

沥青路面预防养护工程的碳排放分析

何璐, 朱自力, 张永贵, 马悦

(重庆市设计院有限公司, 重庆市 400015)

摘要: 通过评估城市沥青路面预防养护工程对碳排放的影响, 为城市交通基础设施的低碳和环保发展提供指导性建议。通过对沥青路面养护过程中的生产、运输、施工3个核心阶段进行分析, 采用工程量预算定额法和碳排放因子法对就地热再生、微表处、超薄磨耗层、薄层罩面四种养护技术的碳排放性能进行了评估。结果表明, 就地热再生技术在材料的高效利用、废物处理及能源消耗方面的优势, 在整个养护周期中表现出了相对较低的碳排放量。据此提出了一个综合评估框架, 强调在选择城市沥青路面预防养护策略时, 应综合考虑技术的碳排放性能与经济效益。

关键词: 沥青路面; 预防养护工程; 碳排放; 就地热再生; 经济效益

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)02-0249-06

Analysis on Carbon Emissions of Prevention and Maintenance Engineering for Asphalt Pavements

HE Lu, ZHU Zili, ZHANG Yongkui, MA Yue

(Chongqing Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400015, China)

Abstract: By assessing the impact of urban asphalt pavement prevention and maintenance engineering on carbon emissions, the guidance and suggestions are provided for the low-carbon and environmental protection development of urban transportation infrastructure. Through the analysis on three core stages of production, transportation and construction in the asphalt pavement maintenance process, the engineering quantity budget quota method and the carbon emission factor method are used to assess the carbon emissions of four maintenance techniques such as in-situ thermal regeneration, micro-surfacing, ultra-thin wearing courses and thin overlay. The result shows that due to the advantages of in-situ thermal regeneration technology in efficient material utilization, waste treatment and energy consumption, its relatively lower carbon emissions are shown during the whole maintenance cycle. Accordingly, an integrated assessment framework is proposed to emphasize that the carbon emission performance and economic benefit of the technology should be considered comprehensively when selecting the prevention and maintenance strategies of urban asphalt pavements.

Keywords: asphalt pavement; prevention and maintenance engineering; carbon emissions; in-situ thermal regeneration; economic benefit

0 引言

在当前全球气候变化和环境保护成为热点议题的背景下, 城市交通基础设施建设和维护活动的碳排放问题日益受到公众和学术界的关注^[1-2]。城市道路作为城市基础设施的重要组成部分, 其建设和后期养护对于保障城市交通的顺畅与安全至关重要, 同时也是城市碳排放的一个不可忽视的来源^[3-4]。

城市道路沥青路面, 作为交通基础设施中最常见的一种路面形式, 因施工便捷、成本效益高及良好的使用性能而得到广泛应用。然而, 从沥青的生产、运输到路面的建设、后期维护乃至最终的更新改造, 每一环节均伴随着能源消耗和碳排放。因此, 对城市道路沥青路面的碳排放进行全面分析, 对于指导城市道路建设与养护向更加环保、低碳的方向发展, 具有重要的理论价值和实践意义。

张磊等^[5]通过建立生命周期评价体系, 量化分析了不同设计寿命沥青路面的能耗排放特征, 揭示了半刚性基层沥青路面的能耗及全球变暖潜值总量显著高于柔性基层和高掺量胶粉沥青路面, 进而探

收稿日期: 2024-03-13

作者简介: 何璐(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事道路工程设计和研究工作。

讨论了影响能耗排放的多个因素,并提出了减排措施。而凌宏伟等^[6]采用排放因子法深入探讨了降低排水性沥青面层 OGFC 的生产、运输和施工过程中的碳排放策略,并以上海金海路改建工程作为实例,验证了这些碳减排措施的有效性。这一研究不仅补充了张磊等的工作,还具体展示了减排措施在实际工程中的应用情况。余希帆^[7]的工作则从城市道路全生命周期的角度出发,构建了一个覆盖建造、运行和拆除阶段的市政道路及配套工程碳排放计算模型,通过案例分析进一步验证了模型的实用性。这为道路及市政基础设施建设项目的碳排放管理提供了重要工具。于明策等^[8]则运用 AHP 层次分析法,从沥青面层施工过程中的能耗与碳排放角度进行分析,明确了不同施工环节的能耗排放权重,强调了集料加热环节作为主要的碳排放源,并提出了相应的减排策略。这项研究不仅与之前的研究形成呼应,也为具体的施工过程提供了减排方向。乔兰等^[9]通过深度分析,为中国交通行业量身定做了一套碳排放因子数据,建立了基于归因全生命周期评价方法的公路工程建设期碳排放数据库及测算模型。这为中国交通行业的碳排放计算和管理提供了本土化的方法论和工具,填补了相关研究的空白。

