于配 额值,即有减碳	$SV<0$ 实际进度小于计划进 度,即进度延误	增加人员投入,优化施工方案,加强施工方案执行和 监控,提升施工进度 保持现有单位量实测碳排放

划作业周期等参数,应用专业工程预算软件预测了砌体工程、混凝土工程、钢筋工程和模板工程所涉及施工机具的台班数。在确定施工机具台班量后,结合获取的施工机具能耗定额、能源碳排放因子等参数,即可获得相关作业工程的碳配额值,具体计算公式见式(14)。

$$Q_{m,c}=WS_m\times Q_{m,e}\times EF_e\tag{14}$$

式中: $Q_{m,c}$ 为 m 机具的碳排放定额; WS_m 为 m 机械的预期台班(work shift)量; $Q_{m,e}$ 为 m 机械的能耗定额; EF_e 为 m 机械消耗的 e 能源的碳排放因子。

案例所涉施工机具碳排放定额的求和值即为

相关项目碳定额总值。表4为案例所涉相关机具名称、机具台班数及其碳配额值。结合上述碳配额值和预期作业完成百分比等参数,应用式(1)和式(2)即可计算单位工程量碳配值和对对应时间点的碳配值。

4)基于物联感知的能源消耗量。案例所涉机具燃烧能源和电力能源分别通过无线传感器和智能电表实时动态采集,然后通过通信网络和云端服务器等CPS设备实时传输监测数据。图2记录了上述感知设备采集的施工至第37天时各类能耗的消耗量。其中,图2(a)是由智能电表采集记录的所有

表 2 部分施工机具能耗定额

Table 2 Energy consumption quotas for some construction machinery

施工机具	机具型号	台班能耗定额		
		汽油/ kg	柴油/ kg	电/ (kW·h)
灰浆搅拌机	搅拌容量 200 L			8.61
钢筋调直机	直径 14 mm			14.91
钢筋切断机	直径 40 mm			32.1
混凝土输送泵	输送量 30 m ³ /h			202.37
混凝土振捣器	插入式			4.0
电动卷扬机	单筒牵引 50 kN			31.5
钢筋切断机	直径 40 mm			32.1
钢筋弯曲机	直径 40 mm			12.8
对焊机	容量 75 kVA			122.9
交流电焊机	容量 30 kVA			87.2
电渣焊机	电流 1 000 A			147
木工圆锯机	直接 500 mm			24
汽车式起重	提升质量 5 t	23.3		
载货汽车	转载质量 6 t		33.24	

表 3 能源碳排放因子

Table 3 Carbon emission factors for energy

能源	CC_e / (g/MJ)	NCV_e / (MJ/t)	$OF_{m,e}/\%$	$EF_{m,e}$
汽油	18.90	43.070	98	2.925 kg CO ₂ e/kg
柴油	20.20	42.652	98	3.096 kg CO ₂ e/kg
电力				0.581 0 kg CO ₂ e/(kW·h)

电力机具能消耗量,而图 2(b)是由无线传感器采集记录的所有耗汽油设备的能源消耗量。相比之前,模板和木材的场地外运输是施工第 1 天通过柴油货车运输至施工场地,核算其碳排放总量并基于作业

