

# 基于工程量清单的市政道路工程碳排放研究

李佳慧<sup>1</sup>, 刘辉<sup>1</sup>, 刘耀坤<sup>2</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.广东中南建设有限公司, 广东 广州 510007)

**摘要:**以 PAS 2050:2008《商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范》、工程量清单与市政工程预算定额为依据,运用碳排放系数法研究市政道路工程初步设计阶段碳排放量化方法,评估市政道路工程建设对环境的影响。将市政道路工程划分为土方工程、路基工程、路面工程、路面处理工程和其他工程,将碳排放来源分为材料耗用、机械设备,确定市政道路工程主要材料和能源的碳排放系数,建立市政道路工程碳排放计算模型;以湖北省某市政道路为例核算各分项工程、各类能源及材料的碳排放量,并提出减排建议。

**关键词:** 工程管理;市政道路;工程量清单;碳排放

中图分类号:U415.1

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2023)04-0153-06

市政基础设施是中国城市发展的重要组成部分,具有高能耗、高污染、高排放的特点,是节能减排重点。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的统计数据表明,道路交通行业所产生的温室气体占全球温室气体的 13%。本文依据工程量清单和预算定额进行市政道路工程划分,明确市政道路工程初步设计阶段碳排放来源,分析材料投入使用量与机械能源消耗量,进行市政道路工程碳排放核算,推动市政基础设施建设由“高能耗”转型为“多减碳”,实现低碳建设。

## 1 碳排放核算研究现状

### 1.1 碳排放核算方法

目前多从碳排放计算范围与核算方法进行工程项目碳排放分析。在计算范围方面,尚春静等建立建筑项目全生命周期碳排放评价体系,从物化、使用与拆除 3 个阶段核算了钢筋混凝土结构低层住宅的碳排放量<sup>[1]</sup>;陈彬彬等通过定额法研究了建筑项目施工阶段碳排放定额估算方法<sup>[2]</sup>;吴淑艺等以施工定额与工程量清单为依据,结合工程量计算软件,计算了建筑项目施工阶段碳排放量<sup>[3]</sup>;章蓓蓓等将市政基础设施运营系统分为燃气供应、道路照明、景观照明等七类工程,核算了市政基础设施运营期间的碳排放量<sup>[4]</sup>;徐建峰以隧道物化阶段为计算边界,将碳排放来源分解为施工材料消耗、施工机械电力与燃料消耗、运输工具产生的消耗 3 种,建立了碳排放计算模型<sup>[5]</sup>。

工程项目碳排放核算方法主要分为碳排放因子

法、排放系数法和投入产出法。陈赞等运用碳排放因子法对沥青路面碳排放的影响因素和测算模型进行研究,建立了人工、材料和机械设备碳排放当量测算模型<sup>[6]</sup>;郭亚林等采用碳排放系数法建立了铁路隧道建设材料生产和运输、隧道施工、运营维护和拆除阶段的碳排放计算模型<sup>[7]</sup>;郭春等运用数据清单和排放系数法研究了隧道施工碳排放的关键影响因素<sup>[8]</sup>;高源雪依据四川大学 CLCD 和 IPCC 报告及实物型投入产出模型,研究了碳排放源头的量化特征,结合碳排放系数法,测算了框剪、框架、砖混结构的碳排放<sup>[9]</sup>。

### 1.2 碳排放系数

碳排放因子表示每消耗单位质量或体积的材料/能源所产生的碳排放,也称为碳排放系数,是指在普遍的生产合格化、技术标准化、经济合理化和科学化的情况下,完成单个产品排放的平均 CO<sub>2</sub> 量。张涛等对建筑项目建设时主材与燃料的单位碳排放进行了汇总和分类,测算了常用能源和材料的碳排放因子<sup>[10]</sup>;张春霞等对国内外研究机构给出的碳排放因子进行分类整理与数据分析,测算了煤炭、石油、天然气、电力等材料与能源的碳排放因子<sup>[11]</sup>。

