doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2025.06.003

# 高速公路全生命周期碳排放特征、影响机制及研究进展

杨顺由[1],张燕廷[2],刘 云[1],杨 雷[1],李松谕[1],郑之灿[3],严志钰[3],廖 畅[3],程晓莉[3]
(1.云南勐绿高速公路投资开发有限公司,云南 普洱 665000;2.云南省交通发展投资有限责任公司,云南 昆明 650000;
3.云南大学 生态与环境学院,云南 昆明 650500)

**摘要**:在“双碳”目标持续推进的背景下,高速公路作为典型的高能耗基础设施,其建设过程中的碳排放问题正日益受到广泛关注。高速公路全生命周期碳排放来源分为直接和间接碳排放。直接碳排放主要来源于材料生产和运输、机械施工和燃料燃烧等活动,核算方法包括实测法、质量平衡法、投入产出法和碳排放因子法等。其中,碳排放因子法因其操作简便和标准化程度高而被广泛应用。间接碳排放则涉及土地利用变化所引起的土壤和植被变化以及高速公路营运的长期衍生影响。且不同材料和结构类型对碳排放影响存在显著差异。未来,生态修复技术和减排政策可被广泛应用以降低碳排放。

**关键词**:碳排放;全生命周期评价;生态修复;减排政策;高速公路建设

**中图分类号**:P461.7;S718.5;U412.366 **文献标识码**:A **文章编号**:1671-3168(2025)06-0015-07

**引文格式**:杨顺由,张燕廷,刘云,等. 高速公路全生命周期碳排放特征、影响机制及研究进展[J]. 林业调查规划,2025,50(6):15-21. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2025.06.003

YANG Shunyou, ZHANG Yanting, LIU Yun, et al. Research Progress on Carbon Emissions from Expressways: Characteristics and Impact Mechanisms across the Full Life Cycle[J]. Forest Inventory and Planning, 2025, 50(6): 15-21. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2025.06.003

# Research Progress on Carbon Emissions from Expressways: Characteristics and Impact Mechanisms across the Full Life Cycle

YANG Shunyou[1], ZHANG Yanting[2], LIU Yun[1], YANG Lei[1], LI Songyu[1], ZHENG Zhican[3], YAN Zhiyu[3], LIAO Chang[3], CHENG Xiaoli[3]
(1. Yunnan Menglyu Expressway Investment and Development Co., Ltd., Pu'er, Yunnan 665000, China;
2. Yunnan Transportation Investment and Development Co., Ltd., Kunming 650000, China;
3. School of Ecology and Environmental Science, Yunnan University, Kunming 650500, China)

**Abstract**: Amid the ongoing implementation of “Dual Carbon” goals, expressways, as representative high-energy-consuming infrastructure, have attracted growing attention due to their significant carbon emissions, particularly during the construction phase. Over the full life cycle of expressways, carbon emissions can be broadly classified into direct and indirect sources. Direct emissions primarily originate from the production and transportation of construction materials, the operation of machinery, and fuel combus-

**收稿日期**:2025-06-11;**修回日期**:2025-07-04
**基金项目**:云南省交通运输厅高速公路桥梁隧道路面工程施工碳排放量化评价及减碳路径研究科技项目(MLGS-GCB-2024-01);云南省教育厅科学研究基金资助项目(2025Y0120).
**第一作者**:杨顺由(1976-),男,高级工程师. 主要从事公路工程与土木工程方面的研究. Email:125305549@qq.com
**责任作者**:郑之灿(1999-),男,博士研究生. 主要从事草地碳循环与模型模拟方面研究. Email:zhengzhican@stu.ynu.edu.cn

tion. Common accounting approaches include direct measurement, mass balance, input-output analysis, and the emission factor method, among which the latter is most widely adopted due to its operational simplicity and high standardization. Indirect emissions are mainly linked to land use changes, such as soil disturbance and vegetation loss, as well as long-term operational impacts. Furthermore, the choice of construction materials and structural designs significantly influences the overall carbon footprint. Looking ahead, the large-scale application of ecological restoration techniques and the implementation of targeted emission reduction policies are expected to play a key role in mitigating carbon emissions across the sector.

