

引用格式: 宋战平, 刘世昊, 孙引浩, 等. 基于 LCA 的山岭隧道碳排放核算研究现状与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(5): 943.

SONG Zhanping, LIU Shihao, SUN Yinhao, et al. Current state and prospects of carbon emission accounting of mountainous tunnels based on life cycle assessment[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(5): 943.

基于 LCA 的山岭隧道碳排放核算研究现状与展望

宋战平^{1, 2, 3}, 刘世昊^{1, 2}, 孙引浩^{3, 4}, 成涛⁵, 张玉伟^{1, 2, 3}, 王军保^{1, 2}

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 西安建筑科技大学基础设施智能建造研究院, 陕西 西安 710055; 4. 中铁二十局集团第一工程有限公司, 江苏 苏州 215000; 5. 中铁北京工程局集团第一工程有限公司, 陕西 西安 710100)

摘要: 首先, 梳理山岭隧道碳排放核算研究的进展并进行探讨, 基于生命周期评价理论(life cycle assessment, LCA)与排放因子法, 结合山岭隧道特点对其全生命周期内各阶段的碳排放来源进行分析, 着重探讨施工与运营阶段的计算边界; 其次, 强调碳排放核算过程中清单分析涉及到的碳排放因子与活动数据的获取方式与应用条件; 然后, 对核算结果的应用、不确定分析与碳排放预测的相关研究成果进行整理; 最后, 指出当前山岭隧道碳排放研究中存在的问题, 并展望其未来发展方向。

关键词: 山岭隧道; 碳排放核算; 生命周期评价; 排放因子法

DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2024.05.003

文章编号: 2096-4498(2024)05-0943-09

中图分类号: U 455

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Current State and Prospects of Carbon Emission Accounting of Mountainous Tunnels Based on Life Cycle Assessment

SONG Zhanping^{1, 2, 3}, LIU Shihao^{1, 2}, SUN Yinhao^{3, 4}, CHENG Tao⁵,
ZHANG Yuwei^{1, 2, 3}, WANG Junbao^{1, 2}

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering of Shaanxi Province, Xi'an 710055, Shaanxi, China; 3. Institute of Infrastructure Intelligent Construction, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China; 4. The First Engineering Co., Ltd. of China Railway 20 Bureau Group Corporation, Suzhou 215000, Jiangsu, China; 5. The First Engineering Co., Ltd. of China Railway Beijing Engineering Group, Xi'an 710100, Shaanxi, China)

Abstract: First, the research progress on carbon emissions accounting for mountain tunnels is reviewed and discussed. Based on the life cycle assessment theory and the emission factor method, the sources of carbon emissions at each stage of the life cycle of mountain tunnels are analyzed, considering their characteristics. The calculation boundary between the construction and operation stages is also discussed. Second, the method and application conditions for obtaining carbon emission factors and activity data involved in inventory analysis for carbon emission accounting are emphasized. Third, the application of accounting results, uncertainty analysis, and related research on carbon emission prediction is examined. Finally, existing problems in the study of carbon emissions in mountain tunnels are identified, and future research directions are proposed.

Keywords: mountainous tunnel; carbon emission accounting; life cycle assessment; emission factor method

收稿日期: 2023-11-17; 修回日期: 2024-04-30

基金项目: 陕西省科技创新团队项目(2020TD-005)

第一作者简介: 宋战平(1974—), 男, 陕西蒲城人, 2006年毕业于西安理工大学, 岩土工程专业, 博士, 教授, 现从事隧道与地下空间工程领域的科研工作。E-mail: songzhp@xauat.edu.cn。

0 引言

中国制定了“双碳战略”以应对日益严峻的环境问题,需要建筑行业减少建设活动产生的二氧化碳排放^[1]。中国山地众多,制约着经济的发展,山岭隧道是改变这一现状的关键^[2-3]。但山岭隧道在施工和运营过程中涉及大量能源消耗,其碳排放量较之于一般建筑项目更为显著^[4-7]。

在公路、铁路工程中,山岭隧道材料和能量密度最高,会消耗大量的钢材和水泥,相应的单位工程排放量也是最大的;同时,山岭隧道运营周期长达百年,其运营维护产生的碳排放量也不容小觑,这意味着山岭隧道在全生命周期内产生的碳排放会对环境造成巨大的负担。因此,基于生命周期评价理论(life cycle assessment, LCA)对山岭隧道进行碳排放核算,并以此为基础进行后续的减排工作成为一种迫切需求,隧道碳排放领域成为研究的热点。

隧道建设碳排放基础核算采用以生命周期评价理论为分析方法的排放因子法。首先,以生命周期评价理论与排放因子法为线索,对山岭隧道全生命周期的碳排放核算划分阶段,明确各阶段碳排放核算的计算边界;其次,对山岭隧道碳排放核算的清单分析涉及到的活动数据与排放因子进行探讨;然后,对核算结果的应用、不确定分析与碳排放预测的相关研究成果进行整理;最后,指出在隧道碳排放研究领域存在的亟待解决的问题,给出建议并对该领域未来的发展进行展望。

1 隧道碳排放核算方法

1.1 生命周期评价理论

生命周期评价是一种综合考虑资源、能源消耗与环境影响的核算方法,有效地指导了各国实施环境效益评价工作,使得对产品、服务或系统整个生命周期内

的环境影响进行全面评估成为可能^[8]。20 世纪 90 年代以后,国际环境毒理学和化学学会首次提出了 LCA 的概念。国际标准化组织(ISO)在国际环境毒理学和化学学会提出的 LCA 基本结构的基础上进行改进,并颁布 ISO 14040 标准,对生命周期评价理论与框架做出定义,包括目的和范围的确定、清单分析、结果解释与影响评价 4 部分内容^[9],如图 1 所示。

