

引文格式: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):1-10.

GUO Chun, GUO Yalin, CHEN Zheng. Carbon Emission Accounting and Research Progress Analysis of Traffic Tunnel Engineering[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(1): 1-10.

交通隧道工程碳排放核算及研究进展分析

郭春^{1,2} 郭亚林^{1,2} 陈政^{1,2}

(1.西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室,成都 610031; 2.西南交通大学土木工程学院,成都 610031)

摘要:为应对日趋严重的全球气候变暖问题,中国政府提出了“双碳”目标。交通隧道生产活动排放的温室气体是土木工程领域碳排放的主要来源之一,其节能减排工作开展的成效是按时按质完成“双碳”目标的关键。通过统计调研近10年来的相关文献,总结目前交通隧道碳排放计算分析的研究现状。结果表明,目前国内外常基于生命周期评价开展隧道生命周期的碳排放研究,同时选用排放系数法进行计算;多数文献主要围绕公路隧道、盾构隧道施工期的碳排放开展计算和减排分析,并且一般将隧道施工期碳排放划分为材料生产、材料运输和现场施工3个阶段。对隧道施工碳排放的影响因素、预测公式等方面的研究进展进行综合性叙述,可为后续研究提供参考。

关键词:交通隧道;生命周期评价;碳排放;计算方法;清单分析

中图分类号:U459.9

文献标识码:A

1 引言

随着全球气候变暖问题日益严重,冰川融化、极端天气频发、粮食作物减产以及自然生态结构遭到破坏等不良现象已经威胁到人类的生存与发展。温室气体的大量排放被认为是造成全球气候变暖局面的最主要原因,如何有效控制温室气体排放量的增长成为了国际社会讨论和研究的热点。目前一般将温室气体的组成划分为以下6类:二氧化碳(CO₂)、氧化亚氮(N₂O)、甲烷(CH₄)、六氟化硫(SF₆)、氢氟碳化物(HFCs)和全氟化碳(PFCs)。然而由于不同气体对于温室效应的贡献能力存在差异,同时CO₂作为最常见、排放占比最大的温室气体,因此通常采用等效折算的方式将其他温室气体按比例关系折算为CO₂当量进行计算评估,即“碳排放”研究分析。对于温室气体的折算主要以全球变暖潜势值(GWP:CO₂:CH₄:N₂O=1:28:265)或全球变暖潜势值(GTP:CO₂:CH₄:N₂O=1:4:234)作为基准进行换算^[1]。

各类交通基础设施如桥梁、隧道、道路等是人类社会正常开展生产活动的重要载体,消费了大量资

源和能源,也是碳排放的主要源头之一^[2]。其中,隧道工程是交通基础设施的重要组成部分,隧道的资源和能源消耗使用密度明显高于其他基础设施^[3],这也意味着隧道施工和运营期间产生的温室气体对气候和环境的影响尤为值得关注。Galan等^[4]预测西班牙国内土木工程施工建设所用的混凝土中,用于隧道施工的混凝土占比高达25%。Chang等^[5]对旧金山至阿纳海姆段高速铁路建设阶段产生的碳排放进行测算后发现,虽然隧道长度只占铁路沿线全长的15%,但隧道施工建设所产生的碳排放占铁路修建碳排放总量的60%。李乔松等^[6]以上海市虹桥南路盾构隧道为工程案例,测算了直径为14.93 m的泥水平衡盾构机掘进过程中,平均每环施工产生的碳排放为60 t。冯旭杰^[7]将京沪高铁的建设过程划分成桥涵、隧道、路基、轨道、电气化系统等5个子系统,对每个子系统建设施工产生的碳排放进行测算,发现隧道是单位施工里程中产生碳排放量最大的子系统。重庆缙云山公路隧道长2.5 km,其施工产生的碳排放量却达到了52.6万t^[8]。

总的来看,隧道工程施工建设产生的碳排放已

收稿日期:2022-04-21

修回日期:2022-05-24

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2019YFC0605104);四川省社会科学规划项目(SC22B031);四川省教育科研资助金项目(SCJG20A120)。

作者简介:郭春(1979-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事隧道与地下工程的教学与研究,E-mail:guochun@swjtu.edu.cn.

经成为CO₂等温室气体的重要来源,开展交通隧道工程的碳排放分析研究工作对于我国可持续发展、建设绿色低碳隧道具有重要意义。本文通过调研近年来隧道碳排放相关的研究文献,从碳排放评估方法、CO₂排放来源界定、清单分析内容和前沿探索性研究等方面总结综述目前交通隧道碳排放计算分析的发展现状。

