



公路工程建设阶段全生命周期碳排放智能估算方法

乔兰 邓乃夫 李庆文 王秀格 张庆龙 王雅文

Intelligent assessment method of life-cycle carbon emission during the highway construction phase

QIAO Lan, DENG Naifu, LI Qingwen, WANG Xiuge, ZHANG Qinglong, WANG Yawen

引用本文:

乔兰, 邓乃夫, 李庆文, 王秀格, 张庆龙, 王雅文. 公路工程建设阶段全生命周期碳排放智能估算方法[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(12): 2173–2186. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2022.10.21.001

QIAO Lan, DENG Naifu, LI Qingwen, WANG Xiuge, ZHANG Qinglong, WANG Yawen. Intelligent assessment method of life-cycle carbon emission during the highway construction phase[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(12): 2173–2186. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2022.10.21.001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.10.21.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国钢铁行业超低排放之路

Research of ultra-low emission technologies of the iron and steel industry in China

工程科学学报. 2021, 43(1): 1 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.06.18.003>

机动车来源多环芳烃及其衍生物的排放特征研究进展

Research progress of emission characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons and their derivatives of vehicle exhaust

工程科学学报. 2021, 43(1): 10 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.08.10.002>

生物质锅炉氮氧化物排放控制技术研究进展

Overview of advances in emission control technologies for nitric oxides from biomass boilers

工程科学学报. 2019, 41(1): 1 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.01.001>

具有微米纤维碳的硅/石墨/碳复合材料的制备及在锂离子电池中的应用

Preparation of silicon/graphite/carbon composites with fiber carbon and their application in lithium-ion batteries

工程科学学报. 2019, 41(10): 1307 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.06.08.001>

碳纳米纸复合材料的拉伸应变协同性

Tensile strain synergistic of carbon nanotube buckypaper composites

工程科学学报. 2018, 40(6): 714 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2018.06.009>

基于多场耦合碳/碳复合材料传热及烧蚀响应

Heat transfer and ablation of carbon/carbon composites based on multi-field coupling

工程科学学报. 2020, 42(8): 1040 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.06.30.002>

公路工程建设阶段全生命周期碳排放智能估算方法

乔 兰^{1,2)}, 邓乃夫^{1,2)}, 李庆文^{1,2)}✉, 王秀格³⁾, 张庆龙^{1,2)}, 王雅文^{1,2)}

1) 北京科技大学城市地下空间工程北京市重点实验室, 北京 100083 2) 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083 3) 交通运输部规划研究院, 北京 100028

✉通信作者, E-mail: qingwenli@ustb.edu.cn

摘 要 深度分析了国内外交通行业碳排放清单及碳排放因子目录, 结合中国交通行业特点, 基于现有的公路工程估算指标及中国传统交通行业施工机械设备台班单价计算表, 总结归纳符合中国交通行业特点的碳排放因子数据. 基于归因全生命周期评价方法(ALCA), 采用“自下而上”的公路工程碳排放计量思路, 将公路工程项目建设期内工程活动分为分项工程–分部工程–单位工程, 建立了公路工程建设期碳排放数据库及碳排放测算模型. 在此基础上, 利用 MATLAB 搭建了公路工程碳排放智能估算软件并对国内两段支线高速公路的路面工程碳排放进行了估算分析, 实现了仅通过公路工程量、工程方量和公路等级等信息即可快速估算并统计碳排放量, 同时能够智能溯源各阶段碳排放要素并定位碳排放大户, 为交通行业节能减排提供数据和理论基础. 分析显示, 在路面工程中, 稳定土基层和沥青路面面层的碳排放主导整体碳排放量, 占据了 99.6% 以上, 其中, 以 C32.5 水泥为主的材料占据了 75% 左右的碳排放.

关键词 公路工程建设; 碳排放估算; 碳排放数据库; 碳排放因子; 归因全生命周期评价

分类号 TG142.71

Intelligent assessment method of life-cycle carbon emission during the highway construction phase

QIAO Lan^{1,2)}, DENG Naifu^{1,2)}, LI Qingwen^{1,2)}✉, WANG Xiuge³⁾, ZHANG Qinglong^{1,2)}, WANG Yawen^{1,2)}

1) Beijing Key Laboratory of Urban Underground Space Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

3) Transport Planning and Research Institute, Ministry of Transport, Beijing 100028, China

✉Corresponding author, E-mail: qingwenli@ustb.edu.cn

ABSTRACT The Chinese government has announced its “carbon peak and carbon neutrality goals” for 2030 and 2060, respectively. All industry sectors are working toward developing carbon policies to support the national dual carbon goals. The transportation industry, which is one of the three major sources of CO₂ emission in China, has indirectly contributed to the greenhouse effect and global warming and serves as a threat to human living spaces. Therefore, highway construction projects are the key targets for emission reduction in China. This paper presents a detailed analysis of the carbon emission inventories and carbon emission factor catalogs in the domestic and foreign transportation industries. The carbon emission factor data of China’s transportation industry are compiled and summarized based on the existing estimation indices for highway projects and the unit price calculation sheet of construction machinery and equipment in China’s traditional transportation industry. A “bottom-up” approach to measuring carbon emissions of highway projects, based on the attribution life-cycle assessment (ALCA) method, is adopted. In this method, the project activities are divided into

收稿日期: 2022–10–21

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52274107); 北京科技大学青年教师学科交叉研究项目(FRF-IDRY-GD21-001); 佛山市科技创新专项资金资助项目(BK20BE008)

subprojects, divisional projects, and unit projects during the construction period of the highway project, thereby establishing a carbon emission database and a carbon emission assessment model. Accordingly, intelligent assessment software for the carbon emission of highway projects was developed using MATLAB, and the carbon emissions of pavement projects for a certain mileage of two domestic highway feeders were estimated and analyzed. In general, our method enables the rapid assessment and statistical analysis of carbon emissions using information about the highway mileage, highway grade, and engineering volume. Moreover, it can intelligently track the carbon emission elements at each stage and identify the major carbon emitters during the construction of highway projects. Based on the assessment of two case studies of pavement projects, the software shows that the major carbon emitters that accounted for 75% of overall emissions were C32.5 cement, gravel, and modified asphalt in the different concrete layers. This implies that the construction phase is the dominant contributor to the overall carbon emissions. Among the machinery and equipment, the asphalt mixture mixing equipment is the major carbon emitter, with emissions of $380 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$, accounting for roughly 30% of the overall carbon emissions from the machinery and equipment. In asphalt pavement engineering, the main source of carbon emissions is the stable soil base and the asphalt pavement layer, accounting for more than 99.6% of the total carbon emissions, while the emissions from the pavement cushion and sporadic engineering are almost negligible. Therefore, our intelligent assessment method can provide robust data and a theoretical basis for energy conservation and the reduction of emissions in the transportation industry.

KEY WORDS highway construction; carbon emission assessment; carbon emission database; carbon emission factors; attribution life-cycle assessment

全球变暖的负面影响是不言而喻的, 温室气体是导致全球变暖的根本原因. 为了应对全球变暖, 世界主要责任国都在确定自己的行动计划和减排路径. 中国已经制定了自己的“双碳”目标, 即 2030 年碳达峰, 2060 年达到碳中和. 二氧化碳作为碳排放的主要组成部分, 交通运输业产生的二氧化碳排放是学者们首先关注的问题. 而我国公路运输在铁路、水运、航空和管道运输等多种运输方式中占据重要地位. 因此, 推进绿色公路的全生命周期建设尤为重要, 这也是中国交通规划建设的主要理念^[1]. Zhang 等^[2]对我国道路交通碳排放做了系统的调查和分析, 总结出影响交通碳排放的主要因素为需求侧因素、供给侧因素和环境计量因素三类. Wei 等^[3]基于符合法规的路线优化模型, 研究了公路货运部门的碳减排问题. Huang 等^[4]关注了公路车辆排放的碳的浓度、光学特性和排放因子. 随着研究的深入, 在当前的国际环境下, 公路建设的碳排放已成为一个新的研究方向. Shang 等^[5]将高速公路的生命周期分为建筑材料生产、施工、养护和拆除废弃四个阶段, 并分析了能源消耗和大气排放情况. Anthonissen 等^[6]将二氧化碳排放量作为公路建设项目的评判标准. Krantz 等^[7]提出了一种用于道路建设规划阶段的替代方案已实现减碳优化. Peng 等^[8]研究了用于高速公路建设的碳排放计算方法和低碳技术. 为了对高速公路的碳排放进行更好地评价, 研究人员提出了多种碳排放评价模型和计算方法. Liu 等^[9]通过不确定性分析估算了实际高速公路项目施工阶段的二氧化碳排放量. Liu 等^[10]利用生命周期评

估(LCA)确定了高速公路养护项目的二氧化碳减排潜力. Jiang 等^[11]通过混合生命周期评估方法(HLCA)评估了道路使用、维护和修复的碳排放.

