

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240528001

城市地下交通基础设施系统全生命周期碳排放 计算模型*

路德春, 季港澳, 王国盛, 杜修力

(北京工业大学城市建设学部, 北京 100124)

摘要: 气候变化是当前世界面临的主要挑战之一, 其中人类生产活动制造的温室气体是导致气候变化的主要因素之一, 准确评估温室气体的排放量是实现节能减排的重要环节。城市地下交通基础设施系统具有防治交通阻塞、增加城市绿化面积等优势, 能够实现节能减排。然而, 目前还缺乏城市地下交通基础设施系统的碳足迹计算方法。在全生命周期碳足迹评估框架内, 研究了城市地下交通基础设施系统的碳足迹计算边界和尺度, 提出了地下交通基础设施全生命周期碳足迹计算模型, 基于计算模型, 建立了城市地下交通基础设施系统碳排放计算方法。结合某工程案例, 揭示了城市地下交通基础设施系统总体及各阶段的碳排放规律, 针对不同阶段的碳排放特点, 给出了相应的节能减排建议和措施。

关键词: 地下交通基础设施; 碳足迹; 全生命周期; 计算方法; 节能减排

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)06-1231-14

Full Lifecycle Carbon Emission Calculation Model for Urban Underground Transportation Infrastructure Systems

LU Dechun, JI Gangao, WANG Guosheng, DU Xiuli

(Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology,
Beijing 100124, China)

Abstract: Climate change is one of the most significant challenges facing the world today, with greenhouse gas emissions from human activities being a primary driver. Precise evaluation of these emissions is crucial for achieving energy conservation and emission reduction. Urban underground transportation infrastructure systems, which help alleviate traffic congestion and expand urban green spaces, play a key role in achieving energy conservation and emission reduction. However, there is currently no method for calculating the carbon footprint of these systems. This study addressed this gap by developing a carbon footprint calculation model within a full lifecycle assessment framework, specifically for urban underground transportation infrastructure. The model established a methodology for carbon emission calculations, which was then applied to a case study to analyze carbon emission patterns

* 收稿日期: 2024-05-28; 修回日期: 2024-09-09

基金项目: 中国工程院战略咨询“城市地下基础设施低碳发展战略研究”(2022-XY-76)资助

作者简介: 路德春(1977—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事岩土与城市地下工程方面的研究。

E-mail: dechun@bjut.edu.cn

通信作者: 王国盛(1990—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事岩土塑性力学与连续-非连续数值方法的研究。

E-mail: wangguosheng@bjut.edu.cn

across the system's lifecycle and at various stages. Tailored recommendations and measures for energy conservation and emission reduction were proposed based on the distinct emission characteristics of each stage.

Keywords: underground transportation infrastructure; carbon footprint; full lifecycle; calculation method; energy conservation and emission reduction

0 引言

气候变化是当今世界面临最为紧迫的挑战之一,化石燃料使用制造的温室气体是导致全球气候变化的主要因素之一^[1]。在中国,2019年交通领域的碳排放占有所有碳排放的约11%^[2],是城市碳排的主要战场之一。由于城市地下空间具有扩充基础设施容量、提高土地利用效率、防治交通阻塞、节省土地资源、缓解中心城市密度、增加城市绿化面积等特点和优势,越来越多的交通基础设施被建于地下。当前中国城市地下交通基础设施建设速度已位居世界前列,城市地下交通里程现在仍以11%/年的速度增加^[3]。为了准确评估交通领域的碳排放当量,建立城市地下交通基础设施系统全生命周期碳排放计算方法是必要的。

现有的碳排放评估方法主要包括:清单分析法、实测法、投入产出法、过程分析法和全生命周期评估法等。清单分析法以过程为出发点,详细解释碳排放的各个过程,然后将各个过程分解计算,该方法通常被用于微观尺度的建筑物碳排放计算^[4]。实测法通过规定计量工具和实验方法,对某个碳排放源现场测定,得到碳排放源的排放浓度和流量,根据相关标准计算出碳排放量,该方法计算精度较高,但仅适用于排放源稳定的环境,不具有广泛的适用性^[5-6]。投入产出法是通过统计某类部门在一定时期内投入来源和产出去向,计算消耗系数,并据此进行经济分析和预测,该方法适用于宏观领域碳排放的计算,计算结果精度较差^[7]。过程分析法是对具体生产过程进行详细的碳排放拆解,具有计算模型简单、计算过程方便的特点。在过程拆分时,受客观条件和计算成本的限制,通常仅考虑生产的主要环节,导致计算结果具有截断误差^[8]。全生命周期评估法(Life Cycle Assessment, LCA)是将研究对象从“摇篮到坟墓”划分为若干个阶段,确定各阶段计算边界并逐一展开计算分析。该方法具有分析全面、计算结果准确的特点,并且能够确定影

响最显著的生命阶段,进而可以有效给出减排建议和措施,因此被广泛用于不同领域或产品的碳足迹评估^[4,9-10]。张又升^[10]基于全生命周期理念,提出了简约式生命周期评估,并将建筑全生命周期划分为建材生产运输、营建施工、日常使用、更新维护、废弃拆除处理、建材回收6个阶段,并针对各个阶段的耗能情况,构建了建筑全生命周期碳排放计算模型。L. Gustavsson等^[11]和R.J. Cole等^[12]将建筑全生命周期划分为原材料生产、定点建设、运行、拆除及材料处理4个阶段;G.P. Gerilla等^[13]则将建筑全生命周期分为建设施工、维护、运行、废弃处理4个阶段;G.Q. Chen等^[14]将建筑全生命周期分为建筑施工、装修、室外设施建设、运输、运行、废物处理、物业管理、拆卸和废弃物的处置9个阶段;L.Z. Brihan等^[15]将建筑全生命周期划分为生产、建设、使用、拆除4个阶段。上述研究表明,在地上建筑全生命周期碳足迹评估中,LCA模型还存在阶段划分不统一,计算边界难以合理确定的问题。鞠颖等^[16]通过统计分析发现,地上建筑在运营阶段的碳排放量占全生命周期碳排放量的60%~80%。因此,部分学者仅对建筑运行阶段的碳排放开展研究^[17-19]。针对地上交通系统碳排放计算方法,A.T. Ghate等^[20]采用全生命周期的方法,对比分析了印度城市快速公交系统和地铁轨道交通系统在施工、运营和维护期间的能源消耗和碳排放当量,结果表明地铁轨道交通系统在整个生命周期内更加节能减排。J. Pérez等^[21]利用全生命周期评价方法,计算了马德里市垃圾收集车队的碳足迹,其中燃料的全生命周期碳排放占比为92%,车辆全生命周期占比为8%,基于这一规律给出了马德里市垃圾收集的优化路径。M.N. Postorino等^[22]通过综合考虑机场直接碳排放和间接碳排放来源,提出一种机场交通碳足迹评估方法,并确定了碳排放宏观来源的百分比贡献以及单个宏观源对碳排放的贡献。

综上所述,LCA已被广泛用于地上建筑全生命周期碳排放的计算,也有少量地上交通系统全生命周期碳排放的计算方法。然而,目前还缺乏城市地

下交通基础设施系统全生命周期的碳排放计算方法,原因是地下交通基础设施相较于地上建筑发展的较晚,同时地下基础设施的计算边界与尺度与地上建筑差别较大,无法直接采用地上建筑全生命周期碳排放计算方法的框架。本文通过研究城市地下交通基础设施系统的碳足迹计算边界和尺度,提出碳足迹计算模型,基于计算模型建立城市地下交通基础设施系统全生命周期碳排放计算方法。利用建立的碳排放计算方法,结合工程案例揭示城市地下交通基础设施系统碳排放规律,并提出相应的节能减排措施。

