文章编号：1000-8608(2019)04-0385-08

沥青路面施工期温室气体排放量化方法及减排对策研究

曹世江[1]， 彭 波[*2]， 张 波[1]， 龙康滔[1]， 程振威[1]， 祁义辉[1]

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

摘要： 通过对我国多个省份的10条高速公路沥青路面进行碳源调查与分析并结合IPCC与《中国能源统计年鉴2016》提供的温室气体计算参数，建立了适用于不同能源类型的沥青路面施工期温室气体排放的量化模型，得出了施工期高排放环节及主要影响因素并提出了相应的低碳减排措施.结果表明：沥青路面施工期温室气体排放较高的环节为集料加热、沥青加热及沥青混合料拌合，分别占能源消耗温室气体排放总量的64.66%、14.63%和13.21%；集料加热和沥青加热环节温室气体排放较高的原因在于使用了含碳量较高的煤和重油作为能源，应加大清洁能源天然气的使用.研究成果明确了低碳减排研究方向的同时，对于绿色施工、建设低碳环保型沥青路面具有参考意义.

关键词： 沥青路面；温室气体；量化方法；调查分析；高排放环节；减排措施

中图分类号： U416.217 **文献标识码：** A **doi：** 10.7511/dllgxb201904009

0 引 言

高速公路沥青路面由于其良好的行车舒适性、噪音低且便于养护维修等，目前在国内外得到了广泛应用[1].交通运输部2016年底统计数据显示，我国高速公路通车里程达13.1×10^4 km，总里程位居世界首位[2]，其中，沥青路面所占比重高达75%[3].然而沥青路面施工过程中机械设备的使用会消耗大量不同的能源，而不同能源在使用过程中也会产生相应量的温室气体.

在解决沥青路面温室气体排放量化方法的问题上，国内外道路工作者进行了相关研究.White等基于生命周期理论，建立了一种适用于不同路面类型且能够根据路面宽度、厚度等参数对一条道路的CO_2排放量平均值进行计算的量化模型[4]；Kim等通过对居住地区沥青路面建设项目的调查，建立了适用于当地区域的沥青路面温室气体排放模型，用于评估当地温室气体的排放情况[5]；柴明明等根据温室气体排放系数与活动数据相乘原理建立了就地热再生沥青路面在材料生产及施工阶段的温室气体量化模型[6]；钱琳琳等应用生命周期的分析方法，以施工定额数据为基础对典型沥青路面生产、施工阶段的能源消耗及排放的温室气体进行了量化研究[7].然而，以往的研究主要是依据施工定额计算能源使用过程排放的温室气体，数据多来源于有关机构和政府部门的统计数据[8]，缺乏现场实际调查数据，数据存在着滞后性，且尚未建立针对不同能源类型温室气体排放的量化模型，无法准确量化各施工环节温室气体的排放量并判断产生温室气体的高排放环节，以至于不能有针对性地指导沥青路面低碳减排工作的进行.

基于此，本研究提出一种沥青路面施工期温室气体排放的量化方法，针对沥青混合料在拌合站生产至施工现场进行摊铺及碾压这一高能源消耗高排放过程进行量化研究.为了便于直观地体现沥青路面各施工环节温室气体的排放量并进行对比分析，明确温室气体高排放环节及影响因素，研究以全国10条高速公路沥青路面现场调查与检测数据为支撑，并以具体项目为算例进行量化计算，以期为绿色施工、建设低碳环保型绿色道路提供参考.

收稿日期： 2018-12-19； **修回日期：** 2019-05-30.
基金项目： 陕西省自然科学基金资助项目(2011JM7001)；陕西省交通厅科技计划项目(15-08K).
作者简介： 曹世江(1991-)，男，硕士，E-mail：2232046322@qq.com；彭 波*(1970-)，男，博士，教授，E-mail：382261211@qq.com.

1 沥青路面施工期温室气体排放源调查与边界界定

政府间气候变化专门委员会(IPCC)在《2006年IPCC国家温室气体清单指南》中提出,引起温室效应的气体有多种,而这些温室气体中受人类活动影响较大且温室效应显著的主要有 CO_2、CH_4 和 N_2O[9-11],因此,本文以 CO_2、CH_4、N_2O 3种温室气体为研究对象开展碳源调查及分析.由于这3种温室气体中,CO_2 的温室效应贡献率最高,达到86%,现有研究中主要将各种温室气体等效成相应量的 CO_2 来研究各温室气体产生的温室效应[12].