对于任一种碳排放估算体系, 碳足迹都是碳排放计算的基础. Muhammad 等^[12]总结了高速公路发展的碳足迹计算方法. Roukounakis 等^[13]开发了一个碳足迹模型, 用于计算高速公路的温室气体排放. 在高速公路建设项目中常使用高碳含量的材料, 如沥青, 因而路面工程在碳排放估算中被广泛分析. Chen 等^[14]基于 LCA 方法对橡胶沥青再生路面的节能减排效果进行了研究. Qi^[15]分析了沥青混凝土路面预防性养护技术的碳排放情况. Peng 等^[16]提出了沥青路面施工中碳排放的定量评价方法, 并应用于实际路面工程中. Barbieri 等^[17]评估了沥青路面在生产、施工和使用阶段的二氧化碳排放量. 然而这些方法在数据更新、结果分析等方面还有待优化, 不足以应对复杂工程项目的碳排放测算.

经过详细的碳足迹筛选, 本文尝试以各单位工程建设期内源性碳排放为研究对象核算公路工程碳排放量, 采用工程计价类比的统计手段, 构建了公路工程建设阶段使用的材料和工程机械设备的碳排放因子数据库, 并基于归因全生命周期评价(ALCA)方法建立了自下而上的碳排放估算体系, 实现了公路工程碳排放的智能估算、统计和分析.

1 全生命周期碳排放估算建模

广义上说, 全生命周期评价方法分为归因全

生命周期评价 (ALCA) 和归果全生命周期评价 (CLCA) 两种. CLCA 是通过能够反映碳排放情况的边际数据来间接解算碳排放量, 例如由于碳排放会导致温度升高, 通过获取温度升高量建立碳排放间接计算模型推演碳排放量. 而 ALCA 是一种基于过程的全生命周期评价方法, 通过采集与碳排放有直接因果关系的数据, 逐级列项相加得到碳排放量. 例如通过能源使用产生的碳排放推算使用该能源的机械设备的碳排放, 进而推算使用该机械的单元工程的碳排放, 最后汇总得到公路工程的碳排放量.

公路工程建设全生命周期具有流程连续且多级分布的特点, 相应的碳排放估算同样具备多级、连续流程的特性. 因此, ALCA 更适用于公路工程建设期的碳排放估算建模. 开展材料、机械设备等方面的碳溯源是公路工程建设阶段全生命周期碳排放的关键环节. 而由于建设阶段是公路生命周期的重要阶段, 具有资源消耗密集、碳排放强度高的特点, 同时建设阶段所需材料种类、施工工序较多, 不同公路项目建设阶段碳排放水平差异明显. 因此, 本文基于“自下而上”的统计理念建立碳排放估算模型, 以碳排放测算、特征分析和碳排大户分析为目标, 引入分项工程-分部工程-单位工程-单项工程层级结构, 评估公路工程建设期全生命周期的碳排放值.

1.1 公路工程建设结构性划分

公路工程建设阶段碳排放估算与公路工程建设阶段计价具有高度相似性: 一是均具有单价性特点, 二是材料和机械设备的计量来源相同. 据

此, 在公路工程建设的碳计量中, 本项目主要采用以单项、单位、分部、分项工程为划分标准的建设项目分解方法, 统一工程计量中的材料及机械设备碳消耗的统计尺度, 实现建设工程造价管理工作的科学化与标准化. 因此, 在结构化测算公路工程项目建设阶段的碳排放时, 参考公路工程项目施工定额的结构划分方法, 将公路工程项目划分为单项工程-单位工程-分部工程-分项工程(图 1), 并据此建立“自下而上”的碳排放估算模型.

单项工程, 即公路工程建设项目, 是指一个建设单位中具有独立的设计文件、竣工后可以独立发挥生产职能或者工程效益的工程单元. 公路工程建设中主要指一整条高速公路或者一个区段的公路工程项目.

单位工程, 是单项工程的组成部分, 是指具有单独设计和独立施工条件, 但不能独立发挥生产能力或效益的工程. 公路工程建设主要包括路基工程、路面工程、隧道工程、桥涵工程、交叉工程、交通工程、临时工程等基础设施建设的单位工程. 在不同公路工程中, 路基条件差别较大, 隧道工程、桥涵工程、临时工程等要求不统一, 不易于数据的直观展示, 因此在本研究中, 碳排放智能估算软件的应用和案例解析中将主要集中在对公路建设中的路面工程进行全生命周期的碳排放.

分部工程作为单位工程的组成部分, 是按部位、材料和工种进一步分解单位工程形成的工程. 每一个单位工程仍然是一个较大的组合体, 它本身是由许多结构构件、部件或更小的部分所组成, 把这些内容按部位、材料和工种进一步分解, 就是

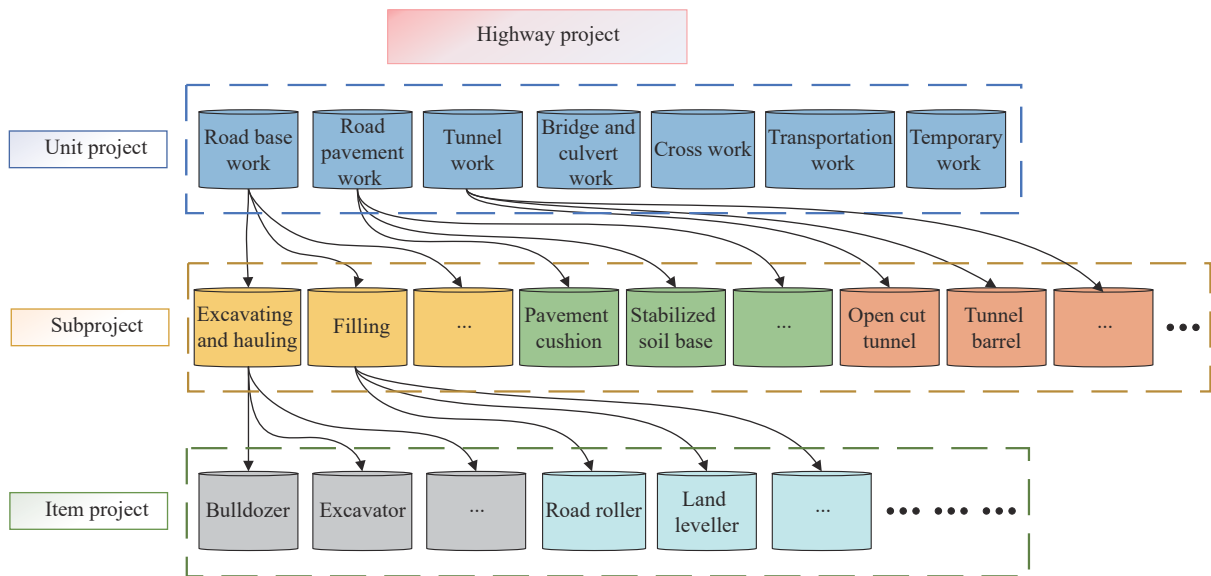


图 1 公路工程建设阶段单元过程划分示意图

Fig.1 Schematic diagram of the division of highway engineering projects

分部工程. 例如, 根据《公路工程估算指标 JTG/T 3821—2018》^[18], 我国公路路面工程分为路面垫层、稳定土基层、沥青路面面层和路面零星工程四个部分, 其中路面垫层、稳定土基层按土层面积进行工程量计算, 沥青路面面层按公路实体进行工程量计算, 路面零星工程按路基长度进行计算.

分项工程作为是分部工程的组成部分, 指能够单独地经过一定施工工序就能完成, 并且可以采用适当计量单位计算的建筑或安装工程. 由于影响各分部工程材料消耗规模的因素还很多, 为方便计算工程成本和材料消耗, 有必要将分部工程按不同的施工方法、不同的结构、不同的规格等进一步分解为若干个子项目. 分项工程是公路工程建设阶段材料和施工机械使用量的基本计量单位.

