

# 路基排水沟机械化施工的碳排放计算及方案比选

邢浩<sup>1</sup>, 吴佳润<sup>2\*</sup>, 李瀚<sup>1</sup>, 林宇亮<sup>2</sup>, 郭冬冬<sup>1</sup>

(1. 中铁七局集团第四工程有限公司, 湖北 武汉 430074; 2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 国家“双碳”目标下, 路基排水沟机械化施工不仅需要考虑施工功效和经济性问题, 也应考虑碳排放问题。该文以勐绿高速公路为工程依托, 从建材生产、建材运输及建造3个阶段建立路基排水沟碳排放量与投资成本计算方法。引入碳交易的概念平衡碳排放量与投资成本, 基于等效碳排放量实现路基排水沟传统支模法与液压力式滑模法两种施工方案的综合比选。以路基排水沟上边长、浇筑厚度、建材运距与建造长度4个关键因素设计正交试验, 比较两种方案的等效碳排放量, 并分析因素的影响敏感性。研究表明: 浇筑厚度与建造长度对两种施工方案的等效碳排放量影响均较大。建材生产阶段等效碳排放量对传统支模法的贡献率最大, 建材生产与建造阶段等效碳排放量对液压力式滑模法的贡献率较大。液压力式滑模法的等效碳排放量优于传统支模法, 其施工全阶段的减碳率为85.58%, 且3个阶段的等效碳排放量均少于传统支模法, 其中建材生产阶段与建材运输阶段的减碳率较高, 分别为91.92%和85.06%, 因此路基排水沟施工推荐选择液压力式滑模法。

**关键词:** 路基排水沟; 机械化施工; 碳排放量; 投资成本; 综合方案比选

中图分类号: U415

文献标志码: A

## Carbon Emission Calculation and Scheme Selection for Roadbed Drainage Ditches by Mechanized Construction

XING Hao<sup>1</sup>, WU Jiarun<sup>2\*</sup>, LI Han<sup>1</sup>, LIN Yuliang<sup>2</sup>, GUO Dongdong<sup>1</sup>

(1. The Fourth Engineering Company of China Railway Seventh Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

**Abstract:** Aligned with the peak carbon and neutrality goals, the mechanized construction of roadbed drainage ditches should consider not only construction efficiency and economic factors but also carbon emissions. This study, centered on the Meng-LYU highway, devised approaches to calculate roadbed drainage ditches' carbon emissions and investment costs across three stages: building material production, transportation, and construction. By introducing the concept of carbon trading to align carbon emissions and investment costs, a comprehensive comparison was conducted between the conventional supporting formwork method and the hydraulically powered sliding formwork method regarding equivalent carbon emissions. An orthogonal experiment was conducted involving the upper length of the roadbed drainage ditch, pouring thickness, haul distance, and construction length as key factors. A comparison was made between the equivalent carbon emissions of the two methods, and the influence sensitivity of these factors was analyzed. The research shows that both pouring thickness and construction length have a significant impact on the equivalent carbon emissions of the construction methods. The contribution of equivalent carbon emissions in the material production stage is higher in the traditional formwork, whereas in the material production and construction

收稿日期: 2023-12-04 (修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (编号: 51878667)

作者简介: 邢浩, 男, 大学本科, 工程师. E-mail: m13089777884@163.com

\*通信作者: 吴佳润, 男, 博士研究生. E-mail: wjr\_csu@163.com

stages, it is higher for the hydraulically powered sliding formwork. The hydraulically powered sliding formwork exhibits superior equivalent carbon emissions compared with traditional formwork. The overall decarbonization rate throughout the construction phase is 85.58%. Notably, the equivalent carbon emissions in all stages are lower than those of the traditional supporting formwork, with higher decarbonization rates observed in the construction and transportation stages, reaching 91.92% and 85.06%, respectively. Therefore, choosing the hydraulically powered sliding formwork method for roadbed drainage construction is recommended.

**Keywords:** roadbed drainage ditch; mechanized construction; carbon emissions; investment costs; comprehensive scheme selection

## 0 引言

随着全球气温的不断升高,人类的生产生活受到了越来越严重的影响<sup>[1-2]</sup>,控制全球气温的升高已经成为世界各国亟须解决的问题。2016年,全世界178个缔约方共同签署了《巴黎协定》,目标是将全球气温的上升幅度控制在1.5℃以内<sup>[3]</sup>。中国作为目前全球第一大碳排放国,不断努力降低碳排放强度,履行签署《巴黎协定》时的承诺,主动提出于2030年实现“碳达峰”、2060年实现“碳中和”的目标<sup>[4-6]</sup>。国际能源署的统计数据显示,交通运输行业的碳排放量位居第三,占总碳排放量的25%以上<sup>[7]</sup>。公路交通建设由于其建设规模较大,使用机械设备较多,损耗材料与能源多,建设过程中产生的碳排放量巨大。随着交通运输行业的快速发展,中国公路总里程不断增加,公路交通建设产生的碳排放逐渐引起人们的重视。