**Key words**: carbon emissions; life cycle assessment; ecological restoration; emission reduction policy; expressway construction

在全球气候变化日益严峻、可持续发展理念深入人心的背景下,中国提出了“碳达峰”与“碳中和”战略目标,旨在构建以绿色低碳发展为核心的现代化经济体系,推动资源利用方式和发展模式的根本转型。该“双碳”战略不仅彰显了我国积极参与全球气候治理、履行国际承诺的责任担当,也体现了推动经济高质量发展与生态环境协同治理的总体战略取向。在落实“双碳”目标的系统进程中,交通运输行业因其能源消耗强度高、碳排放量大等特征,已成为亟需实现绿色转型与深度减排的重点领域。作为国家综合交通运输体系的核心构成,高速公路在支撑区域互联互通与经济社会发展的同时,其建设与运营过程中的碳排放问题也日益受到广泛关注。

交通运输领域的绿色转型已成为应对气候变化、降低碳排放的重要抓手。尤其是高速公路作为高能耗基础设施,其在全生命周期中产生的碳足迹对实现“双碳”目标具有重要影响。根据交通运输部于 2024 年 6 月发布的《2023 年交通运输行业发展统计公报》,我国公路交通体系持续保持高速发展态势。2023 年,全国公路总里程由 2022 年末的 535.48 万km 增长至 543.68 万km,呈稳步增长态势,其中高速公路通车里程由 17.73 万 km 增长至 18.36 万 km,反映出高速公路建设仍具显著扩张潜力与市场规模(图 1)。因此,推动以高速公路为代表的交通基础设施实现绿色低碳发展,不仅是构建生态文明制度体系、缓解环境压力的关键路径,也是引导行业实现高质量发展与可持续转型的战略支点。

高速公路的碳排放主要来源于建设材料生产与施工、车辆尾气排放过程中的能源消耗等[1],从车辆尾气排放来看,随着交通流量的不断增长,大量机动车在高速公路上行驶所产生的二氧化碳、一氧化碳和氮氧化物等温室气体和污染物排放量较为可观[2]。在建设阶段,沥青搅拌、水泥生产、钢材加工

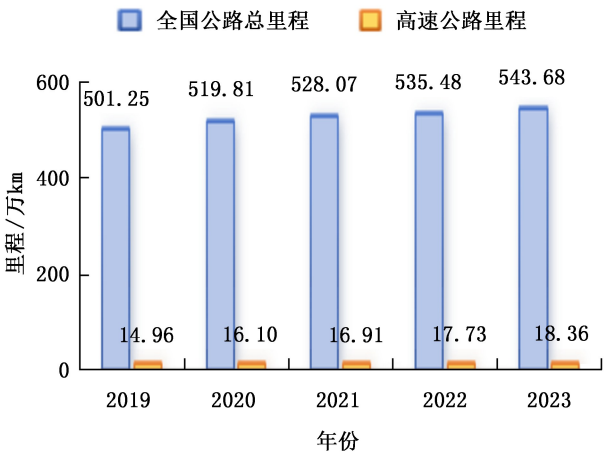


**图 1 2019—2023 年全国公路里程**

**Fig. 1 National highway mileage from 2019 to 2023**

等建筑材料的制造过程以及大型施工机械的运行均消耗了大量能源并释放了相应碳排放[3]。据统计,2023 年公路建设碳排放占比约 75%~80%,主要来自汽油和柴油消耗,其中高速公路贡献显著,使研究高速公路碳排放效应及其减排策略成为交通领域实现“双碳”目标的重要课题。

当前,国内外学者针对高速公路碳排放进行了一系列研究,SEO 等对道路建设产生的 $CO_2$ 进行了量化,并分析了车道数和不同结构类型对碳排放的影响[4];黄山倩等基于生命周期评价理论提出碳排放量核算模型和碳排放强度指数,并对新建高速公路典型路段进行碳排放量核算[5];孙文圃等基于 MOVES 模型评估了西安绕城高速公路油耗核算的碳排量,建立了我国高速公路不同纵坡情况下的碳排放数据库和高速公路纵坡路段碳排放模型[6],但我国在该领域的碳排放测算工作仍存在较大的不确定性,这种不确定性主要源于我国交通行业碳排放核算体系起步较晚,相关标准体系尚不健全,碳排放测算方法科学性与适用性有待提升。同时,关键参