沥青路面施工是一个各环节相互衔接的过程,应研究不同施工环节的温室气体排放源及排放量,沥青路面施工工艺流程图如图1所示.

由图1可知,沥青路面施工涉及很多环节,但其中有些环节并不产生温室气体,结合现场温室气体排放源调查可知,沥青路面施工期排放的温室气体主要来源于机器设备消耗煤、重油、柴油、电能、天然气等不同的能源,按照沥青路面施工工艺及产生排放源的不同,将施工期排放温室气体的环节划分为料场堆料、集料上料、集料加热等8个环节.

考虑到目前我国沥青路面施工多采用热拌沥青混合料且不同地区沥青路面施工工艺存在一定差异性,为了提高调查数据的准确性且避免其他因素的影响,本研究针对施工工艺及技术指标较高的高速公路沥青路面进行温室气体排放数据的获取工作.在研究中,课题组以我国华北、华中、西北、西南等地区的10条高速公路沥青路面调查与检测数据为支撑,以IPCC及《中国能源统计年鉴2016》提供的计算参数为基础开展本研究[11,13].由于不同施工环节使用的能源类型不同,为了便于统一计算,各环节均以每吨沥青混合料所排放的温室气体为功能单位[14];调查与检测的数据均通过标准差及变异性分析后取平均值作为代表值进行计算.为便于不同高速公路之间温室气体排放量的对比研究,采用编号A～J分别代表相应的10条高速公路,各高速公路能源消耗清单见表1.

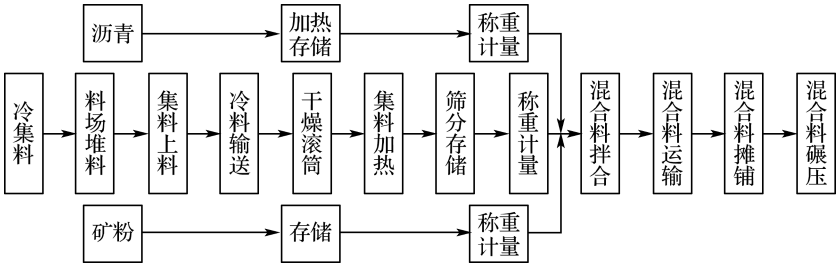

图1 沥青路面施工工艺流程图

Fig.1 Asphalt pavement construction process flow chart

表1 沥青路面施工期各环节能源消耗清单

Tab.1 List of energy consumption in links of asphalt pavement construction period

高速公路编号	料场堆料 M(柴油)/(L·t^{-1})	集料上料 M(柴油)/(L·t^{-1})	集料加热 M(重油)/(kg·t^{-1}); V(天然气)/(m^3·t^{-1})	沥青加热 M(煤、重油)/(kg·t^{-1}); V(天然气)/(m^3·t^{-1})	沥青混合料拌合 W(电)/(kW·h·t^{-1})	沥青混合料运输 M(柴油)/(L·t^{-1})	沥青混合料摊铺 M(柴油)/(L·t^{-1})	沥青混合料碾压 M(柴油)/(L·t^{-1})
A	0.120	0.166	6.482(天然气)	1.521(天然气)	3.215	0.031	0.232	0.329
B	0.137	0.216	6.524(重油)	2.642(煤)	3.206	0.036	0.232	0.329
C	0.113	0.162	6.720(天然气)	1.214(重油)	2.850	0.052	0.160	0.275
D	0.135	0.152	5.822(重油)	1.187(重油)	3.072	0.047	0.172	0.386
E	0.122	0.148	5.941(重油)	2.563(煤)	4.357	0.061	0.257	0.403
F	0.112	0.160	5.863(重油)	2.310(煤)	3.152	0.038	0.144	0.337
G	0.125	0.159	6.149(重油)	2.683(煤)	3.441	0.047	0.182	0.260
H	0.136	0.148	6.142(重油)	1.226(重油)	3.739	0.042	0.165	0.273
I	0.121	0.152	6.007(重油)	2.195(煤)	3.478	0.063	0.155	0.213
J	0.119	0.145	6.228(重油)	2.524(煤)	2.330	0.035	0.133	0.267

2　沥青路面施工期能源消耗温室气体排放的量化研究

在沥青路面各施工环节温室气体来源调查中，明确了温室气体排放源为机械设备使用过程中所消耗的能源. 通过建立各施工环节不同类型的温室气体量化模型，并结合具体项目的调查与检测数据，不仅能直观对比各环节温室气体排放量情况，也便于明确高排放环节及主要影响因素，进而有针对性地开展节能减排对策研究.

