

基于路段动态划分的沥青路面低碳养护策略研究

李响¹, 布羽¹, 张惠勤², 刘宪明², 陈磊磊³

(1. 湖北武麻高速公路有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 山东高速工程检测有限公司, 山东 济南 250002;

3. 东南大学 智能运输系统研究中心, 江苏 南京 211189)

摘要: 探讨基于路段动态划分的沥青路面低碳养护策略, 以实现对路面的有效管理和可持续维护, 推动沥青路面的绿色养护。通过对路段以10 m为最小基础单元, 将技术状况相似等级的路段动态合并, 对养护路段进行动态划分, 解决较长基础单元评定结果易掩盖局部不良路段的问题, 更精细地理解路面的磨损状况和养护需求。基于生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)方法构建了沥青路面养护施工全生命周期中碳排放量的量化体系, 综合考虑养护过程中的各个环节, 准确评估碳排放。通过以某高速公路养护工程为案例, 说明所提出的基于路段动态划分的低碳养护策略在实际工程中的应用效果。结果表明: 路段动态划分确定养护路段对降低养护过程的碳排放有显著效果, 可降低24.45%的碳排放。

关键词: 沥青路面; 路段动态划分; 碳排放; 低碳道路养护; 可持续发展

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)03-0194-06

Research on Low-carbon Maintenance Strategy of Asphalt Pavement Based on Dynamic Division of Road Section

LI Xiang¹, BU Yu¹, ZHANG Huiqin², LIU Xianming², CHEN Leilei³

(1. Hubei Wuma Expressway Co., Ltd., Wuhan 430010, China; 2. Shandong Expressway Engineering Testing Co., Ltd., Jinan 250002, China; 3. Intelligent Transportation System Research Center, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Aiming to explore a low-carbon maintenance strategy for asphalt pavement based on dynamic division of road sections, the effective management and sustainable maintenance of pavements are realized, and the green maintenance of asphalt pavement is promoted. By segmenting road sections with a minimum unit of 10 meters, the road sections with similar technical status are dynamically merged and the maintenance sections are dynamically divided, which can solve the problems that the evaluation results of long foundation units are easy to cover up the local bad sections, and understand the wear condition and maintenance needs of the pavement more accurately. Based on the life cycle assessment (LCA) method, the quantification system of carbon emission in the whole life cycle of asphalt pavement maintenance construction is established. Every link in the maintenance process is comprehensively considered to accurately assess the carbon emissions. Taking an expressway maintenance project as a case, the practical application and effectiveness of the proposed low-carbon maintenance strategy based on dynamic division of road section are illustrated. The results indicate that the dynamic division of road sections to determine the maintenance road sections has a significant effect on reducing the carbon emission in the maintenance process, and the carbon emission can be reduced by 24.45% in this case.

Keywords: asphalt pavement; dynamic division of road sections; carbon emission; low-carbon road maintenance; sustainable development

0 引言

公路作为国民经济发展中的重要基础设施支撑,在建设管理养护的过程中需要消耗大量能源并

且排放大量的温室气体,这将导致严重的气候变化,对人类社会的健康运转产生威胁^[1-2]。随着我国公路路网规模逐渐扩大,公路领域的主要任务开始由建设向养护转变。在养护施工过程中,养护材料生产、材料运输和机械施工均会造成大量的碳排放^[3],因此通过合理的决策降低养护过程中的碳排放十分必要。