数如碳排放因子及其他基础数据的准确性和代表性仍存在较大偏差，从而制约了行业碳减排工作的系统推进。鉴于此，本文对我国高速公路建设阶段碳排放的主要测算方法及排放因子进行了系统梳理，重点分析了直接碳排放与间接碳排放的核算机制，揭示了当前碳排放测算实践中存在的主要问题，并在此基础上提出具有可行性的改进建议，旨在为交通运输行业低碳发展路径优化与碳减排工作有序推进提供理论支撑与方法参考。

## 1　碳排放核算方法及分类

高速公路建设碳排放核算主要依据生命周期评价方法（LCA）[7]，这是一种综合考虑资源、能源消耗与环境影响的核算方法。该模型具有 3 方面的核心特点：（1）覆盖“从摇篮到坟墓”的所有阶段（如建材生产、运输、施工、维护、拆除等）；（2）需要依赖具体方法（如实测法、质量平衡法、投入产出法、碳排放因子法等）来计算各阶段的碳排放数据；（3）服务于整体碳足迹分析、减排策略优化或环境影响认证。根据生命周期评价理论，高速公路碳排放一般分为材料生产阶段、材料运输阶段、施工建设阶段和运营维护阶段（图 2）。

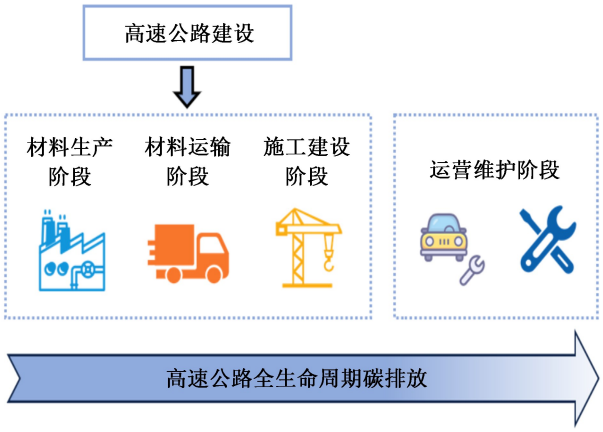


**图 2　高速公路全生命周期评价系统**

**Fig. 2　Full life cycle assessment system of the expressway**

量化全生命周期各阶段碳排放测算方法可分为 4 类（表 1）。

**表 1　常见碳排放测算方法对比**

**Tab. 1　Comparison of common carbon emission calculation methods**

| 方法名称 | 核心原理 | 适用场景 | 优点 | 局限性 | 典型应用案例 | 数据来源 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 实测法 | 通过传感器、流量计等设备直接监测能源消耗（如机械油耗、电力消耗）或碳排放量 | 施工阶段微观分析、特定设备碳排放核算 | 数据精度高（误差在±5%以内） | 成本高、依赖设备覆盖率和实时性 | 某隧道工程中挖掘机柴油消耗监测[8] | 现场监测数据、机械技术手册 |
| 质量平衡法 | 基于物质守恒定律，通过材料消耗量（如水泥、钢材）计算碳排放 | 材料生产阶段、工程预算阶段快速估算 | 计算简单、依赖工程清单数据 | 忽略工艺改进（如低碳水泥替代） | 某桥梁工程钢材用量核算[9] | 工程预算清单、IPCC 材料排放因子 |
| 投入产出法 | 通过经济部门间的投入产出关系，分析高速公路建设对全产业链的间接碳排放拉动效应 | 宏观政策分析、区域碳排放评估 | 覆盖供应链上游影响 | 分辨率低、难以区分工程结构差异 | 中国高速公路投资对钢铁行业碳排放的拉动效应分析 | 国家投入产出表、经济统计数据 |
| 碳排放因子法 | 基于 IPCC 或国家标准的排放系数，将能源或材料消耗量转换为碳排放（如电力、柴油排放因子） | 快速估算、政策制定与报告编制 | 操作简便、标准化程度高 | 因子更新滞后、忽略技术动态变化 | 某高速公路运营阶段交通流量碳排放估算 | IPCC 指南、国家发改委排放因子数据库 |

目前，全球基本采用碳排放因子法来测算交通行业的碳排放量。通过获得交通生产碳排放活动数量，结合相关碳排放因子测算该部分活动碳排放量[10]。

综合 GHG Protocol 和 ISO 14064 的核算标准，高速公路碳排放基于来源不同可分为直接碳排放和间接碳排放[11]。直接碳排放指在高速公路全生命周期中由项目主体直接控制或拥有的排放源产生的即时温室气体，产生于现场地理边界内的燃料燃烧、化学转化或生物质分解过程（表 2）。