汪慧颖<sup>[8]</sup>建立适用于广西高速公路碳排放因子库和计算模型,计算了广西壮族自治区25条高速公路的碳排放量,并采用BP神经网络和随机森林算法对高速公路建设期碳排放量进行预测;闫强等<sup>[9]</sup>从原材料生产、原材料运输以及路面施工3个阶段研究了沥青路面结构类型对建设期碳排放的影响;White等<sup>[10]</sup>设计了一种可以模拟不同路面类型道路建设过程碳排放量的模型,通过调整模型参数,设计人员可以根据不同条件优化路面设计;Chang等<sup>[11]</sup>估算了旧金山至阿纳海姆高速铁路建设的碳排放,发现建材生产和运输分别占总碳排放量的80%和16%;宋庄庄等<sup>[12]</sup>以某已建高速公路为背景,分析不同阶段的能耗与碳排放,认为使用阶段的能耗与碳排放占比在90%以上;Cass等<sup>[13]</sup>基于密歇根州的两段路面,整

合施工数据,计算了公路建设、维护与修复施工过程中产生的碳排放量;万杰<sup>[14]</sup>基于全生命周期理论,计算了高速公路建设各阶段的碳排放量,并研究了施工阶段碳减排方案,研究表明:采用绿色低碳材料以及优化施工组织设计可以减少碳排放量;孟祥晨<sup>[15]</sup>提出了沥青路面原材料生产、原材料运输与施工建设3个阶段的能耗与碳排放量化模型,并提出了相应的碳减排措施;彭波等<sup>[16]</sup>提出了适用于沥青面层施工碳排放的计算方法,并分析了各环节的碳排放权重系数,提出了相应的低碳建设方案。

国内外学者针对公路交通建设产生的碳排放进行了较多相关研究,主要研究考虑不同的碳排放因子、量化评价方法以及建设阶段公路路面建设的碳排放量,但少有涉及路基排水沟施工过程碳排放量的研究,而路基排水沟作为路基路面工程中重要的排水设施,在施工过程中同样会产生大量的碳排放量<sup>[17]</sup>。因此,本文以勐绿高速公路工程为依托,提出路基排水沟施工产生的碳排放量与投资成本的计算方法;为平衡碳排放量与投资成本的关系,引入碳交易的概念,通过正交试验实现路基排水沟传统支模法与液压力式滑模法两种施工方案的综合比选;基于正交试验,对水沟上边长、浇筑厚度、建材运距与建造长度4个关键因素进行敏感性分析,同时研究两种施工方案建设各阶段碳排放量对总碳排放量的贡献率。

## 1 依托工程及计算模型

勐绿高速公路土建4标起止里程为:K63+424(干沟寨山1号大桥起点)~ZK86+884(YK86+871)(石楼梯山隧道进口),线路正线全长19.678 km。本标段跨越2个设计标段和2个县级行政区域,起止里

程分别为:设计1标(勐腊县境内):K63+424~K74+296.37,线路长10.872 km;设计2标(江城县境内):K78+066~ZK86+884,线路正线长8.805 km。该工程根据沿线地形、地质、水文、气象等条件以及桥涵设置等情况,设置边沟、排水沟、截水沟、桥梁涵洞等排水设施,形成完善的路基排水系统,保证路基和周围水系的通畅,防止地表水和地下水对路基稳定造成危害。

路基排水沟的传统支模法施工工艺流程如图1所示。沟槽开挖的传统工艺采用机械开挖方式为主、人工开挖方式为辅,小挖机使用传统的挖斗按测量灰线进行开挖,预留10 cm人工清除。沟槽开挖平整后,均匀摊铺10 cm厚砂浆找平层。传统支模法混凝土浇筑施工工艺分为立模、混凝土搅拌、混凝土运输、混凝土卸落、混凝土浇筑、拆模。液压力式滑模法<sup>[18-19]</sup>施工流程与传统支模法施工流程相似。沟槽开挖采用挖机配置特型挖斗快速开挖,达到一次成槽效果,且沟槽的平整度较好,故不进行水泥砂浆找平。混凝土浇筑施工前将液压力式滑模设备安装在沟槽内,施工时通过液压装置挤压已浇筑完成的混凝土进行移动,同时设备自带附着式平板振捣器对混凝土进行振捣。

