

# 热拌沥青混合料碳排放量化与评价体系

彭 波<sup>1</sup>, 邓海龙<sup>1</sup>, 曹世江<sup>2</sup>, 李文瑛<sup>3</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081; 3. 西安公路研究院, 陕西 西安 710003)

**摘 要:**为解决目前尚未建立热拌沥青混合料碳排放评价体系,无法正确反映沥青混合料碳排放水平和进一步开展沥青路面低碳减排工作等问题,通过对中国 21 条高等级公路沥青路面的碳排放来源调查,结合联合国政府间气候变化专门委员会和中国国家统计局提供的计算参数,建立了热拌沥青混合料能耗碳排放量化模型和高温挥发碳排放量化模型。运用层次分析法(AHP)得出不同种类沥青混合料碳排放的权重,依据同种沥青混合料在各个碳排放环节中的权重系数和碳排放量,采用海明贴近度理论,明确了同类沥青混合料在各施工环节碳排放总量的加权均值,并结合中国“十三五”规划提出的温室气体减排要求,提出了不同类型沥青混合料的碳排放总量评价标准及各施工环节的碳排放评价标准。研究结果表明:集料加热、沥青加热和混合料拌合环节的能耗碳排放分别占热拌沥青混合料能耗碳排放总量的 65.62%、15.30%和 12.22%;碾压、摊铺环节的高温挥发碳排放分别占沥青混合料高温挥发碳排放总量的 91.56%和 7.02%;以中国减排目标值、实测碳排放均值为碳排放分级评价界限,将热拌沥青混合料碳排放水平分为 A 级(轻度排放)、B 级(中度排放)、C 级(重度排放)。该研究成果提供了不同类型沥青混合料的碳排放评价指标,对指导沥青路面低碳施工具有积极意义。

**关键词:**道路工程;碳排放;量化模型;层次分析法;评价体系

**中图分类号:**U416.217 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.03.001

## Carbon emission quantification and evaluation system of hot mix asphalt mixture

PENG Bo<sup>1</sup>, DENG Hai-long<sup>1</sup>, CAO Shi-jiang<sup>2</sup>, LI Wen-ying<sup>3</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Guiyang Engineering Corporation Limited of Power China, Guiyang 550081, Guizhou, China; 3. Xi'an Highway Institute, Xi'an 710003, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to solve the problems that a carbon emission evaluation system for hot mix asphalt mixture was not yet to be established, the carbon emission level of an asphalt mixture could not be correctly identified, and reduction of carbon emission in asphalt pavement needs further studied, the carbon emission sources for 21 high-grade asphalt pavements in China was adopted. The emission source survey, combined with the calculation parameters provided by the UN Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and the National Bureau of Statistics of

收稿日期:2019-01-20

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2011JM7001);陕西省交通运输厅科技计划项目(15-08K);

甘肃省交通运输厅科研项目(201227);三门峡市科技发展计划项目(2014050406)

作者简介:彭 波(1970-),男,陕西西安人,教授,工学博士,E-mail:pengb8888@126.com。

China, a quantitative model for energy consumption carbon emissions of a hot mix asphalt mixture and a quantitative model for high temperature volatile carbon emissions were established. The weight of the carbon emissions for different asphalt mixture types was obtained by using an analytic hierarchy process (AHP). According to the weight coefficients and carbon emission of the same kind of asphalt mixture in each carbon emission link, the same kind of asphalt mixtures were identified using Hamming closeness theory. In the weighted average of the total carbon emissions in each construction link, combined with the emission reduction requirements proposed in the China “13th Five-Year Plan”, the evaluation standard for the total carbon emission for different asphalt mixture types and the carbon emissions of various construction links were proposed. The results show that the energy consumption carbon emissions for aggregate heating, asphalt heating, and mixture mixing account for 65.62%, 15.30%, and 12.22% of the total carbon emissions of the asphalt mixture, respectively. The high temperature of rolling and paving the volatile carbon emissions accounted for 91.56% and 7.02% of the high-temperature volatile carbon emissions of the asphalt mixture, respectively, and the China emission reduction target values and the measured carbon emission mean values are used as the carbon emission classification evaluation limits. The hot mixed asphalt mixture carbon emission level are divided into three types: A (mild emissions), B (medium emissions), and C (severe emissions). The research results provide evaluation indexes for carbon emissions of different types of asphalt mixtures, and these indexes are significant for ensuring low carbon concentrations in asphalt pavements. 7 tabs, 1 fig, 22 refs.

**Key words:** road engineering; carbon emission; quantitative model; analytic hierarchy process; evaluation system

## 0 引 言

随着全球温室气体排放量的与日俱增,产生的冰川融化、极端天气频发等问题已引起世界各国的密切关注。中国环境状况数据显示:自 1951 年以来,全国平均气温呈不断上升趋势,2016 年全国平均气温高达  $10.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>。美国政府发布的《气候科学特别报告》指出:若不采取减排对策,预计到 2100 年全球年平均气温将会比工业化前提高  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[2]</sup>。公路交通行业是温室气体排放的“重灾区”,以中国当前交通行业碳排放的发展趋势,预计到 2030 年将达到年排放 11.08 亿吨<sup>[3]</sup>。

沥青路面具有行驶舒适、噪音低、便于养护维修等优点,在中国高等级路面结构中被广泛采用。热拌沥青混合料以较好的路用性能和成熟的施工工艺多作为沥青路面面层材料,但在其生产、运输和施工过程中会产生大量的温室气体,为此,国内外学者开展了大量研究。Santos 等建立了路面生命周期成本评估模型,从整个生命周期的角度研究热拌沥青混合料(HMA)、温拌沥青混合料(WMA)和预防性处理等解决方案的碳排放程度,通过减少 HMA 和