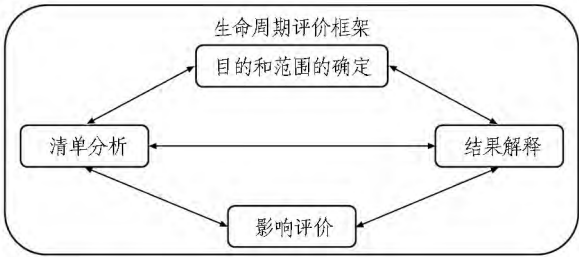


图 1 ISO 关于 LCA 的基本结构

Fig. 1 Basic structure of ISO on LCA

而后 ISO 不断对 LCA 进行优化,相继推出了 ISO 14041《环境管理—全生命周期评价—目标与范围的确定,清单分析》等一系列相关标准。我国也相继颁布了 GB/T 24040—2008《环境管理 生命周期评价 原则与框架》等标准,并不断更新。

根据生命周期理论适用条件、边界范围等不同,可分为 3 种方法:自下而上的基于过程的生命周期分析方法(P-LCA)、自上而下的基于经济投入产出的生命周期分析方法(EIO-LCA)以及将 P-LCA 和 EIO-LCA 综合使用的混合生命周期评价方法(H-LCA)^[10]。这 3 种方法在具体数据要求、边界范围确定和评价尺度大小等方面具有独特性,可以根据具体的研究目的和数据可获得性,选择适合的方法建立碳排放计算模型,其对比分析见表 1。

表 1 P-LCA、EIO-LCA 与 H-LCA 对比分析

Table 1 Comparative analysis of P-LCA, EIO-LCA, and H-LCA

类别	优势	不足	适用范围
P-LCA	针对性强,对于边界确定具有较强的主观性,能够获得精确的碳排放数值,可采用流程图表示,便于独立分析	容易产生截断误差且误差大小难以判断,工作量巨大且细节性要求过高,需要耗费大量时间,容易造成滞后性	单个产品/项目/工艺/环节(微观)
EIO-LCA	完整性强,对数据要求较低,工作量小,是一种更综合、更稳健的碳排放评价方法	无法进行细节部分的碳排放测算,缺乏主观性,存在数据平均化带来的误差	部门/行业/区域/国家(宏观)
H-LCA	完整性强,对数据要求较低,工作量小,是一种更综合、更稳健的碳排放评价方法	受数据来源和分析对象本身的限制,没有合理数据库的支持	微观/宏观

目前工程领域最常见的碳排放测算模型建立及测算边界确定方法是 P-LCA,其通过圈定碳排放核算边界、收集碳排放数据等过程,并通过生命周期清单分析得到数据清单,配合排放因子法,进而对研究对象的碳排放进行计算^[11]。在核算过程中要严格执行《环境管理 生命周期评价 原则与框架》等规范,确保评价结果

的准确性。

1.2 排放因子法

排放因子法是联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)提出的目前最为常用的碳排放量核算方法^[12]。其基本思路是依托碳排放清单列表,针对每一种排放源或排放项目构造其活动数据与排放因子,以活动数

据和排放因子的乘积作为该排放项目的碳排放量估算值。参考 IPCC 制定的《国家温室气体清单指南》,排放因子法计算公式如下^[13]:

$$E = M \times e_o. \quad (1)$$

式中: E 为温室气体排放当量; M 为活动数据,指单个排放源与碳排放直接相关的具体使用和投入数量; e_o 为排放因子,指单位某排放源使用量所释放的温室气体数量。

2 山岭隧道碳排放核算目标与范围的确定

碳排放是温室气体排放的简称,根据不同气体对温室效应的影响程度,所有温室气体的排放单位归一化为二氧化碳当量($\text{CO}_{2\text{eq}}$)。隧道的碳排放来源复杂,从规划设计开始到最终废弃期间不断产生碳排放。计算隧道工程碳排放量的关键一步就是需要确定碳排放边界,不同的边界得到的结果是不同的。但现有研究鲜有从隧道设计规划到运营的全生命周期碳排放研究,大多研究方向着力于隧道的某个阶段,以建设阶段为主。

参考既有研究成果,将隧道碳排放分为规划、设计、建设施工、运营维护与最终处置 5 个阶段^[14],并以此为基础确定山岭隧道各阶段碳排放核算目标范围。可按碳排放特性将碳排放源分为内源性与外源性 2 种。内源性碳排放源指直接产生碳排放的排放活动,如施工机械的能源消耗;外源性碳排放源指间接产生碳排放的活动,如上游的材料生产。5 个阶段的主要排放活动与碳排放源特性分类如表 2 所示^[15]。

在规划与设计阶段有少量碳排放产生,该阶段碳排放的来源主要为勘察工作的机械、人员与车辆、设计院的图纸绘制打印等活动。由于碳排放量小且边界不

易界定,在进行隧道碳排放计算时大多学者都忽视该阶段的碳排放,所以对这 2 个阶段的计算边界不做探讨。同理,隧道的最终处置由于目前案例较少,往往采取废弃的措施,对其计算边界也不做探讨。

表 2 山岭隧道生命周期碳排放主要活动及特性

Table 2 Key activities and characteristics of life cycle carbon emissions in mountainous tunnels