Ma等^[4]采用生命周期评价方法(Life Cycle Assessment, LCA)对不同类型养护方法的温室气体

收稿日期: 2024-04-10

作者简介: 李响(1979—),男,学士,高级工程师,从事高速公路工程建设与养护管理工作。

通信作者: 陈磊磊(1985—),男,博士,副教授,从事道路与铁道工程研究工作。电子邮箱: chenleilei@seu.edu.cn

排放量进行计算,研究结果表明增加预防性养护频率可有效减少路面养护过程中的碳排放。Liu 等^[5]分析了车流与路面养护协同作用下沥青路面生命周期过程中的碳排放,研究发现沥青路面生命周期内材料生产、混合料制备和养护时长是影响碳排放的主要因素。Wang 等^[6]采用 LCA 评价方法,综合考虑养护时期和预后使用期,对不同养护措施维修条件下路面生命周期内碳排放进行分析,研究证明了薄层罩面可以较大幅度地减少生命周期内温室气体的排放量。Zheng 等^[7]面向路面建设的四个阶段建立了一种考虑成本、环境、社会因素的综合性生命周期分析方法,为选择可持续的路面养护方案提供依据。当前相关研究多关注于路面养护在生命周期内各阶段的碳排放分析,而缺乏针对养护施工组织的低碳策略研究。

在养护施工组织中,养护路段划分是进行路面技术状况评价、养护措施确定以及养护施工组织的关键基础。根据我国现行《公路技术状况评定标准》(JTG 5210—2018)^[8](下称《标准》),公路技术状况调查以 1 000 m 路段长度为基本单元,在进行自动化检测时以每 10 m 为单位进行检测统计。在实际工程中,评价路面技术状况主要分析路面面层的病害分布情况,以较长路段为基本单元进行技术评定,往往使得局部不良路段被掩盖,评定指标无法真实反映路面技术状况,导致养护措施缺乏针对性,从而造成养护资源的浪费;采用较短基本单元进行检测可以精细化评定路面技术状况,但得出结果较为离散,在指导养护施工时会增加施工组织的复杂程度,增加施工过程中断频率,导致养护材料的损耗增加,从而增加养护过程中的碳排放。因此,需要进行养护路段动态合并,综合考虑路段技术状况相似性和空间连续性,避免养护材料和养护施工的浪费,实现养护过程的低碳环保。

1 考虑空间连续性的路段动态划分方法

本研究为节约养护资源,实现养护施工低碳化,基于空间连续性和路段相似性,在充分考虑养护施工组织特征的基础上,对路段等级划分界限进行模糊化处理,依据新的模糊处理结果进行路段合并,实现面向养护的路段动态划分。

1.1 10 m 级基础单元等级划分及路段合并

为解决较长基础单元评定结果易掩盖局部不良路段的问题,本研究采用 10 m 检测单元作为路段最

小基础单元进行技术状况评价。根据《标准》,结合技术状况评价情况进行静态等级划分,等级划分标准见表 1。在进行等级划分后,将空间上相邻且等级相同的 10 m 级基础单元进行合并,形成多个等级路段,即单一等级路段由多个等级相同的 10 m 基础单元组合而成,具体合并过程见图 1。

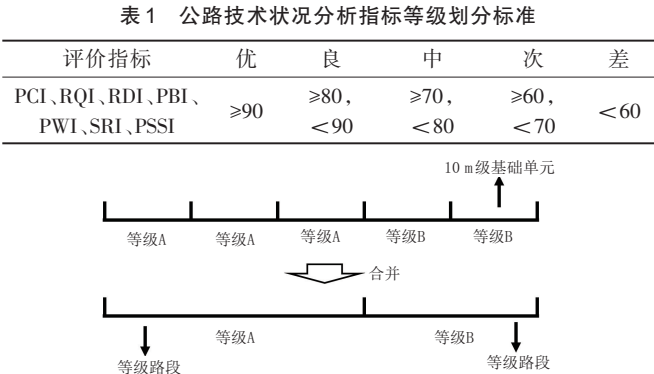


图 1 基础单元合并过程示意图

1.2 等级划分界限模糊化处理

现有的路段等级划分方式较为绝对,当相邻路段实际路况相似,评价分数接近却处于分界线上时,路段会被分为两个等级,从而采用不同的养护措施,导致养护资源的浪费。不符合低碳施工的需求。本研究根据实际使用情况设定标准差 λ ,将《标准》中分界值变为区间范围,实现划分界限模糊化处理,模糊化处理后的技术状况等级划分标准见表 2。模糊化处理后等级划分标准将为后续相似性等级路段合并提供依据。