2.1　能源消耗温室气体排放量化模型的建立

在建立能源消耗温室气体排放量化模型时，需要选取合适的计算指标和计算参数，用于温室气体计算的统一化和标准化. 在温室气体计算参数的选择上，本研究采用我国政府公布的能源发热值 Q[13]（MJ/kg）作为各种能源的发热量；采用 IPCC 提供的能源温室气体排放因子 f_e（mg/MJ）和全球增温潜势值 P_{gw} 分别表征不同能源产生温室气体的能力及将各种温室气体转换成当量二氧化碳的比值[11,15]. 常见的能源发热值、温室气体排放因子及全球增温潜势值见表 2～4.

表 2　能源发热值

Tab. 2　Energy calorific value

能源类型	Q	能源类型	Q
煤	20.908 MJ/kg	重油	41.816 MJ/kg
天然气	38.931 MJ/m^3	柴油	42.652 MJ/kg
电	3.6 MJ・kW^{-1}・h^{-1}		

表 3　不同能源温室气体排放因子

Tab. 3　Greenhouse gas emission factors for different energy sources

能源类型	温室气体排放因子/(mg・MJ^{-1})		
	CO_2	CH_4	N_2O
煤	94 600	1	1.5
重油	77 400	3	0.6
天然气	56 100	1	0.1
柴油	74 100	3	0.6
电	317 000	—	—

表 4　温室气体全球增温潜势值

Tab. 4　Global warming potential of greenhouse gases

温室气体	增温潜势值
CO_2	1
CH_4	25
N_2O	298

由于各施工环节所使用的能源类型具有一定的差异性且不同能源的计量单位不同，需要根据能源类型建立相应的温室气体量化模型. 在温室气体量化模型中，以 x 代表各施工环节（$x=1,2,\cdots,8$ 分别代表料场堆料、集料上料、集料加热、沥青加热和沥青混合料的拌合、运输、摊铺及碾压）；y 代表温室气体类型（$y=1,2,3$ 分别代表 CO_2、CH_4、N_2O）. 结合温室气体的计算参数和调查结果，可分别得出柴油、煤、电、重油及天然气排放的温室气体量化模型及具体项目能源消耗温室气体排放总量的量化模型.

（1）不同能源消耗温室气体排放的量化模型

$$G_{gh,x}=\begin{cases} M\eta Q\sum_{y=1}^{3}P_{gw,y}f_{e,y}/10^6 \\ WQ_1P_{gw}f_e/10^6 \\ V\eta_1Q_2\sum_{y=1}^{3}P_{gw,y}f_{e,y}/10^6 \end{cases} \tag{1}$$

（2）各施工环节能源消耗温室气体排放总量的量化模型

$$G_{gh}=\sum_{x=1}^{8}G_{gh,x} \tag{2}$$

式中：G_{gh} 为沥青路面排放温室气体的总量（kg/t）；$G_{gh,x}$ 为各施工环节不同能源消耗排放的温室气体（kg/t）；M 为煤、重油、柴油的消耗量（kg/t）；V 为天然气的消耗量（m^3/t）；η 为煤、重油、柴油的能源氧化率（%）；η_1 为天然气的能源氧化率（%）；W 为电能消耗量（kW・h/t）；Q 为煤、重油、柴油的能源发热值（MJ/kg）；Q_1 为电的能源发热值（MJ・kW^{-1}・h^{-1}）；Q_2 为天然气的能源发热值（MJ/m^3）；$f_{e,y}$ 为温室气体排放因子（mg/MJ）；$P_{gw,y}$ 为全球增温潜势值；10^6 为 mg/t 转化为 kg/t 的换算单位.

