

# 公路工程材料全生命周期碳足迹核算与低碳化路径研究

李坤志

云南省公路科学技术研究院 云南昆明 650000

**摘要:** 在“双碳”战略目标下,公路工程领域碳排放问题成为了交通基础设施绿色转型的主要挑战。本文以公路工程材料为研究对象,采用全生命周期分析(LCA)的方法,对公路工程材料生产、运输、施工、养护、回收等阶段的碳排放特征进行研究。本文提出了一整套标准化核算体系的创建方法、提高数据智能监测能力的方法、创建供应链协同机制的途径、以及创建政策激励与市场导向机制的方式等。研究认为公路工程材料低碳化需技术创新与制度约束双轮驱动,构建透明、科学、可追溯的碳排放核算体系,为我国公路行业高质量、低碳化发展提供决策支撑和技术支持。

**关键词:** 公路工程材料; 全生命周期; 碳足迹核算; 低碳化路径; 绿色基建

## 引言

双碳背景下,公路工程作为交通基础设施建设的关键领域,其全生命周期碳排放情况受到越来越多的关注。传统公路建设过程中,从材料开采、生产、运输、施工、运营维护等各个环节都会有大量能源消耗和温室气体排放。尤其是沥青、水泥、钢材等高能耗、高碳排放材料的应用使得公路工程成为了碳排放的主要来源。我国基础设施建设领域引起的碳排放占到全国总排放量的30%左右,公路工程材料部分就占到了50%。因此建立公路工程材料全生命周期的碳足迹核算体系,科学地分析各阶段的排放特征,寻找低碳发展的路径和技术方案,已经成为了推进交通基础设施绿色建设、实现可持续发展的重要课题。

## 一、公路工程材料碳排放特征分析

### 1. 材料构成与碳排放比例

公路工程的关键构造层包含路基、基层以及面层,其材料属性对整体碳排放水平起着决定性作用。一般而言,水泥混凝土、沥青混合料、钢筋以及砂石骨料是用量最大的几种主要建材。依据生命周期评估(LCA)研究所得数据来看,每吨水泥在生产过程中大概会产生 $0.85tCO_2$ ,沥青的排放量约为 $0.58tCO_2$ ,钢材的碳足迹则高达 $1.7tCO_2$ 。就一条双向四车道公里级路段而言,施工阶段材料消耗环节所产生的碳排放所占全生命时段比重可以达到60%以上。水泥混凝土路面因为高强度钢筋和水泥用量很大,所产生的碳排放强度要比沥青路面高出

很多。基层材料每种单体的排放值虽然很低,但受其用量极大的影响,依然成为重要的碳源贡献部分。施工过程中不同配比方案与再生骨料掺入量,对整体碳排放调节效果十分明显。据相关研究显示,再生沥青混合料占比达到30%时,原材料生产阶段就能减排大约15%。改进材料组合设计,并尽可能选用低碳环保型的新型建材,再结合废弃物循环利用的技术方法,这几乎是达成公路工程领域减碳目的最核心的途径之一。

### 2. 材料生产与运输阶段的排放分析

材料生产阶段的碳排放主要来自于能源消耗和化学反应这两部分。拿水泥来说,熟料煅烧时碳酸钙分解反应释放出大量 $CO_2$ ,这部分约占总排放量的60%,燃料燃烧引发的能耗排放约占40%。沥青的生产过程在提炼、加热蒸馏、混合等一系列过程中消耗的能源较多,温拌沥青能节省能耗和碳排放。钢材生产过程中主要采用的是高炉冶炼和电弧炉法,电力来源的碳排放强度决定钢材的碳足迹。运输环节的排放也不能忽略。运输的距离越长,运输车辆的载重越大,排碳量与重心成正比。公路工程材料的运输阶段消耗能源约占总碳排放的百分之十五到百分之二十。

### 3. 施工与养护阶段排放特征

施工阶段的碳排放重点体现为机械能耗和工艺差异,拿沥青混合料摊铺来说,其温度控制直接影响能源消耗量。常温热拌方式每吨沥青混凝土的单位碳排放量约为 $56.4kgCO_2/t$ ,采用温拌技术后可节约约25%的能耗,其碳足迹约为 $42.3kgCO_2/t$ 。数字化摊铺和智能化碾压系统