现有研究多关注沥青路面建设阶段的环境影响,对于预防养护阶段的碳排放分析相对较少。鉴于城市化快速发展,城市道路养护频次和范围的不断扩大,系统分析和评估城市道路沥青路面预防养护工程的碳排放,对于指导实现城市交通基础设施的低碳发展具有重要意义。本研究旨在填补这一研究空白,通过系统分析城市道路沥青路面预防养护工程的碳排放,评估其环境影响,探讨降低养护工程碳排放的可能途径和策略,期望通过提出有效的减排措施,实现城市交通基础设施的绿色、低碳发展。

1 碳排放计算方法

在工程行业的道路建设领域,碳排放量的计算方法主要采用生命周期评价(LCA)、排放因子法和能耗清单与热值法等,以实现碳排放的定量分析。这些方法从不同维度反映了建设项目的碳排放特征,为降低建设活动的碳足迹提供了科学依据。本研究采用工程量预算定额的方法,利用碳排放因子来计算养护工程在生产、运输和施工阶段的碳排放量,最后计算出总的碳排放量。

1.1 计算边界

如图 1 所示,在沥青路面养护工程碳排放界定中,可将其分为材料生产、运输及施工建设三个关键阶段,各阶段均展现出独特的碳排放属性及其驱动因素。首先,材料生产阶段关注于沥青及其他相关材料(集料、水泥)的制造过程,此阶段碳排放主要源于原材料加工及生产活动中的能源消耗和直接排放。随后,运输阶段着眼于将生产完成的材料自生产地点至施工现场的搬运过程,该阶段碳排放量与运输距离、方式及运输工具的能效紧密相关。最终,施工建设阶段包括道路铺设和养护操作,涵盖沥青加热混合、路面铺设及养护设备运用等活动。此阶段碳排放受施工技术、设备能效及施工管理等因素影响。

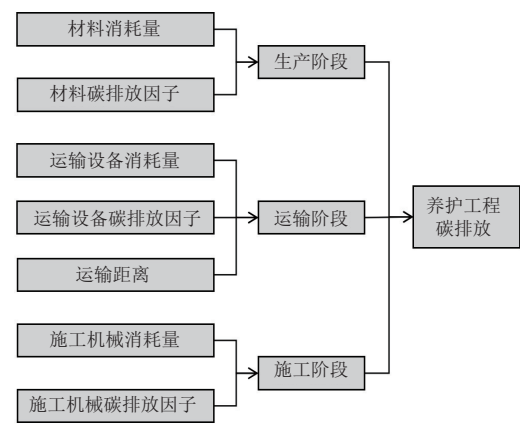


图1 公路养护工程碳排放计算边界

1.2 计算方法

1.2.1 材料生产阶段

在材料生产阶段,碳排放主要来源于沥青及相关材料的生产过程,碳排放计算如式(1)所示,具体碳排放量的计算需要考虑生产每吨材料所需的能源类型及其燃烧或转化过程中产生的二氧化碳当量。

$$E_1=\sum_{i=1}^n A_i \times af_i \tag{1}$$

式中: E_1 为生产阶段的碳排放量; i 为沥青路面生产阶段所需的材料类型; A_i 为第*i*中材料的消耗量; af_i 为第*i*中材料的碳排放因子。

1.2.2 材料运输阶段

运输阶段具体碳排放量的计算需要考虑生产每吨材料所需的能源类型及其燃烧或转化过程中产生的二氧化碳当量,碳排放计算如式(2)所示。

$$E_2=\sum_{i=1}^n B_i \times bf_i \times L_i \tag{2}$$

式中: E_2 为运输阶段的碳排放量; i 为沥青路面运输阶段所需的机械设备类型; B_i 为第*i*中机械设备的消

耗量; bf_i 为第*i*中机械设备的碳排放因子; L_i 为运输距离。

1.2.3 材料施工阶段

施工阶段的碳排放计算包括沥青混合料的加热、混合、铺设及压实等过程产生的碳排放。施工设备(如加热炉、摊铺机、压路机)的能源消耗是此阶段主要的碳排放源,碳排放计算如式(3)所示。

$$E_3=\sum_{i=1}^n C_i \times cf_i \tag{3}$$

式中: E_3 为施工阶段的碳排放量;*i*为沥青路面施工阶段所需的机械设备类型; C_i 为第*i*中机械设备的消耗量; cf_i 为第*i*中机械设备的碳排放因子。