WMA 混合料中的原始粘合剂和原始骨料含量,以减少混合料产生的能量消耗和排放<sup>[4]</sup>。Galatioto 等以英国城际道路为例,探讨了扩大道路路面生命周期评估(LCA)系统边界的影响,包括维护期间延误而增加的交通排放,认为与维护过程相比,道路工程延误造成的额外交通排放相对较小<sup>[5]</sup>。Wang 等应用生命周期评估模型分别对沥青路面和水泥混凝土路面在材料生产、施工及运营使用阶段的能耗和温室气体排放情况进行了分析,并对比研究了沥青路面和水泥混凝土路面在运营使用阶段,因路面平整度及滚动阻力的不同对交通车辆的能耗和排放的影响,结果表明,对于交通繁忙的公路项目,改善运营期间使用的路面状况可有效降低道路的能耗和温室气体排放问题<sup>[6]</sup>。Noland 等研究表明,采用 WMA 和生物燃料可降低路面温室气体的排放量<sup>[7]</sup>。Schlegel 等发现在 HMA 中添加改性剂(熟石灰),对降低沥青混合料能源消耗及其产生的温室气体效果显著<sup>[8]</sup>。Keijzer 等研究表明,低能量沥青和再生剂的应用具有很高的碳减排潜力<sup>[9]</sup>。许宪硕以  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  三种温室气体为研究对象,对中国常用的能源类型进行温室气体排放系数量化分

析,进而测算出各行业的温室气体排放量,采用对数平均权重(LMDI)分解法对中国能源碳排放的影响因素进行了研究<sup>[10]</sup>。柴明明等运用 LCA 方法对地热再生沥青路面建设期的材料在生产与施工阶段排放的温室气体进行了分析,并从新旧材料掺配比例和运输距离方面对碳排放的影响进行了研究<sup>[11]</sup>。蔺瑞玉提出了沥青面层和水泥稳定类半刚性基层的碳排放量计算模型,并对比分析了冷拌、温拌、热拌沥青混合料面层的能耗和碳排放量<sup>[12]</sup>。胡玥建立了基于生命周期的集对分析与可变模糊集耦合的评价方法,并确定了两级量化评价指标,对路面能耗和环境碳排放进行了量化分析<sup>[13]</sup>。

综上,现有研究主要集中在通过技术措施减少路面建设的碳排放量,对沥青路面量化也仅停留在建设期能源消耗产生的碳排放,且量化过程多以施工定额提供的数据为基础,数据存在滞后性,忽略了高温环境下不同类型沥青混合料自身挥发产生的碳排放;同时,对于热拌沥青混合料碳排放评价体系的研究也较

少。为此,本文通过对碳排放来源进行分析和数据调查,建立沥青混合料能源消耗和高温挥发碳排放量化模型,提出了不同类型沥青混合料碳排放总量和各施工环节碳排放评价标准。研究成果对于指导低碳施工、建设低碳环保型绿色道路具有积极意义。

## 1 碳源分析与数据调查

为量化热拌沥青混合料碳排放,首先对碳排放来源(碳源)进行分析。对中国高等级公路沥青路面建设过程调查发现,热拌沥青混合料的施工流程基本一致,分为 3 个阶段、7 道工序。笔者课题组对陕西、甘肃、河南、云南等地 21 条高等级公路沥青路面项目调查得知,热拌沥青混合料在生产、运输、施工阶段使用的机械设备的能源主要为柴油、重油、原煤、电力、天然气,能源使用会产生碳排放;同时,高温环境下,沥青混合料高温挥发会产生温室气体。故热拌沥青混合料的碳源可分为能耗碳排放和混合料高温挥发碳排放,如图 1 所示。

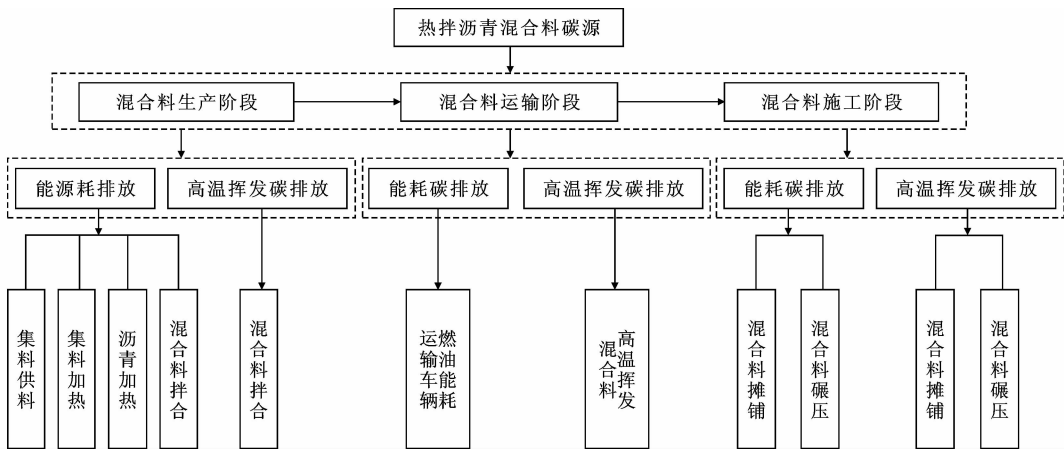


图 1 热拌沥青混合料碳源  
Fig. 1 Hot mix asphalt mixture carbon sources

为计算热拌沥青混合料能耗碳排放,需要调查各个项目路段路面结构材料及对应环节的基本信息和数据参数以计算能耗,各道路项目能耗如表 1 所示。以道路项目编号 A~U 表示 21 条高等级公路,其中,编号 A~K、L~N、O~U 的沥青混合料类型分别为 SBS 改性沥青混合料、橡胶改性沥青混合料、基质沥青混合料。

