

道路沥青混凝土碳减排决策分析方法研究

赵炜诚

(上海浦东建设股份有限公司, 上海市 200126)

摘要: 为深入分析道路沥青混凝土生命周期碳排放,科学制定碳减排对策,以沥青混凝土的原材料准备、生产加工、摊铺施工为研究阶段,分别对基于层次分析法以及排放因子法的碳减排决策分析方法进行研究和总结,总结两种方法的特点和适用性。提出采用两种方法相结合的对策,首先运用排放因子法计算各研究阶段的碳排放和比重,提出主要的碳减排方案,再结合专家打分法,在充分收集专家意见的基础上,进一步采用层次分析法,将所提出的碳减排方案进行权重分析和相对优先排序,得到最终的碳减排决策方案。

关键词: 沥青混凝土;碳排放;碳减排;层次分析法;排放因子法

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)05-0258-04

Research on Decision Analysis Method for Carbon Emission Reduction of Road Asphalt Concrete

ZHAO Weicheng

(Shanghai Pudong Construction Co., Ltd., Shanghai 200125, China)

Abstract: To conduct an in-depth analysis of the carbon emissions throughout the life cycle of road asphalt concrete and scientifically formulate the carbon reduction countermeasures, taking the preparation of raw materials, production and processing, and paving construction of asphalt concrete as the research stage, the carbon emission reduction decision and analysis methods based on the analytic hierarchy process (AHP) and emission factor method are studied and analyzed, and the characteristics and applicability of the two methods are summarized. It is proposed to adopt the countermeasures of combining the two methods. Firstly, the emission factor method is used to calculate the carbon emission and proportion of each research stage, and the main carbon reduction schemes are proposed. Then, combined with the expert scoring method, on the basis of fully collecting the expert opinions, the AHP is further used to carry out the weight analysis and the relative priority sorting of carbon emission reduction schemes in order to obtain the final decision schemes of carbon emission reduction.

Keywords: asphalt concrete; carbon emissions; carbon reduction; analytic hierarchy process (AHP); emission factor method

0 引言

为应对全球气候变化我国提出了“双碳”目标。当前,全国建筑行业领域正在大力开展节能降碳工作,取得了积极进展。在市政工程建设领域,对道路沥青混凝土生命周期的碳排放组成和碳减排决策分析方法进行研究,有利于推进碳减排决策分析方法的完善和新技术、新材料、新工艺等的应用,推动行业节能、降碳水平,助力建设“美丽中国”并顺利实现“双碳”目标^[1]。

层次分析法是一种定性与定量相结合的分析方

法^[2],而排放因子法是一种定量分析方法。以道路沥青混凝土生命周期的材料准备、混合料生产加工、摊铺施工为研究阶段,对基于层次分析法的碳减排决策分析方法,以及基于排放因子法的碳减排决策分析方法进行研究分析,并总结两种方法的特点和适用性,可为今后道路沥青混凝土碳减排工作提供一些经验借鉴。

1 生命周期和研究阶段的确定

生命周期评价方法已被广泛应用于碳排放与能耗等的计算分析中^[3]。根据《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019),建筑碳排放生命周期及相应的计算边界为与建筑物建材生产及运输、建造及拆除、运行等活动相关的温室气体排放的计算范围^[4]。

收稿日期: 2025-01-16

作者简介: 赵炜诚(1977—),男,博士,高级工程师,从事市政和建筑工程建设管理工作。

而沥青混凝土作为工程建设领域的一种材料或产品,按照生命周期理论,一般可划分为材料准备、生产加工、摊铺施工、保养维护和路面拆除等多个阶段。其中保养维护阶段由于受地区气候条件、交通荷载和养护状况等综合因素影响较大,以及路面拆除阶段由于后期处置和决策条件较为复杂,造成这两个后期阶段的碳排放差异较大。因此,考虑以材料准备、生产加工、摊铺施工 3 个阶段来进行分析研究。

其中材料准备阶段是指根据沥青混合料配合比设计确定沥青混合料的组成原材料,从原材料的开采或加工、原材料运输到混合料生产基地的过程,主要由材料准备的碳排放和运输过程产生的碳排放组成。