1.2 碳排放测算全生命周期建模思路

全生命周期模型建模思路与模型结构是公路

建设阶段碳排放估算模型建模的基础和依据. 公路工程建设为一次性活动, 施工条件复杂多变. 但总体来说, 公路建设各基础工程单元的施工在时间和空间上合理组织, 各施工活动按序施工, 工序间关系也有规律可循. 因此, 公路建设阶段碳排放估算首先需要基于公路建设阶段碳排放要素分析结果, 进行公路建设阶段结构化, 按照“单项—单位—分部—分项”的施工时序和层级将整个公路建设阶段划分为相互独立且具有统一碳排放测算表达的单元过程, 基于全生命周期估算模型完成单元过程碳排放测算, 然后按照公路建设阶段单元过程“自下而上”进行组合估算, 最终获得公路建设阶段的整体碳排放.

本文提出的公路项目建设阶段结构化碳排放估算方法共分为五个部分, 如图 2 所示. 第一部分是上节提到的公路工程单元过程划分, 目的是将

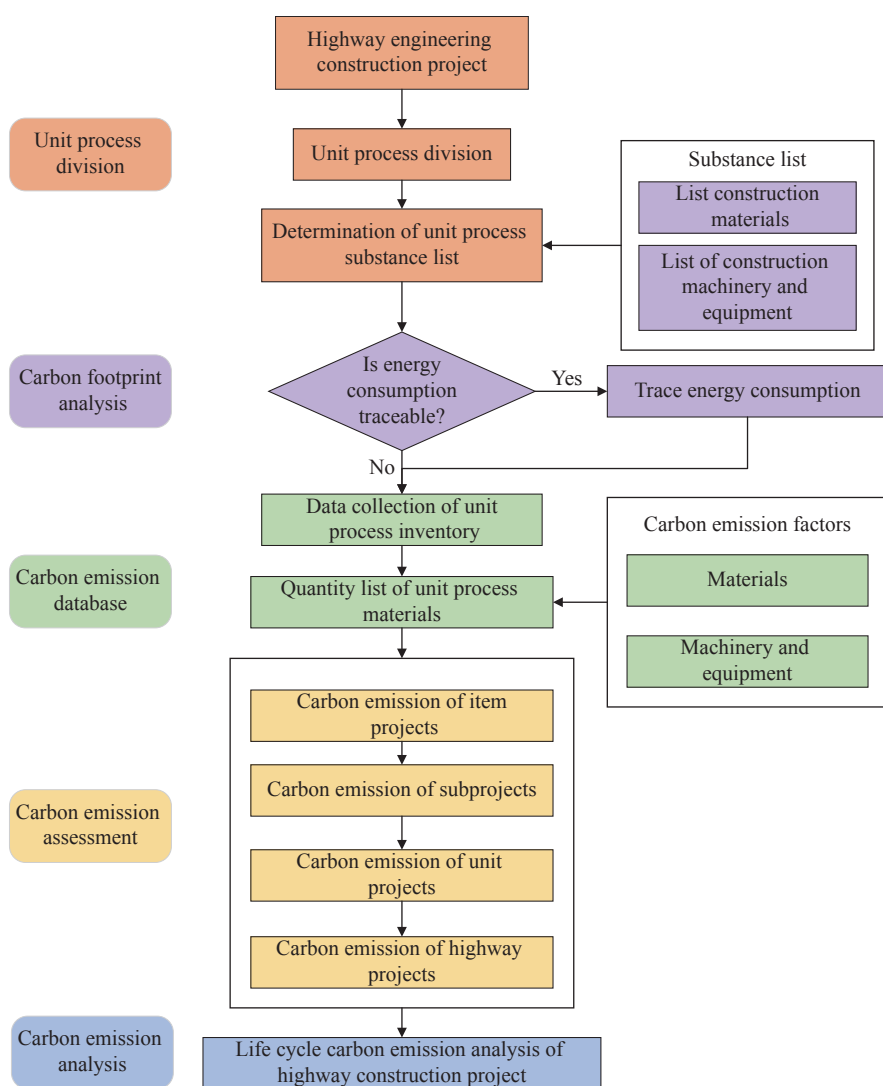


图 2 公路工程建设全周期碳排放估算方法总览

Fig.2 Life-cycle carbon emission assessment method for highway construction projects

常规的公路工程体系进行统一的“自下而上”的结构性拆分,方便碳排放估算体系搭建;第二部分是碳足迹分析及碳排放清单归纳,目的是追溯并汇总国内外碳排放数据,提炼适用于公路工程建设阶段在材料以及机械设备两方面的碳排放因子数据;第三部分是数据库的搭建,通过构建统一的数据库结构,将碳排放因子数据以及公路工程单元过程划分结构数据进行封装,方便数据库的维护、更新以及索引调用;第四部分是碳排放估算,基于工程计价原理,针对不同层级的碳排放进行估算;第五部分是碳排放分析,基于 MATLAB 整合碳排放估算模型、碳排放数据库以及碳排放评价体系,实现公路工程建设的智能估算结果统计与分析。

综上,基于“单项—单位—分部—分项”结构划分的公路建设阶段碳排放估算流程如下:

(1) 依据《公路工程估算指标 JTG/T 3821—2018》对公路基础建设工程进行单元过程划分。

(2) 分析研究边界内单元过程的物质名录,确定筑路材料及机械设备清单。

(3) 依据清单判断是否需要需要进行能耗追溯,若为机械设备清单则需要根据单元过程追溯,采集物质名单内各物质的能耗量,再依据《公路工程估算指标 JTG/T 3821—2018》获得物质名录内各物质

的工程量;若为材料清单则直接进行单元过程清单数据采集与计算,获得名录内各物质的工程量。

(4) 在物质名录内各物质的工程量基础上,结合碳排放因子数据库,计算获得单元过程生命周期碳排放数据。

(5) “自下而上”汇总获得建设阶段各分项、各分部、各单位及各单项工程的碳排放量。

1.3 “自下而上”碳排放估算建模

采用“自下而上”的计算模型估算评价公路建设工程全生命周期的碳排放值,按照分项工程—分部工程—单位工程—单项工程的层级进行计算。估算模型的参数如表 1 所示。

本文的单元过程碳排放由材料及机械设备两部分构成,结合表 1 中的模型参数定义,材料相关碳排放量模型为:

$$C_{ijk}^{h=1} = \sum_{p=1}^m f_p X_{ijk}^p \quad (1)$$

机械设备相关碳排放量模型为:

$$C_{ijk}^q = \sum_{l=1}^n f_l U_l^q Y_{ijk}^q \quad (2)$$

基于“自下而上”的测算理念,则单一分项工程的碳排放总和估算模型为:

表 1 估算模型参数定义

Table 1 Parameter definition for the assessment model

Parameter	Definition
i	Index of highway project
j	Index of unit project
k	Index of subproject
g	Index of item project
h	Index of carbon source, $h = 1$ indicates that the carbon source is from materials; $h = 2$ indicates that the carbon source is from machinery and equipment.
C_{ijk}^h	Carbon emission from the h th source in the g th item project of the k th subproject of the j th unit project of the i th highway project
C_{ijk}	Carbon emission in the g th item project of the k th subproject of the j th unit project of the i th highway project
C_{ijk}	Carbon emission in the k th subproject of the j th unit project of the i th highway project
C_{ij}	Carbon emission in the j th unit project of the i th highway project
C_i	Carbon emission of the i th highway project
p	Type of materials ($p = 1, 2, 3, \dots, m$)
q	Type of machinery and equipment ($q = 1, 2, 3, \dots, n$)
f_p	Carbon emission factor of the p th type material
f_l	Carbon emission factor of the l th type of energy fuel, where l is the index of energy type
X_{ijk}^p	Consumption quota of the p th type of material in the g th item project of the k th subproject of the j th unit project of the i th highway project
Y_{ijk}^q	Unit quantity of the q th type of construction machinery in the g th item project of the k th subproject of the j th unit project of the i th highway project
U_l^q	Consumption quota of the l th type of energy fuel for the q th type of construction machinery

$$C_{ijk} = \sum_{h=1}^2 C_{ijk}^h \quad (3)$$

同理, 单一部分工程的碳排放测算模型为:

$$C_{ijk} = \sum_{g=1} C_{ijk}^g \quad (4)$$

单一单位工程的碳排放测算模型为:

$$C_{ij} = \sum_{k=1} C_{ijk} \quad (5)$$

单一单项工程, 即某一公路工程建设期的碳排放测算模型为:

$$C_i = \sum_{j=1} C_{ij} \quad (6)$$

在本文中, 式 (6) 的单位工程为路基工程、路面工程、隧道工程、桥涵工程、交叉工程、交通工程、临时工程等 7 项, 因此 $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$. 若需要同时估算多个公路工程建设期的总碳排放量, 可用式 (7) 模型进行计算:

$$C = \sum_{i=1} C_i \quad (7)$$

2 碳足迹分析和碳排放数据库构建

高速公路项目建设规模大, 工程结构复杂, 每个项目所处位置不同, 且每个项目受环境气候、地质、水文等自然条件的影响, 工程技术水平、公路等级、质量标准和工程量也存在很大差异, 其碳排放有各自的特点, 不同公路项目的碳排放不可能完全相同. 因此, 在统计公路项目建设阶段的碳排放清单和碳排放因子时, 有必要在结构上将建设工程分解成尽可能小的单元, 使工程量和碳排放计算尽可能达到相对准确的水平.