直接碳排放具有 3 个核心特征：（1）空间确定性：排放源位于施工/运营现场地理边界内；（2）时间同步性：碳排放与施工/运营活动同步发生；（3）控制权归属：排放量受项目方直接控制。

间接碳排放指在高速公路系统物理边界之外，由项目活动间接导致的额外的温室气体排放，涵盖原材料加工、土地利用变化和交通量增长排放，其特点是具有空间离散性和时间延迟性（表 3）。

表2 直接碳排放典型来源

Tab. 2 Typical sources of direct carbon emissions

| 活动阶段 | 具体排放源 | 计算公式 | 数据来源 |
|---|---|---|---|
| 施工阶段 | 外购电力/热力生产排放 | $CO_2e$=能源消耗量×对应物料的全生命周期排放因子 | GHG Protocol Scope 2 |
| | 建材生产和外购排放 | $CO_2e$=建材消耗量×对应物料的全生命周期排放因子 | GHG Protocol Scope 3(部分) |
| | 工程机械柴油燃烧(挖掘机、压路机等) | $CO_2e$=柴油消耗量×柴油碳排放因子 | EPA 移动源排放因子库 |
| | 沥青混合料加热炉天然气燃烧 | $CO_2e$=天然气体积×天然气碳排放因子 | IPCC 2019 燃料燃烧指南 |
| 运营阶段 | 隧道通风系统化石能源消耗 | $CO_2e$=电力消耗×电网碳排放因子(若使用自备发电机) | IEA 各国电网排放因子 |
| | 服务区锅炉生物质燃料燃烧 | $CO_2e$=燃料质量×生物质碳排放因子 | GHG Protocol 生物质能指南 |

表3 间接碳排放典型来源

Tab. 3 Typical sources of indirect carbon emissions

| 内容描述 | 典型案例 | 时间滞后效应 |
|---|---|---|
| 原材料开采与初级加工 | 石灰石矿山开采碳排放 | 通常滞后施工期1~3年 |
| 土地利用变化 | 占用森林、农田和草地等导致的土壤碳库流失 | 持续20年以上 |
| 交通量增长排放 | 新建高速公路汽车增量出行 | 运营期逐年累积 |

## 2 直接碳排放

高速公路建设包括路基工程、桥梁工程和隧道工程,3种工程由于其材料、施工方法和结构类型等差异,碳排放也存在差异。

### 2.1 高速公路不同沥青材料碳排放差异

高速公路建设过程中,沥青路面因其行车舒适、方便快捷和噪声低等特点,已成为我国当下公路建设施工中的主要路面形式[12]。沥青公路的修建需大量使用集料、沥青、改性剂等加工材料,施工过程中材料拌和、运输、摊铺、碾压等设备也会耗费较多燃油和电力,从而产生大量二氧化碳等温室气体。此外,沥青公路养护也消耗大量的资源和能源,而且热拌沥青混合料被普遍使用[13]。

沥青路面通常由面层、基层、底基层和垫层组成,近年来,国内学者从不同类型沥青路面出发,对建设期间碳排放进行评估。李清华等基于LCA理论,量化了半刚性沥青路面建设过程的碳排放,并分析其碳排放特征[14];陈和悦根据路面厚度、不同混合材料设计了3种沥青路面,并分别从原材料生产、运输、施工3个阶段对碳排放进行对比分析,发现了碳排放最少的最佳方案[15];王雪英等采用热储存和常温储存两种方式,对比SBS(苯乙烯-丁二烯-苯乙烯三嵌段共聚物)改性沥青和乳化SBS改性沥青碳排放量发现,不论是能耗还是碳排放,乳化SBS改性沥青均优于SBS改性沥青[16];张红波等基于生命周期分析方法,建立沥青路面碳排放与能耗模型,研究表明,单位质量沥青能耗与碳排放:SBS改性沥青>橡胶沥青>基质沥青,且在建设周期过程中,原材料生产碳排放量最高[17];兰勇烽等基于不同交通等级高速公路历年检测数据提出,SMA(沥青玛碲脂碎石混合料)路面就地热再生技术经济效益更高,且具有显著的节能减排效益,可减少20%~30%的温室气体排放[18]。

