



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405673

引用格式:杜宇君,周艳家,刘映晶,等.基于生命周期的盾构渣土再生同步浆液减碳效果分析:以苏州地铁8号线南泽庄-唐庄区间为例[J].科学技术与工程,2025,25(22):9542-9549.

Du Yujun, Zhou Yanjia, Liu Yingjing, et al. Carbon emission reduction analysis of producing synchronous slurry from shield muck based on life cycle assessment; a case study on the Nanzezhuang-Tangzhuang Section of Suzhou Metro Line 8[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(22): 9542-9549.

交通运输

# 基于生命周期的盾构渣土再生同步浆液减碳效果分析: 以苏州地铁8号线南泽庄-唐庄区间为例

杜宇君<sup>1,2</sup>, 周艳家<sup>3</sup>, 刘映晶<sup>4</sup>, 李闻韬<sup>1,2\*</sup>

(1. 苏州大学轨道交通学院, 苏州 215031; 2. 江苏省智慧城轨工程研究中心, 苏州 215031;  
3. 中铁电气化局集团有限公司, 北京 100071; 4. 中天建设集团有限公司, 杭州 310016)

**摘要** 随着中国城市轨道交通建设的飞速发展,巨量盾构渣土随之产生,其运输、堆填造成严重的环境污染问题。依托苏州轨道交通8号线06标段,以该项目盾构渣土为研究对象,采用全生命周期评价方法,对盾构渣土常规处置和资源化利用的碳排放进行了分析。研究结果表明:本工程的盾构渣土总量为 $2.64 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,若进行传统的填埋处理,其全生命周期的碳排放将会达到 $3.00 \times 10^6$ 碳排放当量;当填埋深度为5 m时,盾构渣土将占用 $5.28 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的土地。若采用工业固废处理盾构渣土制备同步注浆材料,其28 d强度可达2.5 MPa,减少注浆原材料成本46.7万元/km,降低碳排放约 $4.6 \times 10^5$ 碳排放当量每千米。研究结果可为盾构渣土资源化利用提供参考。

**关键词** 盾构隧道; 渣土利用; 生命周期评价; 同步注浆; 碳排放

中图法分类号 U25 X731; 文献标志码 A

## Carbon Emission Reduction Analysis of Producing Synchronous Slurry from Shield Muck Based on Life Cycle Assessment: A Case Study on the Nanzezhuang-Tangzhuang Section of Suzhou Metro Line 8

DU Yu-jun<sup>1,2</sup>, ZHOU Yan-jia<sup>3</sup>, LIU Ying-jing<sup>4</sup>, LI Wen-tao<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Rail Transportation, Soochow University, Suzhou 215031, China;  
2. Intelligent Urban Rail Engineering Research Center of Jiangsu Province, Suzhou 215031, China;  
3. China Railway Electrification Bureau Group Co., Ltd., Beijing 100071, China;  
4. Zhongtian Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 310016, China)

**[Abstract]** With the rapid development of urban rail transit in China, a large amount of muck is generated during shield tunneling, and its transportation and landfill will cause serious environmental issues. Based on the Suzhou Metro Line 8 section 6, full life cycle assessment method was used to analyze and compare the carbon emissions of conventional disposal and resource utilization of shield muck. Research results indicate that the total amount of muck produced during shield tunneling is  $2.64 \times 10^5 \text{ m}^3$  in this project. When traditional burial treatment is carried out for shield muck, the carbon emissions throughout its entire life cycle will reach  $3.00 \times 10^6$  carbon emission equivalents. In this case,  $5.28 \times 10^4 \text{ m}^2$  of land with a 5-meter landfill depth will be occupied by shield muck. If shield muck and industry-byproducts are used for preparing synchronous grouting materials, the 28-day strength of the grouting material can reach 2.5 MPa. Grouting raw material cost by 467 thousand yuan/km will be reduced, and about  $4.6 \times 10^5$  carbon emission equivalents per kilometer will be reduced. The findings provide reference for optimizing the resource utilization of shield muck.