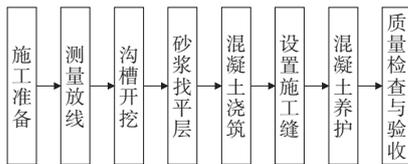


图1 路基排水沟施工工艺流程

Figure 1 Construction process of roadbed drainage ditch

结合工程背景,建立路基排水沟施工的碳排放计算模型如图2所示,对比计算路基排水沟传统施工方案与液压力式施工方案的碳排放量与投资成本,并对两种施工方案进行碳排放与经济性的综合性比选研究。其中水沟底边长为 $l_1$ ,上边长为 $l_2$ ,水沟开挖深度为 $h$ ,混凝土浇筑厚度为 $a$ ,整个模型的长为 $L$ ,高为 $H$ 。

## 2 碳排放及投资成本计算

### 2.1 碳排放量计算

依据《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366—2019)<sup>[20]</sup>,建筑全生命周期碳排放计算分为运行阶

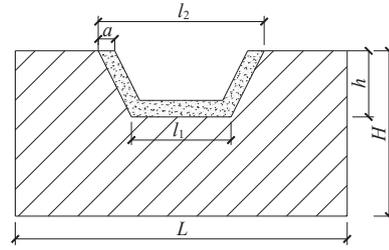


图2 路基排水沟碳排放计算模型示意图

Figure 2 Schematic diagram of carbon emission calculation for roadbed drainage ditch

段、建造及拆除阶段、建材生产及运输阶段3个阶段碳排放量的总和。建筑运行阶段碳排放计算范围包括暖通空调、生活热水、照明及电梯、可再生能源、建筑碳汇系统在建筑运行期间的碳排放量,路基排水沟不涉及前述计算范围内容,故可不计算运行阶段碳排放量。根据路基排水沟的施工流程(图1),路基排水沟的施工不包含拆除工程,故不计算拆除阶段的碳排放量。因此,路基排水沟施工的总碳排放量包括建材生产、建材运输以及建造3个阶段的碳排放量,如式(1)所示:

$$C = C_{sc} + C_{ys} + C_{jz} \quad (1)$$

式中: $C$ 为总碳排放量; $C_{sc}$ 为建材生产阶段碳排放量; $C_{ys}$ 为建材运输阶段碳排放量; $C_{jz}$ 为建造阶段碳排放量。

#### 2.1.1 建材生产阶段

建材生产阶段的碳排放量为各主要建材消耗量与各碳排放系数乘积之和。路基排水沟消耗的主要建材为混凝土、水泥砂浆以及钢模板,根据《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366—2019)<sup>[20]</sup>,建材生产阶段的碳排放量计算如式(2)所示:

$$C_{sc} = j_1 \cdot F_1 + j_2 \cdot F_2 + j_3 \cdot F_3 \quad (2)$$

$$j_1 = (l_1 + l_2) \frac{hP}{2} -$$

$$\left[ 2l_2 - \frac{(l_2 - l_1)(h - a)}{h} - 4a \right] \frac{(h - a)P}{2} \quad (3)$$

$$j_2 = 0.1l_1P \quad (4)$$

$$j_3 = 0.785 \frac{P(h - a) \sqrt{4h^2 + (l_2 - l_1)^2}}{2h} \quad (5)$$

式中: $j_1$ 为路基排水沟沟身的混凝土用量; $j_2$ 为砂浆垫层砂浆用量; $j_3$ 为钢模板钢材用量; $P$ 为路基排水沟建造长度; $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 分别为生产混凝土的碳排放系数、生产水泥砂浆的碳排放系数以及生产钢材的碳排放

系数,根据《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)<sup>[20]</sup>取值如表1所示。

表1 主要建筑材料生产碳排放系数  
Table 1 Carbon emission coefficient of major building material production

建材种类	单位	碳排放系数
钢材	t/t	2.050
普通水泥	t/t	0.735
碎石	t/t	2.180
M7.5水泥砂浆	t/t	0.204
C30混凝土	t/m <sup>3</sup>	0.295

### 2.1.2 建材运输阶段

路基排水沟运输阶段的碳排放主要考虑建材运输以及开挖土体运输的碳排放。其中建材运输的碳排放包括混凝土、水泥砂浆以及钢模板的运输过程中的碳排放,路基排水沟开挖土体在实际工程中采用就近堆弃方式,故可以不考虑开挖土体运输的碳排放。

建材运输的碳排放由建材运输车产生。建材运输车等机械设备产生的碳排放量与其消耗能源量成比例关系,比例系数为机械设备消耗各类能源的碳排放系数,结合《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)<sup>[20]</sup>,取值如表2所示。因此,根据《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)<sup>[20]</sup>,建材运输阶段的碳排放量的计算公式为:

$$C_{YS} = \left( \frac{j_1 \cdot f_1 \cdot Q_{F_1}}{\rho_1} + \frac{j_2 \cdot f_2 \cdot Q_{F_2}}{\rho_2} + \frac{j_3 \cdot f_3 \cdot Q_{F_3}}{\rho_3} \right) \cdot x \quad (6)$$