2 隧道工程碳排放计算评估方法

近年来,学者们普遍以生命周期评价方法,即以LCA(Life Cycle Assessment)方法为理论依据,对隧道建设和运营期间产生的碳排放进行分析研究。LCA法是一种用于评价产品或设施从“摇篮”到“坟墓”的全过程中对于外界环境造成的影响程度的分析法^[9]。根据产品在生命周期不同阶段的特征将其划分为几个不同的研究阶段,然后对每个研究阶段采用各自适宜的管理方式和应对措施^[10]。LCA法的主要内容包含4个方面:确定研究目标与范围、清单分析、影响评估和解释,其中核心部分在于确定研究目标和范围以及清单分析。研究目标和范围包括了定义隧道的生命周期、功能单位以及系统边界等内容,明确研究目标和范围是正确并顺利开展隧道碳排放研究的关键基础。隧道的生命周期主要考虑的是建筑材料生产、材料的运输、隧道现场施工、隧道运营使用、隧道的报废处理和回收利用等阶段。对于功能单位的定义,有学者将其解释为“用来作为基准单位的量化的产品系统功能”^[11],即通过明确功能单位从而定义碳排放研究对象,为后续的碳排放计算分析指明了合理的研究方向。不同研究课题的功能单位可能存在差异,如Xu等^[12]以每千米公路隧道的超前支护、开挖、支护、衬砌和通风照明作为功能单位,从围岩条件和衬砌设计的角度出发深入探究了不同围岩条件下隧道施工碳排放的变化路径。Guo等^[13]通过设定5种不同隧道区段的功能单位,对比研究了不同围岩级别和路面种类对隧道碳排放的影响机理。对于LCA方法论的系统边界,从隧道生命周期的碳排放研究来看,就是需要明确和界定出CO₂的排放来源与研究边界,不同研究对象的系统边界不同。比如,对于隧道施工碳排放的研究来说,其系统边界可以划分为建材生产加工、材料运输、现场施工和废料处理等过程,而隧道运营期研究中CO₂的排放来源和系统边界则可以界定为通风机组、照明灯具和监测系统的电能消耗,隧道内通行车辆的尾气排放,以及隧道路面维修养护产生的碳排放等方面。可以发现,研究目标和范围解释了开展

隧道碳排放研究的原因,因此需要对该部分予以充分重视。

此外,结合目前针对隧道碳排放计算的研究成果发现,学者们主要采用排放系数法对隧道生命周期碳排放进行量化分析。该方法是指通过构建隧道生命周期内消耗各类建筑材料和能源的清单,将建材和能源的消耗量分别乘以对应的碳排放因子并累加,即可得到隧道整个生命周期产生碳排放的总体水平。从排放系数法的定义可以看出,计算隧道碳排放就是通过碳排放因子将材料和能源的消耗数据转化为碳排放量。因此隧道的碳排放研究与能耗研究有很大的联系,只是研究侧重点不同。能耗研究的重点在于从“对内输入”角度出发考虑资源和能源的消耗,而碳排放研究则是以“对外输出”的视角分析隧道生命周期带来的环境负担^[14]。

目前学者们采用LCA方法和排放系数法,主要是用于隧道规划设计阶段的CO₂排放量估算,以及隧道施工开挖过程或竣工后的运营阶段中CO₂排放对外界环境造成的影响程度的评估。虽然隧道碳排放计算评估方法的原理简单且适用广泛,然而每一座隧道的实际工况不同,意味着需要以“因地制宜”的态度开展隧道生命周期碳排放的研究分析。

3 隧道生命周期碳排放研究阶段和计算边界划分

利用LCA方法计算隧道碳排放的大小,首先需要确定CO₂的排放来源以及分类,研究区间的合理划分是实现隧道低碳设计和建造的重要一环。根据不同的研究目的和实际工况,学界内对隧道生命周期碳排放研究阶段和计算边界的划分有所不同。但综合来看,国内外学者们大多是将隧道生命周期内温室气体的排放源头界定为施工建设和运营使用两大阶段,并且目前隧道施工期的碳排放是重点研究对象。

在国外学者的研究中,Miliutenko等^[3]以瑞典诺拉兰肯公路隧道为案例,采用LCA方法将该公路隧道的生命周期拆分为施工阶段和运营阶段,并开展了碳排放分析测算。Ahn等^[15]在测算隧道碳排放时,仅考虑了施工现场机械设备消耗柴油和电能排放CO₂的影响。Huang等^[16]分析了隧道施工过程中钻爆开挖阶段碳排放对环境的影响程度,但没有将同属于施工环节的施作围岩支护与衬砌产生的碳排放纳入考虑范围。Lee等^[17]选取韩国20个隧道案例,将隧道施工期间造成环境负荷的过程拆解为7个施工步骤:施作衬砌混凝土、喷射混凝土、隧道开

挖、布设排水工程、钢管加固多级灌浆、淤泥运输作业、锚杆工程布置,并对这些过程中材料消耗和能源产生的碳排放开展了分析测算。Rodriguez等^[18]则认为隧道施工期间CO₂排放主要包括了4个来源:柴油和电能等能源的消耗过程,采用钻爆法开挖的爆破过程,支护和衬砌材料的生产过程,同时还考虑到了当隧道穿越石炭系地层时围岩地层释放出的甲烷。可以看出,国外学者主要是以各项具体的施工阶段为研究边界,对隧道施工期产生的碳排放开展了广泛的研究分析。

在国内研究中,学者们针对地铁盾构隧道和公路隧道的碳排放研究分析较多。肖时辉等^[19]针对珠海横琴盾构隧道的施工掘进阶段,采用排放系数法研究了盾构机掘进过程中各施工环节的CO₂释放量,为后续优化施工方案,降低电能消耗提供了依据和参考。李乔松等^[5]认为目前有关盾构隧道碳排放的文献大多是从宏观的角度出发,较少考虑盾构机每掘进一环的排放影响因素,并以上海市虹梅南路盾构隧道为案例,将隧道施工碳排放划分为建筑材料生产、预制加工、场内运输以及现场施工4个阶段,结合地层参数分析了施工碳排放各环之间的差异性。王幼松等^[20]将地铁盾构区间施工期的碳排放测算分成了建材和管片等预制构件的生产阶段、材料运输阶段和施工安装3个阶段,其中运输阶段包