2.1 公路工程建设阶段碳排放要素及清单分析

公路工程建设全生命周期的碳排放, 主要考虑与建筑材料有关的碳排放以及与建设活动有关的碳排放两个来源. 从建筑材料全生命周期进行分析, 主要包括公路工程原材料开采、加工生产、运输至施工现场等材料物化的整个过程中消耗的资源材料以及设备消耗共同产生的碳排放. 根据已有研究, 公路工程建设过程中的碳排放主要来源是建筑材料的生产活动, 在建设过程总碳排放量中约占 60%~90%^[19], 其次来源于工程现场的建设活动, 最后是来自材料的拌合和运输. 由于材料拌合、运输与现场建设活动 3 类活动均是通过施工机械和车辆实现的, 其碳排放均与施工机械设备有关, 本质来自于能源燃料的使用, 故本文将材

料拌合、材料运输、现场建设活动统一考虑为与机械设备有关的碳排放.

2.1.1 建筑材料生产阶段碳排放

公路建设阶段筑路材料涉及建筑砂石材料、无机结合料及制品、有机结合料及混合料、工程高分子材料、公路工程用材料和新型的复合材料等, 主要分为主要材料和次要、零星材料. 主要材料指经过加工后能构成工程实体的各种材料(包括外购件、成品、半成品), 例如钢材、水泥、木材、砖、瓦、石灰、砂和石等.

目前针对房屋建筑材料全生命周期的碳排放, 众多发达国家政府和国际组织已经通过大量调研形成了系统的碳排放核算标准, 并形成了例如欧洲生命周期数据库(ELCD)^[20]的国际主流碳排放数据库. 2010 年, 四川大学的刘夏璐等^[21]也在参考国外标准数据库基础上, 结合我国实际情况, 建立了中国生命周期参考数据库(CLCD). 龚志起等^[22-24]测算得到了水泥、钢材等建材的碳排放因子. 张红波^[25]等根据材料量换算得出不同沥青混凝土的碳排放量. 王雪英等^[26]研究了橡胶沥青混凝土的碳排放量. 然而尚未有专门针对公路建设工程的碳排放数据库. 表 2 总结了主要公路建材碳排放因子.

2.1.2 机械设备使用过程中的碳排放

公路不同基础设施工程施工机械种类有差异, 但是同种基础设施现场建设主要机械设备类型差异不大, 且主要以施工工序和工艺划分. 在公路工程建设全生命周期中, 运输车辆、施工机械设备运行产生的碳排放主要来源于柴油、汽油、电力等能源燃料的消耗. 目前, 能源燃料的碳排放通常是利用物料平衡法计算得到的, ELCD 等国际主流碳排放数据库和我国的 CLCD 数据库均提供了常见化石能源的碳排放因子. 基于清华大学的研究数据, 并综合气候中心提供的本地化碳排放因子, 本文总结了公路工程建设过程中, 常用车辆和机械设备等所需能源燃料的碳排放因子, 如表 3 所示.

2.2 公路工程建设关系型碳排放数据库构建

基于碳足迹分析以及碳排放因子清单数据, 本文利用 MySQL 语言搭建了“自下而上”的公路工程建设全生命周期碳排放数据库, 根据图 2 所示的公路工程建设项目结构性划分, 相应的碳排放数据库同样需要具有相应的层级结构, 以此保证在碳排放估算时能够在不同层级之间进行索引关联, 方便碳排放估算模型的数据引用以及碳排

表2 公路工程全生命周期主要建材的碳排放因子

Table 2 List of the carbon emission factors of major building materials for highway projects throughout the duration of the project

Material type	Unit	Carbon emission	Ref.
Wood	kg·kg ⁻¹	0.026	[21]
Shape steel	kg·kg ⁻¹	4.339	[22]
Wire	kg·kg ⁻¹	3.551	[22]
Iron	kg·kg ⁻¹	2.500	[23]
High density polyethylene	kg·kg ⁻¹	0.569	[21]
Rubber	kg·kg ⁻¹	0.098	[21]
Vinylene chloride plastics	kg·kg ⁻¹	1.390	[21]
Cement(P.I.52.5)	kg·kg ⁻¹	1.04156	[24]
Cement(P.O.42.5)	kg·kg ⁻¹	0.92003	[24]
Cement(P.S.32.5)	kg·kg ⁻¹	0.67768	[24]
Petroleum asphalt	kg·kg ⁻¹	0.17424	[27]
Modified asphalt	kg·kg ⁻¹	0.29591	[27]
Mineral powder	kg·kg ⁻¹	0.0844	[21]
Aggregate	kg·m ⁻³	3	[28]
Sand	kg·m ⁻³	3	[28]
Cement macadam	kg·kg ⁻¹	0.00218	[29]
Medium (coarse) sand	kg·kg ⁻¹	0.00251	[29]
Rubble	kg·m ⁻³	6.050	[30]
Coarse grained asphalt concrete	kg·kg ⁻¹	6.04531	[25]
Medium grained asphalt concrete	kg·kg ⁻¹	6.22147	[25]
Fine grained asphalt concrete	kg·kg ⁻¹	6.37211	[25]
Sand type asphalt concrete	kg·kg ⁻¹	6.43167	[25]
Combined steel formwork	kg·kg ⁻¹	2	[31]
Gravel for pavement	kg·m ⁻³	1.39	[32]
Medium grain modified asphalt concrete	kg·kg ⁻¹	3.23	[25]
Fine grained modified asphalt concrete	kg·kg ⁻¹	3.77	[25]
Coarse grained rubber asphalt concrete	kg·kg ⁻¹	248.3574	[26]
Medium grain rubber asphalt concrete	kg·kg ⁻¹	279.1254	[26]
Fine grained rubberized asphalt concrete	kg·kg ⁻¹	326.3771	[26]
Rubber asphalt	kg·kg ⁻¹	0.177772	[25]
M5 cement mortar	kg·m ⁻³	228.03	[33]
M10 cement mortar	kg·m ⁻³	315.39	[33]
Cement C20-32.5-4	kg·m ⁻³	270.38	[31]
Cement C25-32.5-4	kg·m ⁻³	267.69	[31]
Cement C30-32.5-4	kg·m ⁻³	295	[29]
Steel plate	kg·kg ⁻¹	2	[31]
Welding rod	kg·kg ⁻¹	2.02	[31]
Iron nail	kg·kg ⁻¹	2.02	[31]

放清单的后续更新。如图3所示,碳排放数据库分为4个数据表,分别存储单位工程—分部工程—

表3 公路工程全生命周期常用机械设备所需燃料的碳排放因子清单

Table 3 List of the carbon emission factors of fuels required by the commonly used machinery and equipment for highway projects throughout the duration of the projects

Type of fuels	Unit	Carbon emission factors	Source
Clean coal	kg·kg ⁻¹	0.170	Localized carbon emission factors provided by the climate center
Gasoline	kg·kg ⁻¹	1.989	
Diesel	kg·kg ⁻¹	2.126	
Aviation kerosene	kg·kg ⁻¹	2.063	
Admiralty fuel	kg·kg ⁻¹	2.221	
Natural gas	kg·kg ⁻¹	1.630	
Liquefied petroleum gas	kg·kg ⁻¹	1.829	
Electricity	kg·kW·h ⁻¹	0.980	