生产加工阶段是指沥青混合料在基地内生产的过程,主要由材料保温、混合料加热和拌合等过程产生的碳排放组成。

摊铺施工阶段是指沥青混合料产品由沥青混合料拌合厂或生产基地运输到施工现场、进行现场摊铺和碾压的过程,主要由产品运输、现场施工过程产生的碳排放组成。

2 基于层次分析法的碳减排决策分析方法

2.1 层次分析法简述

层次分析法是一种定性和定量相结合^[5],通过构建各准则之间两两比较矩阵和判断矩阵的特征向量(权值)来确定最优方案的方法^[6];同时,可将人的主观性依据用数量的形式表达出来,使之条理化、科学化^[7]。可采取以下步骤。

第一步是建立层次结构模型。层次结构一般分为三个层次,即:高层、中间层和底层。其中高层,即目标层;中间层,即准则层,是指采取的主要措施和准则等,每层有多个元素,可以有多个中间层;底层,即方案层,是具体方案,每层有多个元素。可以根据上述逻辑绘制出层次结构模型图。

第二步是构造比较判断矩阵。通常采取两两比较的方法^[8],并以比较标度 a_{ij} (下一层次的第*i*个因素和第*j*个因素的相对重要性认识)来组成比较判断矩阵。

第三步是进行单准则下的层次排序以及一致性检验^[8]。根据比较判断矩阵,求出最大特征值和特征向量^[9],再得到单层次排序的重要性权重向量、一致性指标和一致性比例^[8]。

第四步是进行层次总排序和一致性检验。计算中间层相对于高层的排序向量,底层相对于中间层的排序向量,并计算底层相对于高层的排序向量,再进行一致性检验。由底层相对于高层的排序向量得到各评估因子的权重值和重要性排序。最终根据分析结果决策各方案实施的先后次序。

2.2 建立层次结构模型

以沥青混凝土材料准备、生产加工、摊铺施工过程为计算的基础范围,拟定该模型的高层(第一层)为总目标 A:实现碳减排对策。

中间层(第二层)为方案评价准则层 B,通过以往经验总结和业内专家意见征询结果,拟定为:材料减碳 B1、生产设备节能 B2、运输和施工机械节能 B3。

底层(第三层)为具体的方案层 C,也是通过以往经验总结和业内专家意见征询结果,拟定可供选择的主要方案为:优化材料配合比 C1、材料就近采购运输 C2、旧料利用 C3、拌合厂工艺改进 C4、智能化控制 C5。

根据上述逻辑,进一步绘制出决策分析的层次结构模型(见图 1)。

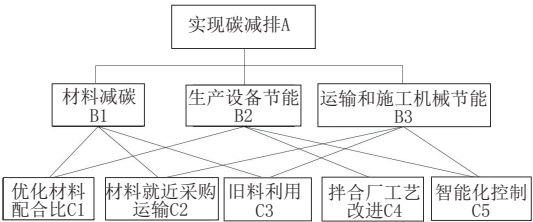


图 1 决策分析层次结构模型图

2.3 构造比较判断矩阵

通过专家打分法确定两个层次之间相对应的重要性权数。其中中间层(准则层 B)对高层(目标层 A)的两两比较判断矩阵见表 1,底层(方案层 C)对中间层(准则层 B)的两两比较判断矩阵如表 2 至表 4 所列。

表 1 A-B 两两比较判断矩阵

相关因素	B1	B2	B3
B1	1	3	4
B2	1/3	1	2
B3	1/4	1/2	1

表 2 B1-C 两两比较判断矩阵

相关因素	C1	C2	C3
C1	1	5	7
C2	1/5	1	3
C3	1/7	1/3	1

2.4 层次单排序及其一致性检验

根据比较判断矩阵,求出最大特征值和对应的

表 3 B2-C 两两比较判断矩阵

相关因素	C1	C4	C5
C1	1	1/7	1/5
C4	7	1	2
C5	5	1/2	1

表 4 B3-C 两两比较判断矩阵

相关因素	C2	C3	C5
C2	1	1/2	1/3
C3	2	1	2
C5	3	5	1

特征向量,将特征向量进行归一化后,得到相应的单层次单排序重要向权重向量,以及一致性指标 CI 和一致性比例 CR^[8]。层次单排序权重向量和检验指标计算结果见表 5。

表 5 层次单排序权重向量和检验指标计算结果

判断矩阵	权重向量	$\lambda_{\max}$	RI	一致性指标 CI	一致性比例 CR
A-B	$(0.623, 0.240, 0.137)^T$	3.018 3	0.52	0.009 2	0.017 6
B1-C	$(0.724, 0.193, 0.083)^T$	3.065 8	0.52	0.032 9	0.063 3
B2-C	$(0.076, 0.591, 0.334)^T$	3.014 2	0.52	0.007 1	0.013 6
B3-C	$(0.106, 0.633, 0.261)^T$	3.038 7	0.52	0.019 4	0.037 2