## 2 碳排放量化

### 2.1 能耗碳排放量化模型

热拌沥青混合料各施工环节使用的能源类型和能耗量化存在差异,因此,必须明确碳排放计算参数以建立混合料能耗碳排放模型。本文采用联合国政

府间气候变化专门委员会(IPCC)和国家统计局提供的碳排放因子(CEF)、能源热值(Q)和全球增温潜势值(GWP)<sup>[14-16]</sup>为能耗碳排放的计算参数,碳排放因子如表 2 所示。CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 的全球增温潜势值分别为 1、28、265<sup>[17]</sup>。原煤、重油、柴油的能源热值分别为 20.908、41.816、42.652 MJ/kg,天然气能源热值为 38.931 MJ/m<sup>3</sup>,电力能源热值为 3.6 MJ/(kW·h)。

依据表 1、表 2 给出的能耗量和碳排放因子,建立热拌沥青混合料在生产、施工过程中能源消耗产生的温室气体量化模型,见式(1);在此基础上,通过全球增温潜势值可将各种温室气体等效成当量 CO<sub>2</sub>,建立热拌沥青混合料生产、施工过程中各个环

表 1 热拌沥青混合料各阶段的能耗

Tab. 1 Energy consumption list of hot mix asphalt mixture at each stage

道路项目 编号	生产阶段				运输阶段	施工阶段	
	集料供料(柴油)/ (L·t <sup>-1</sup> )	集料加热/ (kg·t <sup>-1</sup> )	沥青加热/ (kg·t <sup>-1</sup> )	混合料拌合(电 能)/(kW·h)	混合料运输(柴 油)/(L·t <sup>-1</sup> )	混合料摊铺(柴 油)/(L·t <sup>-1</sup> )	混合料碾压(柴 油)/(L·t <sup>-1</sup> )
A	0.156	6.142(重油)	1.226(重油)	2.507	0.030	0.176	0.229
B	0.172	6.007(重油)	2.195(原煤)	3.478	0.044	0.129	0.178
C	0.166	5.981(重油)	2.202(原煤)	3.257	0.035	0.144	0.286
D	0.193	6.762(天然气)	1.403(天然气)	3.200	0.027	0.182	0.277
E	0.150	11.725(原煤)	2.733(原煤)	2.400	0.048	0.170	0.218
F	0.169	6.007(重油)	2.021(原煤)	3.200	0.028	0.131	0.188
G	0.134	6.321(天然气)	1.114(重油)	3.333	0.044	0.155	0.207
H	0.155	5.822(重油)	1.224(重油)	2.500	0.038	0.180	0.299
I	0.191	6.228(重油)	2.524(原煤)	3.000	0.045	0.151	0.224
J	0.176	6.276(重油)	2.733(原煤)	3.200	0.039	0.175	0.241
K	0.149	6.149(重油)	2.683(原煤)	3.300	0.036	0.167	0.188
L	0.189	7.024(天然气)	1.432(天然气)	3.333	0.038	0.144	0.237
M	0.179	6.554(重油)	1.262(重油)	3.214	0.045	0.151	0.313
N	0.161	6.483(重油)	2.838(原煤)	2.400	0.029	0.183	0.270
O	0.162	5.863(重油)	2.240(原煤)	3.152	0.027	0.158	0.283
P	0.129	6.540(天然气)	1.981(原煤)	3.000	0.039	0.128	0.169
Q	0.158	6.192(天然气)	1.917(原煤)	3.214	0.033	0.143	0.188
R	0.142	6.321(天然气)	2.031(原煤)	3.000	0.043	0.155	0.231
S	0.173	5.941(重油)	2.440(原煤)	2.400	0.035	0.186	0.275
T	0.168	5.545(重油)	1.780(原煤)	3.333	0.030	0.173	0.269
U	0.185	5.730(重油)	1.147(重油)	2.240	0.025	0.168	0.330

表 2 能耗碳排放因子

Tab. 2 Energy consumption carbon  
emission factors

		mg·MJ <sup>-1</sup>				
能源类型		原煤	重油	柴油	天然气	电力
碳排放 因子	CO <sub>2</sub>	94 600.0	77 400.0	74 100.0	56 100.0	317 000.0
	CH <sub>4</sub>	1.0	3.0	3.0	1.0	
	N <sub>2</sub> O	1.5	0.6	0.6	0.1	

节的能耗碳排放量化模型,见式(2);并以此建立能耗碳排放总量量化模型,见式(3)

$$G_{HG(ijk)} = \begin{cases} M_{ij}Q_{ij}C_{EF(ijk)} \\ V_{ij}Q_{ij}C_{EF(ijk)} \\ W_{ij}Q_{ij}C_{EF(ijk)} \end{cases} \quad (1)$$

$$C_{Ee(ij)} = \sum_{k=1}^3 (G_{HG(ijk)}G_{WPk})/10^6 \quad (2)$$

$$C_{Ee} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^7 C_{Ee(ij)} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^3 (G_{HG(ijk)}G_{WPk})/10^6 \quad (3)$$