括了建材和预制构件的场内外的运输过程,施工安装阶段主要包括了施工机械的运行和周转材料的使用,计算边界简图如图1所示。王贤卫等^[21]对中国某高速公路隧道的建设施工碳排放计算时,考虑了建材生产过程的碳排放、运输载具的碳排放和施工机械的碳排放,并归纳总结出了隧道建造期碳排放的来源构成,如图2所示。樊婧^[22]将隧道施工周期划分为建筑材料生产、材料运输、现场施工三方面,认为当考虑施工废弃物回收利用后,对于建材碳排放系数的取值更加准确。徐建峰等^[23]将隧道物化阶段分解成施工材料的消耗、运输工具燃料消耗和施工机械能源消耗,并结合《公路隧道预算定额》以及《全国统一施工机械台班费用定额》提出了隧道物化阶段碳排放的计量方法。上述研究内容主要以隧道施工期的碳排放为研究核心展开分析,当然也有学者还考虑到了隧道运营期通风、照明系统产生的碳排放。朱合华等^[24]将研究重点聚焦于公路隧道光环境全生命周期的碳减排研究,以碳排放量和成本造价为核心考量因素,建立了隧道光环境的计算评价模型,并以杭州市某公路隧道为例,考察了隧道建设期和运营期的绿色低碳最优照明方案。

可以看出,学者们对于隧道碳排放的分析研究基本集中在隧道工程的施工期,对于隧道运营阶段的碳排放研究较少,同时大多数学者将隧道施工建

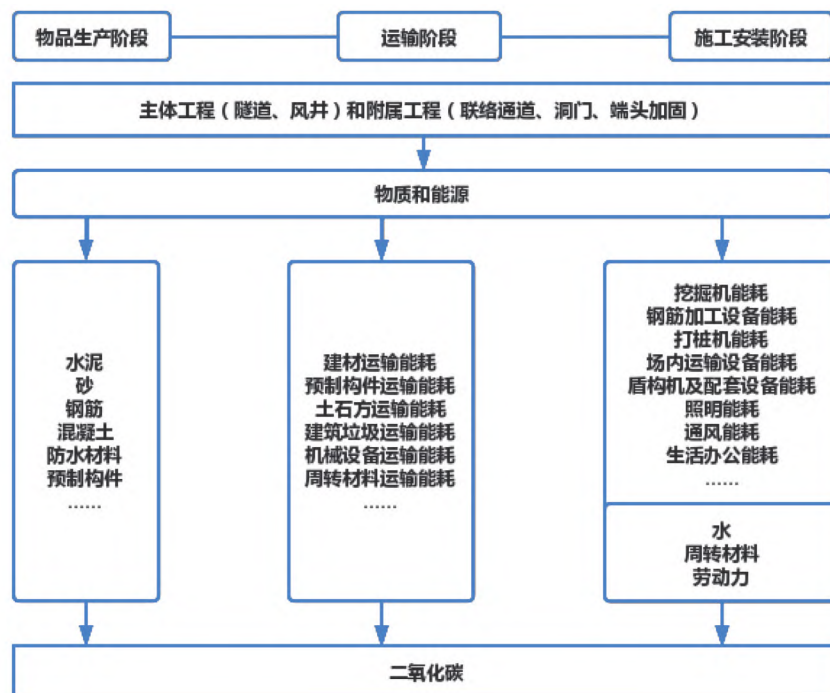


图1 碳排放计算边界划分

Fig.1 Boundary division of carbon emission calculation

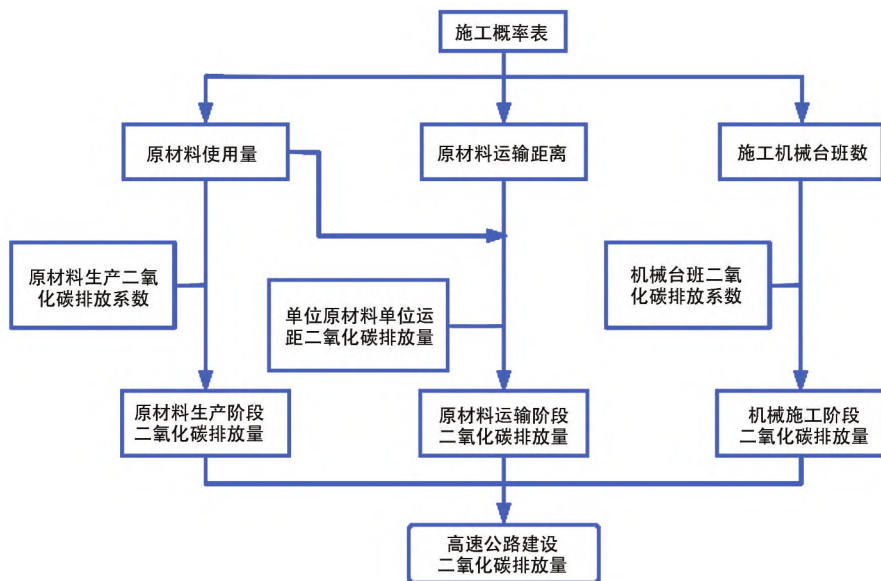


图2 隧道建造期碳排放构成

Fig.2 Carbon emission composition during tunnel construction

造期间的碳排放阶段分解为建材生产阶段、运输阶段和现场施工阶段。

利用LCA方法评估产品对环境的影响本应包括产品从生产使用到报废处理,再到回收利用的一个完整产业链。但根据国内外学者对隧道工程生命周期碳排放的现有研究成果,结合隧道自身性质与特点可以认为,目前隧道的报废处理和回收利用阶段通常不包括在隧道全生命周期碳排放的研究范畴里面,相关研究课题基本是围绕隧道施工建造期间碳排放计算和减排措施研究。即认为目前隧道生命周期内排放出的CO₂主要来源于施工建造阶段,而对于隧道运营使用期间因通风、照明设备运转产生的能耗和碳排放研究,是未来学者们进一步拓展研究的方向。将隧道施工期的CO₂排放分为3个阶段^[25]展开碳排放测算和分析研究:

(1) 建材生产阶段:隧道开挖施工期间所涉及的如水泥、钢筋、衬砌管片等建筑材料或预制品在生产加工阶段产生的碳排放;

(2) 材料运输阶段:包括了场内、场外运输两方面,因柴油货车和自卸汽车等运输载具消耗燃料能源产生的碳排放。场内运输是指施工现场开挖产生的碎石、砂砾的出渣运输以及弃渣经采集加工后的回收运输过程;场外运输是指水泥、钢筋等建材由材料生产地或建材市场运输至施工现场的过程;

(3) 现场施工阶段:隧道施工现场由机械设备施工作业过程中释放的CO₂。值得注意的是,施工机械消耗柴油、汽油时会对外界环境直接排放出

CO₂,但对于以电能为驱动能源的设备来说,一般认为在电能的使用过程中不会直接对外界环境排放出CO₂,而考虑的是在电能上游生产环节,如以煤炭为发电原料的火力发电等方式将会产生碳排放。

在初步确定隧道施工期间的碳排放阶段后,可根据研究目的和实际工况的不同,对碳排放计算方法、清单分析和节能减排工作的研究进行灵活处理。

4 隧道生命周期碳排放清单分析

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^[26]。采用排放系数法量化计算隧道生命周期的物质能源消耗以及CO₂排放,除了需要界定合理的碳排放研究阶段和计算边界以外,还有一个关键点是获取准确适用的基础计算数据。徐建峰^[7]在研究公路隧道施工碳排放的模块化计算方法时,提出了清单分析所需的基础数据分为两类:前景数据和背景数据。前景数据包含了施工活动所需建材及能源的消耗量数据,比如用于构建隧道支护结构的混凝土、钢材等建材的使用量,以及材料运输载具或施工机械对电能、柴油和汽油等能源的消耗量;而背景数据则包括了上述各类建材和能源各自对应的碳排放因子,碳排放因子指的是消耗单位材料或能源时对外界环境释放的CO₂量。前景数据的获取来源大多是施工现场材料和能源的工程量统计清单以及施工概算表,或者

是借助勘察设计资料和政府单位公布的预算定额进行工程量推算;背景数据一般取自于研究机构公布的数据库,如《温室气体盘查议定书》《国家温室气体IPCC指南》等以及相关文献的研究成果。

4.1 材料与能源的工程量

对于材料和能源使用数据的获取,文献[6,22]中材料和能源的消耗量取自于施工单位统计整理的工程量清单,文献[19,21,23]以施工概算表或《公路工程预算定额》《公路工程机械台班费用定额》作为建材和能源工程量的计算依据。也有文献在计算研究CO₂排放量时,同时将工程量清单以及预算定额作为基础数据的来源。在文献[20]中以施工现场的工程量清单作为计算使用建筑材料和施工机械运转产生碳排放的依据,而运输阶段的计算数据则取自于预算定额。

利用施工单位监测统计的工程量清单计算得到的结果,相比于使用预算定额或概算表,其准确性更高,计算理论值也更贴近实际排放量,但统计材料与能源消耗量的评估成本高、实施难度大。而在预算定额或概算表中则记录了各个分部分项单元过程建筑材料和燃料能源的输入量,加上合理的工程假设,即可得到整个施工期间材料和能源的消耗值和CO₂排放量。

此外,还有观点认为能耗数据可以通过计算机软件的动力模拟输出获得建材的工程量。尤其是近年来基于Revit操作平台构建的BIM(Building Information Modeling)模型,凭借可视化、可动态调整的特点得到了学者们的青睐。相较于传统建模软件,BIM模型最突出的优点在于能够对工程的设计方案进行实时反馈,帮助设计管理人员及时调整建筑物的结构形态、材料使用方案等^[27]。然而由于隧道四周的环境条件复杂,建立精确模型的难度大,导致目前BIM模型主要应用于地面建筑领域的能耗和结构优化研究。但也有学者对BIM技术在隧道碳排放研究领域的应用做了许多有意义的突破和尝试。Sun等^[28]对韩国某公路隧道项目的施工碳排放进行分析时,通过建立隧道的BIM模型估算了隧道施工阶段主要建筑材料和运输载具、施工机械的能耗与碳排放量,并且还提出引用碳排放的交易价格,将CO₂的排放转化为实际的经济成本,为设计过程中进行隧道结构的调整和建筑材料的选择提供了很好的参考依据。