工程量均摊分析单位工程量的碳排放贡献值。基于该均摊单位工程量的碳排放贡献值和特定时间点作业工程量即可核算出该作业时间点的柴油基碳排放量(图 2(c))。

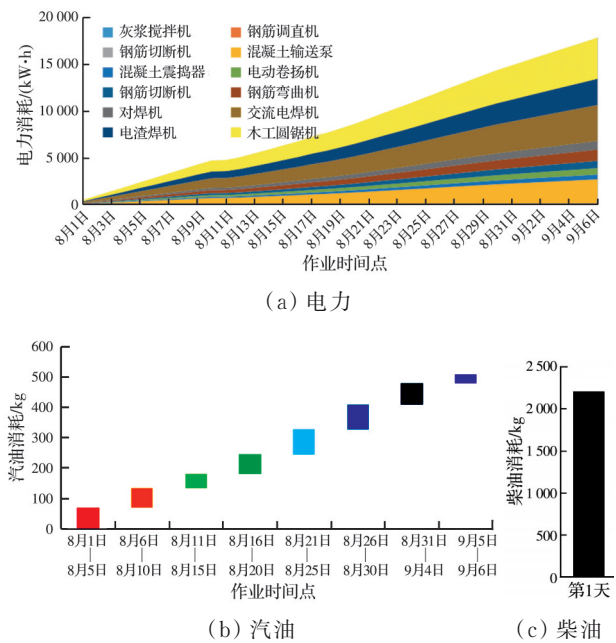


图 2 施工机具能耗监测

Fig. 2 Energy consumption monitoring of construction machines

5)施工进度。基于传统方法进行施工进度人工统计。尽管已有研究开发了面向饰面工程的智能进度评估模型^[27-28],但该类智能评估方法还未覆盖施工全领域。本研究目前基于传统方法进行施工进度人工统计,待施工进度智能评估技术全面发展后,可更新为施工进度智能评估,以提高其碳排

表 4 主体工程的台班设置与碳排配额

Table 4 Shift settings and carbon emission quota for the case project

分项工程	单元工程	施工机具	机具型号	预期其工程量/台班	能耗/(kW·h)	能耗/kg	碳配额量/(kgCO ₂ e)
砌体工程	砂浆生产	灰浆搅拌机	搅拌容量 200 L	11.679 6	100.61		58.46
	钢筋加固 (砌体内)	钢筋调直机	直径 14 mm	3.288	49.04		28.49
		钢筋切断机	40 mm	3.288	105.56		61.33
混凝土工程	混凝土泵送	混凝土输送泵	30 m ³ /h	20.320 8	4 212.58		2 447.51
	混凝土振捣	混凝土振捣器	插入式	214.550 4	857.15		498.00
钢筋工程	钢筋加工	电动卷扬机	单筒牵引 50 kN	35.540 4	1 119.52		650.44
		钢筋切断机	直径 40 mm	40.137 72	1 288.58		748.67
		钢筋弯曲机	直径 40 mm	153.881 28	1 970.44		1 144.82
	钢筋焊接	对焊机	75 kVA	12.513	1 537.81		893.47
		交流电焊机	30 kVA	72.079 56	6 284.99		3 651.58
		电渣焊机	电流 1 000 A	31.593 6	4 644.22		2 698.29
模板工程	模板加工	木工圆锯机	直接 500 mm	299.511 6	7 188.65		4 176.61
	模板运输	汽车式起重	提升质量 5 t	35.904		836.53	2 446.86
		载货汽车	转载质量 6 t	64.905 6		2 157.40	6 679.32

放核算的自动化水平水准。考虑到主体工程砌筑工程、混凝土工程、钢筋工程和模板过程施工类型交替进行,且施工类型存在差异,为了便于统计和类比,每5天统计一次主体工程作业工程量(图3),中间天数的工程量做插值处理。