式中: $i$ 为沥青路面施工过程中的3个阶段, $i$ 取1、2、3分别表示沥青混合料的生产、运输和施工阶段; $j$ 为各阶段对应的环节, $j$ 取1、2、3、4分别表示沥青

混合料生产阶段的集料供料、集料加热、沥青加热和沥青混合料拌合环节, $j$ 取5表示运输阶段的混合料运输环节, $j$ 取6、7分别表示施工阶段的混合料摊铺和碾压环节; $k$ 为温室气体类型, $k$ 取1、2、3分别表示CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O; $G_{HG(ijk)}$ 为*i*阶段*j*环节对应的*k*种温室气体排放量(mg/t); $M_{ij}$ 为*i*阶段*j*环节的固体或液体能源消耗量(kg/t); $V_{ij}$ 为*i*阶段*j*环节的气体能源消耗量(m<sup>3</sup>/t); $W_{ij}$ 为*i*阶段*j*环节的电能消耗量(kW·h/t); $Q_{ij}$ 为*i*阶段*j*环节的能源热值; $C_{EF(ijk)}$ 为*i*阶段*j*环节*k*种温室气体的能耗碳排放因子(mg/MJ); $C_{Ee(ij)}$ 为*i*阶段*j*环节的能耗碳排放量(kg/t); $G_{WPk}$ 为*k*种温室气体的全球增温潜势值; $C_{Ee}$ 为沥青混合料能耗碳排放总量(kg/t)。

21条高等级公路路面建设过程的能耗碳排放量化结果如表3所示。

由表3可知,热拌沥青混合料集料加热环节的能耗碳排放所占比重最大、其次为沥青加热环节和沥青混合料拌合环节,集料加热、沥青加热与混合料拌合的能耗碳排放量分别占能耗碳排放总量的65.62%、15.30%和12.22%。由表1可知,集料加

表 3 热拌沥青混合料能耗碳排放量

Tab. 3 Energy consumption carbon emissions of hot mix asphalt mixture

kg · t<sup>-1</sup>

道路编号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
集料供料	0.495	0.546	0.527	0.613	0.477	0.536	0.425	0.493	0.605	0.559	0.764
集料加热	19.941	19.503	19.419	14.783	23.295	19.503	13.819	18.902	20.221	20.376	19.964
沥青加热	3.980	4.361	4.375	3.067	5.430	4.015	3.617	3.974	5.015	5.430	5.331
拌合环节	2.861	3.969	3.717	3.652	2.739	3.652	3.804	2.853	3.424	3.652	3.766
运输环节	0.095	0.140	0.111	0.086	0.152	0.089	0.140	0.120	0.143	0.124	0.114
摊铺环节	0.558	0.409	0.457	0.577	0.539	0.415	0.491	0.571	0.479	0.555	0.530
碾压环节	0.726	0.564	0.907	0.878	0.691	0.596	0.656	0.948	0.710	0.764	0.596
道路编号	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	
集料供料	0.599	0.567	0.511	0.514	0.409	0.501	0.450	0.549	0.533	0.586	
集料加热	15.356	21.279	21.049	19.036	14.297	13.537	13.819	19.290	18.003	18.604	
沥青加热	2.845	4.097	5.639	4.450	3.936	3.809	4.035	4.848	3.536	3.723	
拌合环节	3.804	3.668	2.739	3.597	3.424	3.668	3.424	2.739	3.804	2.556	
运输环节	0.120	0.143	0.092	0.086	0.124	0.105	0.136	0.111	0.095	0.079	
摊铺环节	0.457	0.479	0.580	0.501	0.406	0.453	0.491	0.590	0.549	0.533	
碾压环节	0.751	0.992	0.856	0.897	0.536	0.596	0.732	0.872	0.853	1.046	

热和沥青加热以煤为能源产生的能耗碳排放量最高,重油次之,天然气最少,能源类型对沥青混合料能耗碳排放影响显著,可作为低碳减排的重点。

2.2 高温挥发碳排放量化模型

热拌沥青混合料在拌合、运输、摊铺及碾压环节会产生大量沥青烟尘,其中含有大量 CO<sub>2</sub> 等温室气体形成高温挥发碳排放。因温室气体中含量较高且温室效应显著的气体主要是 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O<sup>[18]</sup>,故本文以 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 为热拌沥青混合料生产过程中温室气体的研究对象。本文采用 ZR-3110 型多气体检测仪对沥青烟尘中的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 进行检测。检测仪由气体收集、粉尘过滤和降温等装置构成,由不同气体的感应器,可分别检测 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 的体积分数。在建立高温挥发碳排放量化模型时,先将 3 种温室气体的体积分数转换为质量浓度<sup>[19]</sup>,见式(4);再建立热拌沥青混合料的高温挥发碳排放量化模型,见式(5)、式(6)

$$\rho_{m(k)} = \frac{M_k}{22.4} (\rho_{v(k)} - \rho_{a(k)}) \frac{273}{273 + T_0} \frac{B_a}{101\,325} \quad (4)$$

$$\begin{cases} C_{Et(ij)} = \frac{\sum_{k=1}^3 (V_{ij} \rho_{m(ijk)} G_{WPk})}{10^6 m} \\ V_{ij} = S v_{ij} t \end{cases} \quad (5)$$

$$C_{Et} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^7 C_{Et(ij)} = C_{Et(14)} + C_{Et(25)} + C_{Et(36)} + C_{Et(37)} \quad (6)$$

式中:ρ<sub>m(k)</sub>为k种温室气体的质量浓度(mg/m<sup>3</sup>);ρ<sub>v(k)</sub>为k种温室气体的体积分数;ρ<sub>a(k)</sub>为检测地点空