1 城市地下交通基础设施系统碳足迹计算模型

1.1 计算边界

参考地上建筑全生命周期的阶段划分^[23-25],交通基础设施系统的全生命周期也可以分为设计阶段、物化阶段、运维阶段和消纳阶段。然而,对于城市地下交通基础设施系统前期设计阶段的碳排放量占全生命周期总碳排放量较少^[26],依据帕累托法则^[27],在城市地下交通基础设施系统的全生命周期碳足迹分析中不考虑设计阶段的碳排放。另一方面,地下空间开发与利用具有不可逆性^[28],当地下基础设施达到使用寿命后,通常改建为功能降级的地下基础设施,该阶段的碳排放属于新建基础设施的建造阶段^[29]。基于上述认识,将城市地下交通基础设施系统的全生命周期计算边界划分为物化阶段和运维阶段,如图1所示,并将二者定义为一级边界。

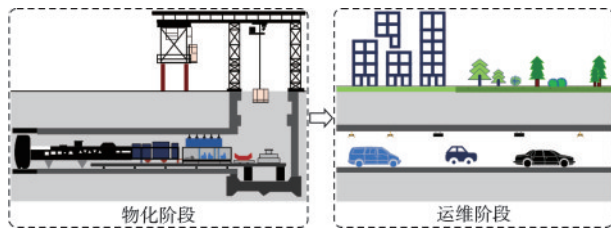


图1 城市地下交通基础设施系统全生命周期碳排放过程
Fig.1 Carbon emission process of urban underground transportation infrastructure systems over the entire lifecycle

对于物化阶段,其碳足迹从工程活动类别上可细分为建材活动和建造活动,如图2所示。运维阶段是城市地下交通基础设施系统全生命周期碳排

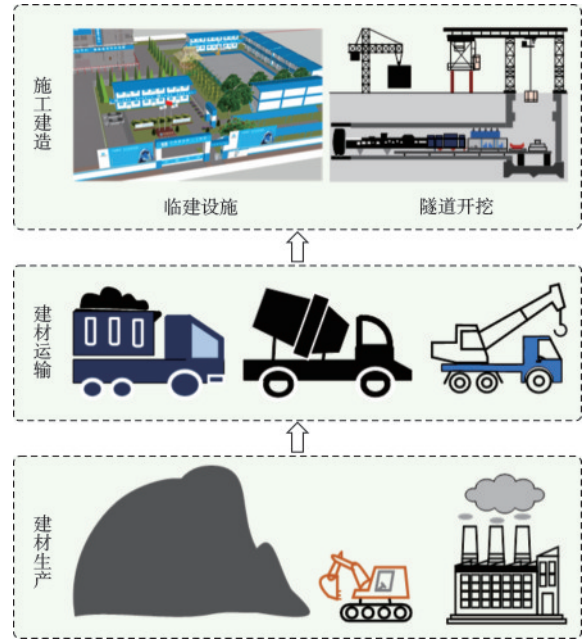


图2 物化阶段的碳排放分布

Fig.2 Carbon emission distribution in the materialization stage

放量占比最大的阶段,该阶段的碳排放来源主要包括源头端、消费端和固碳端。其中,源头端是指提供地下交通基础设施系统正常运行的能源,包括化石能源和清洁能源。消费端是指车辆消耗和地下交通基础设施运行的能耗,当不考虑能耗效率损失时消费端与源头端的碳排放量近似相等,利用其中之一进行运维阶段碳排放当量计算即可。车辆碳排放包括车辆生产和使用两部分,由于该系统中的车辆同样会应用在其他地方,因此本文不再考虑车辆生产的碳排放,仅考虑使用部分所产生的碳排放。固碳端指释放的地面空间作为城市绿地吸收的二氧化碳或固碳技术固定的二氧化碳,运维阶段详细信息如图3所示。本文将建材活动、建造活动、源头端、消费端和固碳端定义为二级边界。

根据城市地下交通基础设施系统最底层的活动清单,将二级边界进一步展开,形成全生命周期碳足迹三级计算边界,如图4所示。其中,一级边界由宏观全生命周期所包含的物化阶段和运维阶段组成;二级边界是一级边界的初步细化,由建材活动碳排放、建造活动碳排放、源头端碳排放、消费端碳排放和固碳端碳吸收组成;三级边界是二级边界的进一步展开,是由具体的生产和活动组成。如建材活动主要包括地下交通基础设施用到的建材以及建材运输至施工现场的交通类型,地下交通基础

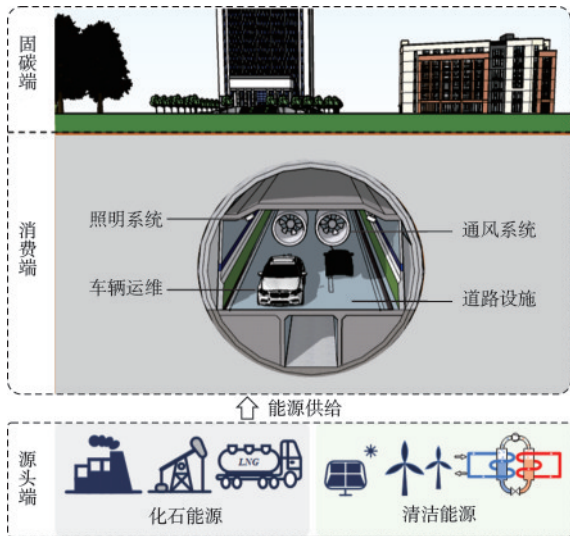


图3 运维阶段的三端碳排放体系

Fig.3 Three-end carbon emission system during operation and maintenance phase

设施用到的建材种类主要是钢材、混凝土、木材等，运输材料的交通方式包括公路、铁路、水路和航空。基础设施建造活动主要包括地面施工和地下施工，其中，地面施工包括地面准备工作、施工机具运行、临时设施等；地下施工包括开挖工程、土方工程、结构工程、排水工程等。源头端碳排放需要考虑输入系统能源，能源类型主要包括化石能源和清洁能源；消费端主要包括车辆碳排放和基础设施辅助设备碳排放两部分，其中车辆包含汽油车、柴油车、新能源车和混动车等，基础设施运行所用到的设施包括照明系统、通风系统及其它设施；固碳端通过各种途径将二氧化碳从大气中捕获并储存起来，包括物理固碳和生物固碳。其中物理固碳包括直接空气捕获技术，生物固碳包括生物炭土壤固碳技术、绿地碳汇技术。