式中: $x$ 为运距; $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 分别为混凝土、水泥砂浆以及钢模板运输车每公里能源消耗量; $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 、 $\rho_3$ 分别为混凝土、水泥砂浆以及钢模板运输车单车容量; $Q_{F_1}$ 、 $Q_{F_2}$ 、 $Q_{F_3}$ 分别为混凝土、水泥砂浆以及钢模板运输车消耗能源的碳排放系数。

表2 不同能源设备的碳排放系数

Table 2 Carbon emission coefficient of different energies

供给能源类型	单位	碳排放系数
柴油	kg/kg	3.10
汽油	kg/kg	2.93
电能	kg/(kW·h)	0.78

### 2.1.3 建造阶段

建造阶段的碳排放主要考虑建造过程中所使用的机械设备消耗驱动能源所产生的碳排放。路基排水沟建造过程包括沟槽开挖和混凝土浇筑,根据《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)<sup>[20]</sup>,路基排水沟建造阶段的碳排放量计算公式为:

$$C_{JZ} = W_1 \cdot T_1 \cdot E_{F_1} + W_2 \cdot T_2 \cdot E_{F_2} \quad (7)$$

式中: $W_1$ 为挖掘机单位时间内消耗的油量或电能; $T_1$ 为沟槽开挖中土方开挖消耗的时间; $E_{F_1}$ 为挖掘机消耗能源的碳排放系数; $W_2$ 为混凝土浇筑所用设备单位时间内消耗的油量或电能; $T_2$ 为灌注混凝土消耗的时间; $E_{F_2}$ 为灌注混凝土所用设备消耗能源的碳排放系数。 $E_{F_1}$ 和 $E_{F_2}$ 取决于不同功能的工程机械设备的消耗能源类型,具体取值如表2所示。

### 2.1.4 总碳排放量

综上所述,将式(2)、(6)、(7)代入式(1)即可得到路基排水沟施工的总碳排放量的表达式:

$$C = \sum_{i=1}^3 (j_i \cdot F_i) + \sum_{i=1}^3 \frac{j_i \cdot f_i \cdot Q_{F_i} \cdot x}{\rho_i} + \sum_{i=1}^2 (W_i \cdot T_i \cdot E_{F_i}) \quad (8)$$

## 2.2 投资成本计算

路基排水沟的投资成本计算与碳排放量计算相同,只考虑建材生产、建材运输以及建造3个阶段的投资成本,如式(9)所示:

$$I = I_{SC} + I_{YS} + I_{JZ} \quad (9)$$

式中: $I$ 为总投资成本; $I_{SC}$ 为建材生产阶段投资成本; $I_{YS}$ 为建材运输阶段投资成本; $I_{JZ}$ 为建造阶段投资成本。

路基排水沟的建材成本由浇筑所用混凝土、铺设找平层用水泥砂浆以及立模所用钢模板的生产成本组成。因此,路基排水沟建材生产成本的计算公式为:

$$I_{SC} = j_1 \cdot k_1 + j_2 \cdot k_2 + j_3 \cdot k_3 \quad (10)$$

式中: $k_1$ 为混凝土单价; $k_2$ 为水泥砂浆单价; $k_3$ 为钢材单价;其他参数意义同前。

路基排水沟的运输成本主要为各建材运输产生的运输费用,其表达式为:

$$I_{YS} = \left( \frac{j_1 \cdot r_1}{\rho_1} + \frac{j_2 \cdot r_2}{\rho_2} + \frac{j_3 \cdot r_3}{\rho_3} \right) \cdot x \quad (11)$$

式中: $r_1$ 为混凝土运输单位运距单价; $r_2$ 为水泥砂浆运输单位运距单价; $r_3$ 为钢材运输单位运距单价;其他

参数意义同前。

路基排水沟建造成本为沟槽开挖以及混凝土浇筑所产生的费用,因此,路基排水沟建造成本的表达式为:

$$I_{JZ} = T_1 \cdot k_4 + T_2 \cdot k_5 \quad (12)$$

式中: $k_4$ 为沟槽开挖平均每小时成本; $k_5$ 为混凝土浇筑平均每小时成本。 $k_4$ 和 $k_5$ 包含人工费、机械费与管理费等。

综上所述,将式(10)~(12)代入式(9)即得到路基排水沟的总投资成本的表达式为:

$$I = \sum_{i=1}^3 (j_i \cdot k_i) + \sum_{i=1}^3 \frac{j_i \cdot r_i \cdot x}{p_i} + \sum_{i=1}^2 (T_i \cdot k_{i+3}) \quad (13)$$