## 2 基于 PAS 2050:2008 的碳排放计算模型

PAS 2050:2008《商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范》<sup>[12]</sup>为全球首个计算产品碳足迹的方法标准,被用于计算产品/服务在全寿命周期内温室气体排放量,可帮助企业管理自身产品及服务的碳排放情况,寻找减排机会,最终达到生产低

碳产品的目标。

## 2.1 目标确定

通过计算市政道路工程初步设计阶段碳排放,

分析其碳排放规律、碳排放主要来源及影响因素,提出有针对性的减排措施。图1为基于PAS 2050:2008规范的市政道路工程碳排放核算体系。

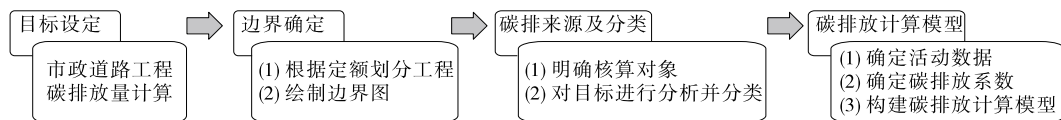


图1 基于PAS 2050:2008规范的市政道路工程碳排放核算体系

## 2.2 市政道路工程初步设计阶段碳排放计算边界

碳排放计算边界定义了产品碳排放核算范围。以市政道路工程量清单与预算定额为依据,将市政道路工程划分为土方工程、路基工程、路面工程、路面处理工程和其他工程(见图2)。

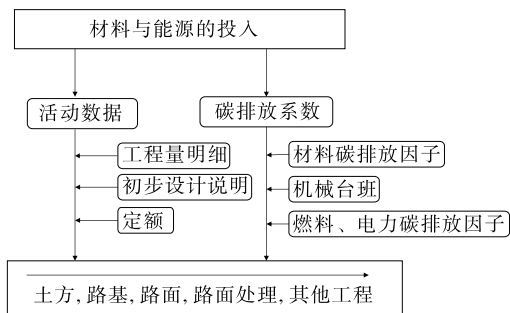


图2 市政道路工程碳排放核算边界

## 2.3 碳排放来源及分类

依照工程目标范围界定和预算定额将市政道路工程划分为5个部分,各部分再划分为分部分项工程。各分部分项工程碳排放来源主要为工程中拟投入的材料、施工采用的机械设备消耗燃料或电力产生的碳排放。人工碳排放影响较小,人工活动产生的碳排放忽略不计。

(1) 材料。市政道路工程中应用广泛的原材料包括直接从自然界获取的资源(水、黄土、碎石、片石等)、通过简单加工得到的材料(石灰、石膏等)、加工而成的成品材料(如钢筋、钢模板、水泥、预拌混凝土、润滑油等)。

(2) 机械设备。包括履带式推土机、自卸汽车、钢轮压路机、稳定土拌和机、钢筋切断机、直流弧焊机。

## 2.4 碳排放计算模型

在确定碳排放计算边界、碳排放来源后,采用碳排放系数法,根据工程项目建设前期活动数据及碳排放系数建立市政道路工程初步设计阶段碳排放计算模型。

碳排放系数法的基本思路是依照碳排放工程量

清单,将每种碳排放源的活动数据与相对应的排放因子的乘积作为碳排放源的排放量估算值,即:

碳排放量=碳排放源的活动数据×碳排放系数

运用高源雪提出的工程量造价理论进行碳足迹评价<sup>[9]</sup>,在此基础上运用工程计算软件对工程量数据进行划分<sup>[13]</sup>,将市政道路工程的工程量计算结果套入定额碳排放因子<sup>[14]</sup>,即可测算工程项目的碳排放量。

### 2.4.1 工程活动数据来源

碳排放计算范围界定为市政道路工程初步设计阶段,工程活动数据来源为初步设计说明和工程设计图中工程量数据。

### 2.4.2 碳排放系数来源

碳排放系数的确定分为材料和机械设备两方面。

(1) 材料的碳排放系数。依据工程量清单所涵盖的材料清单明细,参照国内外文献和官方机构公布的数据、中国产品全生命周期温室气体排放系数库(CPCD)、中国碳核算数据库(CEADs)或IPCC碳排放因子数据库确定材料的碳排放系数。