1.2.4 碳排放总量

每个阶段的碳排放量计算是沥青路面养护工程整体碳足迹评估的基础,通过对这三个阶段的碳排放累加,即可得到沥青路面养护工程的碳排放总量,如式(4)所示。

$$E=E_1+E_2+E_3 \tag{4}$$

1.3 碳排放因子

沥青路面养护工程涉及的材料和机械设备品种较多,本研究主要选择主体材料、部分辅助材料和主要机械设备作为工程量消耗的计量依据。根据《建筑碳排放计算标准》^[10]和其他相关研究^[11-13],建立沥青路面养护工程材料的碳排放因子库,详见表1和表2。由于人工的碳排放量较少,本研究忽视人工的影响。

表1 材料的碳排放因子

材料类型	碳排放因子 CO ₂ e/(kg·t ⁻¹)
SBS 改性沥青	295.91
乳化沥青	183.542
水泥	735
碎石	3.87
RAP 再生混凝土	0.52
矿粉	7.36

2 养护方案

城市沥青路面的养护一般采用就地热再生、微表处、超薄磨耗层和薄层罩面四种养护技术。就地热再生技术通过高效回收并再利用现有路面材料,减少了新材料的需求和废弃物的产生,从而在源头上降低了碳排放。微表处技术以低能耗的施工过程和材料利用的经济性,为轻微磨损的路面提供了一种低碳养护方案。超薄磨耗层技术通过在旧路面上铺设极薄的沥青混合料层,既改善了路面性能,又限制了施工过程中的能耗及相应的碳排放。作为一种

表2 机械设备的碳排放因子

机械设备类型	碳排放因子 CO ₂ e/(kg·台班 ⁻¹)
120 t/h 沥青拌合设备	17 325.88
240 t/h 沥青拌合设备	35 263.9
钢轮振动压路机	252.1
20 ~ 25 t 轮胎式压路机	157.25
2 m ³ 以内装载机	289.72
30 t/h 内配料拌合机	3 326.99
自动找平摊铺机(4.5 m 以内)	131.23
微表处摊铺车	99.84
5 t 以内自卸汽车	126.15
2 t 以内载货汽车	82.65
10 t 以内自卸汽车	172.6
3 m ³ 以内轮胎装载机	359.268

应对路面轻度至中度破损的养护方法,薄层罩面技术通过有效控制施工厚度和优化材料使用,实现了碳排放的减少。四种养护工程的预期使用年限、单价见表3。

表3 不同养护方式的使用信息

养护方式	预期使用时间/a	单价/(元·m ⁻³)	密度/(t·m ⁻³)
就地热再生	5 ~ 7	53	2.5
微表处	2 ~ 3	23	2.13
超薄磨耗层	3 ~ 4	37	2.33
薄层罩面	3 ~ 5	47	2.41

注:预期使用年限取自《公路沥青路面预防养护技术规范》^[14],单价来源于市场调研的均值,仅供参考。

2.1 生产阶段碳排放

本研究依据国家及各省市公路工程预算定额的规定,对四种沥青路面预防养护技术(就地热再生、微表处、超薄磨耗层和薄层罩面)在实施过程中的材料消耗量进行了详细测算。此项测算工作基于养护技术的具体操作要求及施工标准,精确评估了各养护方案所需材料的使用情况。随后,参考碳排放因子,对每项养护技术在材料生产过程中的碳排放量进行了计算,旨在量化分析各养护方案的环境影响。计算结果汇总于表4中,显示了各养护技术的碳排放量,为评估和比较这些养护技术的环境可持续性提供了科学依据。

2.2 运输阶段碳排放

本研究根据国家及地方级别的公路工程预算定额规范,细致评估了四种沥青路面预防养护方案在运输阶段对机械设备的能耗需求。此过程涵盖了对各项养护方案实施过程中所需运输机械的类型及其运行消耗量的测算,以确保计算的准确性和可靠性。随后,基于这些数据并引用碳排放因子,本研究计算