### 3 综合方案比选

为平衡施工过程中产生的碳排放与投资成本,基于支付意愿理论<sup>[21]</sup>,引入碳交易<sup>[22]</sup>的概念,将二氧化碳的排放权作为一种商品进行交易,以实现基于碳排放量的施工方案综合比选。根据2021年生态环境部发布的《碳排放权交易管理暂行条例(草案修改稿)》,中国目前碳排放配额以免费分配为主,逐步扩大有偿分配比例,同时在碳市场成熟后,引入碳税<sup>[23]</sup>。因此,本文不计算实际碳排放量超出碳排放配额部分的成本,而是将施工方案的投资成本通过碳交易的方式转化为碳排放量,即投资成本可购买的碳排放权,再与实际施工过程中产生的碳排放量结合得到施工方案的等效碳排放量,如式(14)所示,碳交易过程中二氧化碳排放权的定价由实时市场供需关系所决定。对比液压力式滑模施工与传统支模法施工两种方案的等效碳排放量,值小者对应的施工方案为减碳理念下的较优方案,若两者相等则认为达到了路基排水沟减碳方案综合比选的分界线。

$$C_{\text{等效}} = I/P_{\text{CO}_2} + C \quad (14)$$

式中: $C_{\text{等效}}$ 与 $C$ 分别为等效碳排放量与实际碳排放量; $I$ 为总投资成本; $P_{\text{CO}_2}$ 为实时碳交易价格。

针对勐绿高速公路工程,基于等效碳排放量对路基排水沟的传统施工方案与液压力式施工方案进行综合比选。对于图2的路基排水沟碳排放计算模型,拟定路基排水沟的底边长 $l_1$ 以及开挖深度 $h$ 均为0.6 m,对水沟上边长为 $l_2$ ,建材运距 $x$ 以及水沟建造长度 $P$ 选取5个水平,混凝土浇筑厚度 $a$ 选取4个

水平设计正交试验,且不考虑参数之间的相互影响,5个水平取值如表3所示。根据上海环境能源交易所2021年10月的数据,将单位碳排放交易额 $P_{\text{CO}_2}$ 定为42元/t。

表3 各因素各水平取值

Table 3 Values of each factor at each level

水平	水沟上边长 $l_2$ /m	混凝土浇筑厚度 $a$ /m	建材运距 $x$ /km	水沟建造长度 $P$ /km
1	0.6	0.05	10	10
2	0.8	0.10	15	20
3	1.0	0.15	20	30
4	1.2	0.20	25	40
5	1.4	0.20	30	50

基于25组三参数五水平一参数四水平混合正交试验,传统支模法施工碳排放量、液压力式滑模施工碳排放量、传统支模法施工成本、液压力式滑模施工成本、传统支模法施工等效碳排放量、液压力式滑模施工等效碳排放量以及各组试验最优施工方案的试验结果如表4所示。根据正交试验结果可知:液压力式滑模施工方案施工过程的碳排放与投资成本均优于传统支模法施工方案,基于等效碳排放量得出的最优方案可知,液压力式滑模施工方案也优于传统支模法施工方案。

对所选取的水沟上边长、混凝土浇筑厚度、建材运距以及水沟建造长度这4个关键因素进行敏感性分析,计算传统支模法施工等效碳排放量和液压力式滑模施工等效碳排放量4个参数各水平的平均值,并求取各参数的极差,如表5所示。极差值越大说明该参数对试验结果影响越大。对于传统支模法施工方案的参数敏感性排序为:水沟建造长度 $P >$ 浇筑厚度为 $a >$ 水沟上边长为 $l_2 >$ 建材运距 $x$ ;对于液压力式滑模施工方案的参数敏感性排序为:浇筑厚度为 $a >$ 水沟建造长度 $P >$ 建材运距 $x >$ 水沟上边长为 $l_2$ 。可以看出:浇筑厚度与水沟建造长度对液压力式滑模施工与传统支模法施工两种方案的影响较大,因此在路基排水沟施工方案设计时应着重考虑浇筑厚度与水沟建造长度。从极差分析表中选择四因素各水平中碳排放量最小的水平,即可得到两种施工方案4个参数的最优值,对于传统支模法施工方案,水沟上边长为0.6 m、混凝土浇筑厚度0.15 m、