(2) 机械设备的碳排放系数。主要计算机械设备能源消耗产生的碳排放。市政道路工程的能源消耗包括柴油、汽油、电能,其中柴油、汽油属于直接消耗能源,目前国内外很多机构对其碳排放因子进行了测算。IPCC给出了能源产生各种温室气体的单位热量排放值,按照中国的取值标准,排放因子数据选取IPCC给定的95%置信区间下限值,低位发热量值采用《中国统计年鉴2009》提供的数据<sup>[15]</sup>,柴油碳排放系数为3.12 kgCO<sub>2eq</sub>/kg,汽油碳排放系数为2.93 kgCO<sub>2eq</sub>/kg。电能属于间接消耗能源,发电过程消耗其他能源。因发电技术、资源供应等不同,每个地区电力碳排放因子各不相同。本文采用国家电网华中分部给出的电力碳排放因子。

按照上述方法确定的市政道路工程常见材料和能源的碳排放系数见表1。

表1 市政道路工程常见材料和能源的碳排放系数

材料和能源	碳排放系数	来源	材料和能源	碳排放系数	来源
预拌混凝土(C30)	260.20 kgCO <sub>2eq</sub> /m <sup>3</sup>	文献[10]	中厚钢板	2 320.00 kgCO <sub>2eq</sub> /kg	文献[9]
预拌混凝土(抗折强度 4.5 MPa)	251.00 kgCO <sub>2eq</sub> /m <sup>3</sup>	文献[9]	型钢(综合)	2 365.00 kgCO <sub>2eq</sub> /kg	文献[9]
碎石	2 180.00 kgCO <sub>2eq</sub> /kg	文献[16]	铁件(综合)	2 280.00 kgCO <sub>2eq</sub> /kg	文献[16]
干混抹灰砂浆	321.34 kgCO <sub>2eq</sub> /m <sup>3</sup>	文献[3]	低碳钢焊条	2 630.00 kgCO <sub>2eq</sub> /kg	CPCD
聚氯乙烯胶泥	1 765.00 kgCO <sub>2eq</sub> /kg	CPCD	钢筋混凝土	230.00 kgCO <sub>2eq</sub> /m <sup>3</sup>	文献[15]
润滑油	2 300.00 kgCO <sub>2eq</sub> /kg	CPCD	标准砖	134.00 kgCO <sub>2eq</sub> /m <sup>3</sup>	文献[14]
毛渣	3 000.00 kgCO <sub>2eq</sub> /m <sup>3</sup>	文献[5]	水	0.26 kgCO <sub>2eq</sub> /m <sup>3</sup>	文献[9]
钢筋 HPB300	2 309.00 kgCO <sub>2eq</sub> /kg	文献[5]	柴油	3.12 kgCO <sub>2eq</sub> /kg	文献[4]
钢筋 HPB400	4 080.00 kgCO <sub>2eq</sub> /kg	CPCD	汽油	2.93 kgCO <sub>2eq</sub> /kg	文献[17]
			电力	0.972 kgCO <sub>2eq</sub> /(kW·h)	国家电网华中分部

2.4.3 碳排放计算模型的建立

依据碳排放测算边界与碳排放来源分类建立碳排放计算模型(见表2),核算清单工程项目包含的一个或所有定额使用的建筑材料及机械设备产生的碳排放量。

(1) 材料碳排放量的计算。材料碳排放量为材料使用量与相应碳排放系数的乘积。

(2) 机械设备碳排放量的计算。机械设备的定额体系中不仅包括单位产量的台班用量定额,还包

括台班的资源、能源消耗量定额,使用过程中要将这两类定额配套使用,实现施工过程从直接工程量到能源消耗量的转换。通过计算软件内置的《全国统一施工机械台班费用定额》给出的定额台班含量,输入工程数量得到具体台班数量。通过查询机械单位台班消耗的燃料数量及该燃料的碳排放系数,计算该机械的碳排放量。汽油、柴油和电力是施工机械设备消耗的主要能源,燃料碳排放因子综合生产、运输、燃烧3个阶段的排放获得。机械台班碳排放因