表 2 重设后的公路技术状况分析指标等级划分标准

评价指标	优	良	中	次	差
PCI、RQI、RDI、 PBI、PWI、SRI、 PSSI	≥90- λ	≥80- λ , <90+ λ	≥70- λ , <80+ λ	≥60- λ , <70+ λ	<60+ λ

1.3 考虑技术状况相似性的等级路段动态合并

为将评价分数接近但等级划分结果不同的等级路段进行合并处理(见图 2),本研究采用如下步骤。

(1)提取等级路段信息:所需提取的信息包括本体等级路段 Y_i 的等级 A_i 、该等级路段中各 10 m 级基础单元的分项评定指标的最小值 $x_{\min}$ 和最大值 $x_{\max}$;上一路段 Y_{i-1} 等级 A_{i-1} 、上一等级路段重设后的等级划分区间 $[a_{i-1}, b_{i-1})$;下一路段 Y_{i+1} 等级 A_{i+1} 、下一等级路段重设后的等级划分区间 $[a_{i+1}, b_{i+1})$ 。

(2)等级重设与路段合并:当相邻等级路段等级相等,即 $A_{i-1}=A_{i+1}=A$ 时,此时应有 $a_{i-1}=a_{i+1}=a$, $b_{i-1}=b_{i+1}=b$,则

a. 当 $A_i=A$ 且 $x_{\max}<b$ 时,则本体等级路段满足等

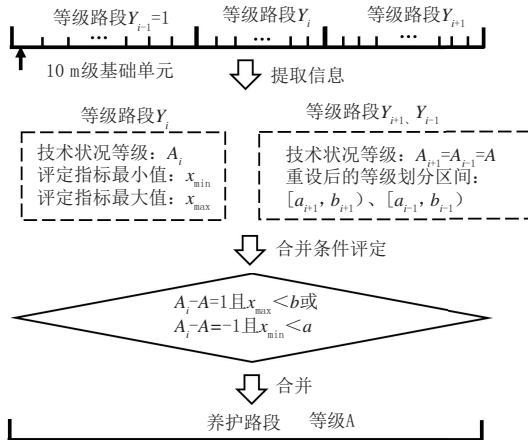


图2 等级路段动态合并示意图

级重设条件及合并条件,将其等级降为A,并与相邻等级路段进行合并。

b. 当 $A_i - A = -1$ 且 $x_{\min} > a$ 时,则本体等级路段满足等级重设条件及合并条件,将其等级升为A,并与相邻等级路段进行合并。

上述步骤如所示,等级路段合并的结果即为最终确定的养护路段,单一养护路段在空间上具有连续性,路段内10 m级基础单元在技术状况上具有相似性,解决了现有路段划分方法中存在的不足。

2 养护施工碳排放计算方法

本研究基于LCA方法构建了沥青路面养护施工全生命周期中碳排放量的量化体系,根据ISO-14040系列标准,LCA计算方法包含目标和范围定义、清单分析、影响评价和结果解释四个阶段^[9]。

2.1 目标和范围定义

本研究评价对象为沥青路面,针对沥青路面等道路工程研究,研究者常将生命周期划分为材料生产、施工建设、运营管理、维修养护、废弃处置五个阶段,本研究旨在通过路段动态划分实现养护施工过程的最低碳排放,故只针对沥青路面养护的材料生产、材料运输和养护施工阶段进行分析。本研究的系统边界见图3。

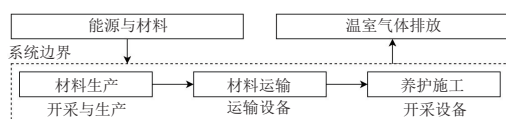


图3 沥青路面养护碳排放研究系统边界

2.2 清单分析

清单分析是量化生命周期中投入(如能源消耗)和产出(如温室气体排放)的过程,针对沥青路面养护过程的材料生产、材料运输和养护施工阶段,清单可分为能源清单和材料清单。

(1)材料清单

沥青路面的养护材料涉及沥青类材料、集料和其他少量改性添加剂等,不同原料在其开采与生产过程中会产生温室气体排放。

(2)能源清单

在沥青路面养护的各个阶段,均会通过能源的使用产生碳排放。汽油、柴油等化石能源燃烧产生的温室气体排放,电力能源在其生产过程中产生温室气体排放。在材料生产阶段,能源消耗已包含于原料的单位排放量中;在材料运输与施工阶段,碳排放的主要来源为运输车辆和施工设备的能源消耗,以及封闭施工后交通延误所带来的能源消耗。