在设计沥青路面结构时,应综合考虑道路性能、使用寿命、环境影响和经济成本等多方面因素,优先选用乳化沥青等环保型施工材料,并采用高效、低能耗的施工设备实现公路建设的可持续发展。

### 2.2 高速公路不同桥梁类型碳排放差异

桥梁是高速公路建设中的重要组成部分,怎样减少桥梁施工的能源消耗和温室气体排放已成为各大学者研究的重点。张振浩等以T桥梁为研究对象,从材料生产、材料运输和机械施工3个阶段计算碳排放量,主要来源于桩基工程以及上部工程,碳排放分别占比约31.6%和30.8%[19];袁浩允等按照全生命周期理论将装配式T梁全生命周期划分为6个阶段构建碳排放计算模型,研究发现,原材料准备阶段碳排放量占比最大(62.71%)[20];李小娇对不同跨悬索桥全生命周期各阶段产生的碳排放进行系统量化,发现山区大跨重力式锚碇悬索桥全生命周期碳排放总量远超其他几种桥型,且建材准备阶段碳排放量大于运营维护阶段[21];徐双对不同材料下的桥梁碳排放进行对比分析,研究发现,钢混组合结构减排效果优于普通混凝土结构[22]。从碳排放量来看,T型梁桥碳排放中等,施工简便,维护成本低;拱桥施工阶段碳排放高,但长期使用碳排放低;悬索桥施工和维护阶段碳排放高,但大跨度优势明显;斜拉桥施工和维护阶段碳排放高,但结构轻盈。

### 2.3 高速公路不同隧道类型碳排放差异

高速公路隧道建设是交通行业碳排放大户，尤其是隧道施工过程中，挖掘机械和搅拌车等设备的运行产生大量 $CO_2$。隧道工程的碳排放主要来源于开挖、衬砌和附属设施建设等方面。在开挖过程中，大型挖掘机、装载机等施工机械的燃油消耗会产生碳排放。同时，对于一些复杂地质条件下的隧道可能需要采用爆破作业，炸药生产、运输以及爆破过程中的能源消耗也会增加碳排放。衬砌施工中，混凝土的生产、运输和浇筑是碳排放的关键环节，尤其是大量水泥的使用。此外，隧道的通风、照明等附属设施在运营阶段也会持续消耗能源并产生碳排放，其碳排放量与隧道长度、断面尺寸以及交通流量等因素密切相关。一般来说，隧道建设的碳排放相较公路和桥梁要高。

## 3 间接碳排放

高速公路建设对碳排放的间接影响贯穿整个施工和营运两个阶段。在施工阶段，高速公路施工挖损、压占大量土地[23]，对原有土地造成极大损坏[24]。这些大规模的破坏不仅改变了原有地形地貌，还影响了土壤结构和理化性质，导致土壤侵蚀和水土流失[25]，加剧土壤碳排放过程。土壤是陆地生态系统中最重要碳库，其对碳的固持能有效缓解温室效应[26]。因此，水土流失越严重，土壤固碳能力越差，其向大气释放的 $CO_2$ 含量就越多[27]。在建设初期，碾压导致土壤孔隙度降低，压实的土壤减少了空气和水分的流通与渗透，阻碍了植物根系生长，抑制了土壤微生物活动，从而降低土壤有机碳含量。此外，土壤孔隙度的降低还会增加地表径流，进一步加剧水土流失。研究表明，路堤区由于受高速公路建设的影响，其土壤有机碳含量显著低于未扰动区[28]，且距离高速公路越近，受干扰越大，植被破坏越严重，土壤有机碳含量越低[29-31]。

在运营期高速公路对碳排放的间接影响仍持续存在。一方面，汽车尾气释放的 NOx 和 $SO_2$ 等气体易与水反应生成酸性物质，可能导致土壤酸化[32]，在一定范围内能促进土壤碳排放[33]。另一方面，汽车尾气是土壤重金属污染的主要来源，土壤重金属污染能降低微生物的生物量和活性，从而显著抑制土壤碳排放[34]。研究表明，高速公路两侧土壤重金属含量与车流量呈显著正相关关系，且距离高速公路越远，重金属含量越低[35]。但也有研究显示，高速公路两侧土壤重金属含量随距高速公路距离的增加表现出先增加后降低的趋势[36-39]。这种不一致主要与重金属进入土壤的方式的不同有关。具体而言，锌和镉主要通过地表径流或扬尘扩散进入土壤[40]，因此可能表现出随距高速公路距离的增加而降低的趋势，而铅主要以颗粒态的形式随汽车尾气向高速公路两侧扩散[41]，通常扩散到一定距离后才会被地面或植被截留而进入土壤，因此高速公路两侧土壤中的铅含量在距离高速公路一定距离处才会出现最大值。