气中温室气体的体积分数;M<sub>k</sub>为k种温室气体的相对分子质量;B<sub>a</sub>为气体压强(Pa);T<sub>0</sub>为大气温度;ρ<sub>m(ijk)</sub>为i阶段j环节k种温室气体的质量浓度(mg/m<sup>3</sup>);V<sub>ij</sub>为i阶段j环节高温挥发碳排放计算体积(m<sup>3</sup>);m为沥青混合料出料时每盘料的质量(t);S为沥青混合料检测面面积(m<sup>2</sup>);v<sub>ij</sub>为i阶段j环节气体挥发速度(m/s);t为检测时间;C<sub>Et</sub>为热拌沥青混合料高温挥发碳排放总量;C<sub>Et(ij)</sub>为i阶段j环节的高温挥发碳排放量(kg/t),如C<sub>Et(14)</sub>为1阶段4环节的高温挥发碳排放量。

热拌沥青混合料高温挥发碳排放如表4所示。由表4可知,沥青混合料碾压环节碳排放所占比重最大,摊铺环节碳排放量次之,二者分别占沥青混合料高温挥发碳排放量的91.56%和7.02%,其他环节碳排放量则较少。道路编号A~N所用的SBS改性沥青混合料、橡胶改性沥青混合料的高温挥发碳排放明显高于编号O~U所用的基质沥青混合料。原因是沥青混合料生产施工过程中,改性沥青混合料对材料的加热温度要高于基质沥青混合料,导致改性沥青混合料挥发速度及排放浓度高于基质沥青混合料。因此,在研究减排措施中,应针对沥青混合料的类型开展减排技术措施研究。

3 碳排放评价体系

为确定热拌沥青混合料在各施工环节的碳排放权重,并为评价指标的确定奠定基础,需要对热拌沥青混合料各施工环节碳排放均值占碳排放总量均值

表 4 热拌沥青混合料高温挥发碳排放量

Tab. 4 High-temperature volatile carbon emissions from hot mix asphalt mixture											kg · t <sup>-1</sup>
道路编号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
拌合环节	0.045	0.042	0.040	0.044	0.051	0.033	0.034	0.038	0.037	0.040	0.038
运输环节	0.271	0.255	0.247	0.261	0.318	0.219	0.234	0.245	0.248	0.242	0.244
摊铺环节	1.721	1.655	1.633	1.693	1.809	1.241	1.223	1.422	1.453	1.447	1.432
碾压环节	22.562	19.625	19.468	21.805	25.478	16.656	16.019	17.326	17.407	17.204	17.364
道路编号	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	
拌合环节	0.049	0.046	0.044	0.029	0.023	0.025	0.027	0.032	0.025	0.028	
运输环节	0.297	0.273	0.268	0.194	0.165	0.177	0.172	0.203	0.168	0.181	
摊铺环节	1.742	1.707	1.698	0.963	0.682	0.860	0.825	1.082	0.709	0.871	
碾压环节	22.214	20.629	19.433	14.762	10.623	12.895	13.113	15.190	11.085	12.657	

的比例进行分析,如表 5 所示。

由表 5 可知,基质沥青混合料与 SBS 改性沥青混合料、橡胶改性沥青混合料从生产到施工阶段在各环节  $X_1 \sim X_7$  的碳排放比重虽有不同,但各施工环节的高碳排放环节均为集料加热、沥青加热、混合料拌合和碾压。

表 5 热拌沥青混合料各环节碳排放量均值占碳排放总量均值的比例

Tab. 5 Average values of carbon emissions in all links of hot mix asphalt mixture accounts for proportion of total carbon emissions								%
沥青混合料类型	生产阶段				运输阶段	施工阶段		
	集料供料 $X_1$	集料加热 $X_2$	沥青加热 $X_3$	混合料拌合 $X_4$	运输 $X_5$	摊铺 $X_6$	碾压 $X_7$	
基质沥青混合料	1.268	41.752	10.148	8.380	0.715	3.408	34.329	
SBS 改性沥青混合料	1.049	38.274	8.868	7.031	0.748	4.072	39.958	
橡胶改性沥青混合料	1.082	37.210	8.115	6.676	0.771	4.298	41.848	

3.1 各施工环节碳排放权重分析

各道路项目沥青路面在沥青混合料生产至施工过程中的施工条件及排放情况有差异性,为了避免客观因素对碳排放的影响且为后期评价指标的确立奠定基础,采用层次分析法(AHP)对热拌沥青混合料在各施工环节的碳排放权重进行分析。热拌沥青混合料碳排放权重计算过程如下所述<sup>[20]</sup>。

3.1.1 确定碳排放层次及组成元素

在层次分析法中,以所求的各环节的碳排放权重系数为目标层,依据 21 条高等级公路沥青路面各环节的碳排放均值占同种沥青混合料碳排放总量均值的比重为基准层,见表 3;准则层中的元素以各施工环节中的重要性标度值表示;方案层为沥青混合料从生产到施工阶段所对应的各施工环节。

3.1.2 构造判断矩阵

由表 5 可知,不同类型沥青混合料中各环节的碳排放均值占碳排放总量均值的比重差异性明显,因此,不同类型的沥青混合料在各施工环节所对应的权重亦有所差别。为了便于说明基质沥青混合料与改性沥青混合料碳排放权重的计算方法,以基质沥青混合料为例说明层次分析法求权重的具体方法。