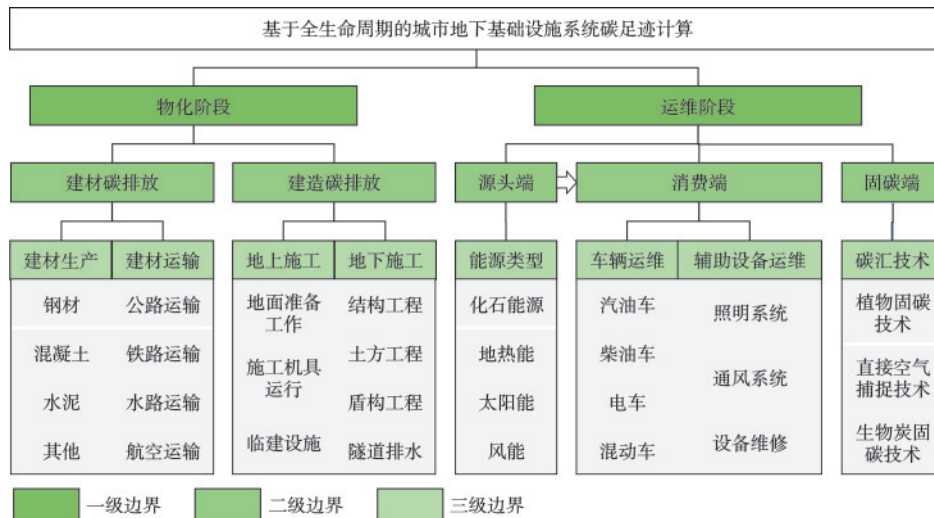


图4 地下交通基础设施全生命周期示意

Fig.4 Schematic diagram of the entire lifecycle of underground transportation infrastructure

1.2 计算尺度

为了获得城市地下交通基础设施系统中各类活动的能源、资源消耗量，必须给出基础设施系统的计算尺度，包括空间尺度和时间尺度。城市地下交通基础设施系统的空间尺度为隧道的长度，时间尺度包括基础设施的建设周期和交通系统的服役周期，在中国建造阶段通常为2~5年，运维阶段通常为100年^[30-31]。以基础设施系统的照明设备为例，来说明空间尺度和时间尺度的作用。要计算基础设施系统照明产生的碳排放，首先需要知道多大范围内有多少个设备，设备的运行时间是多久；进而

通过单位时间和单位距离的能耗因子，乘以隧道长度（空间尺度）和运行时间（时间尺度），即可得到基础设施系统照明设备的碳排放量。

2 碳足迹计算方法

利用ISO 14042(摇篮到坟墓方法)定义的LCA碳足迹评价方法，结合城市地下交通基础设施系统计算边界和计算尺度，基础设施系统全生命周期的碳足迹包括物化阶段(CM)和运维阶段(OM)碳排放的总和。因此，城市地下交通基础设施系统全生命周期的碳排放当量在一级边界上可表示为：

$$C_{LC} = C_{CM} + C_{OM} \quad (1)$$

式中, C_{LC} 为地下交通基础设施系统全生命周期的碳排放量; C_{CM} 和 C_{OM} 分别为物化阶段和运维阶段的碳排放量,单位为 kgCO_2e 。

2.1 物化阶段

由计算边界可知,物化阶段包括建材生产(MP)、建材运输(MT)和施工过程(CP)三个活动,得:

$$C_{CM} = C_{MP} + C_{MT} + C_{CP} \quad (2)$$

式中, C_{MP} 、 C_{MT} 和 C_{CP} 分别为物化阶段中建材生产、建材运输和施工过程产生的碳排放量,并参考联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)给出的碳排放计算公式,其表达式为:

$$C_i = \sum_{j=1}^m Q_{ij} \cdot f_{ij} \quad (3)$$

式中, C_i 为物化阶段第 i 子阶段产生的碳排放量, $i=MP$ 、 MT 和 CP ; Q_{ij} 为二级边界第 i 阶段第 j 种能源/材料的消耗量,其中重量单位通常为 t 、长度单位通常为 m 、体积单位通常为 m^3 ; f_{ij} 为第 i 阶段第 j 种能源/材料的碳排放因子,单位是 $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{活动单位}$; m 为某一阶段内产生碳排放的工程活动总数,同时,式(3)假定全生命周期中能源利用效率不变。

当 $i=MP$ 时, C_{MP} 为建材生产过程的碳排放量,式(3)中 $Q_{MP,j}$ 为基础设施消耗的建材重量,为了与其他活动区分,这里采用 M_j 来表示, j 代表建材的种类, $f_{MP,j}$ 是指单位质量或体积建筑材料在生产或制取时的温室气体排放量。因此,式(3)可变形为:

$$C_{MP} = \sum_j M_j \cdot f_{MP,j} \quad (4)$$

式中, $f_{MP,j}$ 为建材生产对应的碳排放系数。基于《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)^[32]中给出的建材生产碳排放系数见附表1。

当 $i=MT$ 时, C_{MT} 为建材运输过程的碳排放量,式(3)中 $Q_{MT,j}$ 受建材重量和运输距离影响,为了考虑二者的影响, $Q_{MT,j}$ 被表示为:

$$Q_{MT,j} = M_j \cdot D_j \quad (5)$$

式中, M_j 为建材重量与式(4)中的相同; D_j 为建材的运输距离。式(3)中 $f_{MT,j}$ 为单位质量建材在单位运输距离下产生的碳排放量。因此,将式(5)代入式(3),得:

$$C_{MT} = \sum_j M_j \cdot D_j \cdot f_{MT,j} \quad (6)$$

式中, $f_{MT,j}$ 为建材运输对应的碳排放系数。基于《建

筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)^[32],给出了各类运输方式的碳排放系数,见附表2。

当 $i=CP$ 时, C_{CP} 为施工过程的碳排放量,式(3)中 $Q_{CP,j}$ 为施工机具的运行时长,这里采用 G_j 来表示, j 代表施工机具的种类, $f_{CP,j}$ 为单位时间施工机具产生的温室气体排放量。因此,式(3)可变形为:

$$C_{CP} = \sum_j G_j \cdot f_{CP,j} \quad (7)$$

式中, $f_{CP,j}$ 是施工机具运行对应的碳排放系数。参考《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)^[32],给出了施工机具的碳排放系数,见附表3。

2.2 运维阶段

由计算边界可知,运维阶段的碳相关活动既包含排放量也包含固定量,其中排放量可通过源头端(CS)或消费端(CU)计算,固定量可通过固碳端(CF)计算,得:

$$C_{OM} = C_{CS} / C_{CU} + C_{CF} \quad (8)$$

式中, C_{CS}/C_{CU} 为运维阶段源头端/消费端产生的碳排放量; C_{CF} 为固碳端固定的碳排放量,单位均为 kgCO_2e 。在不考虑能源利用效率改变的条件下,消费端与源头端的碳排放量相等,均可表示运维阶段产生的碳排放量,计算时取其一即可。此时变量 $i=CS$ 、 CU 和 CF 。

当 $i=CS$ 时, C_{CS} 为源头端产生的碳排放量,式(3)中 $Q_{CS,j}$ 为基础设施源头端能源供给消耗量,这里用 E_j 表示, j 表示能源的种类, $f_{CS,j}$ 为单位质量能源释放的温室气体排放量。式(3)可变形为:

$$C_{CS} = \sum_j E_j \cdot f_{CS,j} \quad (9)$$

式中, $f_{CS,j}$ 是指能源供给类型对应的碳排放系数。通过查阅《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)^[32]和既有文献[33],给出了不同能源类型的碳排放因子,见附表4。