高速公路施工和运营过程中不可避免地会进行大规模的土壤开挖和回填作业，对周边的生态植被造成一定程度的破坏和影响，如植被损失，群落结构变化，病虫害和外来物种入侵等，这些变化会显著影响植被碳排放。研究表明，公路建设会显著降低植被数量、植被覆盖率和多样性，这主要归因于高速公路建设对植被的破坏，向卫东等基于铜黄高速公路的研究发现，高速公路建设对周边区域生物多样性影响较小，这得益于该高速公路整体线路规划合理[42]。刘杰等基于大保和思小两段高速公路分析高速公路建设对沿线植物生物量的影响发现，高速公路建设对乔木产生负面影响，而对灌木和草本产生正面影响，这主要是由于在高速公路建设过程中，由于乔木处于优势地位而成为工程占地和施工活动的主要破坏对象，而乔木层的破坏改善了下层灌木和草本的光照条件，能极大地抵消公路干扰所带来的负面影响[43]。

## 4 生态修复与政策制度保障

为深入推进高速公路等基础设施工程的减排工作，应从减排技术路径与政策制度两个维度系统展开。一方面，在技术层面，减排措施可涵盖选址优化、低碳设计、绿色施工、生态修复等多个环节，形成贯穿项目全生命周期的系统性减碳策略。另一方面，在政策制度方面，应通过标准制定、评估体系建设、财政激励与监管机制等措施，为技术实施提供制度保障。

在生态修复方面，我国目前广泛采用种子喷播法、厚层基材喷播法、客土喷播法、植生网法、肥料袋法和植生袋法等技术手段[44]，以修复高速公路沿线受损生态系统，降低建设期与运营期的碳排放。通过恢复植被覆盖度，实现光合作用过程中将大气中的 $CO_2$ 转化为碳水化合物并以有机碳形式固存于地表和地下生物量中的过程[45]，从而增强生态系统碳汇功能。目前的修复模式以植被恢复为主，包括

自然恢复与人工恢复两种路径。自然恢复成本低，生态系统稳定性高，生物多样性丰富，但周期较长，效果不易控制；人工恢复则见效快、干预可控，适用于破坏程度较重区域，但投入大，易引发生态风险。因此，在实际应用中更加提倡“自然恢复+人工干预”相结合、因地制宜的修复模式。例如，在生态破坏较轻地区可以自然恢复为主，辅以少量人工措施，以降低人为干扰，提升系统稳定性。

在政策与制度层面，中国已构建多层次的绿色交通推进机制，强化顶层设计与标准引导。如交通运输部于 2022 年修订发布的《绿色公路建设指南》明确要求：新建高速公路使用再生材料的比例不得低于 30%，服务区建筑需达到绿色建筑二星级标准，从源头上减少高碳材料使用，推动资源循环利用。同时，积极引入低碳建材、清洁能源和数字化管理技术，例如推广绿色施工工艺、优化养护管理流程、加强施工期碳排放监测与评估[46]。全国已有约 85%的高速路网接入交通碳排放监测系统，并在部分区域应用无人机巡检技术，相较传统养护方式可减少约 25%的养护车辆碳排放。此外，《交通运输标准提升行动方案（2024—2027 年）》进一步提出，要推动交通基础设施绿色化，制定道路运输节能低碳评价标准、高速公路服务区近零碳设施技术标准等，为实现“双碳”目标提供政策支撑。

## 5 结论与展望

在“双碳”战略背景下，高速公路作为交通运输系统的关键基础设施，其在建设与运营全生命周期中所产生的碳排放正日益成为我国绿色低碳发展转型的重要关注点。本文基于对当前国内外高速公路碳排放研究的系统梳理，深入分析高速公路建设阶段的碳排放特征、主要排放源及其核算方法，明确指出我国当前碳排放测算体系尚不健全，相关标准、核算方法与基础数据仍存在较大不确定性，制约了交通行业碳减排工作的科学化与系统化推进。