结合表 5 中基质沥青混合料在各施工环节的碳

排放比重及两两元素对比的重要程度标度值,得出目标层判断矩阵  $Y_{7 \times 7}$  为

$$Y_{7 \times 7} = \begin{bmatrix} 1 & 1/9 & 1/6 & 1/5 & 2 & 1/3 & 1/8 \\ 9 & 1 & 5 & 5 & 9 & 7 & 2 \\ 6 & 1/5 & 1 & 2 & 7 & 4 & 1/5 \\ 5 & 1/5 & 1/2 & 1 & 6 & 3 & 1/5 \\ 1/2 & 1/9 & 1/7 & 1/6 & 1 & 1/5 & 1/8 \\ 3 & 1/7 & 1/4 & 1/3 & 5 & 1 & 1/8 \\ 8 & 1/2 & 5 & 5 & 8 & 8 & 1 \end{bmatrix}$$

3.1.3 求判断矩阵的最大特征值和特征向量

在计算判断矩阵的最大特征值和特征向量时,借助 MATLAB 软件,采用迭代法,求得使用基质沥青混合料项目的最大特征值  $\lambda_{\max}$  及特征向量  $w$  的精确解,分别为  $\lambda_{\max} = 7.638\ 7$ ,  $w = (0.052\ 1, 0.728\ 8, 0.243\ 1, 0.178\ 7, 0.040\ 2, 0.099\ 0, 0.603\ 0)^T$ 。

3.1.4 一致性检验

在求得最大特征值后,需对判断矩阵进行一致性检验,7 阶判断矩阵的平均一致性指标  $R_{RI}$  值为 1.32,因此,矩阵一致性指标  $C_{CI} = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) = (7.638\ 7 - 7)/(7 - 1) = 0.106\ 5$ 。其中  $n$  为目标层判断矩阵的阶数,  $n = 7$ 。得出  $R_{RI}$  值、 $C_{CI}$  值后,进而得出随机一致性比率  $C_{CR} = C_{CI}/R_{RI} = 0.106\ 5/1.32 = 0.080\ 6 < 0.10$ 。通过对目标矩阵

进行一致性检验可知,随机一致性比率的计算结果满足  $C_{CR} \leq 0.10$ ,表明层次分析法计算结果具有满意的可信度。

3.1.5 基质沥青混合料的碳排放权重计算

对于通过一致性检验要求的目标矩阵,可对最大特征值所对应的特征向量  $w$  进行量纲一化处理,得到基质沥青混合料各施工环节的碳排放权重  $\bar{w} =$

$$w/\sum_{j=1}^7 w_j = (0.026\ 8, 0.374\ 7, 0.125\ 0, 0.091\ 9, 0.020\ 7, 0.050\ 9, 0.310\ 0)^T$$
。其中,  $w_j$  为  $w$  的元素。

其他类型的沥青混合料计算方法与基质沥青混合料一致,通过计算可知,SBS 改性沥青混合料与橡胶改性沥青混合料均通过一致性检验,3 种沥青混合料的碳排放权重系数如表 6 所示。

表 6 不同类型沥青混合料各环节碳排放的权重系数

沥青混合料类型	施工环节						
	集料供料 $X_1$	集料加热 $X_2$	沥青加热 $X_3$	混合料拌合 $X_4$	运输 $X_5$	摊铺 $X_6$	碾压 $X_7$
基质沥青混合料	0.026 8	0.374 7	0.125 0	0.091 9	0.020 7	0.050 9	0.310 0
SBS 改性沥青混合料	0.026 3	0.325 7	0.125 4	0.092 1	0.020 7	0.051 6	0.358 2
橡胶改性沥青混合料	0.026 1	0.328 1	0.091 1	0.124 0	0.020 1	0.050 3	0.360 3

由表 6 可知,集料加热、沥青加热、混合料拌合及碾压环节的碳排放权重较大,这与量化过程中得出的高碳排放环节相吻合。

3.2 碳排放评价体系的建立

依据不同类型沥青混合料在各环节的碳排放量及权重系数,采用海明贴近度理论<sup>[21]</sup>,分别对不同类型沥青混合料在各环节的碳排放量进行加权均值计算,并结合中国“十三五”规划提出的减排要求<sup>[22]</sup>,建立 3 种沥青混合料的碳排放总量分级评价及各环节的碳排放分级评价标准,构成碳排放评价体系。评价指标的建立步骤如下所述。

3.2.1 计算沥青混合料各施工环节碳排放的隶属度

沥青混合料从生产至施工阶段的碳排放量是由各施工环节的碳排放组成,不同施工环节的碳排放量具有一定的差异性。因此,以沥青混合料各施工环节的碳排放作为组成要素,分别计算使用不同类型沥青混合料在各道路项目中各施工环节碳排放的隶属度,隶属度函数的计算式为

$$u_{gj} = \frac{\sum_{r=1}^{G_n} u_{rj}}{G_n} = \frac{\sum_{r=1}^{G_n} \min C_{Ej} / C_{Egj}}{G_n} \tag{7}$$

式中: $u_{gj}$  为  $g$  类沥青混合料  $j$  环节的综合隶属度; $g$  取 1、2、3 分别表示基质沥青混合料、SBS 改性沥青混合料和橡胶改性沥青混合料; $G_n$  为  $g$  类沥青混合料调查道路项目个数; $u_{rj}$  为第  $r$  个道路项目  $j$  环节碳排放的隶属度; $C_{Egj}$  为第  $r$  个道路项目  $j$  环节的碳排放量。