山岭隧道碳排放阶段	主要排放活动	碳排放特性
规划阶段	勘察单位调查、研究活动消耗	外源性
设计阶段	设计文件、材料利用与能源消耗	外源性
建设施工阶段	材料生产、材料与器械的运输	外源性
	施工的机械设备使用	内源性
	土建工程施工	内源性
	防水水类等其他工程施工	内源性
	施工人员活动	内源性
	建筑垃圾的运输	外源性
运营维护阶段	灯光、通风、防排烟、指示、监控等机电设施的日常运营使用	外源性
	车辆的运行活动	内源性
	路面、机电设备等的维修、养护	外源性
最终处置	拆除或废弃隧道	内源性

2.1 山岭隧道建设施工阶段计算边界

建设施工阶段是隧道全生命周期内最主要的碳排放阶段之一,其碳排放计算边界如图 2 所示。在隧道的全生命周期中,建设施工持续时间短,但碳排放量巨大^[16]。因此,对建设施工期间的隧道进行减碳优化,实现的减碳效果最为明显,是 5 个阶段中最热门的研究目标。

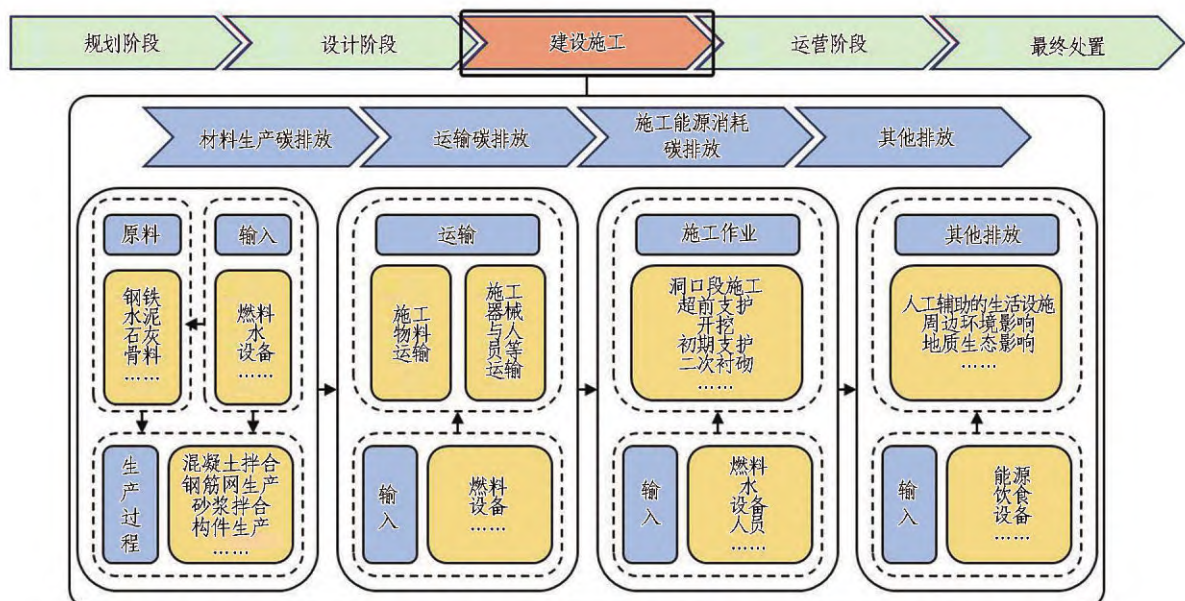


图 2 建设施工阶段的计算边界

Fig. 2 Accounting boundary for construction phase

现有研究往往将建设施工阶段的计算边界划分为隧道施工、物料运输与物料生产的碳排放3个部分^[17]。但是在计算过程中往往忽视了2点:一是施工器械与人员运输排放;二是隧道工程建设产生的其他影响,如地质生态、人工、辅助的生活设施等,这些影响由于计算复杂,排放较小,可以忽视。当采用重型机械(如盾构、TBM掘进机)时,其运输产生的碳排放是不可忽视的,因此,确定隧道碳排放计算边界时要考虑施工机械的运输。在施工阶段产生的所有碳排放中,上游建材生产与运输产生的碳排放占比超过60%^[18],这其中又以支护材料生产为主。因此,在隧道建设期间,最好的减排方法就是:在保证安全的前提下,最大限度地保护和利用围岩,尽可能减少不必要的支护^[19],控制好超欠挖,减少支撑材料的使用,进行合适的施工方案优化。

关于山岭隧道建设施工阶段碳排放核算的研究成果众多,例如:Chang等^[20]利用LCA理论对加州高速铁路某区间的碳排放分布进行了分析,发现隧道建设在整个生命周期中产生较大比例的碳排放量;郭春等^[18]在LCA的基础上建立了一套连贯且可行的碳排放量计算体系;鲍学英等^[21]在LCA理念指导下对铁路隧道施工中相关机械设备的碳排放因子进行计算。以上研究大多对建设施工阶段碳排放的计算边界进行了简化,如图3所示^[15, 22]。

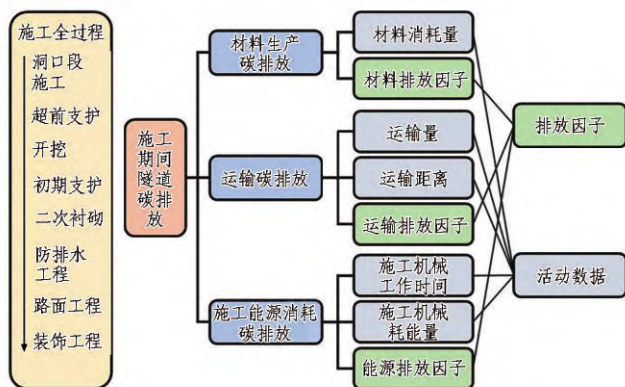


图3 建设施工阶段的碳排放计算边界

Fig. 3 Calculation boundary during construction period

根据划分的边界,隧道建设碳排放主要有建筑材料、工程机械与运输3个来源^[1],其计算流程如下。

1) 建筑材料碳排放计算公式如下:

$$E_m = \sum_i (ef_i \times m_i) \quad (2)$$

式中: E_m 为建筑材料的碳排放总量; i 为类别,这里指材料类别; ef_i 为材料 i 的碳排放因子; m_i 为材料的消耗量。

2) 工程机械的碳排放计算公式如下:

$$E_o = \sum_i (ef_i \times v_i \times n_i) \quad (3)$$

式中: E_o 为工程机械的碳排放总量; i 为类别,这里指工程机械类别; ef_i 为工程机械 i 所用燃料的排放因子; v_i 为工程机械单位时间的燃料消耗; n_i 为机械的工作时间。