4.2 材料与能源的碳排放因子

对于材料和能源碳排放因子的取值,同一种建

材或能源在不同国家和地区的生产加工方式存在差异,不同研究机构和学者对碳排放因子的测算方法可能也有较大区别。尤其是针对电能这种二次能源来说,电能碳排放因子的大小受发电方式的影响。在发电能源结构中风能、水能、太阳能等清洁能源的发电占比越高,电能的碳排放因子越小,而以煤炭为原料的火力发电相对于风力发电、核能发电等方式则会产生更多的CO₂,电能的碳排放因子数值也会更大。目前,大部分国家和地区正不断丰富拓展清洁能源的发电方式,可再生能源在发电能源结构中的使用比例逐步增大。并且随着时间的推移,社会也在不断进步,科技水平持续发展,汽车对柴油、汽油等能源的利用效率在提高,消耗单位燃料能源向自然环境排放的污染气体也更少^[29]。同样,对于绿色环保建材的研究应用目前也取得了一定的成果。近年来可再生钢材、可再生混凝土等再生材料在隧道施工期的利用,被认为是能够实现低碳隧道目标的有效途径。在对这类可循环使用材料的碳排放进行计算时,需要将材料的可回收率纳入碳排放因子取值的考虑范围。因此对于材料和能源碳排放因子的取值需要依据地域性、权威性以及时效性的特点确定,同时在选取时应遵循两个原则:一是优先选用项目所在地研究机构公布的数据,其次是全国通用的研究数据;二是需要着重考虑研究机构的权威性、期刊水平、被引用频次和公布年份等因素^[30]。如果数据来源较为丰富,并且难以判断主次关系,可以将选取数据取平均值作为能源的碳排放因子。

目前,建筑材料的碳排放因子大多取自于知名高校的硕博论文和高水平期刊论文的计算研究成果,或是IPCC、《温室气体盘查议定书》等资料,而能源的碳排放因子则主要来源于研究机构公布的数据。鞠颖等^[27]对能源碳排放因子的常见来源做了分类统计,如《国家温室气体IPCC指南》《中国区域电网基准线排放因子》,以及带有地域性特点的《湘潭市统计年鉴》等。

通过上述内容可以发现,在提取隧道碳排放计算所需的工程量数据和碳排放因子时,应尽可能“因地制宜”,依据地区性、权威性和时效性的特点确定所需的基础计算数据。

4.3 清单分析内容

学者们在划分出合理的研究阶段,以及获得适用的计算数据后,采用排放系数法可计算出各阶段单元过程和整体的碳排放,并可根据各自的研究目的开展相应的研究分析。

王贤卫等^[21]选取中国西南地区某拟建高速公路为案例,对隧道工程的建设生命周期分为建材生产、材料运输和现场施工3个阶段,利用施工概算表中的数据对隧道建设各阶段产生的CO₂进行初步计算,发现砂石、水泥等建筑材料生产阶段产生的碳排放量最大,在总体碳排放量中的占比为85.52%;其次是施工机械消耗能源产生的碳排放,占比为13.55%,运输阶段的碳排放量所占比例最小,为0.94%。李乔松等^[5]采用排放系数法,以上海市虹梅南路地铁盾构隧道为背景,确定碳排放计算边界后,基于施工方所提供的盾构机掘进时每开挖一环消耗电能的统计结果,以及上游产业包括建材生产、管片等预制品的加工和运输等过程的清单数据,对该盾构隧道建造阶段产生的碳排放进行测算,发现建材生产排放出的CO₂是隧道施工期碳排放最主要的排放源头,在碳排放总量中占比达到了92.9%,其中钢筋混凝土构件又是建材生产碳排放的最主要贡献源。预制加工、场内运输和现场施工3个过程释放的CO₂含量仅占到碳排放总量的7.1%。此外,还发现盾构机穿过粉砂层时,每环碳排放量是黏质粉土层的两倍。王幼松等^[20]以广州市某地铁盾构区间工程为算例,基于现场实测的工程量清单,选取了21种主要材料和衬砌管片作为建材生产阶段碳排放的分析对象,在考虑钢材和铁是否使用可再生材料的基础上,以《广东省建筑与装饰工程综合定额2010》和《广东省建设工程施工机械台班费用2010》作为运输阶段的数据来源,通过查询施工现场资料得出了施工安装阶段的能耗工程量,经计算得到建材生产阶段的碳排放量最大,占比为79.2%~83.0%,施工安装阶段占比碳排放量为12.4%~15.1%,运输阶段碳排放量占比最小,为4.6%~5.7%,可见该盾构隧道的CO₂绝大部分是在建材生产阶段产生。通过对比分析碳排放计算结果得到,如果所用的钢材和铁全都选用可再生材料制作,能够降低19.2%的碳排放,减排效果十分可观。

上述工程案例碳排放的计算结果表明,隧道施工对外界环境释放的CO₂主要来自于建材生产阶段,其次是因施工机械耗能产生的碳排放,运输阶段中因货车载具消耗燃料能源的排放量占比最小。此外,有学者针对隧道施工期各研究阶段中,不同单元过程贡献的碳排放比例进行了专项研究。根据郭春等^[31]对四川省内某高速公路隧道建设碳排放的研究发现,水泥和钢铁对建材生产期间的碳排放贡献最大,围岩支护和二次衬砌对隧道施工阶段碳排放的贡献最大,具体研究结果如图3、图4所示。

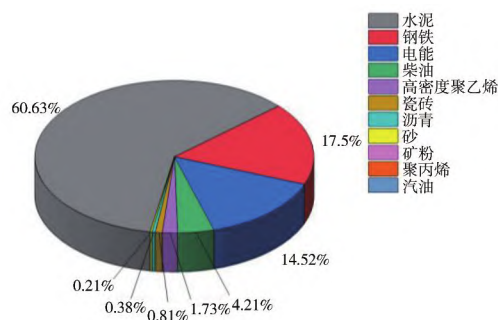


图3 建材和能源碳排放占比^[31]

Fig.3 Proportion of carbon emissions from building materials and energy^[31]