表4 生产阶段的消耗量和碳排放

养护方式	材料消耗	消耗量	单材碳排放 CO ₂ e/(kg·单位 ⁻¹)	方案碳排放量 CO ₂ e/(g·m ⁻²)
就地热再生	SBS改性沥青	5	295.91	1 749.210
	碎石	88	3.87	
	RAP混合料	12	1.38	
微表处	乳化沥青	11.5	183.542	1 215.006
	碎石	100	3.87	
	水泥	2.5	735	
超薄磨耗层	乳化沥青	11	183.542	1 306.865
	碎石	100	3.87	
	水泥	1	735	
薄层罩面	SBS改性沥青	5.5	295.91	881.432
	碎石	100	3.87	
	矿粉	7.8	7.36	

并汇总了各预防养护技术的碳排放量,忽视了运输阶段材料的损失,结果整理呈现于表5中。

表5 运输阶段的机械设备消耗量

运输阶段	机械设备消耗	台班数/ 1 000 m ²	方案碳排放量 CO ₂ e/ (g·m ⁻²)
就地热再生	5 t以内自卸汽车	0.27	34.061
微表处	2 t以内载货汽车	0.23	19.010
超薄磨耗层	10 t以内自卸汽车	0.70	120.820
薄层罩面	3 m ³ 以内轮胎装载机	0.09	32.334

2.3 施工阶段碳排放

根据国家及地方政府对公路工程预算定额的明确规范,本研究细致评估了4项沥青路面预防养护策略在施工阶段对机械设备的具体能耗需求。该评估过程基于对每种养护技术所需施工机械的详细分析,包括机械类型、操作时间及预期能耗,以确保所得数据的准确性和全面性。进一步地,利用碳排放因子,本研究对上述养护技术在施工过程中产生的碳排放进行了量化计算,所得结果详见表6。

3 结果分析

如图2所示,本研究详细比较了城市沥青路面4种预防养护技术——就地热再生、微表处、超薄磨耗层及薄层罩面——在材料生产、物流运输和施工过程中的碳排放量,以及其在整个养护周期内的总碳排放贡献。在材料生产阶段,观察到就地热再生技术呈现出最高的碳排放量,而薄层罩面相对显示出较低的排放。运输阶段的数据分析表明,尽管超薄磨耗层在此阶段的碳排放量最大,但该阶段整体碳

表6 施工阶段的机械设备消耗量和碳排放

养护方式	机械设备消耗	台班数/ 1 000 m ²	机械碳排放 CO ₂ e/ (kg·单位 ⁻¹)	方案碳排放量 CO ₂ e/ (g·m ⁻²)
就地热再生	自动找平摊铺机 (4.5 m以内)	0.38	131.23	324.506
	钢轮振动压路机	0.79	252.1	
	20~25 t轮胎式压路机	0.48	157.25	
微表处	30 t/h内配料拌合机	0.13	3 326.99	512.105
	微表处摊铺车	0.42	99.84	
	2 m ³ 以内装载机	0.13	289.72	
超薄磨耗层	2 m ³ 以内装载机	0.16	289.72	1 442.410
	微表处摊铺车	0.1	99.84	
	120 t/h沥青拌合设备	0.08	17 325.88	
薄层罩面	240 t/h沥青拌合设备	0.04	35 263.9	1 526.422
	钢轮振动压路机	0.26	252.1	
	20~25 t轮胎式压路机	0.32	157.25	

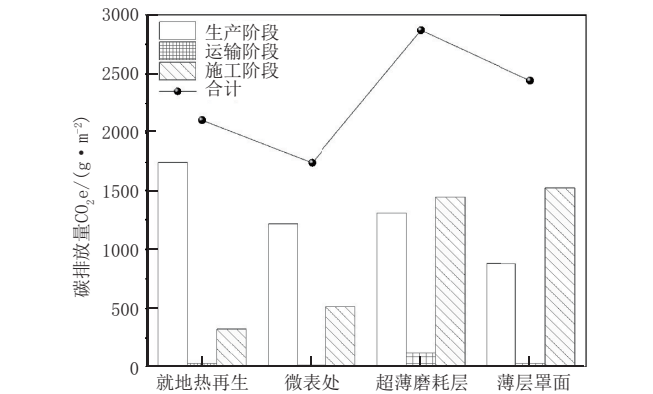


图2 不同养护方式在不同阶段的总碳排放量

排放基数较低,对总排放量的贡献相对有限。至于施工阶段,超薄磨耗层与薄层罩面的碳排放量较为相似,且显著高于就地热再生与微表处技术的排放量。

综合考虑3个阶段的总排放量,就地热再生与微表处的总体排放量较低。这表明在整个沥青路面养护生命周期中,这两种技术相对于其他技术更具环境友好性^[15-16]。超薄磨耗层在材料生产和施工阶段的较高碳排放特征,最终导致了整体较高的总碳排放量。因此,针对养护技术的选择,应充分考虑各阶段的碳排放影响,并针对高排放阶段制定相应的减排策略,以优化总体的碳足迹,进而推动沥青路面养护工程的可持续发展。