3) 运输的碳排放计算公式如下:

$$E_t = \sum_i (ef_i \times v_i \times n_i) \quad (4)$$

式中: E_t 为运输的碳排放总量; i 为类别,这里指运输车辆的类别; ef_i 为运输车辆 i 所用燃料的排放因子。

将3部分的碳排放累加即为隧道施工阶段的总碳排放 E_{total} , 即:

$$E_{total} = E_m + E_o + E_t \quad (5)$$

2.2 山岭隧道运营阶段的计算边界

在运营阶段,由于隧道的运营周期长,实际上隧道的使用寿命通常超过100年,从长远考虑,运营与维护产生的碳排放终究会超过建设施工所产生的碳排放^[23]。因此,对运营阶段进行碳排放核算是必要的。运营期间的碳排放核算边界如图4所示,主要有运营能源消耗产生的碳排放、维护产生的碳排放和交通碳排放3方面。隧道发挥着承载交通运输的作用,而在碳排放核算过程中,由于其交通的复杂性无法具体量化,所以往往忽略该部分的排放,主要考虑运营能源消耗与维护这2部分。

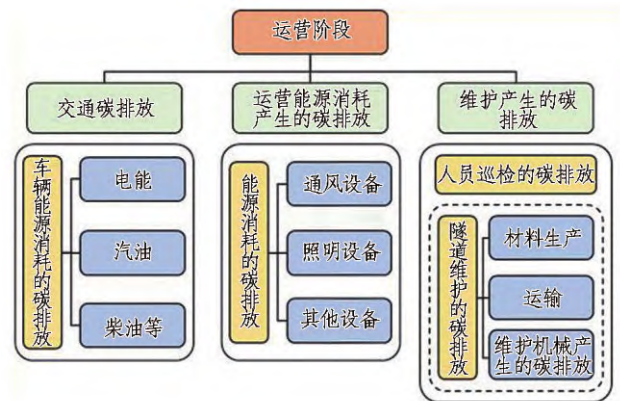


图4 运营阶段的碳排放计算边界

Fig. 4 Accounting boundary for operational phase

隧道的运营需要各系统的协调配合,如供电、照明、通风、监测、维护等。其中,通风与照明2部分研究成果较多,例如:朱合华等^[24]基于隧道全寿命周期理论,重点考察隧道全寿命周期中的建设期和运营期,用隧道光环境设计参数建立目标函数,最终形成了公路隧道光环境的多维度评价模型;张小英等^[25]对公路隧道全寿命周期照明的碳排放进行了核算;袁飞云等^[26]基于罚函数粒子群优化算法,提出了一种减碳优化照明布灯参数的方法;郭春等^[27]以隧道工程的通风系统为研究对象,借鉴建筑全生命周期碳排放计算模型,结合隧道工程的自身特点,确定了隧道施工通风系统的

碳排放边界。

3 山岭隧道碳排放的清单分析

山岭隧道生命周期碳排放的清单分析是指对隧道整个生命周期中对内输入和对外输出过程的定量分析,量化整个过程中输入材料、能源的消耗,以及计算分析对外部环境产生的碳排放输出量^[28]。对山岭隧道进行碳排放核算,除了确定目标范围,还需要准确的清单数据。

山岭隧道碳排放清单数据主要有排放因子与活动数据 2 部分。在选取排放因子时,由于不同省份的碳排放因子有所差异,要考虑其适用范围,注意是否和当地实际碳排放相当,因地制宜^[29]。

3.1 排放因子

排放因子可直接采用 IPCC 等机构提供的数据。该方法使用简便、数据库众多、运用广泛。具体的获取查询途径与说明见表 3^[10, 22, 30]。

表 3 排放因子数值获取来源
Table 3 Source of emission factor value obtained

数据库名称	数据来源	说明	数据库名称	数据来源	说明
IPCC 排放因子数据库	IPCC 网站	提供一般性缺省因子	美国能源情报署 (EIA)	美国能源情报署网站	提供有用的缺省值或可用于对比检验
国际排放因子数据库	国家能源署网站	提供有用的缺省值或可用于对比检验	EMEP/CORINAIR 排放清单指导手册	欧洲环境机构网站 (EEA)	提供有用的缺省值或可用于对比检验
瑞士 Ecoinvent Database	瑞士 Ecoinvent Centre	提供有用的缺省值或可用于对比检验	国家发改委能源研究所	国家发改委网站	提供中国一般性缺省因子
ELCD 数据库	欧盟研究总署 (JRC)	提供有用的缺省值或可用于对比检验	RCESS 数据库	中国科学院生态环境研究中心	提供有用的缺省值或可用于对比检验
GaBi 数据库	德国 Thinkstep 公司	提供有用的缺省值或可用于对比检验	中国汽车替代燃料生命周期数据库	同济大学	检验数据需要符合标准有代表性
the U. S. Life Cycle Inventory	美国国家再生能源实验室 (NREL)	提供有用的缺省值或可用于对比检验	中国生命周期基础数据库 (CLCD)	亿科环境科技、四川大学	检验数据需要符合标准有代表性
Korea LCI database	韩国环境产业技术院 (KEITI)	提供有用的缺省值或可用于对比检验	其他数据	大学等研究机构	检验数据需要符合标准有代表性
IDEA 数据库	产业技术综合研究所、日本产业环境管理协会	提供有用的缺省值或可用于对比检验	国内外杂志期刊	图书馆、期刊等	提供有针对性因子
Baosteel LCA 数据库	Baosteel LCA 数据库	提供有用的缺省值或可用于对比检验			