2.2　能源消耗温室气体排放的量化计算及高排放环节分析

为了便于说明沥青路面能源消耗温室气体排放的量化方法，研究以高速公路 C 为算例，分别进行料场堆料、集料上料、集料加热等 8 个施工环节能源消耗温室气体排放的量化计算.

调查数据显示，柴油的氧化率为 0.98，密度为 0.835 kg/L；煤、重油和天然气的氧化率分别为 0.90、0.98 和 0.99；结合表 1 中高速公路 C 的能源消耗清单、表 2 中能源发热值、表 3 中能源温室气体排放因子、表 4 中温室气体全球增温潜势值，将以上数据分别代入量化模型（1）、（2）中，可

得出高速公路 C 中各施工环节消耗能源所产生的温室气体,结果如表 5 所示.

从表 5 中可以看出,各环节的温室气体排放量差异很大,温室气体排放量最高的环节为集料加热,其次为沥青加热和沥青混合料拌合环节,其余各环节温室气体排放量均较小.为了排除单一路段数据结果的偶然性,在采用相同量化模型和指标的基础上,研究通过将具体项目调查数据代入量化模型,得出所调查的 10 条高速公路各施工环节的温室气体排放量,结果如图 2 所示.

表 5 高速公路 C 沥青混合料能源消耗温室气体排放清单

Tab. 5 Greenhouse gas emission list of energy consumption of asphalt mixture in highway C

各施工环节能源消耗温室气体排放量/(kg·t^{-1})								
料场堆料	集料上料	集料加热	沥青加热	沥青混合料拌合	沥青混合料运输	沥青混合料摊铺	沥青混合料碾压	总量
0.293	0.420	14.541	3.863	3.252	0.135	0.415	0.714	23.633

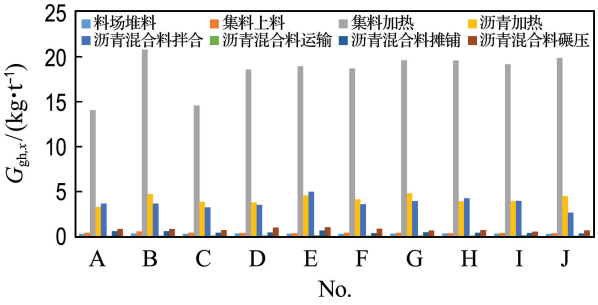

图 2 高速公路沥青路面各环节能源消耗温室气体排放量

Fig. 2 Greenhouse gas emissions of energy consumption from all links of highway asphalt pavement

由图 2 中计算结果可知,10 条高速公路沥青路面排放的温室气体中,集料加热环节排放量最大,约占能源消耗温室气体排放总量的 64.66%,沥青加热和沥青混合料拌合环节次之,分别占温室气体排放总量的 14.63%和 13.21%,这 3 个环节排放的温室气体占总温室气体的比重达 92.50%,为能源消耗的高排放环节.由结果分析可知,导致这种现象的原因主要与沥青混合料生产施工过程中集料加热和沥青加热的温度较高有关,集料加热温度一般控制在 160～190 ℃,沥青加热温度一般控制在 150～170 ℃[16],进而产生高能源消耗高排放的现象.另外拌合环节温室气体排放量较高主要与拌合设备的功率较大有关,在施工过程中会因电能的使用而间接产生能源消耗温室气体.此外,沥青混合料中集料所占比重较大也是导致该环节产生能源消耗温室气体最高的重要原因.因此,控制集料和沥青的生产施工温度以及拌合设备的选择是影响能源消耗温室气体的重要因素,在低碳减排对策中,应重点进行研究.

由图 2 中的温室气体量化结果亦可知,在同一施工环节,不同高速公路产生的能源消耗温室气体排放量具有明显的差别,其中集料加热环节中高速公路 A 与 C 显著低于其他高速公路路段,结合表 1 中沥青路面能源消耗清单分析可知,这主要与能源类型有关,高速公路 A 与高速公路 C 以天然气作为加热能源,其产生的能源消耗温室气体排放量分别为 14.029 和 14.541 kg/t,明显低于使用重油的其他高速公路;此外,沥青加热环节中,使用天然气作为加热能源的高速公路 A 排放的温室气体 3.292 kg/t,远低于使用煤和重油作为加热能源的高速公路,因此,能源类型是影响能源消耗温室气体排放量的重要因素.

