 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i3.9835

Green Maintenance Technology Path and Practice of Highway Engineering under the Dual Carbon Goals

Fuyan Ma

Yunnan Huayi Road & Bridge Technology Engineering Co., Ltd., Kunming,Yunnan, 650000, China

Abstract

Against the backdrop of the comprehensive implementation of the dual carbon strategy, carbon emission reduction in transportation infrastructure has become a critical development task. The highway maintenance sector faces prominent carbon emission issues arising from material usage and energy consumption. The high-carbon characteristics and ecological shortcomings of traditional maintenance models have become increasingly evident, making the green transformation of this industry both urgent and essential. This study focuses on green maintenance in highway engineering, establishing a multi-dimensional green maintenance technology framework. Through validation in typical engineering scenarios, it demonstrates the practical emission reduction effectiveness and engineering value of the applied technologies. The research identifies key optimization directions for emission reduction, including low-carbon materials, energy-efficient construction, and intelligent management. These findings provide actionable technical pathways and practical references for the low-carbon transition of the highway maintenance industry under dual carbon goals.

Keywords

Dual Carbon Goals; Highway Engineering; Green Maintenance

双碳目标下公路工程绿色养护技术路径及实践

马福艳

云南华怡道桥技术工程公司，中国·云南 昆明 650000

摘　要

在双碳战略全面推进的背景下，交通基础设施领域碳减排成为重要发展任务，公路工程养护环节因材料、能耗等产生的碳排放问题突出，传统养护模式的高碳特征与生态短板凸显，推动其绿色转型具有极强的现实紧迫性与行业必要性。本文围绕公路工程绿色养护展开研究，构建了多维度绿色养护技术体系框架，通过典型工程场景验证了技术应用的实际减排成效与工程价值，明确了材料低碳化、施工节能化、管理智慧化等减排优化关键方向，为双碳目标下公路养护行业的低碳转型提供了可落地的技术路径与实践参考。

关键词

双碳目标；公路工程；绿色养护

1 引言

全球“双碳”战略已成为应对气候变化的核心共识，我国明确提出碳达峰、碳中和目标，交通基础设施领域作为能源消耗与碳排放的重点行业，肩负着关键减排使命，亟需通过技术革新与模式转型破解发展与减排的矛盾。然而，传统公路养护模式存在资源利用率低、能耗强度高、生态扰动大等突出短板，缺乏对碳排的系统性管控，与低碳发展理念严重不符，难以适应新时代交通行业高质量发展需求，因此，亟需突破传统养护技术瓶颈，探索低碳、环保、高效的绿色养护路径，实现公路养护与生态保护、碳减排目标的协同推进。

【作者简介】马福艳（1982—），女，回族，中国云南昆明人，本科，从事公路工程养护研究。

2 双碳目标下公路工程绿色养护理论基础

2.1 核心概念界定

双碳目标核心内涵是通过系统性减排行动，实现二氧化碳排放达峰后稳步下降，最终达成碳中和，交通领域作为碳排放重点行业，明确了单位周转量碳排放强度持续降低、新能源应用比例提升等关键减排指标，为公路养护行业划定了低碳发展底线。公路工程绿色养护是基于双碳理念的新型养护模式，以低碳化、资源化、生态化为核心特征，强调在保障公路服役性能的基础上，最大限度降低碳排放、提高资源循环利用率、减少生态环境扰动。公路养护全生命周期碳足迹涵盖材料生产、施工养护、运营使用、废弃处置全流程，既包括养护机械能耗、现场作业等直接碳排放，也涵盖材料生产运输、废旧建材处理等间接碳排放，是衡量绿色养护成效的核心维度。

2.2 双碳目标对公路绿色养护的要求与约束

双碳目标对公路绿色养护提出明确的碳减排量化要求，需结合公路等级、养护类型制定差异化减排指标，确保全生命周期碳排强度持续下降。同时，绿色养护面临技术、经济、政策多重约束，技术层面需突破低碳材料研发、节能工艺应用等瓶颈，经济层面需平衡低碳技术增量成本与长期效益，政策层面需依托标准规范与激励机制引导落地。此外，需坚守养护效果与碳减排协同目标，既要通过绿色技术实现碳减排，也要保障公路结构安全、通行质量与使用寿命，避免片面追求减排而忽视养护核心功能，实现生态效益与工程效益的统一。