当 $i=CU$ 时, C_{CU} 为消费端产生的碳排放量,城市地下交通基础设施系统消费端碳排放由车辆碳排放和基础设施辅助设备碳排放组成,由于二者碳排放特点不同,因此将 C_{CU} 进一步分解为:

$$C_{CU} = C_{VCU} + C_{ECU} \quad (10)$$

式中, C_{VCU} 为车辆运行过程中产生的碳排放量,将图4中车辆运行过程中三级边界的活动代入式(10),得:

$$C_{VCU} = \sum_{j=1}^m Q_{VCU,j} \cdot f_{VCU,j} \quad (11)$$

式中, $f_{VCU,j}$ 为单位距离车辆产生的温室气体排放量, j 指车辆能源类型, 参考 2020 中国汽车低碳行动计划研究报告^[34], 不同能源类型车辆的单位距离碳排放系数见附表 5。 $Q_{VCU,j}$ 为车辆运行的能源消耗量, 它受到日交通流量 (TF_d)、车辆运行时间 (T)、拥堵系数 (c)、车辆类型占比 (P_j) 和隧道长度 (L_j) 的影响, 考虑上述因素后, $Q_{VCU,j}$ 可以表示为:

$$Q_{VCU,j} = c \cdot TF_d \cdot T \cdot \sum_j P_j \cdot L_j \quad (12)$$

在式(10)中, C_{ECU} 为基础设施辅助设备运行过程中产生的碳排放量, 将图 4 中基础设施辅助设备运行过程中三级边界的活动带入式(10), 得:

$$C_{ECU} = \sum_{j=1}^m Q_{ECU,j} \cdot f_{ECU,j} \quad (13)$$

式中, $f_{ECU,j}$ 为单位时间和单位距离内基础设施辅助设备的碳排放量, 其取值见附表 6; $Q_{ECU,j}$ 为基础设施长度范围内所有辅助设备的运行时长。基于计算尺度, 本研究将其表示为单位距离所有辅助设备运行时长与基础设施长度的乘, 表达式如下:

$$Q_{ECU,j} = R_j \cdot L_j \quad (14)$$

式中, R_j 为单位距离内所有辅助设备的运行时长; L_j 为隧道的长度, 与式(12)中的相同。

当 $i=CF$ 时, C_{CF} 为固碳端吸收的碳汇量, 式(3)中 $f_{CF,j}$ 为单位面积单位时间绿地碳汇吸收量, $Q_{CF,j}$ 受绿地碳汇面积和使用寿命影响, 为了考虑二者的影响, $Q_{CF,j}$ 被表示为:

$$Q_{CF,j} = A_j \cdot T \quad (15)$$

式中, A_j 为基础设施地下改造释放的绿地面积; T 为基础设施的运行时间。

将式(15)代入式(3), 得:

$$C_{CF} = \sum_j A_j \cdot T \cdot f_{CF,j} \quad (16)$$

式中, $f_{CF,j}$ 为绿地碳汇碳吸收系数。F. Xu 等^[35] 给出了北京市不同类型植被单位面积年固碳量, 见附表 7。

3 案例分析

3.1 项目概括

北京市某工程道路始建于 1998 年 12 月, 在 2001 年 9 月通车。为了改善交通环境, 2021 年启动将原来的双向四车道改造为双向六车道, 同时将其中一个区间段改建为地下隧道。因此, 项目全线分为直接加宽段和入地改造段。对于入地改造段, 全

长 9.16 km, 地下段采用上下分行 2 孔隧道, 单孔隧道建筑限界净宽 13 m, 机动车道为双向 6 车道。将地上交通改造为地下交通后, 释放的地面空间一部分改造为约 50 公顷的空中花园, 生态绿色花园供市民散步休闲, 提供休闲的同时可实现碳汇, 示意图如图 5 所示。本案例将利用发展的城市地下交通基础设施系统碳足迹计算方法, 对入地改造段地下交通基础设施系统的碳排放规律进行分析。



图 5 北京市某道路改造工程示意

Fig.5 Schematic diagram of a road renovation project in Beijing

3.2 数据源及碳排放计算

3.2.1 物化阶段

物化阶段的数据主要是从施工现场收集, 对于部分建材未记录详细的运输距离, 参考《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019)^[32] 给出的混凝土默认运输距离 40 km, 其他建材的默认距离 500 km, 完善了建材运输的数据。建材运输车辆类型均为柴油货车, 柴油货车碳排放因子采取权重考虑, 单位距离建材运输碳排放因子为 $0.096 \text{ kgCO}_2\text{e}/(\text{t} \cdot \text{km})$ 。表 1 所示为该工程提供的建材使用量和对应的运输距离。将表 1 中的数据代入式(4)和式(6), 即可计算出建材生产和建材运输产生的碳排放量。

该工程在施工过程中用到的工程机械包括挖掘机、盾构机、双头车、罐车、叉车、混凝土搅拌车、曲臂升降车等, 各类工程机械的作业量见表 2。将表 2 中的数据代入式(7), 即可计算出基础设施施工过程中产生的碳排放量。

表1 建材使用量及相应的运输距离

Table 1 Consumption of building materials and corresponding transportation distances

建材类型	材料量	运输距离/km
膨润土/t	7 123.34	1 079.4
稳定剂/t	86.40	1 158.5
盾尾油脂/t	1 154.77	349.5
润滑油脂/t	52.20	247.8
齿轮油/t	91.63	324.2
液压油/t	57.73	400.1
柴油/t	401.68	1 060.8
盾构制浆剂/t	261.00	155.3
克泥效/t	277.14	1 836.4
水泥/t	33 900.76	107.7
混凝土/m ³	456 172.37	40
钢材/t	163 563.06	500
砌块/m ³	2 813.66	500
防水材料/m ²	6 054.87	500
防火材料/m ²	190 788.40	500
铝材/t	626.26	500
楼梯地砖/m ³	35.11	500
管材/t	21.13	500
水泥砂浆/m ³	77.66	500
水玻璃/t	13 927.64	107.7

表2 施工机械作业量

Table 2 Construction machinery workload

工程机械	作业量	工程机械	作业量
挖掘机/m ³	60 630	双头车/(kW·h)	8 760 000
盾构机/m	7 343.9	罐车/kg	184 368.8
搅拌车/(kW·h)	401 792	曲臂升降车/(kW·h)	425 152
施工现场/(kW·h)	24 560 349.88	叉车/kg	173 842.2

3.2.2 运维阶段

运维阶段的碳排放既可以通过源头端计算,也可以通过消费端计算,在不考虑能源利用效率改变的条件下二者计算的碳排放量相等。本次案例的城市地下交通基础设施系统还未投入运行,难以给出源头端总体的能源供应量,因此选取消费端的碳排放活动进行计算。消费端的碳排放活动包括车辆运行和地下交通基础设施辅助设备运行,碳排放量为二者之和。

对于车辆运行数据,参考《2021年北京交通发展年度报告》^[36]中给出的北京市晚高峰(17:00-19:00)交通流量占全天交通流量的26.7%,只要获

得相似道路晚高峰交通流量,即可推算出本案例全天的交通流量。陈静等^[37]对北京市某相似道路晚高峰交通流量进行了统计,结果显示该道路晚高峰交通流量为3 038 pcu/h(Passenger Car Unit/hour),pcu(标准车当量数)是通过将不同类型车辆等效为标准车得到的当量数。利用陈静统计的晚高峰交通流量,计算得到全天交通流量为22 756辆标准车,用于本案例车辆运行碳排放的计算。由于不同车辆类型的碳排放因子不同,因此需要获取北京市不同能源类型车辆的占比。参考国家数据中心给出的2022年全国汽车占比情况^[38],计算得到不同能源类型车辆占比的数据量,见表3。式(12)给出的车辆运行碳排放计算方法中,需要考虑早晚高峰期间交通拥堵产生的额外碳排放量,本研究假定拥堵系数 $b=1.05$;基于计算尺度,本案例地下交通路线长度为9.16 km,城市地下交通基础设施的服役时间是100年,将表3中的数据、路线长度、服役时间和拥堵系数代入式(12),即可计算出车辆运行过程产生的碳排放量。