3.2.2 计算各道路项目中沥青混合料碳排放的海明贴近度

沥青道路项目中沥青混合料的海明贴近度反映

了该项目与同类型沥青混合料的项目在各碳排放组成要素之间的贴近度,主要由各组成要素的权重与其对应的隶属度构成。沥青混合料碳排放的海明贴近度计算式为

$$\rho_{Hg} = 1 - \sum_{j=1}^7 \bar{w}_j |u_{rj} - u_{gj}| \tag{8}$$

式中: $\rho_{Hg}$  为  $g$  类沥青混合料的海明贴近度; $\bar{w}_j$  为  $j$  环节的施工碳排放权重(表 6)。

3.2.3 计算热拌沥青混合料碳排放的加权均值

以沥青路面中同种沥青混合料产生碳排放的贴近度为权重,结合该种沥青混合料的碳排放总量,可实现对同类型沥青混合料产生的碳排放量进行加权均值计算,碳排放加权均值计算式为

$$C_{Egw} = \frac{\sum_{r=1}^{G_n} (C_{Er} \rho_{Hg})}{\sum_{r=1}^{G_n} \rho_{Hg}} \tag{9}$$

式中: $C_{Egw}$  为  $g$  类沥青混合料在道路项目的碳排放量加权均值(kg/t); $C_{Er}$  为第  $r$  个道路项目的碳排放总量(kg/t)。

3.2.4 减排目标值

中国《“十三五”控制温室气体排放工作方案》中提出:到 2020 年,中国单位国内生产总值的碳排放量要实现在 2015 年的基础上降低 18% 的目标<sup>[22]</sup>。为了满足国家政策对减排目标的要求,选取中国“十三五”规划中提出的减排目标值,作为评价现有沥青混合料碳排放水平的一个评价指标。国家减排目标值  $C_{Ep}$  的计算式为

$$C_{Ep} = C_{Egw} (1 - 18\%) \tag{10}$$

式中: $C_{Ep}$  为中国减排目标值的计算参数。

通过对评价指标的研究,明确了以减排目标值、

碳排放加权均值作为分级界限值(轻度排放)的等级划分标准,即以中国减排目标值作为 A 级(轻度排放)、B 级(中度排放)的分级界限值,以碳排放加权均值作为 B 级、C 级(重度排放)的分级界限值。结

合中国 21 条高等级公路沥青路面碳排放评价指标值,本文建立了基质沥青混合料、SBS 改性沥青混合料和橡胶改性沥青混合料从生产到施工阶段的碳排放总量三级评价标准,如表 7 所示。

表 7 热拌沥青混合料碳排放总量评价标准

Tab. 7 Evaluation criterias for carbon emissions from hot mix asphalt mixture									kg · t <sup>-1</sup>
类型	等级	碳排放总量	集料供料	集料加热	沥青加热	混合料拌合	运输	摊铺	碾压
基质沥青混合料	A	(0,32.681]	(0,0.415]	(0,13.645]	(0,3.317]	(0,2.739]	(0,0.234]	(0,1.114]	(0,11.219]
	B	(32.681,39.855]	(0.415,0.506]	(13.645,16.640]	(3.317,4.045]	(2.739,3.340]	(0.234,0.285]	(1.114,1.358]	(11.219,13.682]
	C	(39.855,+∞)	(0.506,+∞)	(16.640,+∞)	(4.045,+∞)	(3.340,+∞)	(0.285,+∞)	(1.358,+∞)	(13.682,+∞)
SBS 改性沥青混合料	A	(0,40.847]	(0,0.428]	(0,15.634]	(0,3.622]	(0,2.872]	(0,0.305]	(0,1.663]	(0,16.321]
	B	(40.847,49.813]	(0.428,0.522]	(15.634,19.066]	(3.622,4.418]	(2.872,3.503]	(0.305,0.372]	(1.663,2.028]	(16.321,19.904]
	C	(49.813,+∞)	(0.522,+∞)	(19.066,+∞)	(4.418,+∞)	(3.503,+∞)	(0.372,+∞)	(2.028,+∞)	(19.904,+∞)
橡胶改性沥青混合料	A	(0,42.438]	(0,0.459]	(0,15.791]	(0,3.444]	(0,2.833]	(0,0.327]	(0,1.824]	(0,17.760]
	B	(42.438,51.754]	(0.459,0.560]	(15.791,19.257]	(3.444,4.200]	(2.833,3.455]	(0.327,0.398]	(1.824,2.224]	(17.760,21.658]
	C	(51.754,+∞)	(0.560,+∞)	(19.257,+∞)	(4.200,+∞)	(3.455,+∞)	(0.398,+∞)	(2.224,+∞)	(21.658,+∞)

4 结 语

(1)对热拌沥青混合料的碳排放来源进行了分析,热拌沥青混合料的碳源可分为能耗碳排放和混合料高温挥发碳排放。

(2)由碳排放因子、能源热值、全球增温潜势值和能耗量,建立能耗碳排放量化模型和高温挥发碳排放量化模型。量化结果表明:集料加热、沥青加热与混合料拌合环节的能耗碳排放分别占能耗碳排放总量的 65.62%、15.30%和 12.22%;沥青混合料碾压、摊铺环节的高温挥发碳排放分别占沥青混合料高温挥发碳排放量的 91.56%和 7.02%;SBS、橡胶改性沥青混合料的碳排放高于基质沥青混合料。

(3)以中国减排目标值、实测碳排放均值作为碳排放分级界限,将热拌沥青混合料碳排放水平分为 A 级、B 级和 C 级。

(4)本文研究的碳排放量化与评价体系仅涉及道路沥青路面建设阶段,且主要针对沥青面层,下一步研究应扩大沥青混合料类型,同时开展对原材料生产、道路运营和养护阶段的碳排放研究。

参考文献:

References:

[ 1 ] 中华人民共和国环境保护部. 2016 中国环境状况公报 [EB/OL]. (2017-06-06) [2018-08-15]. [http://www.gov.cn/xinwen/2017-06/06/content\\_5200281.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2017-06/06/content_5200281.htm).