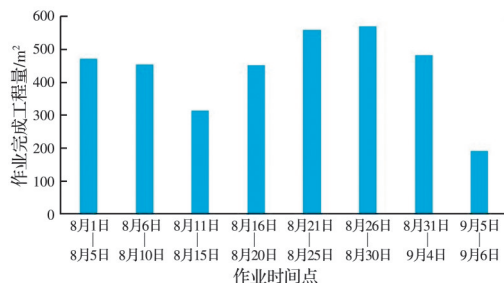


图3 主体工程完成工程量

Fig. 3 Quantity of work completed for main structure

3.3 挣得碳值分析

图4显示了应用ECVM模型分析的项目执行期间碳排放量和施工进度间的关系。施工至第20天,ECVM三参数关系为: $BEWS_{20} > AEWP_{20} > BEWP_{20}$,且同时 $EV_{20} = -105.46 \text{ kgCO}_2\text{e} < 0$ 。 $SV_{20} = -215 \text{ kgCO}_2\text{e} < 0$ 。上述参数关系符合表1中“编号5”的描述,说明当前施工进度过于延误,碳排放超标,亟需开展进度管控和碳控制等纠偏措施。施工管理团队通过“增加熟练机械工人投入、规范施工人员设备操作过程、减少设备空转和无效作业、提高清洁能源应用比例、降低电力浪费”等措施以提高单位碳排放(油耗)工程产出,同时通过“增加施工人员投入,优化人机配置”等措施提升项目规划执行水平,追赶工期,加快施工进度。赶工期至第30天时,ECVM三参数关系为: $AEWP_{30} > BEWP_{30} > BEWS_{30}$,且同时 $EV_{30} = -2603.18 \text{ kgCO}_2\text{e} < 0$, $SV_{30} = 555.39 \text{ kgCO}_2\text{e} > 0$ 。

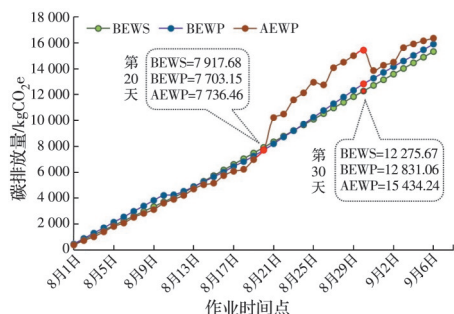


图4 主体工程挣得碳值分析

Fig. 4 Earned carbon value analysis for the main structure

该参数关系符合表1中“编号4”的描述,说明经过进度管控等纠偏措施后,项目施工进度超前,达到了良好的进度控制效果,但项目整体的碳控制措施实施仍存在不足,碳排放超过配额排放,因此还

需适当实施相关措施,纠偏碳偏差。

为了更深入地分析施工至第30天施工机具碳排放产生偏差的原因,对比了作业完成单位主体工程量相关施工机具的碳排放贡献。限于篇幅,仅展示8月21日—30日期间实测碳排放占比最大的4种施工机具的对比结果(图5),分别是木工圆锯机(17.5%)、交流电焊机(15.6%)、汽车式起重机(12.3%)和混凝土输送泵(10.6%)。

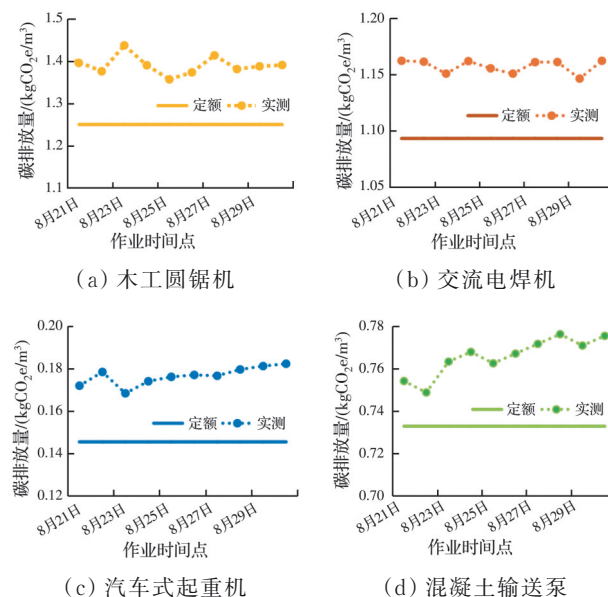


图5 作业单位工程量的机械碳排放定额和机械实测碳排放
Fig. 5 Mechanical energy consumption quota and actual consumption per unit of work quantity