表3 不同能源类型车辆占比

Table 3 Proportion of vehicles by energy types

车辆能源类型	车辆占比/%	车辆能源类型	车辆占比/%
纯电动车	2.51	混合动力车	0.64
燃气车	1.90	柴油车	5.64
摩托车	19.38	汽油车	69.93

对于城市地下交通基础设施辅助设备运行数据,参考《公路隧道照明设计细则》(JTG/T D70/2-01—2014)^[39],当隧道长度大于100 m时,隧道需要安装照明设施。并且由于地下空间的封闭性,需要提供24 h的人工光源,以确保隧道内的行车安全^[40]。根据隧道通风模式要求^[41],隧道运营期间采取每间隔2 h进行隧道全线通风换气,每次运行时间为1.5 h,即每天通风设备运行10.29 h。因此,将基础设施使用寿命100年和基础设施长度9.16 km代入式(16),即可计算出辅助设备的碳排放量。

对于碳汇方面的数据,需要给出交通基础设施地下改造释放的绿地面积和基础设施运行时间。根据工程规划,释放的地上面积约有50公顷用于改造为城市绿地,基础设施使用寿命为100年。将其代入式(18),即可计算出改造后城市绿地的碳吸收量。固碳端也可以采取其他碳汇技术,如直接空气捕捉技术、生物炭土壤固碳技术等,在地下基础设

施通风系统可加入DAC技术进行固碳。收集的二氧化碳可用于制备化学品如甲醇、甲酸。用二氧化碳制备汽油和生物柴油,可以代替部分化石燃料,缓解碳排放和环境污染问题。二氧化碳还可以与工业废料、城市垃圾中含有大量碱土金属的化合物进行矿化反应,转化为稳定的碳酸盐矿物,从而实

现永久封存^[42]。

综上所述,将该案例中物化阶段与运维阶段计算得到的碳排放量代入式(1),即可得到城市地下交通基础设施系统全生命周期的碳排放量。物化阶段、运维阶段及各子阶段的碳排放量计算结果见表4。

表4 某工程改造工程地下交通基础设施全生命周期碳排放计算结果

Table 4 Carbon emission calculation results for the entire lifecycle of underground transportation infrastructure in a renovation project

一级边界	碳排放量/kgCO ₂ e	二级边界	碳排放量/kgCO ₂ e	三级边界	碳排放量/kgCO ₂ e
物化阶段	751 622 188.1	建材活动碳排放	687 690 585.1	建材生产	1 170 290 046
		建造活动碳排放	63 931 603.07	建材运输	13 857 505.8
				施工建造	63 393 430.1
运维阶段	2 800 352 239	消费端	2 831 032 239	车辆运行	1 887 298 529
				辅助设备运行	2 609 628 348
		固碳端	-30 680 000	城市绿地碳汇	-30 680 000

3.3 结果分析

将案例中物化阶段和运维阶段各活动过程的碳排放当量绘制于图6。从图6中可以发现,在物化阶段,建材生产的碳排量占比最大,其排放当量为1 170 290.05 tCO₂e,占全生命周期碳排放的20.48%;其次是施工建造活动的碳排放量,占比约为1.11%。在运维阶段,基础设施辅助设备的碳排量占比最大,其排放当量为2 609 628.35 tCO₂e,占全生命周期碳排放的45.67%,其次是车辆运行能耗碳排放,为1 887 298.53 tCO₂e,占全生命周期碳排放的33.03%,运维阶段总的碳排放量占全生命周期碳排放量的79.20%。

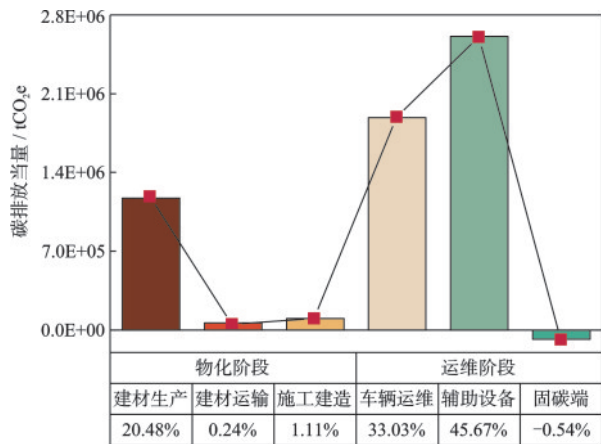


图6 全生命周期物化阶段与运维阶段碳排放当量比例分布
Fig.6 Distribution of carbon emission equivalent ratios in the materialization stage and operation and maintenance stage of the entire lifecycle

图7所示为地下交通基础设施系统的碳排放随时间的变化趋势。图中曲线的起始数据是施工阶段的碳排放量。“物化+车辆运维”代表了仅考虑施工阶段和车辆运营维护阶段的碳排放增长趋势。“物化+车辆+设备运维”是指建设阶段、车辆运行维护阶段和辅助设施运行维护阶段的碳排放增长趋势。“物化+运维阶段”表明,在前者的基础上,增加了固碳阶段碳排放的增长趋势。从图7横坐标可以看出,该项目建造时间为5年,运维持续时间为100年。当考虑车辆运维时,曲线平缓,碳排放增长缓慢。当考虑车辆运维和辅助设备运维时,曲线陡峭,意味着该阶段碳排放增长迅速。说明在运维期间,辅助设备产生的碳排放量更为显著。考虑CF阶段的碳排放时,可以看出阴影面积随着时间的增长而逐渐加宽,说明植物固碳效果随时间越长,效果越显著。

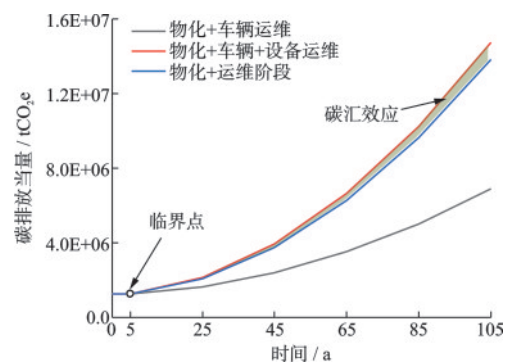


图7 地下交通基础设施系统整个生命周期的碳排放当量
Fig.7 Carbon emission equivalent of the entire lifecycle of underground transportation infrastructure systems

图8显示了地下交通基础设施系统不同阶段的碳排放占比。可以发现,建材生产过程碳排放量占物化阶段碳排放总量的93.81%,其中,以钢材和混凝土的排放为主,钢材的碳排放当量为712 815.17 tCO₂e,占建材生产碳排放总量的60.91%,混凝土碳排放当量为358 400.54 tCO₂e,占建材生产碳排放总量的30.62%,盾构制浆剂、水泥和地材的碳排放分别占比为3.50%、1.94%和1.70%。因此,研发新材料代替钢材能够大幅减少基础设施工程物化阶段的碳排放,同样对新型绿色混凝土的研发也能够实现物化阶段的减排。