表2 市政道路工程碳排放计算模型

项目	碳排放计算公式	公式说明
材料的碳排放	$M_j = \sum_{x=1}^m M_{jx} \times (1+s) \times C_{GWP_x}$	$M_j$ 为第 $j$ 个定额中材料的碳排放量; $M_{jx}$ 为定额 $j$ 中第 $x$ 类材料的消耗量( $x=1,2,\cdots,m$ ); $s$ 为损耗率; $C_{GWP_x}$ 为第 $x$ 种材料的碳排放系数
机械设备的碳排放	$E_j = \sum_{y=1}^n E_{jy} \times C_{GWP_y}$	$E_j$ 为第 $j$ 个定额中机械设备的碳排放量; $E_{jy}$ 为定额 $j$ 中第 $y$ 种机械设备的消耗量( $y=1,2,\cdots,n$ ); $C_{GWP_y}$ 为第 $y$ 种机械台班的碳排放系数
定额的单位碳排放	$D_j = M_j + E_j$	$D_j$ 为第 $j$ 个定额每单位产生的碳排放量
清单工程项目的碳排放	$Q_i = \sum_{j=1}^n Q_j \times D_j$	$Q_i$ 为初步设计阶段第 $i$ 个清单( $i=1,2,\cdots,m$ )的碳排放量; $Q_j$ 为第 $i$ 个清单中第 $j$ 个定额( $j=1,2,\cdots,n$ )的工程量,定额内容根据实际选择
分项工程的碳排放	$W_i = \sum_{i=1}^n Q_i$	$W_i$ 为各分项工程的碳排放量
市政道路工程的全部碳排放	$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5$	$W$ 为市政道路工程初步设计阶段的碳排放量; $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$ 、 $W_5$ 分别为土方工程、路基工程、路面工程、路面处理工程和其他工程5个分项工程的碳排放量

子 C 的计算公式为:

$$C=3.12M_a+2.93M_b+0.972M_c$$

式中: $M_a$ 、 $M_b$ 、 $M_c$ 分别为机械设备消耗的柴油、汽油、电量。

(3) 定额的单位碳排放量计算。碳排放定额是指在正常施工条件下,为完成规定质量合格的分部分项工程所需的能源消耗及单位碳排放的数量标准。结合碳排放系数,根据单位定额消耗的材料和所使用机械种类,参考工程量计算软件中定额单价的计算方法,将定额中的建材、施工机械单价转换为机械台班和建筑材料的碳排放因子,计算定额的单位碳排放量。

(4) 清单工程项目的碳排放量计算。清单工程项目包含一个或多个定额使用的建筑材料及机械设备产生的碳排放量。依照设计图完成清单编制,参照设计说明,计算每道施工工序的拟投入材料与设备。

(5) 分项工程碳排放量的计算。根据表 2 所示碳排放计算模型分别计算土方工程、路基工程、路面工程、路面处理工程和其他工程的碳排放量,其和即为市政道路工程的全部碳排放量。

3 市政道路工程项目碳排放计算案例

3.1 工程概况

湖北武汉市蔡甸区永安街道一条市政道路工程,设计长度为 1 368.916 m,路面宽 3.0 m,设计速度 15 km/h。该项目现已形成 3~7 m 宽田间路,设计拟对现状道路进行硬化加铺,改造为水泥混凝土路面,工程量明细见表 3。

根据计算模型计算各种材料与能源的碳排放量,得到定额的单位碳排放量系数,汇总得到工程量清单碳排放数据,代入工程量数据,即可得到该工程

的总碳排放量。

3.2 碳排放计算结果

根据设计明细、工程量明细及施工组织设计等进行工程项目划分,明确定额的选用及换算标准。以定额编号 D9-2-46(铁件制作安装 预埋铁件)和 D9-1-54(道路拉杆制作安装 换为钢筋 HPB400)两个市政工程定额为例,其单位定额碳排放量计算过程见表 4,其中占比较小且对环境的影响较小的材料