2.3 影响评价

影响评价是在清单分析的基础上,计算评价指标。本研究计算碳排放量用以评价碳排放,整个路面养护期间的碳排放量可由下列公式计算:

$$Q_{\text{total}} = Q_m + Q_t + Q_c \quad (1)$$

式中: Q_{total} 路面养护过程中碳排放总量; Q_m 为材料生产过程的碳排放量; Q_t 为材料运输过程的碳排放量; Q_c 为养护施工过程中的碳排放量。

(1)材料生产碳排放模型

养护施工材料生产阶段产生的碳排放量是通过计算各个材料使用量与该材料的碳排放因子即单位排放量的乘积和得到的,计算公式为:

$$Q_m = \sum_{i=1}^n m_i \times c_i \quad (2)$$

式中: Q_m 为材料生产过程的碳排放量; m_i 第 i 种材料的质量; c_i 为第 i 种材料的碳排放因子。

(2)材料运输碳排放模型

材料运输过程中的碳排放主要来源是运输设备的能源消耗,则此阶段的碳排放量为各种能源消耗量与该种能源的碳排放因子即单位排放量的乘积和,计算公式:

$$Q_t = \sum_{i=1}^n E_{ti} \times F_{ti} \quad (3)$$

式中: Q_t 为材料运输过程的碳排放量; E_{ti} 为第 i 种能源的能耗; F_{ti} 为第 i 种能源的碳排放因子。对于运输方式对于第 i 类能源的消耗,计算公式为:

$$E_{ti} = (1 + \alpha) \times o_{ti} \times p_{ti} \times m_{ti} \times L_{ti} \quad (4)$$

式中: α 表示返程系数,在满载运输,空载返回时取0.8; o_{ti} 为运输过程中单位距离和单位重量的能源消耗当量, $\text{kg}/(\text{t} \cdot \text{km})$; p_{ti} 为所消耗类型的环境负荷参数, MJ/kg ; m_{ti} 为运输材料总重, kg ; L_{ti} 为运输距离, km 。

(3) 养护施工碳排放模型

养护施工过程中,碳排放主要来源为铣刨、摊铺和碾压过程中施工设备的能源消耗,碳排放计算公式:

$$Q_c = \sum_{i=1}^n E_{ci} \times F_{ci} \tag{5}$$

式中: Q_c 为养护施工过程的碳排放量; E_{ci} 为第*i*种能源的能耗; F_{ci} 为第*i*种能源的碳排放因子。养护施工时往往涉及多类型机械设备,具体到不同的养护施工设备,根据其施工的台班数亦可计算养护施工碳排放量,计算公式为:

$$E_{ci} = \sum_{j=1}^n o_{cij} \times t_{cij} \times p_{cij} \tag{6}$$

式中: j 表示第*j*种施工机器; o_{cij} 为第*j*种施工设备单位时间内第*i*类能源消耗量; t_{cij} 为第*j*种施工机器的施工时长; p_{cij} 为第*j*种设备所消耗第*i*类能源的环境负荷参数。

3 工程案例

本研究某高速公路养护工程进行案例说明,在进行养护规划时,根据《标准》要求对路面进行技术状况调查。基于调查结果和路面结构分析认为,该路段技术状况不达标部分需进行预防性养护,通过预防性养护延缓病害进一步发展,并且充分利用路面残余寿命,推迟大修时间。

3.1 养护路段动态划分

为验证本研究采用方法的可行性,选取K588+040~K590+860段进行验证分析,该路段共计长2.82 km,需开展养护工程的车道为下行三车道。根据原有养护规划,综合考虑该路段技术状况分布情况,拟对全路段采用就地热再生技术进行预防性养护。根据10级基础单元路况调查结果,该路段部分基础单元路况较好,进行养护维修造成养护资料浪费,不符合低碳环保的要求。