投入使用之后，又削减了机械设备空载运行和反复作业造成的能量损耗。养护所占比例不大，不过呈周期性而且不能轻视。

## 二、公路工程材料碳足迹核算存在的问题

### 1. 核算体系标准化不足

就我国针对公路工程材料碳足迹核算而言，并未有统一的技术规范及行业标准出台。纵使国家层面出台了诸如《温室气体排放核算指南（试行）》之类的政策文件，但那份指南所适用的范围多集中于工业制造和建筑行业，对于交通基础设施乃至公路工程建设则似乎没有太多直接的诉求。当下不同地区以及设计单位对于核算边界、参数选择、时间周期分割等方面各有差异，于是同类项目的碳排放数据既不可对比也无从追溯。材料生产环节的一些企业按能源消耗量来核算，另一些企业则使用过程排放模型。由于数据来源和统计口径不统一，这对碳足迹测算结果的准确度产生影响。目前，项目管理部门尚未形成统一的碳核算规范和第三方认证体系，这导致评估结论缺乏权威性和公信力。标准制度的缺失限制了低碳评价机制的完善，进而对相关政策激励和市场交易规则的实际执行造成了障碍。

### 2. 数据采集与监测技术落后

碳足迹核算最根本的一点就是数据要准确。但是目前大部分的公路工程项目仍然采用人工记录、分项报表、事后统计等数据采集方式，信息滞后、精度低。材料生产企业的能耗、排放数据大多不能实时上传，部分小型生产企业根本没有完整的能源计量装置，造成基础数据缺少连续性、真实性。施工现场碳排放数据采集环节较弱。机械设备油耗，运输里程，拌合温度等关键参数缺少统一的智能监测系统，碳核算多为估算或经验值，不能形成动态化、可追踪的碳排放档案。另外就是各个数据平台间存在“信息孤岛”现象，设计、施工、监理、材料等各环节没有建立起共享机制，造成碳排放核算无法实现全链条追踪。与之相对应的是，我国碳监测设备综合化与智能化的应用还有很大的提升空间。

### 3. 低碳技术应用与管理协同不足

公路工程材料低碳化是技术问题，也是管理问题。目前在工程实践中，低碳材料、节能装备、绿色运输等新技术虽然有一定推广，但是协同度不高。部分施工企业因为成本、工期的压力，对于低碳技术的投入积极性不高，有短期行为的倾向。像温拌沥青技术虽然可以减少能耗，但是因为刚开始的设备改造和技术培训费用比

较高，所以有些项目还是采用了传统的工艺。另外就是各个部门之间缺少有效的协同管理。设计单位关心结构安全、经济性，施工单位关心进度、成本，环保监管部门重视末端排放控制，各方目的不同，因而造成低碳策略在项目全生命周期中不能持续推行。部分项目的立项时提出了拿下绿色施工的目标，但缺少了之后的过程控制与绩效考核，最后的减排效果事实上并没有实现。低碳管理的信息化支撑体系没有建立起来。目前大多数项目的碳核算只是单点式、阶段性的工作，缺少从设计、采购到施工、运维的全周期管理平台。缺少统一的数据库及评价模型，碳排放数据不能及时反馈给设计改进与工艺优化，不能实现动态选择，持续改进。综上所述，公路工程材料碳足迹核算存在的主要问题就是“三不”，即标准不完善、数据不准确、协同不到位。这些问题互相影响、层层叠加，造成碳核算结果不准确、不可比、不可执行，影响我国公路行业系统化、可持续的低碳转型。

## 三、公路工程材料低碳化路径与策略研究

### 1. 建全流程标准化核算体系

创建科学统一的全生命周期碳排放核算体系，这是公路工程达成低碳化转型的关键。首先应该从国家或者行业的角度出发来制定系统化的标准规范，对核算边界、排放因子、数据格式、报告模板等做出规定，使核算口径保持一致。该项体系包含原材料、加工、运输、施工、报废回收全部过程，并且根据不同地区、不同工艺特性进行分级分类，制定出相应的核算模型。次要需将碳足迹核算融入公路工程项目的全周期。设计阶段要加入碳预算的概念，通过BIM（建筑信息模型）或者LCA（生命周期评估）的方法对不同的材料和方案进行碳排放模拟、比较分析，选出低碳方案；施工阶段要建立碳排放台账，对能源消耗、机械设备运转、运输等过程进行全方位记录、审核；运营阶段完善碳排放绩效评价体系，建立项目后评价机制，从而形成设计、建设、运营、评价、再设计的闭环管理。另外一方面就是第三方专业机构介入到碳核算以及验证的过程当中来，形成一种具有权威性并且透明的行业信用体系。依靠强制标准加上市场机制，逐步塑造出一套可量化、可追溯、可交易的碳排放核算体系，为公路工程碳交易市场和碳信用机制奠定制度基础。