分项工程和碳排放因子数据。

为了实现不同数据库之间的索引和调用,本文引入唯一标识码作为每个数据类目的索引ID。其中,单位工程数据表用以存储公路建设工程内涵盖的7种基本单位工程。每种单位工程用唯一的标识变量(Unit project ID, UPID)进行标记,方便后续关系型数据表的关联以及数据的索引。分部工程数据表用以存储各单位工程下的子工程类目,并用唯一标识变量(Subproject ID, SPID)进行标记,同时,在各分部工程类目后也标注上其所属单位工程的UPID,用以数据串联索引。分项工程数据表用以存储各分部工程下的工程量定额数据,工程量分为机械设备工程量与材料工程量,不同工程量用唯一的标识变量(Item project ID, IPID)进行标记,该数据库与分部工程数据类目编制依据《公路工程估算指标 JTG/T 3821—2018》规范要求。分项工程数据表中,除了记录标识变量、项目名称、所属分部工程SPID外,还记录了不同项目的工程量大小、单位、代号、所属碳排放清单、能耗大小、能耗单位以及碳排放因子标识变量(Carbon emission factor ID, CEID)。其中能耗大小和能耗单位参照项目方提供的施工机械台班单价计算表进行录入。碳排放因子标识变量CEID则来源于碳排放因子数据表。该数据表记录了不同机械设备使用燃料及工程材料生产的碳排放因子数据。本文搭建的MySQL关系型碳排放数据库的优势在于对于任意的公路工程项目,均可按照图3所示的数据表结构录入相应数据。对于缺乏相关数据的工程项目,也可以利用本文搭建的一般性标准数据库缺省值进行补录,在一定程度上还原真实工程用料情况,准确高效还原公路工程建设项

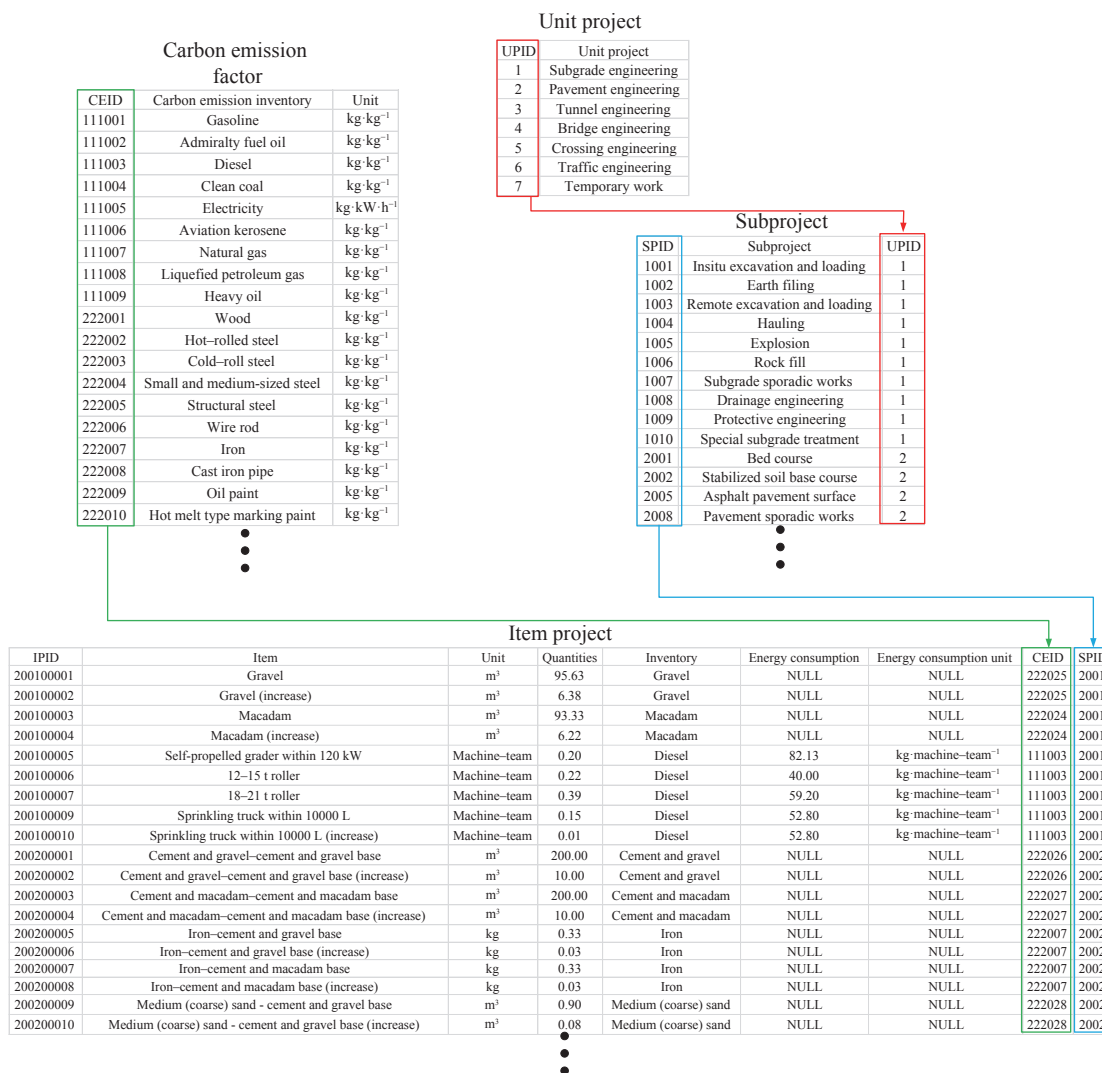


图 3 碳排放数据库结构和索引关系

Fig.3 Structure and index relation in the carbon emission database

目的碳排放指标。

3 碳排放智能估算应用

3.1 碳排放智能估算软件功能

基于碳排放估算模型以及创建的碳排放数据库,在 MATLAB app designer 上二次开发了公路工程建设期碳排放智能估算分析软件,用于对国内不同公路建设项目碳排放进行自动化计算和数据分析.其功能模块主要包括数据库读取、工程参数设置、碳排放数据统计及碳排放数据分析(图 4)。

碳排放数据库导入模块能够连接 MySQL 数据库,读取最新的碳排放数据库,并实时显示出不同层级数据表中的内容,同时可以对显示数据进行排序操作。

工程参数录入模块会根据不同工程类型特

点,依次提供诸如公路等级、土方量、工程里程、地形类别等参数的设置界面,用以输入目标工程的相关参数.同时,该模块还提供计算和记录功能,能够依据录入工程信息自动估算公路工程建设阶段的碳排放量,并记录下来,以供后续方案比选使用。

碳排放数据统计模块则会根据计算模型,“自下而上”依次统计各分项工程、分部工程、单位工程的碳排放量(见图 4(c)),同时在分部工程和单位工程的碳排放统计中会分别统计出机械设备和材料的总碳排放量.此外,碳排放统计和分析模块还支持 Microsoft Excel 数据导出功能。

在碳排放数据分析模块中,会自动将碳排放统计数据绘制成直方图和饼图,可视化不同分项工程、分部工程、单位工程的碳排放量,同时还会自动抓取各分部工程、单位工程的碳排放大户(排