People's Republic of China Ministry of Environmental Protection. 2016 China environmental status bulletin [EB/OL]. (2017-06-06) [2018-08-15]. [http://www.gov.cn/xinwen/2017-06/06/content\\_5200281.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2017-06/06/content_5200281.htm).

[ 2 ] Climate Science Special Report. Fourth national climate assessment (NCA4), volume I. [EB/OL]. (2017-06-06) [2018-08-15]. <https://science.2017.globalchange.gov/>.

[ 3 ] 喻洁,达亚彬,欧阳斌. 基于 LMDI 分解方法的中国交通运输行业碳排放变化分析[J]. 中国公路学报, 2015,28(10):112-119.

YU Jie, DA Ya-bin, OUYANG Bin. Analysis of carbon emission changes in China's transportation industry based on LMDI decomposition method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(10): 112-119.

[ 4 ] SANTOS J, FLINTSCH G, FERREIRA A. Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 116:15-31.

[ 5 ] GALATIOTO F, HUANG Y, PARRY T, et al. Traffic modelling in system boundary expansion of road pavement life cycle assessment[J]. Transportation Research Part D, 2015, 36:65-75.

[ 6 ] WANG T, LEE I, KENDALL A, et al. Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance [J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 33:89-98.



- [7] NOLAND R B, HANSON C S. Life-cycle greenhouse gas emissions associated with a highway reconstruction: A New Jersey case study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 107: 731-740.
- [8] SCHLEGEL T, PUIATTI D, RITTER H J, et al. The limits of partial life cycle assessment studies in road construction practices: A case study on the use of hydrated lime in hot mix asphalt[J]. *Transportation Research Part D*, 2016, 48: 141-160.
- [9] KEIJZER E E, LEEGWATER G A, DE VOS-EFFTING S E, et al. Carbon footprint comparison of innovative techniques in the construction and maintenance of road infrastructure in The Netherlands[J]. *Environmental Science & Policy*, 2015, 54: 218-225.
- [10] 许宪硕. 我国能源相关温室气体排放影响因素及归因分析研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- XU Xian-shuo. Research on driving forces and attribution analysis of China's energy-related GHG emissions[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [11] 柴明明, 李明, 齐桂才, 等. 就地热再生沥青路面建设期碳排放分析[J]. *公路交通科技*, 2016, 33(10): 148-151.
- CHAI Ming-ming, LI Ming, QI Gui-cai, et al. Analysis of carbon emission during hot in-place recycling asphalt pavement construction[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2016, 33(10): 148-151.
- [12] 蔺瑞玉. 沥青路面建设过程温室气体排放评价体系研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- LIN Rui-yu. Research on greenhouse gas emission evaluation system for asphalt pavement construction[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [13] 胡玥. 基于集对分析-可变模糊集的路面能耗和环境保护研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- HU Yue. Study on pavement energy consumption and environmental emission based on set pair analysis-variable fuzzy set model[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [14] 联合国政府间气候变化专门委员会(IPPC). 2006年IPCC国家温室气体清单指南[R]. 日内瓦: 联合国政府间气候变化专门委员会(IPPC), 2006.
- IPCC. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Geneva: IPCC, 2006.
- [15] 国家统计局能源司. 中国能源统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- Energy Bureau, National Bureau of Statistics. China energy statistics yearbook 2016[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [16] 联合国政府间气候变化专门委员会(IPPC). 气候变化 2014 综合报告[R]. 日内瓦: 联合国政府间气候变化专门委员会(IPPC), 2014.
- IPCC. Climate change 2014 synthesis report[R]. Geneva: IPCC, 2014.
- [17] 陈佳君. 全球变暖潜能值的计算及其演变[J]. *船舶与海洋工程*, 2014(2): 27-31.
- CHEN Jia-jun. On the calculation and evolution of global warming potential[J]. *Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2014(2): 27-31.
- [18] 谢守红, 王利霞, 邵珠龙. 国内外碳排放研究综述[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(4): 720-730.
- XIE Shou-hong, WANG Li-xia, SHAO Zhu-long. Review on carbon emissions researches at home and abroad[J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(4): 720-730.
- [19] 程穆宁, 崔云霞, 陆春松, 等. 能见度与颗粒物质量浓度之间的关系[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(3): 146-151, 168.
- CHENG Mu-ning, CUI Yun-xia, LU Chun-song, et al. Relationships between atmospheric visibility and particle mass concentrations[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(3): 146-151, 168.
- [20] 战尧文. 沥青混合料碳排放计算模型及分级标准研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- ZHAN Yao-wen. Study on the calculation model and grading standard for the CO<sub>2</sub> emission of hot asphalt mixture[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [21] 李莹芳. 贴近度理论及其在模糊推理中的应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- LI Ying-fang. Similarity measures on fuzzy reasoning[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [22] 中华人民共和国国务院. “十三五”控制温室气体排放工作方案[EB/OL]. (2016-10-27) [2018-08-15]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content\\_5139816.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5139816.htm).
- State Council of the People's Republic of China. “13th Five-Year Plan” to control greenhouse gas emissions [EB/OL]. (2016-10-27) [2018-08-15]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content\\_5139816.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5139816.htm).