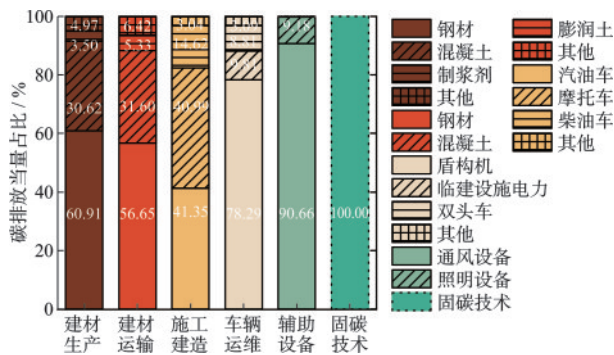


图8 地下交通基础设施系统不同阶段的碳排放占比
Fig.8 Proportion of carbon emissions in different stages of underground transportation infrastructure systems

建材运输阶段碳排放占物化阶段碳排放总量的1.11%,碳排放主要以钢材和混凝土为主。原因是钢材质量较大且用量较多,导致车辆运输的能耗增加。如果新研发的钢材替代材料(如碳纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维等)的质量更轻,则新材料的运输能耗会大大降低,进而实现材料生产端和材料运输端的大幅减排。因此,高性能新材料的研发对于实现碳中和意义重大。

施工建造阶段碳排放占物化阶段碳排放总量的5.08%,主要开挖工程、临建设施用电以及双头车施工为主。上述物化阶段碳足迹分析表明,建材生产和运输产生的碳排放占比最大。因此,选择性能更高、更加绿色的建材能够有效降低物化阶段的碳排放量,如煤矸石作为工业废弃物,可作为喷射混凝土骨料应用在隧道施工中^[43],用土工聚合物混凝土代替部分混凝土^[44],用粉煤灰和磨碎颗粒化高炉渣代替部分水泥^[45],采用纤维材料代替钢筋材料^[46],可重复使用构件同样能够减少碳排放^[47]。

运维阶段的碳排放包括车辆运行和交通

基础设施辅助设备运行产生的碳排放,从图中可以发现,基础设施辅助设备的碳排放当量为2 609 628.35 tCO₂e,占运维阶段碳排放总量的58.03%;车辆运行的碳排放当量为1 887 298.53 tCO₂e,占运维阶段碳排放总量的41.97%;由地下交通基础设施释放的地面绿地碳汇吸收的碳排放当量为30 680 tCO₂e。地下交通基础设施辅助设备碳排放由隧道内通风设备、照明设备以及设备维护产生,其中隧道通风设备产生的碳排放当量最高,为23 659 346.09 tCO₂e,占交通基础设施辅助设备碳排放总量的90.66%,照明设备和设备维护的碳排放量分别占交通基础设施辅助设备碳排放总量的9.18%和0.16%。因此,在通风设备中加入DAC技术对于减少运维阶段的碳排放量具有重要作用,在城市地下交通基础设施系统规划和设计中应当予以考虑。对于车辆运维产生的碳排放,通过推广使用新能源电车,增加电车的保有率能够大幅实现节能减排。同时,通过将地面交通改造为地下交通,释放的地面空间一方面用于城市绿地实现碳汇,另一方面可设置自行车道和人行道,通过鼓励宣传扩大绿色出行占比,可进一步实现运维阶段的节能减排。对于城市绿地碳汇,可以选择种植碳汇能力更强的植物,以及丰富的植物组成来增加其碳汇能力^[48-49],同时在隧道通风设备中加入DAC技术,实现辅助设备运行过程中碳排放的固定,可大幅降低运维阶段的碳排放^[42]。

为了分析车辆能源类型对运维阶段碳排放的影响,本文采用情景假设的方法,分别假定全部是油车的情景和全部是电车的情景,利用式(13)的计算方法,分别计算得到全部油车和全部电车的碳排放当量,并与实际情景下车辆的碳排放当量对比如图9所示。以实际情景为基准,当车辆全部由汽油车组成时,其碳排放量为实际情景的1.12倍;当车辆全部电车时,其碳排放当量仅为实际情景的63.15%。同时,考虑到未来汽车数量的潜在增长,三种情境下的汽车碳排放随时间的演变规律如图10所示。在汽油车主导的场景中,随着汽车使用量的攀升,其碳排放量将呈现出迅猛的增长态势。然而,在电动汽车场景中,得益于交通部门低碳转型的深入推进和智能供电系统的日益完善,碳排放量的增长已经连续多年保持下降趋势。而在传统情况与电动汽车发展并行的场景中,随着中国对电动汽车产业的强有力扶持,电动汽车的比例正逐年稳

步上升。其碳排放的增长趋势虽与电动汽车情境类似,但受汽油车存在的影响,整体仍略高于电动汽车的碳排放水平。因此,新能源电车替代油车在运维阶段节能减排上具有重要作用,建议全球继续加快新能源电车的使用率。

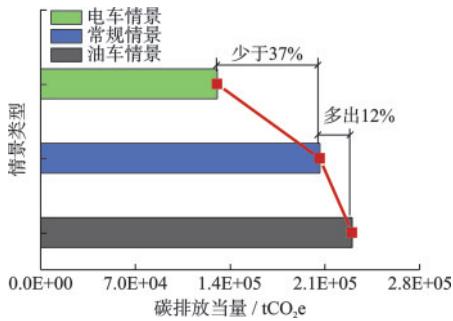


图9 三种情景下车辆碳排放量对比

Fig.9 Comparison of vehicle carbon emission equivalents across three scenarios

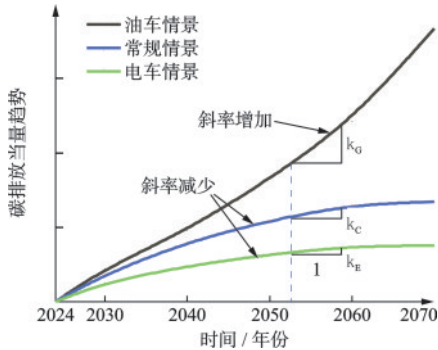


图10 三种情景下车辆碳排放量预测

Fig.10 Prediction of vehicle carbon emission equivalents in three scenarios

4 结论与展望

在全生命周期碳足迹评估框架内,建立了城市地下交通基础设施系统碳排放计算方法。首先,根据城市地下交通基础设施的特点,提出了碳足迹计算的三级边界,由计算边界即可清晰地知道城市地下交通基础设施系统在建设和运维过程中的碳排放活动;同时确定了碳足迹计算的空间尺度和时间尺度,进而给出了地下交通基础设施全生命周期碳足迹计算模型。其次,基于提出的计算模型,采用IPCC给出的碳排放当量计算公式,推导了不同边界内碳排放活动的计算公式,提供了对应活动碳排放因子的建议值,建立了城市地下交通基础设施系统全生命周期碳排放计算方法。结合北京市某工

程案例,利用建立的碳排放计算方法,分析了不同阶段的碳排放特点,给出了相应的节能减排建议和措施。

本次案例中地下交通基础设施系统全生命周期的碳排放当量为5 713 787.86 tCO₂e,其中物化阶段的碳排放当量为1 247 540.98 tCO₂e,占全生命周期碳排放当量的21.83%;运维阶段的碳排放当量为4 466 246.88 tCO₂e,占比为78.17%,是地下交通基础设施系统主要的碳排放阶段,应当采用更有效的节能减排措施。在物化阶段,建材生产制造的碳排放最多,占整个物化阶段碳排放的93.81%,占全生命周期碳排放的20.48%,因此高性能、绿色低碳的建材研发是实现碳中和的重要举措。在运维阶段,车辆运行产生的碳排放和基础设施辅助设备运维产生的碳排放占比相差不大,车辆运行的碳排放占比为41.57%,辅助设备运维的碳排放占比为58.43%,在地下通风设施中加入固碳技术,并将自然风风速和风向与机械通风相结合,能够大幅减少运维阶段的碳排放量。通过情景假设,分析了实际车辆分布、全部油车和全部电车的碳排放规律,结果表明全部油车的碳排放当量是实际情景的1.12倍,全部电车的碳排放当量是实际情景的63.15%,因此用电车替代油车对于节能减排具有重要作用。本文建立的碳排放计算方法为城市地下交通基础设施系统全生命周期碳足迹评价提供了一种通用方法,可为城市尺度节能减排贡献力量。