综上可知,在沥青路面施工期,影响能源消耗温室气体排放的因素主要与沥青路面材料的施工温度、机械设备的类型以及能源类型有关,在低碳减排对策研究中应针对这些影响因素进行重点研究.

3 低碳减排对策研究及经济效益分析

在建立沥青路面能源消耗温室气体量化模型及得出主要的影响因素后,为了验证其减排效果,研究针对温室气体排放量较大的集料加热、沥青加热以及沥青混合料拌合 3 个高排放环节,分别从改变集料和沥青加热的能源类型、更换机械设备、降低集料含水率以及采用温拌技术 4 个方面进行节能减排效果研究.

3.1 改变加热能源类型减排效果及经济效益研究

为了研究改变加热能源类型后的减排效果和经济效益,调查了当前市场上的能源类型煤、重油

和天然气的市场价格，三者分别为 700 元/t、2 800元/t 和 3.25 元/m^3，以每吨沥青混合料在生产施工过程中所需能源和产生的温室气体为功能单位，计算在集料加热和沥青加热环节采用油改气、煤改油和煤改气的减排效果和经济效益，结果如表 6 所示.

表 6　改变能源类型的减排效果和经济效益

Tab. 6　Emission reduction effects and economic benefits of changing energy types

施工环节	能源类型	减排措施	能源消耗量	温室气体排放量/(kg·t^{-1})	减排幅度/%	成本变化幅度/%	费用效益比(成本变化幅度/减排幅度)
集料加热	重油	油改气	6.524 kg/t	20.761	27.68	23.42	0.846
	天然气		6.937 m^3/t	15.014			
沥青加热	煤	煤改油	2.642 kg/t	4.727	18.34	83.65	4.561
	重油		1.213 kg/t	3.860			
	煤	煤改气	2.642 kg/t	4.727	40.93	126.70	3.095
	天然气		1.290 m^3/t	2.792			

由表 6 中得出的集料加热和沥青加热环节的减排效果和经济性可知，能源类型对温室气体排放的影响很大，其中，在沥青加热和集料加热环节所产生的温室气体排放量中，天然气最低，其次为重油，煤的温室气体排放量最高. 就减排幅度和经济效益而言，油改气的减排幅度较大，达到 27.68%，而成本增加量远低于煤改油和煤改气，费用效益比最小；煤改油的减排幅度较低且费用效益比最大；煤改气的减排幅度最大但成本增加幅度也最大. 因此，综上 3 种减排对策可知，油改气的性价比最高，应优先作为减排措施，在项目成本容许的情况下，可采用煤改气来大幅降低施工过程中的能源消耗温室气体排放量.

3.2　控制集料初始含水率减排效果研究

沥青混合料中集料所占比重最大，且在拌合之前需将其加热到较高的温度(160～190 ℃)，通过对集料加热环节能源消耗及温室气体的量化计算可知，该环节因加热耗能所产生的温室气体约占沥青混合料施工过程能源消耗温室气体总量的 64.66%，因此该环节成为沥青混合料中高能源消耗高排放应重点解决的关键环节之一.

集料在加热到指定温度的过程中，首先需要加热蒸发掉其所含的水分，室内试验发现，集料中的初始含水率越高，集料加热到指定温度的过程中用于蒸发集料中水分所需额外消耗的能源也就越多，相应的温室气体排放量也会增加. 通过对高速公路 B 的研究发现，在油石比为 4.1%，矿粉含量为 3.8%，集料加热温度为 190 ℃，拌合设备生产能力为 250 t/h 条件下，以重油为加热能源时，每吨沥青混合料中的集料在降低 1% 的含水率时，能源消耗由 6.524 kg/t 降低至 5.994 kg/t，相应的温室气体排放量由 20.761 kg/t 降低至 19.074 kg/t，减排幅度及成本降低幅度均达到 8%. 由此可知，降低集料的含水率对减少沥青路面能源消耗温室气体排放意义重大，应注重现场集料堆放处的选择和管理，采用搭建料棚并做好料棚的排水和堆放区域的硬化措施，以保证集料中的含水量处于较低水平.