3.2 活动数据

确定活动数据是碳排放核算的关键。隧道碳排放核算的活动数据主要来自地方相关定额或实际物料、能源工程清单数据。贺晓彤^[31]、王建军等^[32]、徐建峰^[22]都是通过工程概算表或工程预算定额与工程机械台班费用定额获取核算所需的活活动数据;樊婧^[33]、李乔松等^[34]通过竣工后统计的工程量清单进行核算;王幼松等^[35]同时结合预算定额和现场实际工程量清单进行了核算。但以上获取活动数据的计算与统计量大,而 BIM (building information modeling) 技术通过隧道模型可快速获得碳排放活动数据进行碳排放核算^[36-37],目前已有软件厂商开始做这方面的探索。

真实的碳排放核算应基于实际工程建设,特别是基于竣工验收核算工程量,而非设计阶段的概算工程量清单,2.2 节中提到的忽略施工器械的运输排放往往就是由于采用了概算工程量清单造成的。但由于实

际工程统计工作量大且需要等工程完工,因此在施工前或施工过程中还是以使用概算工程量清单为主。

4 山岭隧道碳排放核算结果研究现状

4.1 山岭隧道碳排放核算结果应用

基于碳排放核算结果,可对工程进行碳排放评价,判断工程是否低碳环保,也可进行减排优化。目前,绿色评价的研究成果较少,缺乏权威指导,学界主要采取方案比选或碳约束下的方案优化,来指导工程的碳减排。

方案比选本质上属于多属性决策,即在考虑多个属性的情况下,选择最优备选方案或进行方案排序的决策问题^[38]。在对山岭隧道碳排放的方案比选过程中,实际上已经在各个方案建立的评价体系进行了评价,只是缺乏权威性,评价方式、指标不统一。如 Xia 等^[39]提出了兼顾隧道施工稳定性和碳排放水平的评价指标体系,通过向量机的智能决策方法,对工程的绿

色水平打分,完成开挖方案效用的计算和比选;刘世昊等^[40]基于 SVM-MAUT 模型,进行了隧道低碳施工方案优选;陈进等^[41]依托单洞4车道大跨度九家湾隧道工程,采用排放系数法对3种施工方法技术经济进行研究,并基于碳排放量化结果对实际工程的施工方法进行综合评估。

方案优化本质上是多目标优化问题,需要在2个或多个相互冲突的目标之间进行权衡的情况下作出最优决策。陈鑫磊等^[42]基于碳排放评价进行超小净距隧道绿色施工优化研究;鲍学英等^[21]在考虑碳排放量的情况下建立了隧道开挖支护施工机械配置优化模型;靳春玲等^[43]考虑碳排放约束条件,基于水工隧洞施工机群配置优化和碳减排双赢的改进路径,构建了基于工期-成本-质量-碳排放量的多目标优化函数。

无论碳排放方案比选,还是碳约束下的方案优化,在不同的评价标准下的结果是不同的。因此,为规范行业,得到合理可信的评估结果,有必要建立统一的评价指标,为隧道碳排放核算结果界定评价范围,以鼓励指导和反映工程的绿色水平。

4.2 不确定性分析

由于活动数据和实际工况的误差或排放因子的选取,碳排放核算结果具有不确定性,需要进行不确定性分析。不确定性分析是一种用于评估模型或系统输出结果不确定性程度的方法。由于核算过程中包含了众多参数、数据和假设,其结果通常不是绝对准确的,会受到各种不确定性的影响^[44-45]。不确定性分析方法包括蒙特卡洛模拟、敏感性分析、情景分析等:蒙特卡洛模拟通过随机抽样参数值来模拟系统的不确定性;敏感性分析用于确定输入参数的变化对输出结果的影响程度;情景分析考虑不同的系统发展路径或情景,以评估结果的变化。

朱合华等^[46]认为在设计的早期阶段可通过粗粒度的LCA核算方法从绿色低碳角度对多个设计方案进行评估与比选,并通过敏感性分析确定设计方案的最有效优化方向;徐建峰^[22]对公路隧道开挖与支护碳排放进行了不确定性分析;李宇航^[47]对隧道建设施工阶段碳排放测算进行了敏感度分析;张小英等^[25]对隧道照明碳排放核算的同时,也进行了不确定分析。在接下来的研究中,山岭隧道碳排放核算结果的不确定性也将成为下一个热点。

4.3 碳排放预测

诸多学者对山岭隧道的碳排放预测进行了研究。曾弘锐等^[48]基于多种机器学习算法结合动物优化算法构建了铁路隧道施工碳排放预测模型,对隧道延米施工碳排放进行预测;Chen等^[49]基于机器学习算法原理,构建了多种针对成都市某地铁区间和车站施工