参考文献:

- [1] Prather M J, Penner J E, Fuglestvedt J S, et al. Tracking uncertainties in the causal chain from human activities to climate [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(5): 1-6.
- [2] Li X Y, Tan X Y, Wu R, et al. Paths for carbon peak and carbon neutrality in transport sector in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(6): 15-21.
- [3] 中国工程院战略咨询中心, 中国岩石力学与工程学会地下空间分会, 中国城市规划学会. 中国城市地下空间发展蓝皮书[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [4] Lee J Y, Lee C K, Chun Y Y. Greenhouse gas emissions from high-speed rail infrastructure construction in Korea [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 87: 102514.

- [5] Liu J, Han K, Chen X M, et al. Spatial-temporal inference of urban traffic emissions based on taxi trajectories and multi-source urban data [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 106: 145-165.
- [6] Nyhan M, Sobolevsky S, Kang C, et al. Predicting vehicular emissions in high spatial resolution using pervasively measured transportation data and microscopic emissions model[J]. *Atmospheric environment*, 2016, 140: 352-363.
- [7] Qi Y, Rao G, Zha L, et al. Carbon transfer decision model based on LMDI method[J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, 2022: 1-9.
- [8] Aye L, Ngo T, Crawford R H, et al. Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules [J]. *Energy and Buildings*, 2012, 47: 159-168.
- [9] 杨斯慧. 城镇化对民用建筑碳排放的影响效应研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
Yang S H. Research on the impac of urbanization on civil building carbon emission [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [10] 张又升. 建筑物生命周期二氧化碳减量评估[D]. 台湾: 成功大学, 2002.
Zhang Y S. Assessment of carbon dioxide reduction during the life cycle of buildings[D]. Tainan: Success University, 2002. (in Chinese)
- [11] Gustavsson L, Joelsson A, Sathre R. Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building[J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42(2): 230-242.
- [12] Cole R J. Energy and greenhouse gas emissions associated with the construction of alternative structural systems [J]. *Building and Environment*, 1998, 34 (3) : 335-348.
- [13] Gerilla G P, Teknomo K, Hokao K. An environmental assessment of wood and steel reinforced concrete housing construction[J]. *Building and Environment*, 2007, 42(7): 2778-2784.
- [14] Chen G Q, Chen H, Chen Z M, et al. Low-carbon building assessment and multi-scale input - output analysis[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2011, 16(1): 583-595.
- [15] Bribián I Z, Usón A A, Scarpellini S. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification [J]. *Building and Environment*, 2009, 44(12) : 2510-2520.
- [16] 鞠颖, 陈易. 全生命周期理论下的建筑碳排放计算方法研究: 基于 1997~2013 年间 CNKI 的国内文献统计分析[J]. *住宅科技*, 2014, 34(5): 32-37.
Ju Y, Chen Y. Research on the building carbon emission calculation method in compliance with the theory of full lifecycle: based upon statistical analysis of CNKI's domestic literature dated between 1997~2013[J]. *Housing Science* 2014, 34(5): 32-37. (in Chinese)
- [17] Mohamed M A A. Saving energy through using green rating system for building commissioning [J]. *Energy Procedia*, 2019, 162: 369-378.
- [18] Ghafoori M, Abdallah M. Innovative optimization model for planning upgrade and maintenance interventions for buildings[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2022, 36(6) : 04022051.
- [19] Wang B I, Lo C M, Lin M D. Building energy conservation strategies evaluation and simulation[C]//2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). New Jersey: Piscataway, 2018: 1874-1878.
- [20] Ghate A T, Qamar S. Carbon footprint of urban public transport systems in Indian cities [J]. *Case Studies on Transport Policy*, 2020, 8(1): 245-251.
- [21] Pérez J, Lumbreras J, Rodríguez E, et al. A methodology for estimating the carbon footprint of waste collection vehicles under different scenarios: Application to Madrid[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 52: 156-171.
- [22] Postorino M N, Mantecchini L. A transport carbon footprint methodology to assess airport carbon emissions [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2014, 37: 76-86.
- [23] Fenner A E, Kibert C J, Woo J, et al. The carbon footprint of buildings: A review of methodologies and applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 94: 1142-1152.
- [24] Teng J, Wu X. Eco-footprint-based life-cycle eco-efficiency assessment of building projects[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 39: 160-168.
- [25] Sim J, Sim J. The atmospheric environmental impact of a Korean traditional building's life cycle, along with carbon footprint analysis [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 28: 172-186.