3 公路工程养护碳排现状及绿色转型潜力分析

3.1 公路工程养护碳排来源与核算方法

公路工程养护碳排放源于全流程多环节，按排放属性可分为直接碳排放与间接碳排放两类。直接碳排放主要来自养护作业现场，核心是养护机械能耗排放，包括挖掘机、摊铺机、压路机等燃油机械的尾气排放，以及电动养护设备的电力消耗间接关联碳排放；同时，现场加热、搅拌等作业过程也会产生少量直接碳排放。间接碳排放是养护碳排的主要组成部分，涵盖养护材料从生产到废弃的全链条排放，如沥青、水泥、钢材等原材料的开采与加工能耗，材料运输过程中的燃油消耗排放，以及废旧路面材料、建筑垃圾等废弃处置环节的碳排放。为精准量化碳排总量，本文基于生命周期评价（LCA）理论构建全流程碳排核算模型，明确核算边界为“材料生产 - 施工养护 - 运营使用 - 废弃处置”，选取碳排放因子法作为核心核算方法，整合不同材料、机械、运输方式的碳排放因子，详见表 1，建立分环节碳排核算公式，实现对公路养护全生命周期碳排的系统性、精细化核算 [1]。

表 1 公路养护典型碳排放因子（参考值）

类别	核算单元	碳排放因子	备注
能源	柴油	3.15 $kgCO_2/L$	国标 / 地方标准
能源	电力（区域电网）	0.58–0.72 $kgCO_2/kWh$	按区域调整
材料	水泥	0.8–1.0 tCO_2/t	生产阶段
材料	沥青	2.8–3.2 tCO_2/t	含拌合
材料	钢材	1.8–2.2 tCO_2/t	加工成型
运输	重型货车	0.12–0.18 $kgCO_2/(t \cdot km)$	综合工况

3.2 我国公路养护碳排现状调研与数据统计

结合我国公路养护行业实际调研数据，不同等级公路的碳排呈现显著差异：高速公路因技术标准高、养护工艺复杂，单位里程碳排放量最高，尤其在路面大修、桥隧养护等环节，碳排强度明显高于普通公路；国道作为跨区域交通主干道，养护频率与荷载压力较大，单位里程碳排放量次之；省道及以下公路虽养护标准较低，但里程基数大、养护技术相对粗放，整体碳排总量不容忽视。 不同养护类型碳排放强度与特征详见表 2，当前传统养护模式存在三大突出问题，详见表 3。

表 2 不同养护类型碳排放强度与特征对比表

养护类型	碳排强度	主要排放来源	管控重点
日常养护	低	小型机械、零星材料、清扫洒水	精细化作业、节能机具
专项养护	中	病害处治、局部修补、材料运输	优化工艺、缩短运输距离
大修工程	高	材料更换、重型机械、废旧料处置	再生利用、低碳施工

表 3 我国公路养护传统模式主要问题与数据统计

问题类别	关键现状数据	带来的碳排影响
废旧材料利用率	回收利用率不足 30%	新增原材料生产排放大幅增加
养护机械能源结构	新能源机械普及率＜ 5%	直接燃油排放居高不下
碳排管控体系	缺乏全流程核算与决策机制	碳排强度难以持续下降

3.3 绿色转型潜力评估

我国公路养护行业绿色转型具备巨大潜力，主要体现在技术替代、资源循环与管理优化三个维度，核心措施及减排潜力详见表 4。

表 4 公路养护绿色转型综合减排潜力汇总

转型维度	核心措施	减排潜力
技术替代	低碳工艺、新能源装备	30%–40%
资源循环	废旧料再生、循环利用	15%–20%
管理优化	智慧决策、精准养护	5%–10%
综合协同	三维一体发力	≥50%

4 双碳目标下公路工程绿色养护核心技术路径

4.1 低碳养护材料研发与应用路径

低碳养护材料是实现公路养护碳减排的基础支撑，核心围绕再生利用与新型低碳材料研发两大方向推进。核心工艺、回收利用率及碳减排效果，详见表 5。低碳新型材料研发重点突破传统材料高碳瓶颈，低碳沥青通过改性技术降低生产过程能耗与排放，生态型填料选用工业固废、建筑垃圾再生填料等替代天然填料，节能型外加剂则通过优化配比减少水泥、沥青等胶凝材料用量，进一步降低碳排强度。材料低碳化评价标准需建立基于全生命周期的碳排核算体系，明确材料碳足迹量化指标，选型原则遵循“低碳优先、性能达