在本案例分析中,首先根据路段技术状况分布情况分别进行路段动态划分,结合工程实际要求分析认为,在路段等级为良及良以下时即确定为需要进行预防性养护。在完成划分后,将技术状况等级为良及良以下的路段进行并集处理,确定为养护路段。路段划分结果见图4。根据原有规划,养护路段分布较为离散,在施工过程会频繁中断,施工机械需要反复重启,从而导致养护材料损耗的增加,造成养护资源的浪费,不符合低碳环保的要求。采用本研

究提出的路段动态划分方法后,所需进行养护维修的路段更为集中,减少了由于暂停施工所导致材料损耗,可以有效提升养护工程的环保性。

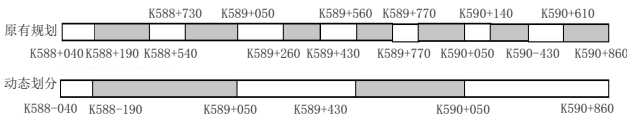


图4 养护路段划分结果

3.2 养护工程碳排放计算

3.2.1 材料生产阶段碳排放计算

就地热再生技术在材料生产阶段^[10]主要为新添加材料的生产,其中包括沥青、集料及再生剂等材料的生产。在本次养护工程中,新添加的沥青为SBS改性沥青,添加新沥青混合料后合成的再生混合料矿料级配为SMA-13,处理层位为上面层,原路面厚度为4 cm,宽度为4.1 m。由于现场就地热再生的材料用量难以准确测量,本研究根据已有研究中的材料组成比例^[11]对新添加的材料用量进行计算,得到的再生工程数量见表3。

表3 就地热再生工程数量

工程数量类型	工程数量	
	原有规划	动态划分
养护路面面积/m ²	7 216	5494
重新摊铺厚度/cm	6	6
再生养护材料体积/m ³	432.96	329.64
再生养护材料质量/t	1 105.35	841.57
中断施工损耗材料质量/t	42	12
新添加材料掺配比例/%	33.3	33.3
新添加材料质量/t	382.45	284.52
新添加沥青用量/t	14.71	10.94
新添加集料质量/t	367.74	273.58
新添加再生剂质量/t	1.47	1.10

根据已有研究^[11-12],新添加材料中不同组分的碳排放因子见表4。根据式(2)可以计算得到原有规划所需新生产的材料碳排放CO₂ Eq为4 604.24 kg,动态路段划分后所需新生产的材料碳排放CO₂ Eq为3 425.34 kg。

表4 不同组分碳排放因子

材料类型	碳排放因子CO ₂ Eq/(kg·t ⁻¹)
新添加沥青	166.385
新添加集料	4.725
新添加再生剂	285.000

3.2.2 材料运输阶段碳排放计算

在实际工程中,养护施工原材料的运距往往在100~200 km之间^[13],为方便计算本研究中养护施工的材料运距统一设定为100 km。本研究设定运输阶

段所采用的运输工具为载重 20 t 的柴油卡车;根据已有研究^[11,13],该类型运载工具的油耗当量为 0.014 0 kg/(t·km),柴油的环境负荷参数为 42.705 MJ/kg,柴油的碳排放因子为 77.4×10⁻³ kg/MJ。因此根据式(3)、式(4),计算得到原有规划原材料运输的碳排放 CO₂ Eq 为 3 185.62 kg,动态路段划分原材料运输的碳排放 CO₂ Eq 为 2 369.95 kg。

3.2.3 养护施工阶段碳排放计算

就地热再生施工的工艺流程主要包括旧有路面加热、旧有路面铣刨耙松、混合料拌合、混合料摊铺和混合料碾压,其中涉及到的机械设备包括就地热再生加热机、就地热再生主机、摊铺机和压路机^[14-15]。参考已有研究^[11,13],施工中涉及消耗的能源类型及对应的环境负荷参数、碳排放因子见表 5。