表 3 某市政道路工程的工程量明细

分项工程	项目或费用	数量
土方工程	挖土并弃土/m <sup>3</sup>	4 924
	外购土填方/m <sup>3</sup>	1 095
路基工程	挖土并弃土/m <sup>3</sup>	1 020
	换填块石/m <sup>3</sup>	300
	换填毛渣/m <sup>3</sup>	180
	换填好土/m <sup>3</sup>	540
	水泥混凝土面层(厚 18 cm,抗折强度≥4.5 MPa)/m <sup>2</sup>	4 124
路面工程	碎石基层(厚 12 cm)/m <sup>2</sup>	4 399
	缩缝切缝及灌缝(0.6 cm×5 cm)/m	1 026
	聚氯乙 烯胶泥填缝(胀缝灌缝 2 cm×4 cm)/m	33
	C30 混凝土垫枕/m <sup>3</sup>	3
	横缝钢筋/kg	105
	其他钢筋制作与安装/kg	25
	现状水泥混凝土破除/m <sup>2</sup>	20
	现状混凝土修复/m <sup>2</sup>	20
	水泥混凝土(厚 18 cm,抗折强度≥4.5 MPa)/m <sup>2</sup>	20
	植筋/kg	270
路面处理工程	苗木清除/m <sup>2</sup>	1 500
	钢筋混凝土管/m	80
	砖砌进水口/座	16

表 4 定额每单位碳排放计算示例

定额编号	定额名称	定额耗用材料和机械	单位或规格	数量	碳排放系数	碳排放量/kgCO <sub>2eq</sub>	合计碳排放量/kgCO <sub>2eq</sub>
D9-2-46	铁件制作	型钢(综合)	kg	3.475	2 365 kgCO <sub>2eq</sub> /kg	8 218.38	63 203.66
		低碳钢焊条	kg	0.728	2 630 kgCO <sub>2eq</sub> /kg	1 914.64	
		中厚钢板	kg	16.825	2 320 kgCO <sub>2eq</sub> /kg	39 034.00	
		钢筋 HPB300	kg	6.075	2 309 kgCO <sub>2eq</sub> /kg	14 027.18	
		氧气	m <sup>3</sup>	0.000	—	—	
	安装 预埋铁件	乙炔气	kg	0.000	—	—	
		钢筋切断机	直径 40 mm	0.002	—	—	
		直流弧焊机	32 kV·A	0.103	—	—	
		电焊条烘干箱	(45×35×45) cm	0.010	—	—	
		电(机械)	kW·h	9.734	0.972 kgCO <sub>2eq</sub> /(kW·h)	9.46	

续表4

定额编号	定额名称	定额耗用材料 和机械	单位或规格	数量	碳排放系数	碳排放量/ kgCO <sub>2eq</sub>	合计碳排放 量/kgCO <sub>2eq</sub>
D9-1-54	道路拉杆制作	材料 钢筋 HPB400	kg	276.750	4 080 kgCO <sub>2eq</sub> /kg	1 129 140.00	1 129 145.39
	安装 换为钢	机械 钢筋切断机	直径 40 mm	0.173	—	—	
	筋 HPB400	电(机械)	kW·h	5.547	0.972 kgCO <sub>2eq</sub> /(kW·h)	5.39	

不纳入计算。

按照表 2 所示计算模型、相应定额的碳排放因子、根据工程量清单和消耗量定额得到的材料与能源的工程量明细,计算该项目清单工程碳排放量和各分项工程定额单位碳排放量,结果分别见表 5 和表 6。