结果显示,4种机具的实际单位工程量碳排值都不同程度高于配额碳排放。木工圆锯机的实测碳排值波动最大(图5(a)),偏差区域为5.56%~14.99%,调查发现,施工过程中有部分非专业工人基于工程进度需要参与了部分木材和木模板的加工,导致其对应单位工程量木工圆锯机的效率偏低、波动性大。另外,施工过程木模板损耗率偏高,重复使用少于预定施工方案的8次,进而引起用于加工木模板的木工圆锯机使用时间增长和单位主体工程量基于木工圆锯机的碳排放量增长。交流电焊机单位主体工程量的碳排放实测值和配额值间波动较小(图5(b)),都只是略高于配额值,偏差比例区域仅为4.86%~6.31%。汽车式起重机单位主体工程量的碳排放实测值普遍高于配额值(图5(c)),偏差较大,其比例区域达到18.28%~24.67%。调查发现,施工过程中存在起重机操作不当和空转等现象,这可能是碳排偏差较大的原因。混凝土输送泵的波动性和偏差都最小(图5(d)),偏差比例区域仅为2.18%~5.95%。此外,还发现汽车式起重机和混凝土输送泵单位主体工程量的实测碳排放呈

上升趋势。这是因为随着施工楼层的升高,由于重力作用,涉及提升工作的施工机具对应单位主体工程量能源消耗和碳排放呈增长趋势。也就是说,随着施工楼层的升高,单位主体工程量的碳排配额呈微增长趋势,须基于工程实践优化该阶段相关的碳配额值。

基于上述4类机械的碳排放绩效分析,认为亟需采取的碳排放-进度纠偏措施包括:1)抽调工程经验丰富、操作效率高的机具操作员替换当前操作人员,加强机具操作人员的培训和管理;2)加强每日上报作业制度建设,及时调整优化施工进度方案;3)应用信息技术手段加强施工机具效率的监控,提高现场施工机具的利用率,尽量减少空转时间,减少能源消耗;4)扩大清洁能源(电力)应用比例,将部分燃油机具替换为使用清洁能源的相应机具等;5)根据施工实践优化施工碳排配额值估算。

4 结论

量化施工场地碳排放量、动态评估配额碳排放和近实时计算碳排放的偏差有助于提高碳排放绩效、实现施工现场碳排放精细化管理,对建筑业碳减排意义重大。在此背景下,基于挣值逻辑开发了一个适用于建筑施工现场碳排放近实时追踪和精细化管理模型,其中,施工碳排放配额通过施工定额参数和施工进度量进行估算,而近实时碳排放量则基于物联感知技术监测的能源消耗量进行计算。最后,以上海某建筑施工场地为例,验证了模型的适用性。应用模型评估发现,施工至第20天时,项目 EV_{20} 为 $-105.46 \text{ kgCO}_2\text{e}$, 而 SV_{20} 为 $-215 \text{ kgCO}_2\text{e}$, 施工整体进度过于延误,碳排放超出了配额值。实施纠偏措施后,项目 EV_{30} 为 $-2603.18 \text{ kgCO}_2\text{e}$ (第30天), 而 SV_{30} 为 $555.39 \text{ kg CO}_2\text{e}$ (第30天)。表明实施进度纠偏措施后,达到了良好的进度控制效果,但其碳排放仍呈超排状态,还需再适当纠偏。评估了4种应用于案例项目的机具碳排放偏差绩效,其中汽车起重机单位主体工程量的碳排放偏差最大,偏差区间为 $18.28\%\sim 24.67\%$ 。而混凝土输送泵的碳排放偏差区间最小,仅为 $2.18\%\sim 5.95\%$ 。案例表明,ECVM可对案例项目施工过程中碳排放进行近实时计算,进而评估碳排放和施工进度偏差关系,为施工场地碳排放精细化管理提供数据支撑。