表 4 正交试验结果

Table 4 Orthogonal test results

试验 编号	水沟上边 长 $l_2/m$	浇筑厚度 $a/m$	建材运 距 $x/km$	建造长度 $P/km$	支模法碳排 放量/万 t	滑模法碳排 放量/万 t	支模法成 本/万元	滑模法成 本/万元	支模法等效碳 排放量/万 t	滑模法等效碳 排放量/万 t	最优方 案
1	0.6	0.05	10	10	1.20	0.21	950.28	57.16	23.83	1.57	2
2	0.6	0.10	20	40	6.90	2.94	3 602.35	326.32	92.67	10.71	2
3	0.6	0.15	30	20	4.98	3.03	1 694.29	206.39	45.32	7.94	2
4	0.6	0.20	15	50	8.76	4.92	3 888.84	599.27	101.35	19.19	2
5	0.6	0.20	25	30	7.27	4.75	2 347.81	362.03	63.17	13.37	2
6	0.8	0.05	30	40	7.06	2.30	3 895.63	231.15	99.82	7.81	2
7	0.8	0.10	15	20	3.06	1.14	1 818.70	163.76	46.36	5.04	2
8	0.8	0.15	25	50	11.21	6.47	4 278.45	520.39	113.08	18.86	2
9	0.8	0.20	10	30	4.32	2.10	2 358.70	364.80	60.48	10.79	2
10	0.8	0.20	20	10	2.13	1.31	791.11	122.41	20.96	4.23	2
11	1.0	0.05	25	20	3.35	0.97	2 013.06	115.59	51.28	3.73	2
12	1.0	0.10	10	50	6.76	2.00	4 695.07	410.95	118.55	11.78	2
13	1.0	0.15	20	30	6.03	3.20	2 649.42	314.85	69.11	10.69	2
14	1.0	0.20	30	10	2.89	1.97	8 23.98	125.42	22.51	4.96	2
15	1.0	0.20	15	40	7.35	4.12	3 265.47	496.53	85.10	15.94	2
16	1.2	0.05	20	50	8.00	1.98	5 298.16	289.02	134.15	8.86	2
17	1.2	0.10	30	30	6.91	3.33	3 006.25	251.03	78.49	9.31	2
18	1.2	0.15	15	10	1.78	0.83	927.28	105.81	23.86	3.35	2
19	1.2	0.20	25	40	10.51	6.78	3 457.65	508.61	92.84	18.89	2
20	1.2	0.20	10	20	3.09	1.47	1 712.87	251.72	43.88	7.46	2
21	1.4	0.05	15	30	4.63	0.92	3 389.22	173.44	85.32	5.05	2
22	1.4	0.10	25	10	2.17	0.94	1 066.49	83.97	27.56	2.94	2
23	1.4	0.15	10	40	6.25	2.35	3 941.26	426.75	100.09	12.51	2
24	1.4	0.20	20	20	4.72	2.81	1 834.46	257.72	48.40	8.95	2
25	1.4	0.20	30	50	15.50	10.31	4 614.52	648.81	125.37	25.76	2

注:最优方案栏中,“1”表示传统支模法施工方案,“2”表示液压力式滑模施工方案。

表 5 极差分析表

Table 5 Range analysis table

项目	水沟上边长 $l_2$		浇筑厚度 $a$		建材运距 $x$		建造长度 $P$	
	支模法等效碳 排放量/万 t	滑模法等效碳 排放量/万 t						
1	65.27	10.55	78.88	5.40	69.36	8.82	23.75	3.41
2	68.14	9.34	72.72	7.96	68.40	9.71	47.05	6.62
3	69.31	9.42	70.29	10.67	73.06	8.69	71.31	9.84
4	74.64	9.57	132.81	25.91	69.59	11.56	94.10	13.17
5	77.35	11.04	132.81	25.91	74.30	11.15	118.50	16.89
极差	12.08	1.70	62.52	20.50	5.90	2.87	94.75	13.48

建材运距为15 km以及水沟建造长度为10 km;对于液压动力式滑模施工方案,水沟上边长为0.8 m、混凝土浇筑厚度0.05 m、建材运距为20 km以及水沟建造长度为10 km。

基于25组正交试验结果,分析液压动力式滑模法与传统支模法各阶段的等效碳排放量贡献率,并计算平均值,结果如图3所示。

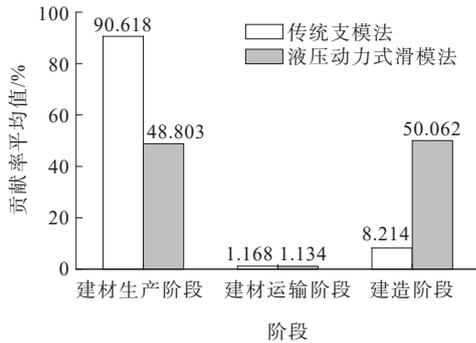


图3 各阶段等效碳排放量贡献率平均值

Figure 3 Average contribution rate of equivalent carbon emissions in each stage

由图3可以看出:液压动力式滑模法建材生产阶段与建造阶段的等效碳排放量对总碳排放量的贡献率较高,采用该方案施工时应该控制建材生产阶段与建造阶段的碳排放量;而传统支模法的建材生产阶段等效碳排放量对总碳排放量的贡献率最高,采用该方案施工时应该着重注意减少建材生产阶段的碳排放量。

减碳率是指液压动力式滑模法的等效碳排放量较传统支模法减少的比率,计算公式如式(15)所示。根据式(15)计算25组正交试验的减碳率,并取平均值,结果如图4所示。液压动力式滑模法3个阶段的等效碳排放量均少于传统支模法,且建材生产阶段与建材运输阶段的减碳率为91.92%和85.06%。施工全阶段液压动力式滑模法的减碳率为85.58%,因此选择路基排水沟施工方案时建议选择液压动力式滑模法。

$$P_{CR} = \frac{C_{\text{等效,支模}} - C_{\text{等效,滑模}}}{C_{\text{等效,支模}}} \times 100\% \quad (15)$$

