

高速公路隧道全寿命周期碳排放核算与监测技术标准探讨

邵亚攀

中铁十四局集团有限公司 山东济南 250000

摘要：随着全球气候变化问题的日益突出，减少碳排放已成为全球范围内的紧迫任务。高速公路隧道作为重要的交通基础设施之一，在其全寿命周期内的碳排放影响巨大。本文通过分析高速公路隧道全寿命周期碳排放的特征，进一步探讨了核算与监测边界的确定、碳排放源的分类以及监测设备的选择原则。在此基础上，提出了针对高速公路隧道全寿命周期碳排放核算与监测的技术标准，包括采用排放因子法进行核算、定期人工统计和自动在线监测相结合的监测方法等。该标准将有助于全面评估隧道项目的碳足迹，为制定针对性的减排措施提供技术支持。

关键词：高速公路隧道；全寿命周期；碳排放核算及监测；技术标准

引言

随着气候变化加剧与全球碳排放持续增长，减少温室气体排放已成为全球关注的焦点^[1]。交通运输是碳排放的主要来源之一，高速公路隧道作为交通基础设施的重要组成部分，其全寿命周期内的碳排放对整体碳足迹具有重要影响^[2]。

目前，生命周期评价（LCA）被广泛用于建筑建设与运营阶段的碳排放研究^[3]。在隧道碳排放核算中，多采用排放系数法，国内外学者在研究阶段与边界划分上存在差异，但大多将碳排放源界定为施工建设与运营使用两大阶段，其中施工期碳排放为重点关注对象，研究其各环节碳排放影响因素，以支持低碳设计与建造^[4]。部分研究也涵盖运营期通风与照明系统的碳排放，为隧道绿色低碳发展提供理论依据与技术参考^[5]。

碳排放监测研究目前以电力行业为主，主要方法包括核算法和在线监测法。研究表明，两种方法所得数据存在差异，通常在线监测法显示的排放量更高^[6]。交通领域的碳排放监测多集中于城市路网，常用技术包括台架测试、隧道测试、遥感监测及车载尾气检测（PEMS）等^[7-10]。总体而言，碳排放监测研究在方法选择与数据准确性方面仍面临挑战，在高速公路隧道领域的研究尚显不足。

因此，本文探讨高速公路隧道全寿命周期碳排放核

算与监测技术标准，旨在全面评估隧道碳足迹，掌握碳排放来源与分布，为政府、企业及相关机构提供参考，支持低碳决策。

一、高速公路隧道全寿命周期碳排放特征分析

1.全寿命周期不同阶段的差异性

高速公路隧道全寿命周期内，各阶段碳排放特征差异显著。材料生产阶段碳排放主要源于原材料采集、加工和运输中的能耗与燃烧排放；建设施工阶段碳排放主要来自工程机械使用和施工能耗；运营养护阶段则主要与照明、通风等机电设施的能耗相关。

2.碳排放核算及监测对象复杂性

监测涵盖材料生产、建设施工和运营养护各阶段活动，需统筹不同环节的碳排放来源。隧道结构与运营系统复杂，需综合材料、能耗及维护等因素，以实现准确的碳核算与监测。

3.碳排放核算及监测数据量大、种类多

全寿命周期碳核算需处理大量多样化数据，包括材料、能耗与运营养护等多类数据，须全面采集、整理与分析。隧道运营长期复杂，需持续积累与监测数据，建立完善的数据管理系统以应对挑战。

二、高速公路隧道碳排放核算与监测边界分析

1.核算及监测边界的确定

核算及监测边界的确定应以隧道全寿命周期为主体，分为材料生产、建设施工和运营养护三个生命周期阶段。

材料生产阶段核算边界为开工至交工验收，需核算监测原材料（如水泥、钢筋、预制构件、沥青及集料

作者简介：邵亚攀（1993.1.16-），男，汉族，安徽黄山人，本科学历，工程师，研究方向：城市地铁盾构隧道的建设工作。

等)的生产与运输,包括运输车辆排放,并记录材料用量及回收利用量。

建设施工阶段核算边界相同,需监测施工中人工、电力、水资源及车辆使用,涵盖辅助与主施工区内的人工、材料加工与反应、机械设备、运输、照明和用水等。

运营养护阶段以年为核算周期,需监测运营中机电设施电力、管理用水用电,养护材料的用量与回收,以及辅助与生产施工中人工、水电和车辆情况,并考虑绿电与碳汇的减排贡献。

2. 碳排放源的分类

碳排放源的分类应按照直接碳排放、间接碳排放和碳减排进行划分。直接碳排放指隧道全寿命周期中化石燃料燃烧产生的排放。间接碳排放包括外购电力和净购入用水所产生的排放。碳减排指通过材料回收、自产减碳及碳汇实现的减排行为。

3. 监测设备

针对以上不同阶段的碳排放源,需配备相应的监测设备进行监测。这些监测设备包括但不限于智能电表、智能水表、智能气表、智能油耗传感器以及OBD在线监

测设备。在选择监测设备时,应考虑以下原则和要求:

- (1) 准确性:确保数据可靠精准;
- (2) 实时性:实时监测并反馈数据;
- (3) 可靠性:性能稳定,可长期连续工作;
- (4) 数据传输与分析:支持数据上传与处理;
- (5) 成本效益:在满足需求的同时控制成本。

三、高速公路隧道碳排放核算及监测技术标准

1. 碳排放核算方法

目前常用的碳排放核算方法包括物料平衡法、排放因子法和实测法。其中,排放因子法无需全面统计投入与产出数据,显著降低了工作量和复杂度。该方法通过分析排放源类型、活动水平和能源使用等,建立排放因子数据库,结合隧道工程中能源消耗、运输及材料使用等数据,即可快速准确计算碳排放量。其在高速公路隧道项目中适用灵活,可根据项目特点调整优化,满足核算需求。