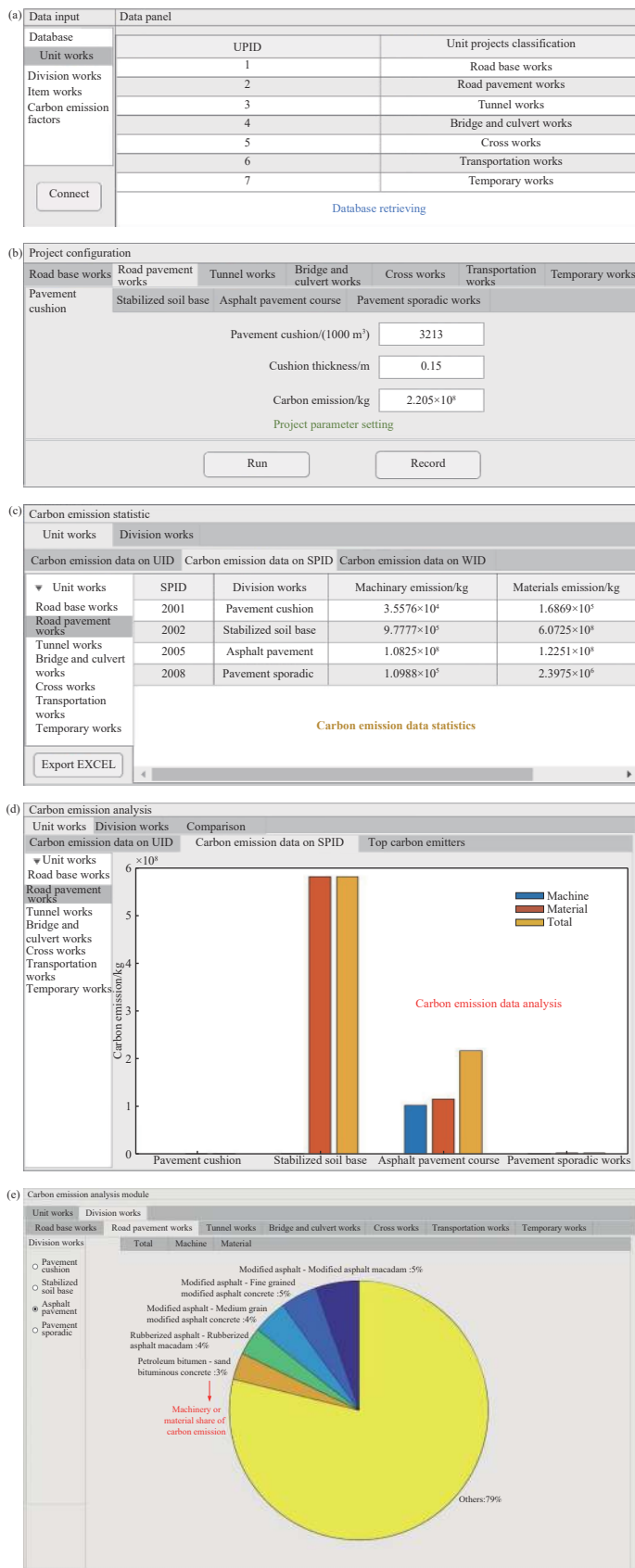


图 4 碳排放智能估算软件功能界面。(a) 数据库读取模块; (b) 工程参数设置模块; (c) 碳排放数据统计模块; (d) 碳排放数据分析模块-碳排放来源分析; (e) 碳排放数据分析模块-碳排放大户定位

Fig.4 Functional interface of the carbon emission intelligent assessment software: (a) data input module; (b) project configuration module; (c) carbon emission statistics; (d) carbon emission analysis; (e) major carbon emitters acquisition

名前 5) 并统计各自的碳排放百分比. 此外, 碳排放分析模块还提供不同工程方案的碳排放比选功能, 能够记录不同方案下不同类型工程项目的碳排放统计数据, 并自动绘制柱状图多维度比选各工程方案在机械设备、材料和总工程量中的碳排放数据(图 4(d~e)).

3.2 碳排放智能估算案例分析

对交通运输部规划研究院设计的江津经泸州至宜宾高速公路四川段宜宾分段内某支线高速公路和张掖至汶川(郎木寺至川主寺段)两个高速公路(简称宜宾支线和郎川支线)路面工程的案例进行估算分析.

宜宾支线高速公路长 23.559 km, 限速 $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, 路基宽度 25.5 m, 路面宽度 22.0 m, 双向 4 车道, 采用沥青混凝土路面, 路面总厚度为 89 cm, 路面零星工程长 13.132 km. 郎川支线高速公路长 193.651 km, 限速 $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, 路基宽度 26 m, 路面宽度 22.5 m, 双向 4 车道, 采用沥青混凝土路面, 路面总厚度为 87 cm, 路面零星工程长 117.383 km. 其结构组成及工程量如表 4 所示.

将表 4 所列数据分别输入碳排放智能估算软件, 其中宜宾支线的路面垫层方量是 297571 m^3 , 厚度是 0.15 m; 稳定土基层仅有水泥碎石基层, 方量为 557920 m^3 , 总厚度是 0.56 m; 沥青路面面层由沥青混凝土、改性沥青混凝土和玛蹄脂碎石三层构成, 其方量分别为 291215、290080 和 288904 m^3 ; 最后的路面零星工程里程为 13.132 km. 郎川支线

的路面工程的路面垫层方量是 3212938 m^3 , 厚度是 0.15 m; 稳定土基层仅有水泥碎石基层, 方量为 5961594 m^3 , 总厚度是 0.54 m; 沥青路面面层由玛蹄脂碎石、改性沥青混凝土和沥青混凝土三层构成, 其方量分别为 2683179、2706989 和 2740322 m^3 ; 最后的路面零星工程里程为 117.383 km. 依据表 4 录入的工程参数信息, 结合碳排放计算模型, 碳排放智能估算软件能够即时核算出该路面工程的碳排放定额数据. 图 5 展示了两组案例路面工程各分部工程的碳排放统计分析结果, 由图可知, 在沥青路面工程中, 主要的碳排放来源为稳定土基层和沥青路面面层的碳排放, 占据了总碳排放的 99.6% 以上, 而路面垫层和零星工程的碳排放则相差了 2~3 个数量级, 可以忽略. 此外, 在稳定土基层碳排放中又以材料消耗的碳排放为主导, 机械设备的碳排放微乎其微. 但是在沥青路面垫层的碳排放中, 机械设备和材料的碳排放基本相当.

此外, 碳排放智能估算软件还可统计不同路面工程在具体机械设备以及材料的碳排放占比情况方面快速锁定最小单元过程下的碳排放大户. 图 6 展示了宜宾支线路面工程在总碳排放量统计视角下的碳排放源分析结果. 可知, 最小的单元过程, 即分项工程的碳排放占比中, 排名前 5 的碳排放大户均为材料相关的碳排放, 其中又以 C32.5 水泥的碳排放为主导, 其占据了该路面工程约 67% 的碳排放. 因此, C32.5 水泥是当之无愧的碳排放第一大户, 也是该路面工程应该着重需要考虑的

表 4 路面工程数量表

Table 4 Quantity of the material used during pavement work

Case	Layer structure	Laminate construction thickness / cm	Quantities / m^3	Remark
Yibin branch	SBS modified Asphalt Macadam SM-13	4	288904	Upper course
	Medium grain SBS modified asphalt concrete AC-20C	6	290080	Middle course
	Coarse grained asphalt concrete AC-25C	8	291215	Bottom course
	Cement stabilized macadam	20	293238	Base course
	Cement stabilized macadam	36	264682	Subbase course
	Graded aggregate	15	297571	Cushion
	Pavement sporadic works	—	13.132	Length / km
Langchuan branch	SBS modified Asphalt Macadam SM-13	4	2683179	Upper course
	Medium grain SBS modified asphalt concrete AC-20C	6	2706989	Middle course
	Medium grained asphalt concrete AC-20C	8	2740322	Bottom course
	Cement stabilized macadam	36	2892702	Base course
	Cement stabilized macadam	18	3068892	Subbase course
	Graded aggregate	15	3212938	Cushion
	Pavement sporadic works	—	117.383	Length / km

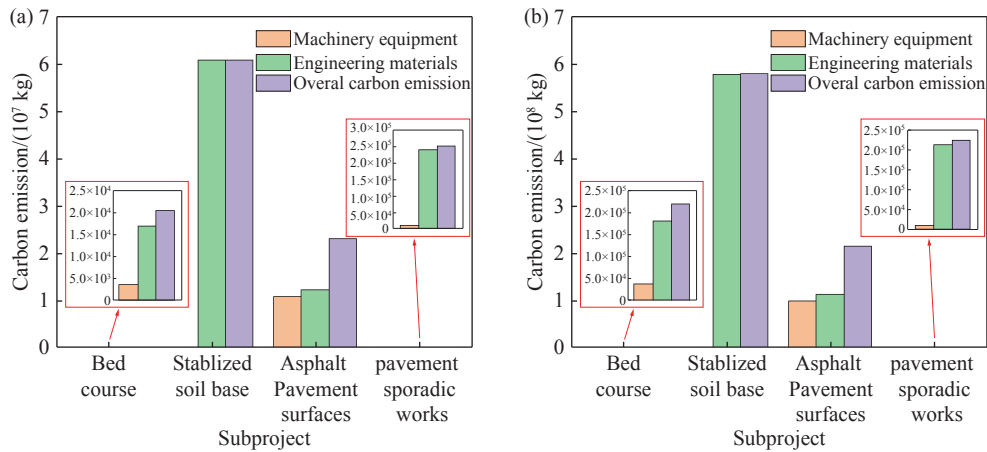


图5 两支线路面工程各分部工程碳排放统计分析。(a) 宜宾支线路面工程碳排放分析结果; (b) 郎川支线路面工程碳排放分析结果

Fig.5 Statistical analysis of carbon emissions for each section of the pavement project: (a) carbon emission analysis of the Yibin branch pavement project; (b) carbon emission analysis of the Langchuan branch pavement project