3.3　温拌沥青混合料技术减排效果研究

据统计，当前沥青路面建设过程中约有 95% 的沥青面层材料采用热拌沥青混合料(HMA)，热拌沥青混合料在拌合施工时温度一般要达到 150～180 ℃，在消耗大量能源的同时，也会因此而产生相应的温室气体及有毒有害气体(沥青烟、苯并芘等)，且高温环境下可能会导致部分沥青出现一定程度的老化，而温拌剂的添加可显著降低混合料的拌合温度 40～60 ℃，节约加热能源 20%～30%[17]. 基于此，采用温拌沥青混合料技术(WMA)，在满足路用性能的同时减少能源消耗温室气体是一种可行的减排措施.

研究采用 Evotherm 温拌剂对高速公路 B 的 SBS 沥青混合料分别进行热拌和温拌沥青混合料减排效果对比研究，在试拌试铺过程中发现，当沥青混合料拌合温度为 120 ℃时，集料加热和沥青加热的温度分别只需 135 和 130 ℃，远低于热拌沥青混合料中集料和沥青的加热温度. 沥青混合料路用性能方面，采用 Evotherm 温拌剂后的温拌沥青混合料的高温性能、低温性能和水稳定性

较热拌沥青混合料有所降低，但均满足规范要求. 在高速公路 B 中，采用重油和煤分别作为集料加热和沥青加热的能源时，温拌与热拌沥青混合料减排效果对比如表 7 所示.

由表 7 中温拌与热拌沥青混合料对比试验结果发现，温拌剂的添加可有效降低能源消耗温室气体排放量，采用温拌技术后高速公路 B 在集料加热和沥青加热环节的能源消耗量和温室气体排放量均有所降低，温室气体减排幅度分别达 26.72%和 28.05%，减排效果显著.

表 7 温拌与热拌沥青混合料拌合过程温室气体减排效果

Tab. 7 Greenhouse gas emission reduction effect in mixing process of warm mix and hot mix asphalt mixture

施工工序	拌合类型	拌合温度/℃	能源消耗量/(kg·t^{-1})	温室气体量/(kg·t^{-1})	减排幅度/%
集料加热	热拌	190	6.524	20.761	26.72
	温拌	135	4.781	15.214	
沥青加热	热拌	165	2.642	4.727	28.05
	温拌	130	1.902	3.401	

3.4 机械设备减排措施研究

在温室气体排放源的调查中发现，拌合设备的选择是影响能源消耗和温室气体排放量的重要因素. 间歇强制式拌合设备由于适用于料源复杂、配合比精确且拌合出的沥青混合料质量高等优点，成为当前国内高等级道路的主要拌合设备，然而其工艺流程较长，存在高能源消耗高排放的现象. 随着连续滚筒式搅拌设备的不断改进，欧美国家已主要采用工艺流程较为简单的连续滚筒式搅拌设备进行拌合，我国当前主要以间歇强制式拌合设备为主，连续滚筒式拌合设备正在逐步推广. 研究表明，相比于间歇强制式的拌合工艺，采用连续滚筒式拌合设备可降低温室气体的排放量达 35%，减排效果显著[18].

此外，施工机械的使用年限对能源消耗也具有一定的影响，施工机械随着使用年限的增加，会出现能源利用率降低而能源消耗不断增加的现象. 通过现场调查得知，沥青混合料在施工过程中所用到的机械设备主要有装载机、运输车、摊铺机及压路机，这些施工机械的能源消耗量与机械设备的使用年限紧密相关. 为研究施工机械的使用年限与温室气体排放量的关系，分别选取上述 4 种施工机械进行研究，分析每种类型的施工机械在型号相同的情况下，使用年限与温室气体排放量的关系，结果如图 3 所示.

由图 3 可知，所调查的 4 种施工机械在使用过程中排放的温室气体量均随着使用年限的增加而不断上升，因此，在沥青路面的施工过程中应加强对施工机械燃油消耗的统计和管理，对于使用年限较长且耗油量较大的施工机械，可采取以旧换新的方式，更新施工机械所产生的效益在短期内可能不明显且需要投入一定的经费，但新型机械的优点在于提高了工作效率，降低了能源消耗，具有一定的经济性且有助于环保.