表 5 能源类型碳排放参数				
能源类型	汽油	柴油	重油	电
环境负荷参数/(MJ·kg ⁻¹)	43.124	42.705	41.816	3.600
碳排放因子/(10 ⁻³ kg·MJ ⁻¹)	94.600	77.400	73.300	317.000

本研究采用《公路工程预算定额》^[16]中规定,就地热再生施工过程中涉及设备的作业时长和能源消耗率参数见表 6。根据式(5)、式(6),计算得到的原有规划施工过程的碳排放 CO₂ Eq 为 15 192.59 kg,动态路

段划分施工过程的碳排放 CO₂ Eq 为 11 567.08 kg。

表6 施工设备作业时长和能源消耗率参数						
工程类型	设备类型	作业 时长/h	能源消耗率/(kg·h ⁻¹)			
			汽油	柴油	重油	电
原有规划	就地热再生加热机	8.38	—	—	504.00	—
	就地热再生主机	8.38	—	63.00	—	—
	沥青混合料摊铺机	6.25	—	17.03	—	—
	轮胎式压路机	8.48	—	5.30	—	—
动态划分	就地热再生加热机	6.38	—	—	504.00	—
	就地热再生主机	6.38	—	63.00	—	—
	沥青混合料摊铺机	4.76	—	17.03	—	—
	轮胎式压路机	6.46	—	5.30	—	—

3.3 养护工程碳排放计算

表 7 可见,由路段动态划分确定养护路段在材料生产阶段、材料运输阶段、养护施工阶段的碳排放量 CO₂ Eq 相比原有规划减少 5 620.08 kg,约降低 24.45%,通过路段动态划分确定养护路段的方法对降低养护过程中的碳排放量效果显著。由于在养护过程中采用了就地热再生技术,在养护过程中养护施工阶段碳排放占比最大,因此由表 7 计算结果也可见,不同阶段的碳排放减少量占总减少量的比重从大到小依次是养护施工阶段、材料生产阶段、材料运输阶段,其中养护施工阶段的碳排放减少量占总减少量 64.51%。

表 7 养护工程碳排放综合分析					
阶段名称	原有规划碳排放/kg	动态划分碳排放/kg	碳排放减少量/kg	碳排放减少率/%	各阶段碳排放减少量占比/%
材料生产阶段	4 604.24	3 425.34	1 178.91	25.60	20.98
材料运输阶段	3 185.62	2 369.95	815.67	25.60	14.51
养护施工阶段	15 192.59	11 567.08	3 625.50	23.86	64.51
养护全过程	22 982.45	17 362.36	5 620.08	24.45	100

4 结 论

(1)采用 10 m 检测单元作为路段最小基础单元,根据路面面层的病害分布情况进行技术状况评价,并对路段等级划分界限进行模糊化处理,依据新的模糊处理结果进行路段合并,实现了面向养护的路段动态划分。该方法以沥青路面面层技术状况为评价来源,符合现有工程实践情况,解决了较长基础单元评定结果易掩盖局部不良路段的问题,能够避免养护材料和养护施工的浪费,实现养护过程的低碳环保。

(2)基于 LCA 方法,针对沥青路面养护过程的材料生产、材料运输和养护施工阶段进行分析,根据相关标准确定了碳排放量计算的相关参数,建立碳排

放模型,构建了沥青路面养护施工全生命周期中碳排放量的量化体系。

(3)从某省高速公路养护工程案例来看,根据路段动态划分确定养护路段,在养护过程中的材料生产阶段、材料运输阶段及养护施工阶段共减少碳排放 CO₂ Eq 为 5 620.08 kg,相比原有规划共减少碳排放 24.45%,其中养护施工阶段减少的碳排放占总减少碳排放量最高,达 64.51%。

参考文献:
[1] 张海涛,孟良,吕丽华.基于 LCA 的沥青路面设计参数对碳排放的影响[J].公路交通科技,2018,35(2):1-7.
[2] CHOI J-H. Strategy for reducing carbon dioxide emissions from maintenance and rehabilitation of highway pavement[J]. Journal of Cleaner Production, 2019(209): 88-100.
[3] 李頔.基于 LCA 的城市道路养护工程施工活动及交通影响碳排放