标、经济可行”，综合考量碳减排效果、工程适配性与成本效益。

4.2 节能型养护施工技术路径

节能型养护施工技术通过机械升级、工艺优化与过程管控，实现施工环节碳减排。低能耗施工机械推广聚焦新能源与节能改造两大方向，新能源机械包括电动压路机、混合动力摊铺机等，零排放或低排放特性可显著降低现场直接碳排放；对传统燃油机械进行节能改造，如安装尾气净化装置、优化动力系统，可降低 15%-20% 的能耗与排放。绿色施工工艺核心优势、能耗较低幅度及碳减排效果详见表 6。施工过程能耗管控需建立精细化管理体系，通过制定能耗定额标准、优化施工组织方案，合理调度机械作业顺序与时间，避免无效能耗；采用智能能耗监测设备实时跟踪机械能耗数据，及时调整施工参数，实现能耗动态优化。

表 5 典型再生材料碳减排效果对比

再生材料类型	核心工艺	回收利用率	碳减排效果
再生沥青混合料	热再生、冷再生、厂拌再生	≥80%	较新料降低 30%–50%
再生混凝土骨料	破碎、清洗、分级	60%–80%	减少天然骨料开采与生产排放
废旧钢材再生	除锈、整形、再利用	较高	显著降低冶炼环节碳排放

表 6 绿色施工工艺能耗与碳减排对比

施工工艺	核心优势	能耗降低幅度	碳减排效果
温拌沥青技术	拌合温度降低 30–60℃	能耗降低 20%–30%	废气与碳排放显著减少
就地冷再生技术	无需高温加热旧料	能耗降低 50% 以上	较热再生减排 40% 以上
模块化快速施工	预制拼装、缩短工期	机械能耗减少 30%	降低现场作业碳排放

4.3 生态协同养护技术路径

生态协同养护技术强调公路养护与生态保护、碳汇提升的协同发展，构建“养护 - 生态 - 碳汇”一体化体系。公路边坡生态修复以固碳与生态防护为核心，优先选用乡土植物进行混播种植，适配本地气候与土壤条件，提高成活率与稳定性；配置固碳型植被如乔木、灌木与草本植物组合，提升边坡植被碳汇能力，同时发挥水土保持、净化空气等生态功能；结合生态袋、三维植被网等防护技术，增强边坡稳定性，减少水土流失。水土保持与污染防控技术聚焦养护过程生态扰动治理，雨水收集利用系统收集养护区域雨水，经处理后用于路面清洗、植被灌溉，节约水资源并减少径流污染；养护废水处理采用小型化、移动化处理设备，对施工废水、清洗废水进行过滤、沉淀等处理，达标后排放或循环利用，避免污染土壤与水体。生态敏感区公路养护需制定特殊技术方案，针对自然保护区、水源涵养地等区域，采用低扰动施工工艺，避开生态敏感时段，选用生态友好型材料，减少养护活动对动植物栖息地、生态廊道的破坏，实现养护工程与生态环境的和谐共生。

4.4 智慧化养护管理技术路径

智慧化养护管理技术通过数字化、智能化手段优化养护决策，提升碳减排精准性与效率。养护决策智能化依托大数据技术，整合公路检测数据、服役年限、交通荷载、气候环境等多源信息，构建养护需求识别模型，精准判断路面病害类型、严重程度与发展趋势，避免过度养护或养护不足导致的碳排浪费；基于病害特征与低碳目标，自动匹配最优养护技术与材料方案，实现养护决策的科学性与低碳化。碳排动态监测借助物联网技术，在养护机械、材料运输车辆、施工区域部署传感器与数据采集终端，实时监测能耗、废气排放等数据，结合碳排核算模型，实现全流程碳排实时追踪与量化分析；通过数据可视化平台，直观呈现碳排分布与变化趋势，为减排措施调整提供数据支撑。全生命周期养护方案优化模型以碳减排为核心目标，整合技术、经济、生态等多维度指标，对养护材料选型、施工工艺选择、养护周期设定等进行全流程优化；考虑公路从建设到废弃的全生命周期碳排，平衡短期减排与长期效益，制定动态调整的养护方案，实现全生命周期碳排最小化与公路服役性能最大化 [2]。

5 双碳目标下公路绿色养护优化策略与保障措施

5.1 技术优化策略

技术优化需立足场景适配性、创新前瞻性与推广实效性，构建全链条技术优化体系。不同养护场景下技术组合方案优化需结合公路等级、气候条件、病害类型精准施策：高速公路大修可采用“沥青混合料热再生 + 温拌施工 + 新能源机械”组合技术，平衡减排效果与路面高性能需求；山区公路养护优先选用“冷再生工艺 + 生态边坡修复”组合，降低施工扰动与运输能耗；城市道路养护推广“模块化施工 + 智慧监测”组合，缩短交通影响周期并强化碳排管控。绿色养护技术创新聚焦前沿方向，推动碳捕集技术与养护工程融合，研发路面材料碳捕集添加剂，实现养护过程中二氧化碳固定；深化新型低碳材料研发，重点突破高性能再生剂、固碳型生态填料、低能耗复合材料等关键技术，提升材料低碳化与功能一体化水平；探索数字孪生、人工智能与绿色养护的深度融合，构建虚拟养护场景模拟系统，优化技术应用效果。技术推广应用机制需打破“产学研用”壁垒，建立政府引导、企业主导、科研机构支撑的协同推广模式，通过试