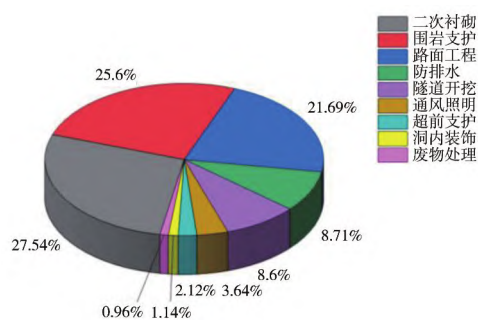


图4 施工阶段碳排放占比

Fig.4 Proportion of carbon emissions during construction phase

隧道施工碳排放可分为直接碳排放和间接碳排放两部分^[23]。直接碳排放主要指的是在隧道施工现场由施工机械燃烧化石燃料对外界直接排放产生的CO₂。需要说明的是,第3节中已经提到与电能消耗有关的碳排放考虑的是在发电过程中释放的CO₂,为了更加全面清晰地开展碳排放计算,认为施工现场的电能消耗也可纳入直接碳排放进行计算。间接碳排放则是指在隧道施工建设阶段需要投入使用的建材在到达施工现场前就已经产生的碳排放,主要涵盖了建筑材料的生产加工、材料的运输等过程排放的CO₂。通过对文献研究成果的总结,可以认为间接碳排放,尤其是建材生产阶段释放的CO₂是隧道施工碳排放的最主要来源。因此对于隧道整体的碳排放研究,除了考虑施工现场因机械设备消耗能源带来的直接碳排放,将包含建材生产和材料运输在内的隧道物化上游阶段产生的间接碳排放纳入分析范围是十分必要的。

5 隧道碳排放前沿性探究

考虑到隧道埋置于地层中,地层围岩既是隧道

结构的受力来源,又与衬砌支护结构共同构建了隧道的结构体系。因此围岩条件包括围岩等级、围岩质量等因素对隧道碳排放可能具有深刻影响,有学者就围岩条件对隧道碳排放的影响作用和机理进行了深入分析。Xu等^[12]使用排放系数法对比5条相同施工工序但不同围岩等级的公路隧道碳排放测算结果发现,围岩等级越高,围岩质量越差,隧道施工产生碳排放的增速就越快,同时还确定了因围岩等级的升高而发生碳排放量明显增大的跃迁路径,主要集中在围岩支护与模筑衬砌两个过程中,如图5所示。围岩等级的改变将导致碳排放量发生非常突出的跃迁,因此在隧道施工的减排研究工作中,考虑围岩条件的影响作用是十分必要的。Guo等^[13]进一步探究了围岩等级影响隧道碳排放的原因,发现随着围岩力学指标的恶化,在隧道开挖后需要投入更多的钢铁、水泥等材料以提高支护强度,保证隧道结构的安全稳定性,消耗了大量的建筑材料后造成了碳排放的迅速增大。因此,对于围岩条件较差的隧道,工程师们应当更加重视对隧道衬砌支护结构的改进优化,发挥围岩的自承载能力,以减少材料和能源的消耗量^[32,33],尤其需要注意水泥和钢材的使用。此外,还需要注意到路面材料类型对隧道施工碳排放的影响,即当围岩条件相同时,沥青路面因更新修复的频率高于混凝土路面,导致了沥青路面会产生更多的温室气体排放,提高环境成本。

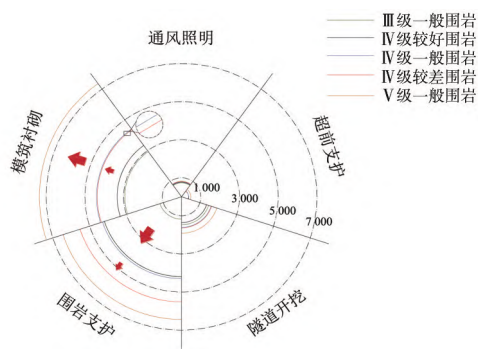


图5 隧道施工碳排放跃迁路径(单位: $t CO_2$)^[12]

Fig.5 Transition path of carbon emission during tunnel construction(Unit: $t CO_2$)^[12]

在已有研究成果的基础上,Xu等^[34]通过对中国西南地区共49组不同衬砌设计的公路隧道碳排放进行测算,探究了影响隧道施工碳排放的关键因素,明确了这些因素与碳排放水平之间的相关程度,由高到低排序依次是投入材料总质量、开挖面积、开挖方式、围岩等级以及隧道埋深等5类因素。同时,基

于计算所得的数据,经回归分析得到了以围岩级别和开挖面积为自变量的碳排放理论预测公式,以及将输入材料总质量作为自变量的预测公式。结合 R^2 、多重共线性和残差序列等因素多次修正预测方程的精度后,得到了2个预测公式:

$$GHG = 0.147M + 1.8 \quad (1)$$

$$GHG = 0.218S + 5.828W - 30.874 \quad (2)$$

式中: GHG 为碳排放量($\times 10^3 t CO_2$); M 为材料总质量($\times 10^3 t$); S 为开挖面积(m^2); W 为围岩等级,取3、4、5。

式(1)、式(2)各自的优点分别是,以材料总质量为自变量的式(1)准确度更高,而式(2)所需的数据更容易获得,使用人员可根据实际情况灵活选用公式估算排放值。需要说明的是,式(1)、式(2)仅适用于中国西南地区隧道施工碳排放的计算。