碳排放的预测模型;Xu等^[50]基于计算所得的数据,多次修正预测方程的精度后,得到了适用于西南地区的隧道碳排放预测公式。相对于预测公式,采用机器学习的方式可以考虑施工工法等无法量化的因素,在数据样本充足的情况下,优先考虑使用该方法。同时,结合交通量的预测,可实现在规划设计阶段对隧道全生命周期的总碳排放量进行预测。

对山岭隧道的碳排放进行预测,从设计规划阶段就对隧道进行低碳优化,其实际意义重大;碳排放预测可以用来指导设计,真正从隧道全生命周期进行减排。因此,碳排放预测应该得到更为广泛的研究和运用,并与数字技术紧密结合。

5 结论与展望

5.1 结论

山岭隧道碳排放核算领域成果众多,但现有研究成果仍存在一些问题。

1)目前活动数据与排放因子的数据质量普遍不高。活动数据采用定额没有代表性,基于定额的活动数据无法体现不同工法的区别,并且因子数据的权威性不足。下一步应从国内实际情况出发,以省为单位编制因子数据库与专门针对碳排放核算的活动数据定额。

2)既有的隧道碳核算研究成果有一定的局限性。就施工过程本身而言,没有考虑机械运输与建设施工带来的周边影响,如施工驻扎、生活用电等;要优化计算边界,应尽可能考虑隧道工程建设产生的其他环境影响,如地质生态等。在运营过程中,未考虑其附属交通碳排放。同时还应该将规划、设计阶段纳入到考虑范围内。

3)现有山岭隧道碳排放核算阶段太过独立,考虑因素较为片面,没有全局考虑。隧道碳排放并不是一个独立的单元,碳排放最低只是一个局部最优解,应该综合间接和直接产生的影响,将隧道的碳排放核算提前至地质勘察选线开始,考虑运营、维护与交通碳排放,寻求一个全局最优解,以降低隧道及其所有附属活动的碳排放。

4)隧道碳排放数据运用时,缺乏权威指导和数据评价。根据隧道碳排放数据进行多属性决策与多目标优化时,没有统一权重指标,得到的结果是不同的。因此,权威机构需要建立一个合理的指标体系,对碳排放与成本等因素合理赋权,避免主观意见以及不完备的数据信息影响决策。

5.2 展望

1)隧道工程的低碳化乃至零碳化是山岭隧道发展的必经之路。虽然现有隧道的碳排放核算方法已相对成熟,但在隧道建设运营阶段仍不可避免地产生大量碳排放,所以需要将数字化技术赋能和山岭隧道的

全生命周期紧密结合,为隧道碳排放核算结果界定评价范围,以鼓励指导和反映工程的绿色水平。结合交通量预测、BIM技术和地质情况,实现从规划设计阶段预估隧道全生命周期内的碳排放量,进而优化隧道的设计,降低山岭隧道的碳排放,是隧道行业的未来发展方向。

2) 过度削减隧道行业的碳排放是不可取的,碳中和目标的达成不能仅靠碳减排,还需要以碳汇技术作为支撑。但这并不是说隧道碳减排没有意义,在合理范围内进行碳减排可以节约资源、优化供给、降低末端固碳的成本,因此仍要继续推动隧道碳减排工作。

参考文献(References):

- [1] XU Jianfeng, GUO Chun, CHEN Xiaofeng, et al. Emission transition of greenhouse gases with the surrounding rock weakened: A case study of tunnel construction[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 209: 169.
- [2] 王祥, 赵祎睿, 宋战平, 等. 基于掘进性能的悬臂掘进机施工围岩分级方法[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(增刊1): 197.
WANG Xiang, ZHAO Yirui, SONG Zhanping, et al. A method of surrounding rock classification for construction of cantilever roadheader based on tunneling performance[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(S1): 197.
- [3] 潘红伟, 郭德赛, 宋战平, 等. 基于N-K模型的隧道施工事故多风险因素耦合分析[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(9): 1537
PAN Hongwei, GUO Desai, SONG Zhanping, et al. Coupling analysis to investigate multiple risk factors for tunnel construction accidents based on N-K model[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(9): 1537.
- [4] 王青松. 关于我国山岭隧道钻爆法施工技术发展的一些思考[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(增刊1): 37.
WANG Qingsong. Some thoughts on development of drilling-and-blasting construction technology for mountain tunnels in China[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(S1): 37.
- [5] MILIUTENKO Sofia, ÅKERMAN Jonas, BJÖRKLUND Anna. Energy use and greenhouse gas emissions during the life cycle stages of a road tunnel-the Swedish case Norra Länken[J]. European Journal of Transport & Infrastructure Research, 2012, 12(1): 39.
- [6] CHANG B. Initial greenhouse gas emissions from the construction of the California high speed rail infrastructure: A preliminary estimate[D]. Davis: University of California, 2009.
- [7] 蒋振雄, 薛鹏, 马欣, 等. 绿色隧道评价体系研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(4): 586.
JIANG Zhenxiong, XUE Peng, MA Xin, et al. Evaluation system of green highway tunnels[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(4): 586.
- [8] 宋战平, 肖珂辉, 成涛, 等. 基于BIM技术的隧道全生命周期管理及应用研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(1): 47.
SONG Zhanping, XIAO Kehui, CHENG Tao, et al. Study on tunnel whole life cycle management and application based on BIM technology[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition), 2020, 52(1): 47.
- [9] 蔡筱霜. 基于LCA的低碳建筑评价研究[D]. 无锡: 江南大学, 2011.
CAI Xiaoshuang. Research on assessment of low-carbon building based on LCA[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.
- [10] 卢勇, 杨克, 刘爱华, 等. 公路工程基础设施建设碳排放测算方法研究综述[J]. 交通节能与环保, 2023, 19(1): 18.
LU Yong, YANG Ke, LIU Aihua, et al. Research of carbon emission measurement methods for highway engineering infrastructure construction[J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2023, 19(1): 18.
- [11] 卞晓红, 张绍良. 碳足迹研究现状综述[J]. 环境保护与循环经济, 2010, 30(10): 16.
BIAN Xiaohong, ZHANG Shaoliang. Overview of current status of carbon footprint research[J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2010, 30(10): 16.
- [12] 徐建峰, 郭春, 郭雄, 等. 隧道物化阶段碳排放计算模型研究[C]//2016中国隧道与地下工程大会(CTUC)暨中国土木工程学会隧道及地下工程分会第十九届年会论文集. 北京: 中国土木工程学会, 2016.
XU Jianfeng, GUO Chun, GUO Xiong, et al. Research on the calculation model of carbon emission during tunnel materialization[C]//2016 Proceedings of the China Tunnel and Underground Engineering Conference (CTUC) and the 19th Annual Meeting of the Tunnel and Underground Engineering Branch of the China Civil Engineering Society. Beijing: China Civil Engineering Society, 2016.
- [13] HOUGHTON J T, MEIRA FILHO L G, LIM B, et al. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Exeter: UK Meteorological Office, 1997.
- [14] 刘圆圆. 基于ALCA的公路生命周期二氧化碳计量理论与方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
LIU Yuanyuan. Study on the theory and calculation methods of carbon dioxide emission from highway life cycle using ALCA[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [15] 陈灵均. 公路隧道交通碳排放特性与影响机制研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
CHEN Lingjun. Study on the characteristics and influence mechanism of traffic carbon emissions in highway tunnel[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [16] 郭亚林, 郭春. 铁路隧道施工期碳排放计算模型研究