提出了一个系统、全面的施工过程碳排放动态管理模型ECVM,提高了施工场地碳排放管理效率和精度。应用ECVM不仅可以近实时测算施工过

程中分部分项工程-单体建筑-施工区域等多尺度的碳排放量,还能够基于施工配额的预期碳排放进行施工进度-碳排放偏差评估。相比于前人的研究^[20-22],开发的模型具备两大特点:1)ECVM更注重施工全过程的碳排放动态追踪,详细描述了施工前和施工过程中碳排放的数据采集、处理和绩效评估;2)首绘了“ECVM参数分析与对应纲领举措”清单,使用者结合开发模型评估结果和该清单可以快速分析判断施工场地碳排放趋势,并能快速映射出提纲性纠偏措施。

在“双碳”目标下,开发并应用ECVM进行施工过程碳排放管理具有很强的实践意义。1)施工过程碳排放追踪:项目管理者可基于ECVM模型来衡量特定时间段内的预期和实际碳排放量,进而评估碳排放和施工进度偏差程度,并采取相应的纠偏措施进行纠偏。2)施工项目碳排放管理:开发的模型不仅适用于项目施工前配额碳排放的规划,也可用于项目竣工后碳绩效的整体评估,更能基于碳绩效指数预测项目施工过程中的碳排放趋势。3)促进部门监管和控制:将ECVM模型应用于项目碳排放管理,有利于促进企业碳信息的披露、加强政府部门对施工项目碳排放的监管。4)此外,研究人员也可基于ECVM相关案例进行低碳措施优选及低碳方案智能推荐。

未来研究可从以下方面开展:首先,案例是基于人工、半人工的方式进行碳排放计算和偏差评估,未来可进一步提升信息采集的自动化水平,如基于计算机视觉的施工进度信息自动化采集,进而实现施工碳排放自动近实时自动计算,提高施工场地碳排放精细化管理效率。其次,模型不包括建筑材料消耗引起的隐含碳排放,若核算边界拓展至建筑材料,则需要调整挣得碳值模型的预期碳排放测算方法和建材消耗量的快速跟踪方法。

参考文献

- [1] AHN C R, LEWIS P, GOLPARVAR-FARD M, et al. Integrated framework for estimating, benchmarking, and monitoring pollutant emissions of construction operations [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2013, 139(12): A4013003.
- [2] RASDORF W, LEWIS P, MARSHALL S K, et al. Evaluation of on-site fuel use and emissions over the duration of a commercial building project [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2012, 18(2): 119-129.
- [3] 李静, 刘胜男. 装配式混凝土建筑物化阶段碳足迹评价研究[J]. 建筑经济, 2021, 42(1): 101-105.