- 研究[D].西安:长安大学,2019.
- [4] MA F, DONG W, FU Z, *et al.* Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from asphalt pavement maintenance: A case study in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021(288): 125595.
- [5] LIU Q, YI X, FALCHETTO A C, *et al.* Carbon emissions quantification and different models comparison throughout the life cycle of asphalt pavements[J]. *Construction and Building Materials*, 2024(411): 134323.
- [6] WANG H, AL-SAADI I, LU P, *et al.* Quantifying greenhouse gas emission of asphalt pavement preservation at construction and use stages using life-cycle assessment[J]. 2020, 14(1): 25-34.
- [7] ZHENG X, EASA S M, YANG Z, *et al.* Life-cycle sustainability assessment of pavement maintenance alternatives: Methodology and case study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019(213): 659-672.
- [8] JTG 5210—2018,公路技术状况评定标准[S].
- [9] 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]. *材料导报*, 2024(20): 118-127.
- [10] 李雪连,崔之靖,吕新潮,等.就地热再生沥青混合料均匀性的细观评价指标[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(10): 254-264.
- [11] 杨强光.沥青路面典型再生工艺能耗与碳排放量化研究[D].广州:华南理工大学,2022.
- [12] 刘士南,王厚植,张磊,等.基于全寿命周期的环氧再生路面碳排放研究[J]. *材料导报*, 2022, 36(20): 121-128.
- [13] 陈宇亮,黄毅,彭孝南,等.就地热再生沥青路面建设期能耗与碳排放分析[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2022, 42(4): 30-39.
- [14] YAO Y, YANG J, GAO J, *et al.* Strategy for improving the effect of hot in-place recycling of asphalt pavement[J]. *Construction and Building Materials*, 2023(366): 130054.
- [15] CAO R, LENG Z, HSU S-C. Comparative eco-efficiency analysis on asphalt pavement rehabilitation alternatives: Hot in-place recycling and milling-and-filling[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019(210): 1385-1395.
- [16] JTG/T 3832—2018,公路工程预算定额[S].

(上接第183页)

- zhengce/zhengceku/2019-09/29/content_5434669.htm.
- [12] 王俊岭,熊玉华,张现国,等.基于AHP-模糊综合评价法的城市排水管网状态和运行效能评价——以淮安市淮安区为例[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(4): 1162-1169.
- [13] 关于印发《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》的通知[EB/OL]. (2021-06-06) [2024-04-18]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/202106/20210616_250477.html.
- [14] CJJ 68—2016,城镇排水管道与泵站运行、维护及安全技术规程[S].
- [15] GB 50014—2021,室外排水设计规范[S].
- [16] TCECS 758—2020,城镇排水管道混接调查及治理技术规程[S].
- [17] SSHZ 10005—2016,上海市分流制地区雨污混接调查技术导则[S].
- [18] GB 50268—2008,给水排水管道工程施工及验收规范[S].
- [19] 骆正清,杨善林.层次分析法中几种标度的比较[J]. *系统工程理论与实践*, 2004(9): 51-60.
- [20] 张彦晶,彭海琴,东阳,等.城市排水系统运行综合风险评估指标体系构建与应用[J]. *中国市政工程*, 2021(6): 88-92, 131.
- [21] 住房和城乡建设部,生态环境部,国家发展改革委,财政部,市场监管总局.住房和城乡建设部等5部门关于加强城市生活污水管网建设和运行维护的通知[EB/OL]. (2024-03-08) [2024-04-19]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202403/content_6940086.htm.
- [22] 周乙新,李激,王燕,等.城镇污水处理厂低浓度进水原因分析及提升措施[J]. *环境工程*, 2021, 39(12): 25-30.
- [23] 周小国,惠二青,彭寿海,等.长江沿线污水处理厂进水BOD₅浓度与管网运营调查分析[J]. *给水排水*, 2021, 57(增刊1): 129-133.