式中: $P_{CR}$ 为减碳率; $C_{\text{等效,支模}}$ 与 $C_{\text{等效,滑模}}$ 分别为传统支模法等效碳排放量和液压动力式滑模法等效碳排放量。

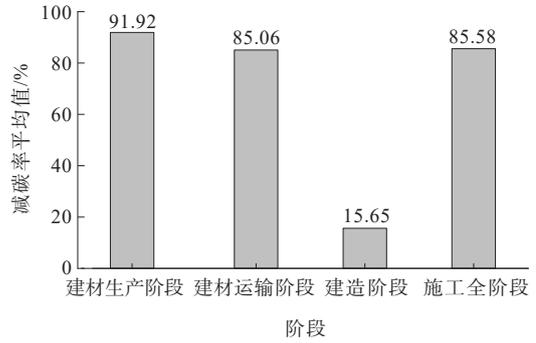


图4 液压动力式滑模法各阶段减碳率平均值

Figure 4 Average carbon reduction rate of hydraulically powered sliding formwork in each stage

由于在建材生产及运输阶段,液压动力式滑模施工方案机械化一次性成槽技术开挖的沟槽较为平整,节约了找平层水泥砂浆的使用,同时液压动力式滑模设备的引入减少了钢模板的使用,减少了水泥砂浆和钢模板在生产与运输过程中产生的碳排放和投资成本;在建造阶段,传统施工工艺采用机械开挖+人工开挖的方式,施工效率低下,二次返工现象严重,机械化一次性成槽技术能够达到取出挖斗倒土之后即可得到设计图纸要求的水沟沟槽,减少了人工成本的投入,并提高了施工效率,减少挖掘机的开挖时间,故也降低了机械开挖过程中产生的碳排放与机械费用;传统施工工艺混凝土浇筑过程需要立模与拆模等工艺,工序复杂烦冗,且最后混凝土的浇筑成型质量不佳,容易出现蜂窝麻面,滑模机的使用加快了混凝土的摊铺速度,降低了人工费、管理费等投资成本,但滑模机的引入使机械费增加,导致建筑阶段液压动力式滑模法比传统支模法的减碳率低。

## 4 结论

(1) 依托实际工程,建立路基排水沟施工的碳排放计算模型,介绍传统支模法与液压动力式滑模法两种施工方案的施工流程,并明确从建材生产、建材运输、建造3个阶段计算两种施工方案的碳排放与投资成本。

(2) 选取水沟上边长、浇筑厚度、建材运距与建造长度4个关键因素设计正交试验,基于等效碳排放量对两种施工方案的综合比选,得到液压动力式滑

模法均优于传统支模法。并进行极差分析,浇筑厚度与建造长度对两种施工方案的影响均较大,在考虑减碳的施工方案设计时,应着重考虑浇筑厚度与水沟建造长度。

(3) 传统支模法建材生产阶段对总碳排放量的贡献率平均值超过 90%,选择该方案施工时应着重注意控制建材生产阶段的碳排放;液压力式滑模法建材生产与建造阶段对总碳排放量的贡献率较高,选择该方案施工应注意减少建材生产与建造阶段的碳排放。