减碳节能目标。排行前5的碳排放大户还包括了不同混凝土层的碎石和改性沥青的碳排放,其占据了约7%的碳排放,也属于路面工程的碳排放减碳重点目标。

在该路面工程在机械设备上,碳排大户主要是功率为 $380 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ 的沥青搅拌机,不难发现,该沥青搅拌机在不同的沥青混凝土制备中均作为主力机械设备,是需要重点关注的碳排放大户。在材料方面则是C32.5水泥的碳排放量占比最大,这与总碳排放占比的分析结论一致。

从分析结果可知,机械设备的碳排放来源主要为汽油、柴油等能源燃料,其生产、运输产生的碳排放量较工程材料合成所产生的碳排放相比要小的多,特别是水泥的制备过程对碳排放的消耗是最大的。这主要是因为水泥的制备工艺较为繁琐,制备流程较为复杂,需经过采石场开采、原料粉碎、生料研磨、熟料煅烧、熟料冷却干燥、熟料二次研磨、成品存储运输等多个环节。每个制备环节又涉及到复杂的能源消耗,因此,在路面工程的节能减排的重点上,还是以材料优先为导向,材料提供方需专注于研发新型节能材料,材料使用方需研究新型施工工艺减少对碳排放较大材料的使用和依赖。

由于两个工程采用的设计规范和计价标准相同,同时两工程的路面组成类似,郎川支线的路面工程碳排放大户分析结果与宜宾支线分析结果相似。此外,此碳排放估算软件还能统计各分部工程下的碳排放估算分析,为更小单元过程的碳排放大户锁定提供数据支撑。对宜宾支线路面工程而言,图6可以准确的锁定该工程的主要碳排放大

户,为工程的节能减排方向提供理论指导,且更小单元过程的分析结论与图6所示的分析结论相仿。

4 结论

为响应国家“双碳”目标背景下对交通工程行业的节能减碳要求,本文整合了国内外公路工程建设领域的碳排放清单和碳排放因子数据,基于ALCA理论框架建立了碳排放估算模型和碳排放数据库。据此,利用MATLAB二次开发对模型和数据库进行整合,搭建了碳排放智能估算软件,对国内某高速公路路段进行估算分析,在一定程度上反映国内公路工程建设在节能减碳工作上的掣肘,为后续交通行业开展减碳降碳提供一定的理论和数据支撑。主要结论:

(1) 归纳总结了国内外碳排放因子的研究成果,结合中国公路工程造价特点,汇总了基于公路工程建设全周期的碳排放因子清单。

(2) 基于工程计价的原理,建立了“自下而上”的公路工程建设全生命周期碳排放估算模型,适用于国内不同公路工程建设的碳排放估算。

(3) 基于“自下而上”的碳排放计算模型,运用MySQL语言建立了公路工程建设关系型碳排放数据库。该数据库包括单位工程、分部工程、分项工程以及碳排放因子4个数据表,分别记录不同公路工程所用投资估算及概预算定额信息以及一般性碳排放因子清单。

(4) 基于MATLAB搭建了一个公路工程建设碳排放智能估算软件,实现了自动化读取碳排放数据库信息并依据公路工程量、工程方量、公路等级等估算定额所需信息快速估算特定公路工程

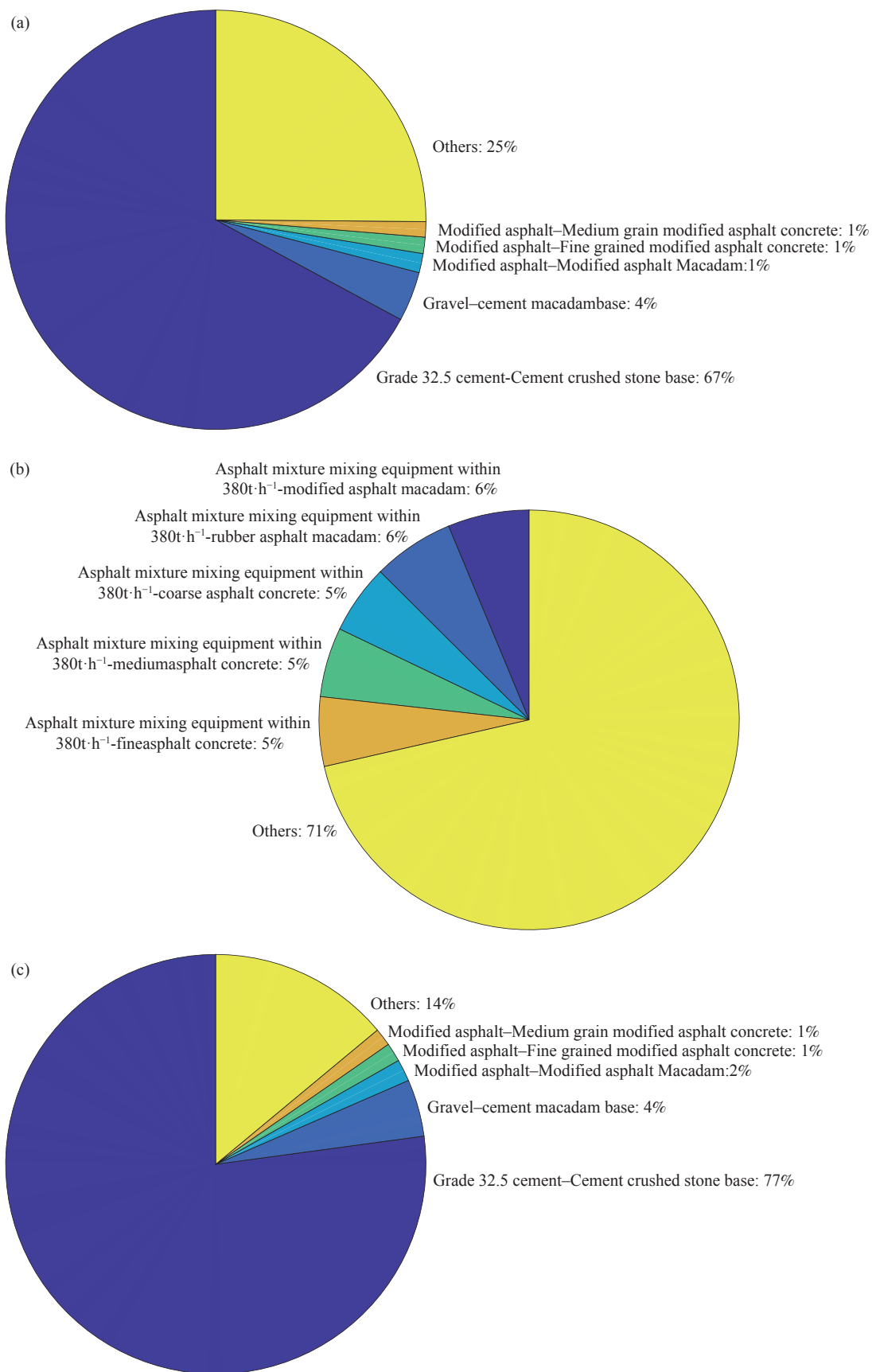


图 6 路面工程碳排放大户分析结果. (a) 路面工程总碳排放大户分析; (b) 路面工程机械设备使用碳排放大户分析; (c) 路面工程材料使用碳排放大户分析

Fig.6 Carbon emissions analysis: (a) share of the top 5 carbon emitters in the pavement project; (b) share of the top 5 carbon emitters from machinery in the pavement project; (c) share of the top 5 carbon emitters from material in the pavement project

建设期内的碳排放量。同时, 本文搭建的碳排放智能估算软件能实时统计分析建设期各单元过程内的碳排放来源组分以及份额, 锁定碳排放大户, 剖析节能减排重点, 为公路工程建设领域的“双碳”目标提供数据支撑。