其中矩阵的阶数为 n ,平均随机一致性指标为 RI,当 $n=1$ 时,RI 取 0,当 $n=2$ 时,RI 取 0,当 $n=3$ 时,RI 取 0.52,当 $n=4$ 时,RI 取 0.89。A-B、B1-C、B2-C、B3-C 两两比较判断矩阵阶数均为 3,因此 RI 取值为 0.52。

表 5 所列计算结果显示,A-B、B1-C、B2-C、B3-C 所对应的 CR 结果均 <0.1 ,因此层次单排序的一致性检验结果为符合要求。

2.5 层次总排序及其一致性检验

由表 5 得到中间层(准则层 B)对应于高层(目标层 A)的排序向量为:

$W^{(2)}=(0.623, 0.240, 0.137)^T。$

底层(方案层 C)对应于中间层(准则层 B)的排序向量分别为:

$P_1^{(3)}=(0.724, 0.193, 0.083)^T;$

$P_2^{(3)}=(0.076, 0.591, 0.334)^T;$

$P_3^{(3)}=(0.106, 0.633, 0.261)^T。$

可计算底层(方案层 C)对应于高层(目标层 A)的排序向量为:

$W=(P_1^{(3)}P_2^{(3)}P_3^{(3)})W^{(2)}$
 $=(0.469, 0.135, 0.139, 0.142, 0.116)^T。$

由表 5 得:

$CI^{(2)}=(0.032\ 9, 0.007\ 1, 0.019\ 4)^T;$

$CR^{(2)}=(0.063\ 3, 0.013\ 6, 0.037\ 2)^T。$

计算层次总排序的一致性指标 $CI^{(3)}$ ^[10]:

$CI^{(3)}=W^{(2)}CI^{(2)}=0.024\ 9。$

根据平均随机性一致性指标 $RI^{(3)}=0.52$,可计算层次总排序的一致性比例 $CR^{(3)}$:

$CR^{(3)}=CR^{(2)}+CI^{(3)}/RI^{(3)}=0.065\ 4。$

$CR^{(3)}$ 计算结果为 $0.065\ 4<0.1$,因此层次总排序的一致性检验结果为符合要求。

2.6 碳减排决策分析

根据底层(方案层 C)相对于高层(目标层 A)的排序向量 W 计算结果,可以得出为实现碳减排目标,所考虑各方案的相对优先排序为:

优化材料配合比 C1,权重为 0.469;

拌合厂工艺改进 C4,权重为 0.142;

旧料利用 C3,权重为 0.139;

材料就近采购运输 C2,权重为 0.135;

智能化控制 C5,权重为 0.116。

2.7 层次分析法的特点

基于层次分析法的沥青混凝土碳减排决策分析方法,可根据分析结果决策各具体方案实施的先后次序。

该方法是基于总目标为实现碳减排,其方案层和不同因素相对于上一层因素的重要性权数是通过征求意见和专家打分法的方式来确定的。层次分析法的特点是简单、实用,适用性强,定量信息需求少,通过广泛征求意见也避免了决策者的个人主观偏好,是一种定性和定量相结合的分析方法^[11]。

该方法也有其不足之处,其不能提供新的决策方案,且判断矩阵不具有绝对一致性^[12],因此需要在征求过程和专家打分时集思广益,充分听取各方意见,尽可能地确定更为完善的具体方案。

3 基于排放因子法的碳减排决策分析方法

3.1 碳减排计算方法简述

沥青混凝土全生命周期的碳排放量化计算可采用排放因子法,该方法是由 IPCC 提出的一种温室气体排放估算方法^[13],其基本公式为:碳排放量=碳排放活动数据×碳排放因子^[14]。其中碳排放活动数据是指引起碳排放的相关活动量,可根据碳足迹追寻确定,碳排放因子可采用权威机构、部门及相关单位公布的数据^[15]。

基于排放因子法的碳减排决策分析方法是根据碳足迹制定各阶段碳排放计算清单,进一步根据排放因子法基本公式计算出各研究阶段的碳排放以及计算周期的总碳排放,再计算各阶段碳排放的占比