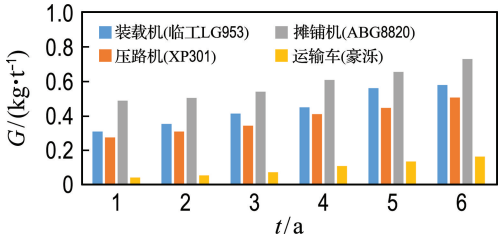

图 3 施工机械使用年限与温室气体排放量关系

Fig. 3 Relationship between the service life of construction machinery and greenhouse gas emissions

4 结 论

(1)通过对我国多个地区沥青路面的工艺流程和温室气体排放源的调查分析，将施工期温室气体排放源划分为料场堆料、集料上料、集料加热等 8 个施工环节，便于深入详细地开展低碳减排技术研究.

(2)利用 IPCC 提供的能源温室气体排放因子、全球增温潜势值及《中国能源统计年鉴 2016》公布的能源发热值为计算参数，以生产施工过程中每吨沥青混合料所产生的温室气体量为各能源量化计算的功能单位，分别建立了基于柴油、煤、天然气、电及重油的能源消耗温室气体量化模型及各施工环节排放温室气体总量的量化模型.

(3)以高速公路 C 为算例，结合 10 条高速公路调查与检测数据进行能源消耗温室气体量化研究，得出能源消耗温室气体高排放环节为集料加热、沥青加热和沥青混合料拌合环节，三者分别占

能源消耗温室气体排放总量的 64.66%、14.63% 和 13.21%.

(4)通过对高排放环节影响因素的分析，提出了以改变原材料加热能源类型、更新机械设备、降低集料含水率以及采用温拌沥青混合料技术等方面的减排措施，用于减少施工过程中排放的能源消耗温室气体.

本研究针对沥青路面施工期排放的温室气体进行了量化方法及减排对策研究，而关于沥青路面寿命周期内原材料的生产、道路运营及养护等阶段排放温室气体的现状仍有待进一步探索，后续应扩大沥青路面寿命周期内其他阶段的研究范围.

参考文献：

[1] 杨　博. 沥青路面节能减排量化分析方法及评价体系研究 [D]. 西安：长安大学，2012.
YANG Bo. Quantitative method and evaluation system of energy-saving and emission-reduction for asphalt pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)

[2] 中华人民共和国环境保护部. 2016 中国环境状况公报 [EB/OL]. [2018-12-01]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201706/t20170605_415442.htm0-tsina-1-38154-397232819ff9a47a7b7e80a40613cfe1, 2016.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. 2016 China Environmental Status Bulletin [EB/OL]. [2018-12-01]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201706/t20170605_415442.htm0-tsina-1-38154-397232819ff9a47a7b7e80a40613cfe1, 2016. (in Chinese)

[3] 金光来. 基于扩展有限元的沥青路面疲劳开裂行为的数值研究 [D]. 南京：东南大学，2015.
JIN Guanglai. Numerical analysis of fatigue crack growth in asphalt pavement based on extended finite element model [D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)

[4] WHITE P, GOLDEN J S, BILIGIRI K P, *et al*. Modeling climate change impacts of pavement production and construction [J]. **Resources Conservation and Recycling**, 2010, **54**(11): 776-782.

[5] KIM Byungil, LEE Hyounkyu, PARK Hyungbae, *et al*. Framework for estimating greenhouse gas emissions due to asphalt pavement construction [J]. **Journal of Construction Engineering and Management**, 2012, **138**(11): 1312-1321.

[6] 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(10): 148-151, 158.
CHAI Mingming, LI Ming, QI Guicai, *et al*. Analysis of carbon emission during hot in place recycling asphalt pavement construction [J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2016 (10): 148-151, 158. (in Chinese).