点示范工程形成可复制经验，依托行业展会、技术交流会搭建推广平台；针对中小养护企业技术储备不足问题，开展定向技术帮扶与设备租赁服务，降低技术应用门槛。

5.2 政策保障措施

政策保障需构建“激励 + 标准 + 监管”三位一体体系，为绿色养护落地提供制度支撑。碳减排激励政策方面，建立差异化绿色养护补贴机制，对采用低碳技术、达到减排目标的养护项目给予财政补贴，补贴标准与碳减排量挂钩；推动公路养护行业纳入碳交易市场，允许养护项目产生的碳减排量作为核证自愿减排量参与交易，拓宽减排收益渠道；对购置新能源养护机械、研发低碳材料的企业给予税收减免，激发市场主体减排积极性。标准体系建设需补齐行业短板，制定绿色养护技术标准，明确再生材料使用比例、节能工艺操作规范等技术要求；统一碳排核算标准，规范核算边界、因子选取与计算方法，确保碳排数据可比可追溯；建立效果评价标准，构建“碳减排 + 工程性能 + 生态效益”多维度评价指标体系，量化绿色养护成效。监管机制强化需落实全流程管控，建立养护项目碳排备案制度，要求项目开工前提交碳排预算方案，竣工后提交实际碳排报告；组建专业核查团队，采用现场核查与数据核验相结合的方式，对碳排数据真实性、减排措施落实情况进行监督；将绿色养护执行情况纳入养护企业信用评价体系，对未达减排要求的企业采取限制投标、信用扣分等惩戒措施。

5.3 经济可行性提升策略

经济可行性提升需破解低碳技术增量成本难题，构建长效成本控制与投融资体系。全生命周期成本控制方法聚焦增量成本分摊，将低碳技术的初期增量成本分摊至公路养护全生命周期，通过减少后期养护频次、降低能耗与资源消耗等长期收益对冲初期投入；建立增量成本分摊机制，由政府、养护企业、社会资本按比例承担，政府通过补贴覆盖部分成本，企业通过技术优化降低自身投入，社会资本通过碳交易、绿色收益获得回报。投融资模式创新需拓宽资金渠道，鼓励金融机构推出绿色信贷产品，对绿色养护项目给予低利率、长周期贷款支持；推广 PPP 模式，吸引社会资本参与绿色养护项目投资、建设与运营，共享项目长期收益；探索绿色债券、产业基金等融资方式，为低碳技术研发与规模化应用提供资金保障。成本 - 效益分析模型优化需完善评价维度，将碳减排效益、生态效益、社会效益纳入分析体系，采用环境价值评估法量化碳减排、水土保持、生态修复等非经济收益；建立动态调整的成本 - 效益分析模型，根据原材料价格、技术进步、政策变化等因素实时优化参数，为养护方案选择与投资决策提供科学依据 [3]。

6 结语

本研究系统梳理了双碳目标下公路工程绿色养护的理论体系与实践路径，核心结论如下：构建了“材料低碳化、施工节能化、生态协同化、管理智慧化”四位一体的绿色养护技术体系，明确了再生建材、低碳新材料、节能工艺、智慧管理等核心技术方向，形成了适配不同场景的技术组合方案。通过典型工程实践验证，核心技术路径可实现单位里程养护碳排下降 30%-50%，同时保障公路服役性能与生态效益，凸显了技术落地的实践价值。研究提出的“技术优化 - 政策保障 - 经济可行 - 人才支撑”四维保障体系，为绿色养护行业转型提供了全链条解决方案，其中差异化激励政策、全生命周期成本控制、产学研协同机制是推动技术规模化应用的关键。

参考文献

[1] 探析公路养护工程质量管理中存在的问题及对策[J]. 林久力.城市建设理论研究(电子版),2023(06)

[2] 公路养护工程四新技术应用分析——以常州市普通国省公路养护工程为例[J]. 高懿.运输经理世界,2023(03)

[3] 公路养护工程施工存在的问题及对策分析[J]. 许东灵.工程技术研究,2022(24)