- [26] 李岳岩, 陈静. 建筑全生命周期的碳足迹[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- [27] Richard K, Li H Z. Pareto 80/20 rule[M]. Beijing: Haichao Press, 2001.
- [28] Peng F L, Qiao Y K, Sabri S, et al. A collaborative approach for urban underground space development toward sustainable development goals: Critical dimensions and future directions [J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2021, 15: 20-45.
- [29] Qiao Y K, Peng F L, Dong Y H, et al. Planning an adaptive reuse development of underutilized urban underground infrastructures: A case study of Qingdao, China[J]. *Underground Space*, 2024, 14: 18-33.
- [30] Li C, Li K, Chen Z. Service life prediction of underground structures: A case study on the transport hub of Tianjin station[C]//*Advances in Concrete Structural Durability*, Proceedings of ICDCS2008. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2008: 985-991.
- [31] Barles S. Urban metabolism of Paris and its region[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2009, 13(6): 898-913.
- [32] 建筑碳排放计算标准: GB/T51366—2019[S]. 北京: 住房和城乡建设部.
- [33] 高春艳, 牛建广, 邢秀青. 建筑碳排放计量方法和碳排放因子核算[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2021.
- [34] 中汽数据有限公司. 2020中国汽车低碳行动计划研究报告[R]. 天津: 中汽数据有限公司, 2020: 16-17.
- [35] Xu F, Wang X, Li L. NPP and vegetation carbon sink capacity estimation of urban green space using the optimized CASA model: a case study of five Chinese cities [J]. *Atmosphere*, 2023, 14(7): 1-20.
- [36] 北京交通发展研究院. 2021年北京交通发展年度报告[R]. 北京: 北京交通发展研究院, 2021.
- [37] 陈静, 刘雪杰, 姚广铮. 北京市朝阳区潮汐车道实施效果评价[C]//第十二届中国智能交通年会大会论文集. 北京: 电子工业出版社, 2017: 10.
Chen, J, Liu, X.J, Yao, G.Z. Evaluation of implementation effect of chaoyang road reversible lane in Beijing [C]//*Proceedings of the 12th China Intelligent Transportation Annual Conference*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017.: 10. (in Chinese)
- [38] 公安部交通管理局. 全国机动车保有量达4.17亿辆驾驶人超过5亿人新能源汽车保有量达1310万辆同比增长67.13% [EB/OL]. (2023-01-11) [2023-12-7]. <https://www.mps.gov.cn/n2254314/n6409334/c8837510/content.html>.
- [39] 公路隧道照明设计细则: JTG/T D70/2-01—2014 [S]. 重庆: 人民交通出版社, 2014.
- [40] Zhao L, Hu S, Wang D, et al. Evaluation of the effects of tunnel lighting environment on energy consumption and drivers' reaction time[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 1: 2376813.
- [41] 刘勇. 特长隧道通风方案及控制措施的研究[J]. *自动化应用*, 2023, 64(16): 1-3.
Liu Y. Study on the ventilation scheme and control measures for extra-long tunnels [J]. *Automation Application*, 2023, 64(16): 1-3. (in Chinese)
- [42] 汪霞, 汪华林. 碳中和技术概论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2022.
- [43] Chen P, Zhang L, Wang Y, et al. Environmentally friendly utilization of coal gangue as aggregates for shotcrete used in the construction of coal mine tunnel [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2021, 15: e00751.
- [44] Verma M, Dev N, Rahman I, et al. Geopolymer concrete: a material for sustainable development in Indian construction industries [J]. *Crystals*, 2022, 12(4): 124762.
- [45] Shau H J, Liu T Y, Chen P H, et al. Sustainability practices for the Suhua highway improvement project in Taiwan[J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2019, 17: 1631-1641.
- [46] Liu H, Lyu X, Zhang Y, et al. Steel corrosion evaluation of basalt fiber RPC affected by crack and steel-concrete interface damage using electrochemical methods [J]. *Sensors*, 2020, 20(18): 1-16.
- [47] Joensuu T, Leino R, Heinonen J, et al. Developing buildings' life cycle assessment in circular economy-comparing methods for assessing carbon footprint of reusable components [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 77: 103499.
- [48] 王义贵, 徐干君, 白明, 等. 巫山针叶林与阔叶林乔灌草结构特征及碳汇功能对比[J]. *中南林业科技大学学报*, 2023, 43(10): 98-106.
Wang Y G, Xu G Q, Bai M, et al. Comparison of structural characteristics and carbon sink functions between trees, shrubs and herbs of coniferous and broad-leaf forests in Wushan[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2023, 43(10): 98-106. (in Chinese)
- [49] Wang Y, Chang Q, Li X. Promoting sustainable carbon sequestration of plants in urban greenspace by planting design: A case study in parks of Beijing[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 64: 127291.

(本文编辑: 赵霞)

附录

附表 1 常见建材的碳排放因子

Table 1 Carbon emission factors of common building materials

建材类别	碳排放因子	
水泥/(kgCO ₂ e•t ⁻¹)	668	
石灰/(kgCO ₂ e•t ⁻¹)	2 190	
混合砂浆/(kgCO ₂ e•m ⁻³)	混合砂浆 M2.5	224
	混合砂浆 M5	236
	混合砂浆 M7.5	239
	混合砂浆 M10	234
	水泥砂浆 M5	165
	水泥砂浆 M10	200
	水泥砂浆 M15	232
	抹灰砂浆/(kgCO ₂ e•m ⁻³)	水泥砂浆 1:3
混合砂浆 1:3		285
石灰砂浆 1:2.5		342
混凝土/(kgCO ₂ e•m ⁻³)	C30	297
	C40	326
	C50	353
	C60	411
钢材/(kgCO ₂ e•t ⁻¹)	大型钢材	2 701
	中小型钢材	2 137
	热轧带钢	2 246
铝材/(tCO ₂ e•t ⁻¹)	铝锭	11.142
	板带	11.782
	铝箔	12.492
	铝挤压材	11.87
玻璃/(tCO ₂ e•t ⁻¹)	1.113	
陶瓷/(kgCO ₂ e•m ⁻³)	14.28	
木材/(kgCO ₂ e•t ⁻¹)	119	

附表 2 各类运输方式的碳排放因子

Table 2 Carbon emission factors for different modes of transportation

运输方式类别	碳排放因子/ (kgCO ₂ e•(t•km ⁻¹))	运输方式类别	碳排放因子/ (kgCO ₂ e•(t•km ⁻¹))
轻型柴油货车运输(载重 2 t)	0.286	轻型汽油货车运输(载重 2 t)	0.334
中型柴油货车运输(载重 8 t)	0.179	中型汽油货车运输(载重 8 t)	0.115
重型柴油货车运输(载重 10 t)	0.162	重型汽油货车运输(载重 10 t)	0.104
重型柴油货车运输(载重 18 t)	0.129	重型汽油货车运输(载重 18 t)	0.104
重型柴油货车运输(载重 30 t)	0.078	电力机车运输	0.010
重型柴油货车运输(载重 46 t)	0.057	内燃机车运输	0.011

附表3 常见机械设备单位时间碳排放因子

Table 3 Carbon emission factors of common machinery and equipment per unit time

机械名称	规格型号	碳排放因子
履带式推土机/(kgCO ₂ e·h ⁻¹)	功率:75 kW	21.94
	功率:105 kW	23.61
	功率:135 kW	25.94
履带式单斗液压挖掘机/(kgCO ₂ e·h ⁻¹)	斗容量:0.6 m ³	13.08
	斗容量:1 m ³	24.46
叉式起重机/(kgCO ₂ e·h ⁻¹)	提升质量:3 t	9.65
履带式柴油打桩机/(kgCO ₂ e·h ⁻¹)	冲击质量:2.5 t	17.23
	冲击质量:3.5 t	18.62
	冲击质量:5 t	20.94
载重汽车/(kgCO ₂ e·h ⁻¹)	载重质量:4 t	9.29
自升式塔式起重机/(kgCO ₂ e·h ⁻¹)	提升:400 t	21.73
	提升:800 t	22.37
	提升:1 000 t	22.49
锚杆钻孔机(32 mm)/(kgCO ₂ e·h ⁻¹)		27.07
电动夯实机(250 N·m)/(kgCO ₂ e·h ⁻¹)		2.20
罐车/(kgCO ₂ e·h ⁻¹)		11.51
盾构机/(kgCO ₂ e·m ⁻¹)		3 569.05
临建设施电力/(kgCO ₂ e·(kW·h) ⁻¹)		1.058

附表4 燃料能源的碳排放因子

Table 4 Carbon emission factors of fuel energy

燃料分类	碳排放因子/(kgCO ₂ e·(kg或m ³) ⁻¹)	燃料分类	碳排放因子/(kgCO ₂ e·(kg或m ³) ⁻¹)
原煤	1.834	原油	2.983
洗精煤	2.311	汽油	2.917
煤矸石	0.730	煤油	3.107
焦炭	2.733	柴油	3.107
焦炉煤气	0.625	燃料油	3.167
高炉煤气	0.824	润滑油	2.986
转炉煤气	1.152	石蜡	2.893
其他煤气	0.195	溶剂油	3.111
炼厂干气	2.222	石油沥青	2.707
天然气	2.115	石油焦	2.656
液化天然气	2.802	液化石油气	3.094

附表5 不同燃料类型的单位距离碳排放因子

Table 5 Carbon emission factors per unit distance for different fuel types

车辆类别	碳排放因子/(kgCO ₂ e·km ⁻¹)
汽油车	0.264 5
柴油车	0.369 1
常规混合动力车	0.220 8
天然气车	0.111 5
纯电动车	0.149 6
摩托车	0.119 6

(下转第 1256 页)