[7] 钱琳琳，景晶晶，刘　强. 典型沥青路面施工期能耗及碳排放定额测算研究 [J]. 上海公路，2016(1): 1-5.
QIAN Linlin, JING Jingjing, LIU Qiang. Quota measurement of energy consumption and carbon emission of typical asphalt pavement construction [J]. **Shanghai Highways**, 2016(1): 1-5. (in Chinese)

[8] 曲建升，曾静静，张志强. 国际主要温室气体排放清单数据集比较分析研究 [J]. 地理科学进展，2008, **23**(1): 47-54.
QU Jiansheng, ZENG Jingjing, ZHANG Zhiqiang. Review of the international main greenhouse gases emission databases [J]. **Advances in Earth Science**, 2008, **23**(1): 47-54. (in Chinese)

[9] 杨　平，仝　川. 淡水水生生态系统温室气体排放的主要途径及影响因素研究进展 [J]. 生态学报，2015, **35**(20): 6868-6880.
YANG Ping, TONG Chuan. Emission paths and measurement methods for greenhouse gas fluxes from freshwater ecosystems: a review [J]. **Acta Ecologica Sinica**, 2015, **35** (20): 6868-6880. (in Chinese)

[10] LAI T M, TO W M, LAM K H, *et al*. Electricity consumption in Hong Kong: trend analysis and greenhouse gases emission [J]. **HKIE Transactions**, 2014, **21**(2): 81-88.

[11] IPCC. 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南 [M]. 神奈川：全球战略研究所，2006.
IPCC. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories** [M]. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies, 2006. (in Chinese)

[12] 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 Shouhong, WANG Lixia, SHAO Zhulong. Review on carbon emissions researches at home and abroad [J]. **Arid Land Geography**, 2014, **37** (4): 720-730. (in Chinese)

[13] 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.
National Bureau of Statistics Energy Division. **China Energy Statistical Yearbook 2016** [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016. (in Chinese)

[14] 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 Yaowen. Study on the calculation model and grading standard for the CO_2 emission of hot asphalt mixture [D]. Xi′an: Chang′an University, 2014. (in Chinese)

[15] ALMUTAIRI H, ELHEDHLI S. Carbon tax based on the emission factor: abilevel programming approach [J]. **Journal of Global Optimization**, 2014, **58**(4):795-815.

[16] 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 Ruiyu. Research on greenhouse gas emission evaluation system for asphalt pavement construction [D]. Xi′an: Chang′an University, 2014. (in Chinese)

[17] 许菲菲，刘黎萍，唐海威，等. 温拌沥青混合料与热拌沥青混合料性能对比 [J]. 公路工程，2009，**34**(3):73-75,82.
XU Feifei, LIU Liping, TANG Haiwei, *et al*. Performance comparison between warm mix asphalt and hot mix asphalt [J]. **Highway Engineering**, 2009, **34**(3):73-75,82. (in Chinese)

[18] 彭 波，蔡春丽，胡如安. 高速公路沥青路面能耗与碳排放评价 [J]. 长安大学学报(自然科学版)，2016，**36**(5):8-15.
PENG Bo, CAI Chunli, HU Ru′an. Energy consumption and carbon emission evaluation of expressway asphalt pavement [J]. **Journal of Chang′an University (Natural Science Edition)**, 2016, **36**(5):8-15. (in Chinese)

Study of quantitative methods for emission of greenhouse gases during construction period of asphalt pavement and emission reduction countermeasures

CAO Shijiang[1], PENG Bo[*2], ZHANG Bo[1], LONG Kangtao[1], CHENG Zhenwei[1], QI Yihui[1]

(1. China National Construction Group Guiyang Survey Design and Research Institute Co., Ltd., Guiyang 550081, China; 2. School of Highway, Chang′an University, Xi′an 710064, China)

Abstract: By investigating and analyzing the carbon sources of 10 highway asphalt pavements in several provinces of China, and combining with the calculation parameters of greenhouse gases provided by IPCC and China Energy Statistical Yearbook 2016, quantitative models of greenhouse gas emissions during construction of asphalt pavement with different energy sources are established. The high emission links and main influencing factors during construction are obtained, and corresponding low carbon emission reduction countermeasures are put forward. The results show that aggregate heating, asphalt heating and mixing of asphalt mixtures account for 64.66%, 14.63% and 13.21% of the total greenhouse gas emissions from energy consumption respectively. The high greenhouse gas emissions from aggregate heating and asphalt heating are due to the use of coal and heavy oil with high carbon content as energy sources, and the use of clean energy, natural gas, should be increased. The research results clarify the research direction of low carbon emission reduction, and at the same time, provide reference for guiding green construction and building low carbon environmental protection asphalt pavement.

Key words: asphalt pavement; greenhouse gas; quantitative method; investigation and analysis; high emission link; emission reduction countermeasures