- [J]. 交通节能与环保, 2021, 17(6): 5.
- GUO Yalin, GUO Chun. Calculation model of life cycle carbon emissions of railway tunnel[J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2021, 17(6): 5.
- [17] BUYLE Matthias, BRAET Johan, AUDENAERT Amaryllis. Life cycle assessment in the construction sector: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 26: 379.
- [18] 郭春, 徐建峰, 张佳鹏. 隧道建设碳排放计算方法及预测模型[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(8): 1140.
- GUO Chun, XU Jianfeng, ZHANG Jiapeng. Calculation methods and prediction models of carbon emission of tunnel construction[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(8): 1140.
- [19] 宋战平, 张艺多, 郭德赛, 等. 邻近既有建(构)筑物隧道爆破方案评价及优化方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(1): 14.
- SONG Zhanping, ZHANG Yiduo, GUO Desai, et al. Evaluation and optimization method of tunnel blasting scheme for adjacent existing structures[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(1): 14.
- [20] CHANG Brenda, KENDALL Alissa. Life cycle greenhouse gas assessment of infrastructure construction for California's high-speed rail system[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2011, 16(6): 429.
- [21] 鲍学英, 许锟. 考虑碳排放的铁路隧道施工机械配置优化模型[J]. 铁道学报, 2020, 42(9): 157.
- BAO Xueying, XU Kun. Optimization model of deployment of railway tunnel construction machinery considering carbon emission[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(9): 157.
- [22] 徐建峰. 公路隧道施工碳排放计算方法及预测模型研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- XU Jianfeng. Study on calculation method and prediction model of carbon emission from highway tunnel construction[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [23] PEELING James, WAYMAN Matthew, MOCANU Isabela, et al. Energy efficient tunnel solutions[J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 1472.
- [24] 朱合华, 邓越, 沈奕, 等. 公路隧道光环境全寿命周期绿色指标应用案例分析[J]. 中国公路学报, 2022, 35(1): 13.
- ZHU Hehua, DENG Yue, SHEN Yi, et al. Application analysis of life-cycle green index of highway tunnel light environment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(1): 13.
- [25] 张小英, 刘陶, 沈奕, 等. 照明对公路隧道全寿命期碳排放的影响分析[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(6): 40.
- ZHANG Xiaoying, LIU Tao, SHEN Yi, et al. Analysis of the effect of lighting on carbon emission in the full life cycle of highway tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(6): 40.
- [26] 袁飞云, 史玲娜, 文森, 等. 公路隧道照明布灯参数优化模型构建与适用性研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(2): 240.
- YUAN Feiyun, SHI Lingna, WEN Sen, et al. Modeling and applicability of optimization on lighting distribution parameters in highway tunnels[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(2): 240.
- [27] 郭春, 郭雄, 徐建峰, 等. 隧道施工通风系统碳排放边界研究[C]//2016中国隧道与地下工程大会(CTUC)暨中国土木工程学会隧道及地下工程分会第十九届年论文集. 北京: 中国土木工程学会, 2016.
- GUO Chun, GUO Xiong, XU Jianfeng, et al. Research on the boundary conditions of carbon emission during tunnel ventilation[C]//2016 Proceedings of the China Tunnel and Underground Engineering Conference (CTUC) and the 19th Annual Meeting of the Tunnel and Underground Engineering Branch of the China Civil Engineering Society. Beijing: China Civil Engineering Society, 2016.
- [28] 陈进杰, 王兴举, 王祥琴, 等. 高速铁路全生命周期碳排放计算[J]. 铁道学报, 2016, 38(12): 47.
- CHEN Jinjie, WANG Xingju, WANG Xiangqin, et al. Calculation of carbon dioxide emissions in the life cycle of high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(12): 47.
- [29] 郭春, 郭亚林, 陈政. 交通隧道工程碳排放核算及研究进展分析[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(1): 1.
- GUO Chun, GUO Yalin, CHEN Zheng. Carbon emission accounting and research progress analysis of traffic tunnel engineering[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(1): 1.
- [30] 刘明达, 蒙吉军, 刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. 热带地理, 2014, 34(2): 248.
- LIU Mingda, MENG Jijun, LIU Bihan. Progress in the studies of carbon emission estimation[J]. Tropical Geography, 2014, 34(2): 248.
- [31] 贺晓彤. 城市轨道交通明挖车站建设碳排放计算及主要影响因素分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- HE Xiaotong. Research on the calculation methods and major parameters on CO₂ emission during the construction of urban mass transit open-cut station[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [32] 王建军, 赵伟, 王世亮. 建筑物建造过程碳排放计算方法研究[J]. 建筑科学, 2014, 30(2): 8.
- WANG Jianjun, ZHAO Wei, WANG Shiliang. Study on calculation methods of carbon emissions of buildings during the construction[J]. Building Science, 2014, 30(2): 8.
- [33] 樊婧. 地下交通基础设施施工周期内的碳排放核算分析[J]. 建筑施工, 2018, 40(10): 1818.
- FAN Jing. Accounting analysis of carbon emission within construction period of underground transportation infrastructure[J]. Building Construction, 2018, 40(10): 1818.