在进行沥青路面养护方式的碳排放量比较时,考虑到不同养护方法具有各自的预期使用寿命,本

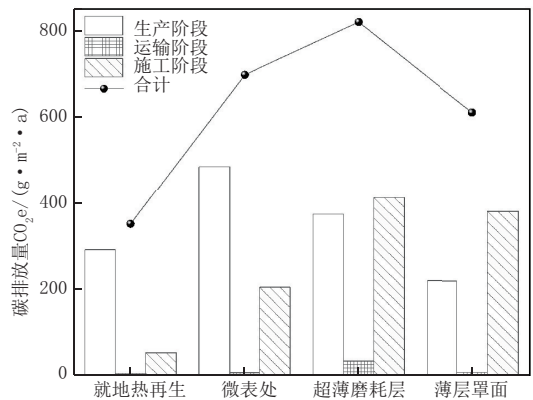


图3 不同养护方式在不同阶段的年碳排放量

研究将预期使用年限纳入作为关键参考变量。据此调整,我们计算并对比了各养护方式按年度分配的碳排放量,相关结果如图3所示。基于就地热再生技术的较长预期使用寿命,该技术在所有阶段及总碳排放量的年度分配上均表现出显著降低。相对而言,微表处技术由于预期使用寿命较短,其按年度分配的碳排放量相对较高,与薄层罩面的碳排放情况相仿,而超薄磨耗层在所有比较的养护方法中,年度碳排放量持续呈现最高值。这一分析框架为评估沥青路面养护技术的环境性能提供了一个更为细化的视角,有助于促进在实际工程决策中更加考量长期环境影响与可持续性。

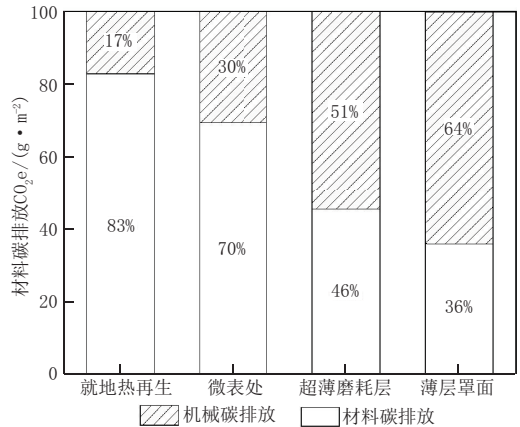


图4 不同养护方式材料和机械碳排放比例

图4展示了城市沥青路面4种养护方式在材料和机械使用上的碳排放量比例。从中可以看出,就地热再生技术的碳排放主要来源于材料,机械使用占比较少,微表处、超薄磨耗层、薄层罩面的机械使用比重依次上升,材料使用均有所下降。在选择最合适的沥青路面养护方式时,需要综合考虑材料和机械使用阶段的碳排放量^[17]。对比之前的总碳排放量结果,此分析反映了不同养护技术在材料生产和施工操作中的碳排放结构,对于指导选择低碳养护方法及优化工程操作以减少碳排放具有实际意义。

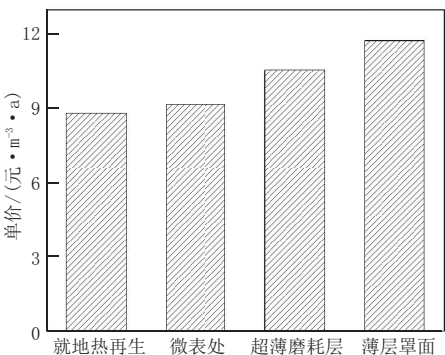


图5 不同养护方式的分年单价

在评估不同沥青路面养护技术的经济性时,本研究详细比较了它们的年度成本效益,具体数据如图5所示。分析结果显示,就地热再生与微表处技术的单位成本显著低于超薄磨耗层与薄层罩面技术。当这些成本数据与先前的年碳排放量结果相结合时,就地热再生技术以最低的年碳排放量和成本显示出最优的经济与环境效益,从而在经济效率和环境可持续性双重角度下,被认为是最为推荐的城市沥青路面预防养护方法。此项分析为城市路面养护的决策提供了综合性的评价框架,强调在实施养护策略时,应同时考虑成本和环境影响,以推动更加经济和环境友好的养护实践。