尽管当前我国在高速公路低碳建设方面已取得初步成效，但仍面临一系列挑战，包括碳排放核算方法科学性不足、基础数据缺失、区域差异性大以及政策执行力有待提升等问题。未来应着力从以下几方面深化研究与实践：（1）构建统一、透明、动态更新的碳排放核算与监测体系，强化全过程碳足迹数据支撑；（2）加快碳排放因子本地化、情景化参数的研究，提高测算精度和适用性；（3）推动绿色建材、清洁能源、数字技术与交通工程的深度融合，实现施工阶段的节能降碳；（4）完善激励约束机制，建立涵盖政策支持、碳交易、绿色认证等多元政策工具的协同体系，促进绿色发展理念在交通基础设施建设中的落地生根。

综上所述，实现高速公路的绿色低碳发展不仅是应对气候变化、落实国家“双碳”战略的重要举措，也是推动交通行业可持续发展的核心路径。未来需在技术创新与制度建设双轮驱动下，推动我国交通基础设施由“高速度”向“高质量、低碳化”转型，助力构建生态文明与现代化交通体系协同发展的新格局。

## 参考文献：


[1] 周颖，秦双双．高速公路建设期碳排放计算与分析[J]．价值工程，2022，41(8)：156-158.

[2] 王贤卫，吴灵生，杨东援．高速公路建设 $CO_2$ 排放计算分析[J]．公路交通科技，2014，31(2)：150-158.

[3] 高亚楠，车瑜佩，薛淑祺，等．公路施工阶段的碳排放计算方法研究[J]．交通节能与环保，2025，21(1)：17-23.

[4] SEO Y，KIM S M. Estimation of materials-induced $CO_2$ emission from road construction in Korea[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2013，26：625-631.

[5] 黄山倩，黄学文，高硕晗，等．基于 LCA 的高速公路建设全过程碳排放核算[J]．交通运输研究，2022，8(6)：72-80，89.

[6] 孙文圃，许金良，景立竹，等．基于 MOVES 的高速公路纵坡段载重柴油车辆碳排放预测模型的研究[J]．公路交通科技，2015，32(12)：144-150.

[7] 龙伟，苟珈源，熊模友．高速公路建设期低碳实施路径研究[J]．价值工程，2024，43(30)：32-34.

[8] WANG J，HOU X，DENG X J，et al. Application of BIM in tunnel design with compaction pile reinforced foundation carrying carbon assessment based on advanced dynamo visual programming：A case study in China[J]. Sustainability，2022，14(23)：16222.

[9] 卢翔，蓝悦铭，易勇涛，等．基于 LCA 的山区公路桥梁建设碳排放核算及碳减排途径初探[J]．公路交通技术，2025，41(1)：199-207.

[10] 高扬．高速公路建设期水泥混凝土物化阶段碳排放测算研究[J]．北方交通，2024(8)：21-24，28.

[11] 刘宽，白云，王创，等．交通基础设施项目的综合碳排放评估探究[J]．环境科学与技术，2017，40(10)：185-190.

[12] 银奕，吴开庆．公路施工期沥青路面结构类型对碳排放的影响分析[J]．交通科技与管理，2023，4(2)：176-178.

[13] 邹晓勇．沥青路面节能减排养护技术碳排放定量评价[J]．交通运输研究，2016，2(1)：38-44.