通过上述研究可以发现,在规划设计隧道施工方案时,如果能够考虑到围岩对隧道结构的支撑作用,并充分发挥围岩的自承载能力,可有效降低建筑材料的消耗使用,最终达到节约资源、降低排放的效果。有学者对优化施工方案能够带来的碳减排效益进行了探究,陈鑫磊等^[35]依托贵州旧屋基连拱隧道的施工方案改造案例,针对连拱隧道形式难以满足绿色低碳的施工要求,从缩短施工工期和减少原材料使用两个角度出发,提出了采用超小净距隧道结构替代连拱隧道形式,采用该方法的理念核心在于通过加固中岩柱能够充分利用围岩的自承载能力,无需施作中导洞和中隔墙,可明显缩短施工工期,降低建筑材料和燃料能源的消耗,实现降低大约25%的碳排放。

开展隧道碳排放影响因素、预测公式和计算方法的分析研究,可以使工程师在规划设计阶段能够预估隧道施工 CO_2 排放量的大致水平,以此对应地提出优化隧道支护结构形式、改进隧道施工方法等措施,从而实现绿色低碳隧道的可持续发展和建设。

6 结 论

本文调研了国内外有关隧道碳排放研究的部分文献,综述了目前隧道碳排放的研究分析方法、计算边界划分、清单分析内容和前沿性探究内容等方面的研究成果,得到了以下结论:

(1) 通常采用LCA方法针对隧道施工、运营等阶段释放的 CO_2 进行分析。选用排放系数法,根据材料和能源的使用量,以及对应的碳排放因子计算出隧道生命周期的 CO_2 排放量。

(2) 多数学者研究的是隧道施工碳排放,将碳排放源拆分为建材生产、材料运输和现场施工3个

阶段,各个阶段之间通过物质流有着紧密的联系,建材生产阶段的碳排放贡献占比最大。

(3) 清单分析所需的基础数据有两类,一是建材和能源的工程量清单,主要取自于施工现场统计整理的数据库清单、施工概算表,或是根据预算定额推算得来;二是碳排放因子,材料碳排放因子一般来源于相关文献的研究成果,能源的碳排放因子则主要取自于权威机构公布的数据。在取值时还需依据地域性、权威性和时效性的原则。

(4) 目前学者们正开展隧道施工碳排放的关键影响因素、排放预测等内容研究。依据围岩条件

制定符合绿色隧道的施工方案,充分发挥围岩的自承载能力,可以改变材料的使用量,通过适用的碳排放预测方程能够在规划设计阶段比对不同施工方案的环境效益,最终确定综合收益最大的一套方案。

针对现阶段隧道碳排放研究较为空白的领域,比如隧道运营期的能耗和碳排放特征研究,铁路隧道碳排放的专项分析和减排研究等方面仍具有较大研究潜力。未来,还需持续推进隧道碳排放的研究分析,助力我国“双碳”目标的达成。

参考文献

References

- [1] 张孝存. 建筑碳排放量化分析计算与低碳建筑结构评价方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
ZHANG Xiaocun. Research on the Quantitative Analysis of Building Carbon Emissions and Assessment Methods for Low-carbon Buildings and Structures[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [2] WANG Xianwei, DUAN Zhengyu, WU Lingsheng, et al. Estimation of Carbon Dioxide Emission in Highway Construction: a Case Study in Southwest Region of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 705-714.
- [3] MILIUTENKO S, ÅKERMAN J, BJÖRKLUND A. 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 and Infrastructure Research, 2012, 12(1): 39-62.
- [4] GALAN I, ANDRADE C, PRIETO M, et al. Estudio del Efecto Sumidero de CO₂ de los Materiales de Base Cemento[J]. Cemento Hormigón, 2010, 939: 70-83.
- [5] CHANG B. Initial Greenhouse Gas Emissions from the Construction of the California High Speed Rail Infrastructure: a Preliminary Estimate[D]. Davis: University of California, Davis, 2009.
- [6] 李乔松, 白云, 李林. 盾构隧道建造阶段低碳化影响因子与措施研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(3): 1-7.
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): 1-7.
- [7] 冯旭杰. 基于生命周期的高速铁路能源消耗和碳排放建模方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
FENG Xujie. Modeling Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions for High-speed Railways[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [8] 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.
- [9] CHO S H, CHAE C U. A Study on Life Cycle CO₂ Emissions of Low-carbon Building in South Korea[J]. Sustainability, 2016, 8(6): 579.
- [10] 朱晓峰. 生命周期方法论[J]. 科学学研究, 2004, 22(6): 566-571.
ZHU Xiaofeng. Study on Life Cycle Methodology[J]. Studies in Science of Science, 2004, 22(6): 566-571.
- [11] CASS D, MUKHERJEE A. Calculation of Greenhouse Gas Emissions for Highway Construction Operations by Using a Hybrid Life-cycle Assessment Approach: Case Study for Pavement Operations[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2011, 137(11): 1015-1025.
- [12] 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: 169-179.
- [13] GUO Chun, XU Jianfeng, YANG Lu, et al. Life Cycle Evaluation of Greenhouse Gas Emissions of a Highway Tunnel: a Case Study in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 211: 972-980.
- [14] 阴世超. 建筑全生命周期碳排放核算分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