- 1818.
- [34] 李乔松,白云,李林. 盾构隧道建造阶段低碳化影响因素与措施研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(3): 1.
LI Qiaosong, BAI Yun, LI Lin. Study of influential factors and measures for low carbonization during the construction of shield tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(3): 1.
- [35] 王幼松,黄旭辉,闫辉. 地铁盾构区间物化阶段碳排放计量分析[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36(3): 12.
WANG Yousong, HUANG Xuhui, YAN Hui. Quantitative analysis of embodied carbon emission in metro shield tunnel[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2019, 36(3): 12.
- [36] 宋战平,史贵林,王军保,等. 隧道工程BIM技术标准化及信息集成化管理研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(2): 556.
SONG Zhanping, SHI Guilin, WANG Junbao, et al. Research on BIM technology standardization and information integration management of tunnel engineering [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(2): 556.
- [37] 宋战平,史贵林,王军保,等. 基于BIM技术的隧道协同管理平台架构研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊2): 117.
SONG Zhanping, SHI Guilin, WANG Junbao, et al. Framework of collaborative management platform for tunnels based on BIM technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2): 117.
- [38] LIU Shihao, SONG Zhanping, ZHANG Yong, et al. Risk assessment of deep excavation construction based on combined weighting and nonlinear FAHP[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: 1204721.
- [39] XIA Zhenzhao, MAO Jingyin, CHEN Guangyao, et al. Decision criteria and intelligent decision method for tunnel excavation scheme selection considering carbon emissions[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 972677.
- [40] 刘世昊,宋战平,徐磊磊,等. 基于SVM-MAUT的隧道低碳施工方案优选[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(6): 68.
LIU Shihao, SONG Zhanping, XU Leilei, et al. Optimization of method statement for low-carbon tunnel construction based on SVM-MAUT [J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(6): 68.
- [41] 陈进,鬲浩然,周中书,等. 基于碳排放评价的节理化岩体大跨度隧道施工方法比选[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2020, 37(1): 86.
CHEN Jin, GE Haoran, ZHOU Zhongshu, et al. Comparison and selection of construction methods for large-span tunnel in jointed rock mass based on carbon emission assessment [J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2020, 37(1): 86.
- [42] 陈鑫磊,张学民,陈进,等. 基于碳排放评价的超小净距隧道绿色施工优化研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(1): 59.
CHEN Xinlei, ZHANG Xuemin, CHEN Jin, et al. Green construction optimization of ultrasmall clearance tunnel based on carbon emission evaluation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(1): 59.
- [43] 靳春玲,苏旸,贡力,等. 碳排放约束下的水工隧洞施工机群配置优化[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 84.
JIN Chunling, SU Yang, GONG Li, et al. Configuration optimization of construction machine group for hydraulic tunnel under carbon emission constraint [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 84.
- [44] HUIJBREGTS M A J, GILIJAMSE W, RAGAS A M J, et al. Evaluating uncertainty in environmental life-cycle assessment: A case study comparing two insulation options for a Dutch one-family dwelling [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(11): 2600.
- [45] LULLO Giovanni Di, ZHANG Hao, KUMAR Amit. Evaluation of uncertainty in the well-to-tank and combustion greenhouse gas emissions of various transportation fuels [J]. Applied Energy, 2016, 184: 413.
- [46] 朱合华,窦世琦,沈奕,等. 基于数字技术的交通隧道工程低碳发展理念与思考[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(6): 1.
ZHU Hehua, DOU Shiqi, SHEN Yi, et al. Concept and reflection on low-carbon development of traffic tunnel engineering based on digital technology [J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(6): 1.
- [47] 李宇航. 基于LCA高速公路隧道交通碳排放测算与特性分析研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2023.
LI Yuhang. Study on carbon emission measurement and characterization based on LCA expressway tunnel traffic [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [48] 曾弘锐,孙文昊,何卫,等. 基于机器学习的铁路隧道施工碳排放预测模型研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(6): 29.
ZENG Hongrui, SUN Wenhao, HE Wei, et al. Study on the carbon emission prediction model for railway tunnel construction based on machine learning [J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(6): 29.
- [49] CHEN Z, GUO Y, GUO C. Prediction of GHG emissions from Chengdu metro in the construction stage based on WOA-DELM [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 139: 105235.1.
- [50] XU Jianfeng, GUO Chun, YU Li. Factors influencing and methods of predicting greenhouse gas emissions from highway tunnel construction in southwestern China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 229: 337.