表 5 清单工程碳排放计算示例

清单工程	定额编号	定额名称	定额耗用材料和机械	单位或规格	数量	碳排放系数	碳排放量/ kgCO <sub>2eq</sub>	合计碳排放 量/kgCO <sub>2eq</sub>
挖土并 弃土 (1 000 m <sup>3</sup> )	G1-87	反铲挖掘	履带式单斗液压挖掘机	1 m <sup>3</sup>	10.744	—	—	517.39
		机挖一般	履带式推土机	75 kW	2.472	—	—	
		土方	柴油(机械)	kg	165.829	3.12 kgCO <sub>2eq</sub> /kg	517.39	
	G1-215	自卸汽车	材料 水	m <sup>3</sup>	59.088	0.26 kgCO <sub>2eq</sub> /m <sup>3</sup>	15.36	21 449.88
			自卸汽车	10 t	157.125	—	—	
		运土方(载 质量 10 t 以内)	洒水车	4 000 L	2.954	—	—	
			汽油(机械)	kg	89.252	2.93 kgCO <sub>2eq</sub> /kg	261.51	
			柴油(机械)	kg	6 786.222	3.12 kgCO <sub>2eq</sub> /kg	21 173.01	

表 6 土方工程碳排放计算示例

工程 类型	清单工程	定额编号	定额名称	单位	每单位碳排放量/ kgCO <sub>2eq</sub>	合计碳排放 量/kgCO <sub>2eq</sub>
土方 工程	挖土并	G1-87	反铲挖掘机挖一般土(斗容量 1 m <sup>3</sup> )	1 000 m <sup>3</sup>	2 547.61	31 014.93
	弃土	G1-215	自卸汽车运土(载质量 8 t,运距 1 km 以内)	1 000 m <sup>3</sup>	21 449.88	
	土方	G1-87	反铲挖掘机挖一般土(斗容量 1 m <sup>3</sup> )	1 000 m <sup>3</sup>	651.52	
	外购土	G1-212	自卸汽车运土(载质量 10 t,运距 1 km 以内)	1 000 m <sup>3</sup>	5 485.54	
	填方	G1-330	回填土 夯填土 机械 地坪	10 m <sup>3</sup>	128.71	
		G1-323	填土碾压 振动压路机 10 t 内	1 000 m <sup>3</sup>	751.67	

3.3 碳排放核算结果分析

3.3.1 各项工程的碳排放量

各分项工程的碳排放量占比见图 3。从图 3 可看出:路面工程和路面处理工程对市政道路工程碳排放的贡献最大,路面工程碳排放量为  $1\,563.44 \times 10^3$  kgCO<sub>2eq</sub>,占 46.94%,主要是由于路面工程中切缝灌缝材料聚氯乙烯消耗大;路面处理工程的碳排放量为  $1\,139.84 \times 10^3$  kgCO<sub>2eq</sub>,占 34.22%,主要为钢筋产生的碳排放。土方工程碳排放量为  $31.015 \times 10^3$  kgCO<sub>2eq</sub>,占比小,主要是因为土方工程大部分碳排放由机械产生,如挖掘机、自卸汽车等,材料占比很小。建议施工中使用能耗效能高且对环境影响

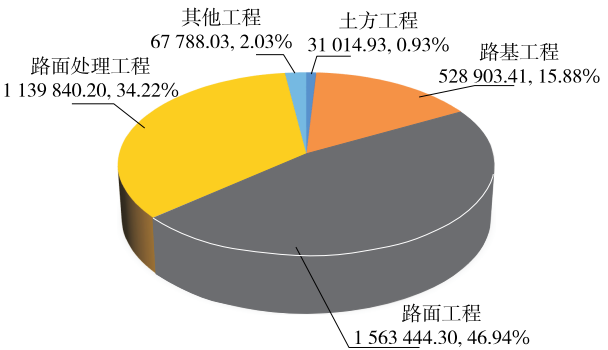


图 3 市政道路工程各分项工程的碳排放量(单位:kgCO<sub>2eq</sub>)及占比

小的机械设备或采取先进的施工工艺与合理的机械设备配置。

### 3.3.2 各类能源及材料的碳排放量

图4为该工程各类建材和能源的碳排放占比。由图4可知:钢筋的碳排放量占该工程总碳排放量的53.79%,聚氯乙烯占40.59%,钢材占1.83%,部分材料和能源的占比小于2%,如碎石(0.75%)、柴油(1.82%)、商品砂浆(0.6%)、汽油(0.02%)、商品混凝土(0.6%)。应尽量选择生产工艺简单、上游碳排放量较少的材料或节能型、效能最优的施工机械设备,降低投入设备能耗的同时提高使用效率。当项目总碳排放量不达标时,可进行施工图纸修改,实现工程碳排放的事前控制与主动控制。