- YIN Shichao. Study of Life-cycle Carbon Emission in Buildings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [15] AHN C, XIE Hua, LEE S, et al. Carbon Footprints Analysis for Tunnel Construction Processes in the Preplanning Phase using Collaborative Simulation[C]//Proceedings of Construction Research Congress 2010. Banff: ASME, 2010: 1538–1546.
- [16] HUANG Lizhen, BOHNE R A, BRULAND A, et al. Environmental Impact of Drill and Blast Tunnelling: Life Cycle Assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 86: 110–117.
- [17] LEE J H, SHIM J A, KIM K J. Analysis of Environmental Load by Work Classification for NATM Tunnels[J]. KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research, 2016, 36(2): 307–315.
- [18] RODRÍGUEZ R, PÉREZ F. Carbon Foot Print Evaluation in Tunneling Construction Using Conventional Methods[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 108: 103704.
- [19] 肖时辉, 马振东. 建设工程施工碳排放计算方法在盾构施工中的应用——以珠海横琴超大直径盾构施工为例[J]. 建筑经济, 2018, 39(1): 36–42.
- XIAO Shihui, MA Zhendong. Application of Carbon Emission Calculation Method of Construction Project in Shield Construction: A Case Study of the Super-Diameter Shield Construction in Hengqin Zhuhai[J]. Construction Economy, 2018, 39(1): 36–42.
- [20] 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): 12–18+47.
- 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): 12–18+47.
- [21] 王贤卫, 吴灵生, 杨东援. 高速公路建设CO₂排放计算分析[J]. 公路交通科技, 2014, 31(2): 150–158.
- WANG Xianwei, WU Lingsheng, YANG Dongyuan. Calculation and Analysis of CO₂ Emission from Expressway Construction[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(2): 150–158.
- [22] 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): 1818–1820.
- FAN Jing. Accounting Analysis of Carbon Emission within Construction Period of Underground Transportation Infrastructure[J]. Building Construction, 2018, 40(10): 1818–1820.
- [23] 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. 成都: 中国土木工程学会隧道及地下工程分会, 2016: 64–72.
- XU Jianfeng, GUO Chun, GUO Xiong, et al. Research on the Calculation Model of Carbon Emission during Tunnel Materialization [C]//Proceedings of 2016 China Tunnel and Underground Congress and the 19th Annual Conference of the Tunnel and Underground Engineering Branch of the Chinese Civil Engineering Society. Chengdu: the Tunnel and Underground Engineering Branch of the China Civil Engineering Society, 2016: 64–72.
- [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): 13–22.
- 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): 13–22.
- [25] 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): 5–9.
- GUO Yalin, GUO Chun. Calculation Model of Life Cycle Carbon Emissions of Railway Tunnel[J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2021, 17(6): 5–9.
- [26] 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): 47–55.
- 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): 47–55.
- [27] 鞠颖, 陈易. 建筑运营阶段的碳排放计算——基于碳排放因子的排放系数法研究[J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41(3): 175–179.
- JU Ying, CHEN Yi. Carbon Emission Calculation in Building Operation Phase—Research on Emission Coefficient Method Based on Carbon Emission Factor[J]. Sichuan Building Science, 2015, 41(3): 175–179.
- [28] SUN Hongwei, PARK Y. CO₂ Emission Calculation Method during Construction Process for Developing BIM-based Performance Evaluation System[J]. Applied Sciences, 2020, 10(16): 5587.
- [29] LI Xiang, DALLMANN T R, MAY A A, et al. Seasonal and Long-term Trend of On-road Gasoline and Diesel Vehicle Emission Factors Measured in Traffic Tunnels[J]. Applied Sciences, 2020, 10(7): 2458.
- [30] 黄旭辉. 地铁土建工程物化阶段碳排放计量与减排分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- HUANG Xuhui. Carbon Emission Measurement and Reduction Analysis in the Embodied Stage of Metro Civil Engineering[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.

- [31] 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): 1140–1146.
GUO Chun, XU Jianfeng, ZHANG Jiapeng. Calculation Methods and Prediction Models of Carbon Emission of Tunnel Construction [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(8): 1140–1146.
- [32] LE K N, TRAN C N N, TAM V W Y. Life-cycle Greenhouse-gas Emissions Assessment: an Australian Commercial Building Perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 199: 236–247.
- [33] TAM W Y V, LE K N, TRAN C N N, et al. A Review on Contemporary Computational Programs for Building's Life-cycle Energy Consumption and Greenhouse-gas Emissions Assessment: an Empirical Study in Australia[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 4220–4230.
- [34] 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: 337–349.
- [35] 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): 59–70.
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): 59–70.

Carbon Emission Accounting and Research Progress Analysis of Traffic Tunnel Engineering

GUO Chun^{1,2} GUO Yalin^{1,2} CHEN Zheng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;
2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: In response to the increasingly serious global warming problem, the Chinese government has put forward the "carbon emission peak and carbon neutrality" goals. The greenhouse gas emitted from the production activities of traffic tunnels is one of the main sources of carbon emissions in the field of civil engineering. The efficiency of energy conservation and emission reduction is the key to achieving the "carbon emission peak and carbon neutrality" goals in time and with good quality. The current research status of carbon emission calculation and analysis of traffic tunnels is summarized through statistical research on relevant documents in the past 10 years. The results show that the carbon emission research of tunnel life cycle at present is often carried out based on life cycle evaluation at home and abroad, and the emission coefficient method is selected for calculation. Most documents mainly focus on the calculation and emission reduction analysis of carbon emissions during the construction of highway tunnels and shield tunnels, and generally the carbon emissions during the construction of tunnels are divided into three phases: material production, material transportation and on-site construction. A comprehensive description of the research progress on the influencing factors and prediction formulas of carbon emissions from tunnel construction can provide a reference for future research.

Keywords: Traffic tunnel; Life cycle evaluation; Carbon emission; Calculation method; Inventory analysis