4 结 语

在城市沥青路面养护工程碳排放研究中,通过对生产、运输、施工3个关键阶段的系统界定,能够揭示各阶段独特的碳排放特性及其驱动因素。本研究全面评估了城市沥青路面养护工程中4种预防养护技术(就地热再生、微表处、超薄磨耗层、薄层罩面)在碳排放方面的性能,覆盖了材料生产、运输和施工建设三个关键阶段。研究发现,就地热再生和微表处两种技术在养护全周期内表现出较低的碳排放水平,这主要得益于它们在材料利用、废弃物处理和能源消耗方面的效率。与此相比,超薄磨耗层和薄层罩面技术在特定环节,尤其是材料生产和施工操作阶段,显示出较高的碳排放水平。本研究进一步探究了不同养护技术的经济性能,特别指出就地热再生技术因更低的年度碳排放量和成本,提供了最优的环境与经济双重效益,使其成为推荐的城市沥青路面预防养护方法。通过结合碳排放量与成本效益的分析,本研究提供了一个全面的评估框架,用于指导城市路面养护的决策过程,强调了在选择养护策略时需要充分考虑其对环境和经济的综合影响,以促进更加经济高效且环境友好的养护实践。

综合上述分析,本研究突显了选择低碳养护技术在沥青路面养护工程中的重要性,并强调了实施过程中需考虑碳排放影响的紧迫性。通过全面考虑养护技术在环境性能、经济效益和长期可持续性方面的表现,可以推动沥青路面养护工程向着更加可持续的发展方向迈进。

参考文献:

- [1] 张自然.城市规模、基础设施与二氧化碳排放研究[J].社会科学战线,2023(12):70-77.
- [2] 李俊奇,张希,李惠民.北京某片区海绵城市建设和运行中的碳排放核算研究[J].水资源保护,2023,39(4):86-93.
- [3] 张晓悦,孙侃.高速公路绿化工程施工阶段碳排放计算研究[J/OL].交通节能与环保:2024:1-7(2024-01-23)[2024-03-12].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1261.u.20240122.0911.002.html>.
- [4] 张林鹏,黄萍,朱佳琪,等.交通运输行业碳排放研究进展[J].能源研究与管理,2023(4):76-84.
- [5] 张磊,王鹏,杨永志,等.基于LCA的不同设计寿命沥青路面能耗排放分析[J/OL].材料导报:2024:1-18(2024-01-05)[2024-03-12].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20231122.1709.002.html>.
- [6] 凌宏伟,郑晓光,闫国杰,等.OGFC生产过程碳排放计算和碳减排技术研究[J].城市道桥与防洪,2024(1):19-22.
- [7] 余希帆.市政道路碳排放计算及分析[J].城市道桥与防洪,2024(1):27-29,34.
- [8] 于明策,李婷,陈冬梅.沥青面层施工沥青混合料拌和阶段能耗和碳排放研究[J].科技资讯,2023,21(18):116-119.
- [9] 乔兰,邓乃夫,李庆文,等.公路工程建设阶段全生命周期碳排放智能估算方法[J].工程科学学报,2023,45(12):2173-2186.
- [10] GB/T 51366—2019,建筑碳排放计算标准[S].
- [11] 吴爽.基于LCA的热拌与温拌沥青路面环境影响研究[D].南京:东南大学,2016.
- [12] 王秋园.高速公路纵坡路段全寿命周期碳排放测算及应用[D].西安:长安大学,2023.
- [13] 于明策,李婷,陈冬梅.沥青面层施工沥青混合料拌和阶段能耗和碳排放研究[J].科技资讯,2023,21(18):116-119.
- [14] JTG/T 5142-01—2021,公路沥青路面预防养护技术规范[S].
- [15] 李吉恺.江西省高速公路沥青路面预防养护技术后评估研究[D].重庆:重庆交通大学,2023.
- [16] 赵瑞瑞.公路沥青路面养护温拌再生技术综合效益评价[D].兰州:兰州理工大学,2024.
- [17] 张怡然.道路基础设施生命周期碳排放量化分析[C]//2019世界交通运输大会论文集(上).北京:中国公路学会,2019:10.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadfloodbridge@163.com