(4) 液压力式滑模法从沟槽开挖和混凝土浇筑两个施工流程改进了传统支模法,因此 3 个阶段的等效碳排放量均少于传统支模法,考虑碳排放量,路基排水沟施工方案建议优选液压力式滑模法。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 彭斯震,何霄嘉,张九天,等.中国适应气候变化政策现状、问题和建议[J].中国人口·资源与环境,2015,25(9):1-7.  
PENG Sizhen, HE Xiaojia, ZHANG Jiutian, et al. Current status, problems and recommendations on climate change adaptation policies in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(9): 1-7.
- [2] 葛全胜,郑景云,郝志新.过去 2000 年亚洲气候变化(PAGES-Asia2k)集成研究进展及展望[J].地理学报,2015,70(3):355-363.  
GE Quansheng, ZHENG Jingyun, HAO Zhixin. PAGES synthesis study on climate changes in Asia over the last 2000 years: Progresses and perspectives[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(3): 355-363.
- [3] HALL J E. Paris agreement on climate change: A diplomatic triumph: How can it succeed? [J]. New Global Studies, 2016, 10(2): 176-180.
- [4] 汪超群,陈懿,迟长云,等.基于潮流分布矩阵的电力系统碳排放流计算方法[J].科学技术与工程,2022,22(12):4835-4842.  
WANG Chaoqun, CHEN Yi, CHI Changyun, et al. Calculation method of power system carbon emission flow based on power flow distribution matrix[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(12): 4835-4842.
- [5] 张涛.《2030年前碳达峰行动方案》解读[J].生态经济,2022,38(1):9-12.  
ZHANG Tao. Interpretation of peak carbon dioxide emissions Action Plan to 2030[J]. Ecological Economy, 2022, 38(1): 9-12.
- [6] 王晶晶,李琦芬,杨涌文.基于变权理论的近零碳排放园区综合评价研究[J].科学技术与工程,2021,21(1):334-340.  
WANG Jingjing, LI Qifen, YANG Yongwen. Comprehensive evaluation of nearly zero carbon emission parks based on variable weight theory[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(1): 334-340.
- [7] 杨源.基于居民出行规律实证研究的城市低碳交通政策模拟[D].北京:清华大学,2016.  
YANG Yuan. Simulation of low carbon urban transport policies based on empirical analysis of citizen travel[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [8] 汪慧颖.广西高速公路建设期碳排放计算及预测研究[D].南宁:广西大学,2022.  
WANG Huiying. Study on calculation and prediction of carbon emissions during expressway construction in Guangxi[D]. Nanning: Guangxi University, 2022.
- [9] 闫强,易可良,李平,等.沥青路面结构类型对建设期碳排放影响分析[J].中外公路,2021,41(2):41-48.  
YAN Qiang, YI Kelian, LI Ping, et al. Analysis on impact of structural types of asphalt pavement on carbon emissions during construction period[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(2): 41-48.
- [10] 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.
- [11] CHANG B, KENDALL A. Life cycle greenhouse gas assessment of infrastructure construction for California's high-speed rail system[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2011, 16(6): 429-434.
- [12] 宋庄庄,朱洪洲.沥青路面全寿命周期节能减排策略案例研究[J].中外公路,2020,40(5):36-42.  
SONG Zhuangzhuang, ZHU Hongzhou. Case study on energy conservation and emission reduction strategy of asphalt pavement in life cycle[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(5): 36-42.

- [13] CASS D, MUKHERJEE A. Calculation of greenhouse gas emissions for highway construction operations by using a hybrid life-cycle assessment approach: case study for pavement operations[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2011, 137(11): 1015-1025.
- [14] 万杰. 基于LCA的高速公路路面施工碳排放优化研究[D]. 合肥: 合肥学院, 2022.  
WAN Jie. Research on carbon emission optimization of highway pavement construction based on LCA[D]. Hefei: Hefei University, 2022.
- [15] 孟祥晨. 沥青路面建设期能耗及碳排放量化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.  
MENG Xiangchen. Study on energy consumption and carbon emission of asphalt pavement during construction period[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [16] 彭波, 蔡春丽, 尹光凯, 等. 沥青路面碳排放计算方法及低碳建设技术[J]. *中外公路*, 2016, 36(4): 18-22.  
PENG Bo, CAI Chunli, YIN Guangkai, et al. Calculation method of carbon emission of asphalt pavement and low-carbon construction technology[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2016, 36(4): 18-22.
- [17] 罗大天, 李嘉慧, 邹静蓉. 多雨地区高速公路排水系统有效性评价方法研究[J]. *中外公路*, 2023, 43(3): 30-36.  
LUO Datian, LI Jiayi, ZOU Jingrong. Study on effectiveness evaluation method of expressway drainage system in rainy area[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2023, 43(3): 30-36.
- [18] 包焯明. 路基梯形水沟滑模施工技术研究[J]. *铁道建筑技术*, 2019(2): 141-144.  
BAO Yeming. Technology research on constructing sliding formwork used in subgrade trapezoidal ditch[J]. *Railway Construction Technology*, 2019(2): 141-144.
- [19] 傅重阳. 路基排水沟机械化一次性成型施工技术[J]. *建筑机械化*, 2017, 38(10): 62-65.  
FU Chongyang. The construction technology of subgrade drainage ditch one-time molding machinery[J]. *Construction Mechanization*, 2017, 38(10): 62-65.
- [20] 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.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for building carbon emission calculation: GB/T 51366—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [21] YAGHI A, ALIBELI M A. Theoretical and empirical analyses of citizens' willingness to pay: Ethical and policy implications for the environment in United Arab Emirates [J]. *Journal of Emerging Trends in Economics and Management Sciences*, 2018, 9(5): 291-303.
- [22] 林立身. 建筑运行部门的碳交易制度设计: 基于中国碳交易试点的研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.  
LIN Lishen. Research on the emission trading system on building sector[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.
- [23] 李楠, 王炜, 马雪, 等. 考虑碳交易成本及区域能源优化的配电网扩展规划研究[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(8): 3101-3109.  
LI Nan, WANG Wei, MA Xue, et al. Distribution network expansion planning considering carbon trading cost and regional energy optimization[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(8): 3101-3109.