### 2. 提升数据采集与智能监测能力

数据是碳足迹核算的要素。全过程、全要素精准管理，就要推进数据采集监测数字化、智能化升级。一是建立基于物联网（IoT）的智能监测系统。通过在施工

现场布置传感器、能耗计量装置和数据采集终端来对能源使用、材料消耗、机械运行状况实施实时监测，然后将数据上传到云平台进行集中管理与分析。利用大数据算法可以自动识别出异常的能耗和排放高峰，给管理人员提供决策依据。第二项就是推进数字孪生技术在公路建设方面的应用。数字孪生模型可以将实际施工环境、材料参数、碳排放数据实时映射到虚拟平台，进行动态对比分析。例如在拌合站就可以对拌料的温度、能耗变化进行实时监控，系统会自动计算出碳排放量并进行调整，从而达到精准控制的目的。第三，创建统一的共享与管理平台。将设计、施工、监理、运输、材料供应商的碳排放数据进行集中整合，形成一个信息链接起来的多源汇聚、统一编码、跨环节的链条。通过云端数据库可以对碳排放数据进行溯源、比对、可视化展示，为政府监管、企业决策、公众监督提供技术支持。在此基础上，还要加强对碳监测系统数据安全和隐私的管理，完善信息保护制度，保证碳监测系统安全可靠。

### 3. 构建供应链低碳协同管理机制

公路工程材料碳排放具有供应链特征，单靠一个环节的减排不能达到整体优化的目的，所以必须创建跨环节、跨主体的协同减排机制。首先，要强化供应链绿色准入制度。政府可以制定材料碳排放限值标准，将低碳认证纳入材料采购门槛。大型高速公路工程项目首先选用具有环境产品声明（EPD）的水泥、沥青、钢材等。其次，应该创建供应链协同管理平台，实现设计、采购、生产、运输、施工等各环节的碳排放信息共享。平台可以依据项目的总碳预算给参与方分配碳排放额度，并调整资源配置。对节能效果好的企业，在以后的招标、评优等活动中予以政策倾斜，促进“以减促增”。再次，推动材料循环利用和绿色物流体系建设。推广再生骨料、再生沥青技术，建立区域性材料回收网络；在运输环节推广清洁能源运输车辆和智能调度系统，提高车辆装载率和运输效率，降低空驶率和能源浪费。

### 4. 健全政策激励与市场引导机制

制度与市场是实现低碳转型的主要外部动力。要建

立一个多层次、多渠道的政策支持体系，为企业的低碳行动提供持久的动力。一是健全政策激励制度，政府应在项目审批、资金补贴、税收减免等方面对低碳公路项目给予扶持，促使企业采用绿色材料和节能设备进行设计、施工。探索设立交通碳基金，支持低碳技术的研发和示范工程。二是碳交易、碳信用。将公路工程项目纳入区域内的碳排放配额交易体系之中，对于减排成绩优越的企业实行配额奖励，推动碳资产以市场化形式交易。用“碳积分”“碳绩效考核”等机制来促使企业自愿参加碳减排行动，营造良好的市场激励环境。三是加强公众监督与信息公开，建立碳排放报告和信息披露制度，让社会公众、行业组织能够对项目碳管理情况实施监督。

### 结束语

公路工程材料碳足迹的全生命周期管理是实现交通基础设施绿色化、低碳化的途径。本文从碳排放特征、核算问题、低碳化路径这三个方面进行了分析。根据研究表明，未来公路行业低碳化转型的关键在于建立标准核算体系，加强数据智能监测，促进供应链协同，以及优化政策奖励机制。只有通过技术创新、制度保障、市场驱动三种方式融合在一起，才可能形成科学的、透明的、高效的一套技术体系，来支撑国家在能源领域实现双碳目标。

### 参考文献

- [1] 林明超, 李晓娟, 卢家婧. 绿色建筑碳排放核算方法及减排路径研究[J]. 上海节能, 2023(8): 1111-1124.
- [2] 王伟, 李茂, 何纯韬, 等. 基于BIM的海岸带建筑碳排放及碳汇一体化管理分析[J]. 施工技术, 2023(11): 51-55.
- [3] 朱惠英. “双碳”战略下建立健全建筑领域碳排放核算标准体系[J]. 工程建设标准化, 2022(9): 48-51.
- [4] 敬洁, 高宝虎, 王玮. 模块化钢结构建筑碳排放研究测算[J]. 建设科技, 2023(7): 93-95.