(5) 公路工程建设期全生命周期智能估算方法研究和软件尚存在一些不足, 例如本文的测算体系目前仅适用于估算阶段的碳排放测算, 缺乏在概算、预算、决算等阶段的碳排放测算, 缺乏更细致化的碳排放数据分析, 例如施工组织架构、材料周转次数等因素对碳排放的影响分析。后续作者会在已有研究基础上深入细化公路工程建设全生命周期的碳排放测算研究, 为交通行业碳排放政策制定提供更准确的数据和理论支撑。

参 考 文 献

- [1] Dou H L, Liu Y Y, Chen Z, et al. Analysis of green highway construction based on whole life cycle. *Constr Sci Technol*, 2022(6): 74
(窦慧丽, 刘媛媛, 陈哲, 等. 基于全生命周期的绿色公路建设分析. *建设科技*, 2022(6): 74)
- [2] Zhang L L, Long R Y, Chen H, et al. A review of China's Road traffic carbon emissions. *J Clean Prod*, 2019, 207: 569
- [3] Wei R, Liu C H. Research on carbon emission reduction in road freight transportation sector based on regulation-compliant route optimization model and case study. *Sustain Comput*, 2020, 28: 100408
- [4] Huang R J, Yuan W, Yang L, et al. Concentration, optical characteristics, and emission factors of brown carbon emitted by on-road vehicles. *Sci Total Environ*, 2022, 810: 151307
- [5] Shang C J, Zhang Z H, Li X D. Research on energy consumption and emission of life cycle of expressway. *J Highw Transp Res Dev*, 2010, 27(8): 149
(尚春静, 张智慧, 李小冬. 高速公路生命周期能耗和大气排放研究. *公路交通科技*, 2010, 27(8): 149)
- [6] Anthonissen J, Van Troyen D, Braet J, et al. Using carbon dioxide emissions as a criterion to award road construction projects: A pilot case in Flanders. *J Clean Prod*, 2015, 102: 96
- [7] Krantz J, Lu W Z, Johansson T, et al. Analysis of alternative road construction staging approaches to reduce carbon dioxide emissions. *J Clean Prod*, 2017, 143: 980
- [8] Peng B, Tong X Y, Cao S J, et al. Carbon emission calculation method and low-carbon technology for use in expressway construction. *Sustainability*, 2020, 12(8): 3219
- [9] 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 Clean Prod*, 2017, 144: 337
- [10] 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 Clean Prod*, 2019, 219: 743
- [11] Jiang R, Wu C K, Song Y Z, et al. Estimating carbon emissions from road use, maintenance and rehabilitation through a hybrid life cycle assessment approach-A case study. *J Clean Prod*, 2020, 277: 123276
- [12] Muhammad F H C Wa C, Rozaid R M, Aminudin E, et al. Review on the method for carbon footprint calculation of highway development. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*, 2019, 513: 012001
- [13] Roukounakis N, Valkouma E, Giama E, et al. The development of a carbon footprint model for the calculation of GHG emissions from highways: The case of Egnatia Odos in Greece. *Int J Sustain Transp*, 2020, 14(1): 74
- [14] Chen J, Lv Z L, Liu K Q. Study on energy saving and emission reduction effect of rubber asphalt recycled pavement based on LCA. *Highway*, 2016, 61(5): 204
(陈珺, 吕正龙, 刘开琼. 基于 LCA 的橡胶沥青再生路面节能减排效果研究. *公路*, 2016, 61(5): 204)
- [15] Qi X F. Quantization and analysis of carbon emission of asphalt pavement preventive maintenance technology. *Highway*, 2017, 62(5): 227
(齐小飞. 沥青混凝土路面预防性养护技术碳排放量化分析. *公路*, 2017, 62(5): 227)
- [16] Peng B, He J, Cai C L, et al. Quantitative evaluation method of carbon emissions in asphalt surface construction and its application. *J South China Univ Technol Nat Sci*, 2018, 46(11): 102
(彭波, 何娟, 蔡春丽, 等. 沥青面层施工碳排放量化评价方法及其应用. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(11): 102)
- [17] Barbieri D M, Lou B W, Wang F S, et al. Assessment of carbon dioxide emissions during production, construction and use stages of asphalt pavements. *Transp Res Interdiscip Perspect*, 2021, 11: 100436
- [18] Ministry of Transport, People's Republic of China. JTG/T 3821—2018 *Estimate Index of Highway Project*. Beijing: Ministry of Transport, 2018
(中华人民共和国交通运输部. JTG/T 3821—2018 公路工程估算指标. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2018)
- [19] Muench S T. Roadway construction sustainability impacts. *Transp Res Rec*, 2010, 2151(1): 36
- [20] Araújo J P C, Oliveira J R M, Silva H M R D. The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements. *Transp Res D*, 2014, 32: 97
- [21] Liu X L, Wang H T, Chen J, et al. Method and basic model for development of Chinese reference life cycle database. *Acta Sci Circumstantiae*, 2010, 30(10): 2136
(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. *环境科学学报*, 2010, 30(10): 2136)
- [22] Gong Z Q, Zhang Z H. Quantitative assessment of the embodied environmental profile of building materials. *J Tsinghua Univ*

- NatSci*, 2004(9): 1209
(龚志起, 张智慧. 建筑材料物化环境状况的定量评价. 清华大学学报(自然科学版), 2004(9): 1209)
- [23] Yan H, Shen Q P, Fan L C H, et al. Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong. *Build Environ*, 2010, 45(4): 949
- [24] Gong Z Q, Zhang Z H. A study on embodied environmental profile during the life cycle of cement. *China Civ Eng J*, 2004(5): 86
(龚志起, 张智慧. 水泥生命周期中物化环境状况的研究. 土木工程学报, 2004(5): 86)
- [25] Zhang H B, Chen H T, Xu S, et al. Evaluation on energy consumption and carbon emission of rubber modified asphalt mixture pavement. *Highway Eng*, 2021, 46(3): 154
(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. 公路工程, 2021, 46(3): 154)
- [26] Wang X Y, Wu J B, Xue Y Q, et al. Carbon emission and cost calculation of rubber modified asphalt pavement based on energy consumption analysis. *Petrol Asph*, 2022, 36(1): 55
(王雪英, 邬建波, 薛永勤, 等. 基于能耗分析的橡胶改性沥青路面的碳排放及成本计算. 石油沥青, 2022, 36(1): 55)
- [27] Blomberg T, Barnes J, Bernard F, et al. *Life Cycle Inventory: Bitumen*. 2nd Ed. Brussels: European Bitumen Association, 2011
- [28] Zhang Y S. *Life Cycle Assessment on the Reduction of Carbon Dioxide Emission of Buildings* [Dissertation]. Taipei: National Cheng Kung University, 2002
(张又升. 建筑物生命周期二氧化碳减量评估 [学位论文]. 台北: 国立成功大学, 2002)
- [29] Ministry of Housing and Urban-Rural Development, People's Republic of China. GBT 51366—2019 *Standard for Building Carbon Emission Calculation*. Beijing: China Architecture Building Press, 2019
(中华人民共和国住房和城乡建设部. GBT 51366—2019 建筑碳排放计算标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019)
- [30] Li L G, Li L Y, Zhou J D, et al. Calculation and evaluation of comprehensive energy consumption and carbon emissions of revetment works materials. *Yangtze River*, 2012, 43(7): 50
(黎礼刚, 李凌云, 周紧东, 等. 护岸工程材料综合能耗和碳排放计算及评价. 人民长江, 2012, 43(7): 50)
- [31] Cang Y J, Luo Z X. Study on accounting methods of embodied carbon emissions of building materials in different stages of engineering design. *Urban Archit*, 2019, 16(26): 33
(仓玉洁, 罗智星. 工程设计中不同阶段建筑建材物化碳排放核算方法研究. 城市建筑, 2019, 16(26): 33)
- [32] Huang B B. *Research on Influence Factors of Carbon Emission During Construction of Typical Pavement Projects in Guangdong* [Dissertation]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021
(黄兵兵. 广东省典型路面工程施工阶段碳排放量影响因素研究 [学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2021)
- [33] Dong K T. *Study on the Building Carbon Dioxide Emission Based on Reinforced Concrete Structures* [Dissertation]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2011
(董坤涛. 基于钢筋混凝土结构的建筑物二氧化碳排放研究 [学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2011)