[14] 李清华,刘聂玚子,刘琰然,等. 半刚性沥青路面建设期碳排放特征分析[J]. 交通节能与环保,2022,18(6):31-37.
[15] 陈和悦. 高速公路路面结构对建设期碳排放的影响研究[J]. 交通世界,2024(16):47-49.
[16] 王雪英,周海防,刘华军. 乳化沥青与热沥青在路面施工中能耗与碳排放的对比[J]. 石油沥青,2022,36(2):53-57.
[17] 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[J]. 公路工程,2021,46(3):154-164.
[18] 兰勇烽,龚余富,洪盛祥,等. SMA 路面就地热再生全寿命周期综合养护效益分析[J]. 现代交通技术,2020,17(5):5-12.
[19] 张振浩,谭荣平,方明. T 梁桥在建设期碳排放模型的建立与分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2018,15(3):71-78.
[20] 袁浩允,李昊天,李昊,等. 装配式 T 梁全生命周期碳排放计算模型研究[C]//2024 世界交通运输大会(WTC2024)论文集(水上运输与交叉学科). 中交第二公路工程局有限公司,中交集团山区长大桥隧建设技术研发中心,长安大学公路学院,2024:645-653.
[21] 李小娇. 山区大跨悬索桥全寿命周期碳排放核算研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.
[22] 徐双. 不同结构材料的桥梁生命周期碳排放研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.
[23] 任艳敏,唐秀美,潘瑜春,等. 高速公路对沿线土地利用的扰动影响评价——以京承高速公路二期为例[J]. 地域研究与开发,2017,36(2):113-117.
[24] 刘卓成. 青藏公路对沿线扰动区草地生态系统的影响研究[D]. 北京:北京林业大学,2022.
[25] 张朕. 典型草原不同公路建设扰动方式的生态损坏评价研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
[26] PAUSTIAN K, LEHMANN J, OGLE S, et al. Climate-smart soils[J]. Nature,2016,532:49-57.
[27] STOCKMANN U, ADAMS M A, CRAWFORD J, et al. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2013,164:80-99.
[28] 张朕,刘宝河,茶娜,等. 扰动方式对典型草原区路域植被和土壤的影响[J]. 水土保持通报,2023,43(3):86-95.
[29] 李涛,李灿阳,俞丹娜,等. 交通要道重金属污染对农田土壤动物群落结构及空间分布的影响[J]. 生态学报,2010,30(18):5001-5011.
[30] 陈琦,李富翠,彭钰梅,等. 青藏公路对沿线草地生态系统土壤可溶性有机碳及其特征的影响[J]. 草地学报,2022,30(8):2158-2166.
[31] 茶娜. 内蒙古中西部草原公路建设扰动对有机碳含量的影响研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
[32] 康玲芬,李锋瑞,张爱胜,等. 交通污染对城市土壤和植物的影响[J]. 环境科学,2006(3):3556-3560.
[33] 孙官发,陆梅,闪昇阳,等. 短期氮沉降对纳帕海高寒退化疏花早熟禾草甸土壤呼吸干湿季变化的影响[J]. 应用生态学报,2024,35(2):390-398.
[34] 刘沙沙,付建平,蔡信德,等. 重金属污染对土壤微生物生态特征的影响研究进展[J]. 生态环境学报,2018,27(6):1173-1178.
[35] 李宗禹,黄岩,刘昕,等. 高速公路路域扰动土壤及其生态管理[J]. 公路交通科技,2002(3):155-159.
[36] 秦莹,娄翼来,姜勇,等. 沈哈高速公路两侧土壤重金属污染特征及评价[J]. 农业环境科学学报,2009,28(4):663-667.
[37] 王初,陈振楼,王京,等. 上海市崇明岛公路两侧土壤重金属污染研究[J]. 长江流域资源与环境,2008(1):105-108.
[38] 朱建军,崔保山,杨志峰,等. 纵向岭谷区公路沿线土壤表层重金属空间分异特征[J]. 生态学报,2006,26(1):146-153.
[39] 季辉,赵健,冯金飞,等. 高速公路沿线农田土壤重金属总量和有效态含量的空间分布特征及其影响因素分析[J]. 土壤通报,2013,44(2):477-483.
[40] TURER D, MAYNARD J B, SANSALONE J J. Heavy metal contamination in soils of urban highways comparison between runoff and soil concentrations at Cincinnati, Ohio[J]. Water Air and Soil Pollution,2001,132(3):293-314.
[41] HEWITT C N, RASHED M B. An integrated budget for selected pollutants for a major rural highway[J]. Science of The Total Environment,1990,93:375-384.
[42] 项卫东,郭建,魏勇,等. 高速公路建设对区域生物多样性影响的评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2003(6):43-47.
[43] 刘杰,崔保山,杨志峰,等. 纵向岭谷区高速公路建设对沿线植物生物量的影响[J]. 生态学报,2006(1):83-90.
[44] 张霄. 我国高速公路边坡生态修复研究综述[J]. 资源节约与环保,2016(3):85.
[45] 高小虎,李帅,宋桂龙,等. 高速公路岩石路堑边坡不同恢复年限植被固碳量变化特征[J]. 草原与草坪,2023,43(4):105-112.
[46] 郝婷婷. 沥青面层建设周期碳排放评估分析与减排对策研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2024.

责任编辑:许易琦