因此,隧道全寿命周期碳排放核算采用排放因子法,即活动数据与排放因子的乘积,各阶段具体计算方法及公式见表1。

表1 碳排放核算方法

核算阶段	核算项	计算公式	公式含义
材料生产阶段	材料生产过程碳排放量	$E_{sc}=E_m-E_{mr}+E_t$	E_{sc} ——材料生产阶段碳排放量(kgCO_2); E_m ——材料生产过程碳排放量(kgCO_2); E_{mr} ——回收利用材料生产过程碳排放量(kgCO_2); E_t ——材料运输过程碳排放量(kgCO_2)。
	回收利用材料抵碳量		
	材料运输过程碳排放量		
建设施工阶段	施工机械能耗碳排放量	$E_{js}=E_e+E_p+E_r+E_t+E_d+E_{ld}+E_{ad}+E_w$	E_{js} ——建设施工阶段碳排放总量(kgCO_2); E_e ——施工机械耗能碳排放量(kgCO_2); E_p ——施工人员生活耗能碳排放量(kgCO_2); E_r ——施工过程化学反应碳排放量(kgCO_2); E_t ——施工过程场内运输碳排放量(kgCO_2); E_d ——施工机械使用电力碳排放量(kgCO_2); E_{ld} ——生产施工照明净购入使用电力的碳排放量(kgCO_2); E_{ad} ——辅助生产施工净购入使用电力的碳排放量(kgCO_2); E_w ——区域消耗水资源的碳排放量(kgCO_2)。
	施工人员碳排放量		
	施工过程化学反应碳排放量		
	施工过程场内运输碳排放量		
	施工机械使用电力碳排放量		
	生产施工照明净购入使用电力的碳排放量		
	辅助生产施工净购入使用电力的碳排放量		
	区域消耗水资源的碳排放量		
运营养护阶段	机电设施碳排放量	$E_{yy}=E_f+E_{od}+E_{ow}+E_{mc}+E_{de}-E_{gdi}-E_{th}$	E_{yy} ——运营养护阶段碳排放总量(kgCO_2); E_f ——机电设施碳排放量(kgCO_2); E_{od} ——运营管理电力碳排放量(kgCO_2); E_{ow} ——运营管理水资源碳排放量(kgCO_2); E_{mc} ——养护行为碳排放量(kgCO_2); E_{de} ——养护交通延误碳排放增加量(kgCO_2); E_{gdi} ——隧道沿线绿色电力减碳量(kgCO_2); E_{th} ——隧道沿线绿地碳汇减碳量(kgCO_2)
	运营管理电力碳排放量		
	运营管理水资源碳排放量		
	养护行为碳排放量		
	养护交通延误碳排放增加量		
	隧道沿线绿色电力减碳量		
	隧道沿线绿地碳汇减碳量		

2. 碳排放监测方法及指标

隧道全寿命周期碳排放监测应覆盖材料生产、建设施工和运营养护阶段。监测方法应根据对象特点选择：材料与回收量采用人工统计，水电等能耗采用自动监测，燃油设备多时可采用抽样监测。

根据前述边界分析，制定了隧道全寿命周期碳排放监测指标。指标按生命周期阶段、碳排放源类别等系统梳理，全面覆盖碳源，提升监测准确性、全面性和可比性，为识别重点碳源及减排提供依据。

结语

本文深入探讨了高速公路隧道全寿命周期碳排放核算与监测的技术标准，通过分析各阶段排放特征、界定核算边界、分类排放源，并提出核算方法与监测指标，为隧道碳足迹评估与管理提供了理论和方法基础。本研究仍存在一定局限，未来可从以下方面深入探索：

- (1) 结合物联网、大数据等技术，发展更先进的数据采集与处理手段，如传感器网络与云计算，以提升数据实时性与分析准确性；
- (2) 改进当前碳排放因子法的精度，研究基于生命周期评价与模型仿真的核算方法，提高结果可靠性；
- (3) 结合政策、法规与市场机制，研究碳排放管理政策的实施路径与碳交易市场的运行机制，推动管理体系的落地与推广。

参考文献

[1] Lee S, Y. Choi, J. Woo, et al. Estimating and

Comparing Greenhouse Gas Emissions with Their Uncertainties Using Different Methods: A Case Study for an Energy Supply Utility [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2014, 64(10): 1164–1173.

[2] 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.

[3] 张秀敏, 吴朝晖. 建筑物碳排放测算方法探析 [J]. 工业技术经济, 2019, 312 (10): 31–40.

[4] 皮膺海. 盾构隧道施工碳排放测评研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2016.

[5] 董红明. 盾构施工碳排放定额编制方法研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2016.

[6] Gurney K. R, J. Huang, K. Coltin. Bias Present in US Federal Agency Power Plant CO₂ Emissions Data and Implications for the US Clean Power Plan [J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(6):064006.

[7] 张娟, 郭腾飞. 碳排放监测技术发展现状及提升对策 [J]. 资源节约与环保, 2023 (05): 45–48.

[8] 李冰, 储江伟. 乙醇汽油车行驶中的尾气遥感监测与排放因子分析 [J]. 中国公路学报, 2014, 27 (3): 122–126.

[9] 闫旭普. 基于OBD检测数据的车辆尾气排放远程监测系统设计 [D]. 北京: 北京工业大学, 2016.

[10] 孙健, 张颖, 薛睿, 张毅. 基于移动监测的城市道路交通碳排放形成机理——以上海市为例 [J]. 中国公路学报, 2017, 30 (05): 122–131.