- LI J, LIU S N. Research on carbon footprint assessment of prefabricated concrete in building stage [J]. Construction Economy, 2021, 42(1): 101-105. (in Chinese)
- [4] CHEN W L, YANG S Y, ZHANG X Z, et al. Embodied energy and carbon emissions of building materials in China [J]. Building and Environment, 2022, 207: 108434.
- [5] KANG G, KIM T, KIM Y W, et al. Statistical analysis of embodied carbon emission for building construction [J]. Energy and Buildings, 2015, 105: 326-333.
- [6] FANG Y, NG S T, MA Z D, et al. Quota-based carbon tracing model for construction processes in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 200: 657-666.
- [7] DING Z K, LIU S, LUO L W, et al. A building information modeling-based carbon emission measurement system for prefabricated residential buildings during the materialization phase [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 264: 121728.
- [8] 刘贵文, 杨浩, 傅晏, 等. 信息物理融合下的建筑施工现场碳排放实时监测系统[J]. 重庆大学学报, 2020, 43(9): 24-31.
- LIU G W, YANG H, FU Y, et al. Real-time monitoring system of carbon emission in construction site under the cyber-physical systems [J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(9): 24-31. (in Chinese)
- [9] SANDANAYAKE M, ZHANG G M, SETUNGE S. Environmental emissions at foundation construction stage of buildings-Two case studies [J]. Building and Environment, 2016, 95: 189-198.
- [10] HAWDON D, PEARSON P. Input-output simulations of energy, environment, economy interactions in the UK [J]. Energy Economics, 1995, 17(1): 73-86.
- [11] ZHANG X C, WANG F L. Hybrid input-output analysis for life-cycle energy consumption and carbon emissions of China's building sector [J]. Building and Environment, 2016, 104: 188-197.
- [12] BASTVIKEN D, WILK J, DUC N T, et al. Critical method needs in measuring greenhouse gas fluxes [J]. Environmental Research Letters, 2022, 17(10): 104009.
- [13] LI D Z, HUANG G Y, ZHANG G M, et al. Driving factors of total carbon emissions from the construction industry in Jiangsu Province, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276: 123179.
- [14] LI Y, LU Y J, CHEN J. A deep learning approach for real-time rebar counting on the construction site based on YOLOv3 detector [J]. Automation in Construction, 2021, 124: 103602.
- [15] LIU G W, CHEN R D, XU P P, et al. Real-time carbon emission monitoring in prefabricated construction [J]. Automation in Construction, 2020, 110: 102945.
- [16] LIU G W, YANG H, FU Y, et al. Cyber-physical system-based real-time monitoring and visualization of greenhouse gas emissions of prefabricated construction [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 246: 119059.
- [17] SUBRAMANI T, JABASINGH D S S. Analysis of cost controlling in construction industries by earned value method using Primavera [J]. International Journal of Engineering Research and Applications, 2014, 4(6): 145-153.
- [18] ANBARI F T. Earned value project management method and extensions [J]. IEEE Engineering Management Review, 2004, 32(3): 97.
- [19] KOKE B, MOEHLER R C. Earned Green Value management for project management: A systematic review [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 230: 180-197.
- [20] ABDI A, TAGHIPOUR S, KHAMOOSHI H. A model to control environmental performance of project execution process based on greenhouse gas emissions using earned value management [J]. International Journal of Project Management, 2018, 36(3): 397-413.
- [21] KIM J, KOO C, KIM C J, et al. Integrated CO₂, cost, and schedule management system for building construction projects using the earned value management theory [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 275-285.
- [22] LIU G W, HUANG R P, LI K J, et al. Greenhouse gas emissions management in prefabrication and modular construction based on earned value management [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2022, 148(6): 04022034.
- [23] 马骏. 建筑物化阶段CO₂排放及其不确定性分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(6): 209-218.
- MA J. CO₂ emission and its uncertainty analysis in the building stage [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(6): 209-218. (in Chinese)
- [24] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [EB/OL]. (2013-03-27). <https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.
- [25] 广东省生态环境厅. 广东省市县(区)级温室气体清单编制指南[EB/OL]. (2020-06-16). <http://gdee.gd.gov.cn/attachment/0/505/505999/3019513.pdf>.
- Department of Ecology and Environment of Guangdong Province. Guidelines for the preparation of greenhouse gas inventories at the city and county (district) levels in Guangdong Province [EB/OL]. (2020-06-16). <http://gdee.gd.gov.cn/attachment/0/505/505999/3019513.pdf>.
- [26] 生态环境部办公厅. 关于做好2022年企业温室气体排放报告管理相关重点工作的通知[EB/OL]. (2022-03-

- 15). https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202203/t20220315_971468.html.
- Office of the Ministry of Ecology and Environment. Notice on key tasks for managing enterprise greenhouse gas emission reporting in 2022 [EB/OL]. (2022-03-15). https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202203/t20220315_971468.html.
- [27] 卢昱杰, 仲涛, 魏伟, 等. 基于图像分割与轨迹追踪的室内饰面施工进度智能评估方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(1): 163-172.
- LU Y J, ZHONG T, WEI W, et al. Intelligent evaluation method of indoor finishing construction progress based on image segmentation and positional tracking [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(1): 163-172. (in Chinese)
- [28] WEI W, LU Y J, ZHONG T, et al. Integrated vision-based automated progress monitoring of indoor construction using mask region-based convolutional neural networks and BIM [J]. Automation in Construction, 2022, 140: 104327.

(编辑 王秀玲)