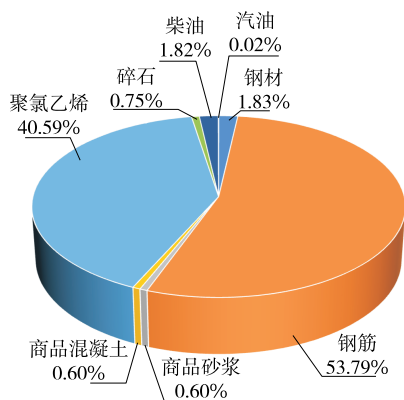


图4 各类建材与能源的碳排放占比

## 4 结语

本文借鉴建筑工程项目碳排放计算方法,结合市政道路工程的特点,以单个市政道路工程项目为研究对象,建立以市政预算定额为基础的市政道路工程碳排放计算模型,分析市政道路工程建设中常用材料和能源的碳排放因子及来源,分析市政道路工程项目碳排放的主要来源,并提出对应减排措施,推进相关企业在实际工程建设中进行碳排放量控制,实现市政道路工程低碳建设。

### 参考文献:

[1] 尚春静,张智慧.建筑生命周期碳排放核算[J].工程管

理学报,2010,24(1):7-12.

- [2] 陈彬彬,陈婵璐,杨建宇,等.施工阶段碳排放定额估算方法研究[J].建筑节能,2020,48(11):147-150.
- [3] 吴淑艺,赖茂宇,孙晓丹.基于工程量清单的建筑施工阶段碳排放计算:以福建省为例[J].工程管理学报,2016,30(3):53-58.
- [4] 章蓓蓓,张春霞,余健俊.市政基础设施运营系统碳排放计算方法:以苏州市为例的实证研究[J].现代城市研究,2012,27(12):80-86+93.
- [5] 徐建峰.公路隧道施工碳排放计算方法及预测模型研究[D].成都:西南交通大学,2021.
- [6] 陈赞,李婵,李晶晶.高速公路沥青路面施工机械碳排放测算模型[J].公路工程,2019,44(1):140-144.
- [7] 郭亚林,郭春.铁路隧道施工期碳排放计算模型研究[J].交通节能与环保,2021,17(6):5-9.
- [8] 郭春,徐建峰,张佳鹏.隧道建设碳排放计算方法及预测模型[J].隧道建设(中英文),2020,40(8):1140-1146.
- [9] 高源雪.建筑产品物化阶段碳足迹评价方法与实证研究[D].北京:清华大学,2012.
- [10] 张涛,姜裕华,黄有亮,等.建筑中常用的能源与材料的碳排放因子[J].中国建设信息,2010(23):58-59.
- [11] 张春霞,章蓓蓓,黄有亮,等.建筑物能源碳排放因子选择方法研究[J].建筑经济,2010,31(10):106-109.
- [12] 英国标准协会.商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范: PAS 2050:2008[S].英国标准协会,2008.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建设工程工程量清单计价规范: GB 50500—2013[S].北京:中国计划出版社,2013.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑碳排放计算标准: GB/T 51366—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [15] 章旸.不同强度等级建材在钢筋混凝土结构设计中的能耗及碳排放分析[J].福建建设科技,2022(3):86-88.
- [16] 肖旭东.绿色建筑生命周期碳排放及生命周期成本研究[D].北京:北京交通大学,2021.
- [17] 杨伟军,蔡慧.沥青混合料建设过程碳排放计算模型研究[J].公路与汽运,2018(1):183-186.

收稿日期:2022-09-08