并进行排序,对碳排放占比较高进行碳减排措施的制定,再进一步计算采取碳减排措施后各阶段的碳排放,最终根据分析结果决策各碳减排方案实施的先后次序。

3.2 碳排放计算

以本地区某道路新建工程为例进行分析,道路车行道路面拟采用沥青玛蹄脂碎石混合料 SMA-13 作为沥青上面层。以 100 t 的 SMA-13 沥青混合料成品为计算功能单位,计算其材料准备、生产加工、摊铺施工过程的各阶段碳排放和总碳排放。现场摊铺厚度为 4 cm,混合料生产基地距工程现场以 50 km 计。沥青混合料配合比设计拟定材料用量:碎石集料的用量为 83.48%,矿粉的用量为 10.32%,沥青的用量为 5.9%,木质素纤维的用量为 0.3%。根据项目情况可计算项目工程量清单,确定建材定额消耗的种类及数量、工程机械设备的型号规格及数量^[16]。根据碳排放核算标准,碳排放计算以二氧化碳当量(CO₂e)表示^[17]。

通过调研,以本地区特点和沥青混凝土各阶段的生产、施工工艺和流程等为前提条件,根据具体的碳足迹和碳排放清单,采用排放因子法计算得到生产和摊铺施工 100 t SMA-13 沥青混合料的碳排放总量为 5 610.5 kgCO₂e。其中:材料准备阶段的碳排放 EA1 为 1 847.7 kgCO₂e,材料运输阶段的碳排放 EA2 为 884.2 kgCO₂e,生产加工阶段的碳排放 EB 为 2 112.4 kgCO₂e,产品运输阶段的碳排放 EC1 为 1 884.2 kgCO₂e,现场施工阶段的碳排放 EC2 为 121.3 kgCO₂e。

各阶段碳排放计算清单如表 6 所列。

表 6 碳排放清单

序号	分阶段碳排放组成	碳排放清单
1	材料准备阶段碳排放 EA	材料用量
		材料碳排放因子
		运输距离
2	生产加工阶段碳排放 EB	运输方式所耗能源碳排放因子
		生产过程能源消耗量
		生产过程所耗能源碳排放因子
3	施工摊铺阶段碳排放 EC	成品运输至现场的运输距离
		运输过程所耗能源碳排放因子
		施工机械所用台班数
	现场施工 EC2	施工过程所耗能源碳排放因子

3.3 碳减排决策分析

对计算所得的各阶段碳排放,按其占总碳排放

的占比,由大到小进行排序,其中:占比最高的是混合料生产加工阶段 EB,占比为 37.65%;其次是原材料准备阶段 EA1,占比为 32.93%;另外,还有原材料运输到厂阶段 EA2,占比为 15.76%,成品运输阶段 EC1,占比为 11.50%,施工摊铺阶段 EC2,占比为 2.16%。

为实现碳减排目标,按该项目碳排放清单的组成及各自占比,可提出相对应的主要碳减排措施排序为:混合料生产加工工艺改进、拌合设备的节能优化、废旧材料的回收利用、减少材料的平均运距^[18]、材料和成品集约化运输、施工摊铺设备的智能化改造等。

3.4 排放因子法的特点

基于排放因子法的碳减排决策分析方法,通过碳足迹追寻、碳排放清单制定和碳排放计算,分析各阶段碳排放占比,提出合适的碳减排措施^[19]及排序。

该方法是一种定量分析方法,相对而言基础数据获取较为容易,计算简单,结果直观,适用性也较强,可延伸应用于其它类型的碳排放计算。尤其是应用建设工程施工碳排放定额估算法^[20],可以较容易获得较为全面的碳排放清单。

但由于各地区存在着一定的差异性,碳排放因子等的取值差异所带来的计算结果可能也有较大差异。另外,各碳减排方案不能直接进行相对量化的优先排序,还需要进一步地计算采取碳减排措施后的碳排放情况再进行比对排序。

4 结 语

基于层次分析法的碳减排决策分析方法,和基于排放因子法的碳减排决策分析方法,均适用于沥青混凝土生命周期的碳减排决策分析,各有其特点。

在实际工作中,为更合理地制定碳减排决策措施,可采用两种方法相结合的方式。首先可以根据本地区的特点,运用排放因子法,计算各阶段的碳排放和占比,提出具体的对策方案,再结合广泛征求意见和专家打分法方式,收集专家意见,进一步采用层次分析法,将所提出的碳减排方案进行权重分析和相对优先排序,最终得到碳减排决策措施。基于两种方法相结合的碳减排决策分析方法,可为行业相关单位进一步开展和实施碳减排措施提供一定的参考决策依据。

(下转第 274 页)