**[Keywords]** shield tunnel; shield muck utilization; life cycle assessment; synchronous grouting; carbon emission

收稿日期: 2024-07-29; 修订日期: 2025-04-28

基金项目: 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(23KJB560023)

第一作者: 杜宇君(2000—),男,汉族,江苏扬州人,硕士研究生。研究方向:盾构渣土资源化利用。E-mail:20235246006@stu.suda.edu.cn。

\*通信作者: 李闻韬(1993—),男,汉族,湖南娄底人,博士,副教授。研究方向:软土处理、固废资源化、隧道工程。E-mail:wli2022@suda.edu.cn。

近年来,中国地下工程建设发展迅速,截至2022年年底,中国隧道总里程达到48 762 km,较2021年增长3 008.1 km<sup>[1]</sup>。以隧道平均直径6 m计算,仅2022年已产出渣土约 $8.5 \times 10^7$  m<sup>3</sup>,按照“十四五”规划,中国预计新增城市轨道交通运营里程3 000 km,若其中75%为地铁,则地铁新增渣土总量超 $8.5 \times 10^7$  m<sup>3</sup>。当前对于盾构渣土的处置方式主要是转运-填埋,这种处置方式侵占土地、造成生态环境破坏,且在处置过程中产生大量碳排放。

中国《绿色交通“十四五”发展规划》中提出“绿色交通基础设施建设行动”,聚焦工业固废和隧道弃渣循环利用,大力推进隧道弃渣用于公路路基填筑和机制砂、水泥砖生产。当前,使用水泥等传统材料处理盾构渣土的研究已经较为成熟。盾构渣土经过一系列改良处理可以作为路基填料<sup>[2]</sup>、免烧渣土轻集料<sup>[3-4]</sup>、高性能非烧结砖<sup>[5]</sup>。在利用盾构渣土制备盾构同步浆液方面,刘慧刚<sup>[6]</sup>在废弃泥浆中加入膨润土、河砂、水泥、粉煤灰,得到符合工程要求的单液硬性浆;吴克雄等<sup>[7]</sup>利用废弃泥浆取代水与膨润土配置同步浆液材料,提出利用水泥与粉煤灰处理盾构渣土,制得性能较好的砂浆。上述盾构渣土处理方法使用水泥作为主要胶凝材料,然而,水泥的生产过程能耗高且碳排放量大。在中国2030年碳达峰,2060年碳中和的战略下,需要寻求更加低碳环保的渣土处理方式。管茂成<sup>[8]</sup>使用高炉矿渣粉(ground granulated blast-furnance slag, GGBS)、粉煤灰、稻壳灰等新型绿色胶凝材料代替水泥固化工程渣土用作工程回填料;Ni等<sup>[9]</sup>使用高炉矿渣、生石灰等材料处理盾构渣土制备了一种新型注浆材料。上述研究提倡降低水泥的用量或使用低碳材料用于渣土处理,进一步降低碳排放和环境影响。随着建筑材料(如砂石)人工和环境成本的增加,盾构渣土的资源化利用可替代部分建筑材料,缓解资源短缺问题<sup>[10-11]</sup>。相关研究表明将盾构渣土转化为低碳建筑材料可减少32%~76%的碳排放<sup>[12]</sup>。在此基础上,本文研究聚焦于利用固废胶凝材料处理盾构渣土,将其用于制备同步注浆材料。目前单位里程盾构隧道建设阶段碳排放量约为 $1.3 \times 10^4$  t CO<sub>2</sub>eq/km,建材生产、建材运输及施工建造阶段的碳排放量占比分别是75.3%、1.7%和23%<sup>[13]</sup>,因此减少建材生产阶段的碳排放是盾构隧道建设减碳的有效手段。在施工阶段,提高施工弃渣的回收利用效率与可再生材料的使用占比,优先使用本地建材,增大就地取材率<sup>[14]</sup>。将盾构渣土制备同步浆液属于原位利用,可以减少渣土外运成本与碳排放。

当前,对于渣土资源化利用的研究正在不断深入。生命周期评价(life circle assessment, LCA)是一种评价产品(包括服务或系统)从原材料开采到最终处置全过程潜在综合环境影响的定量化分析方法<sup>[15]</sup>。现有的隧道碳排放研究范围涵盖建材生产、运输、施工建造、运营维护和拆除的部分或全部阶段<sup>[16]</sup>。通过生命周期评价(LCA)模型量化盾构渣土资源化过程中的碳排放并分析各阶段的减排潜力,为实现低碳建造提供了科学依据<sup>[12,17]</sup>。全昭熹等<sup>[18]</sup>使用生命周期评价方法对深圳隧道施工渣土用于路基填料的减碳效果进行了分析,提出渣土用于路基填筑相比常规渣土处理方法可显著减少碳排放。然而,对于盾构渣土资源化利用的全生命周期评价亦可考虑其他层面的环境影响,如温室效应、酸化、水土富营养化、雾霾等问题。目前尚无针对盾构渣土制备同步浆液的减碳效果和环境评价的研究,缺乏对渣土资源化利用的环境效益评估。

因此,基于苏州轨道交通8号线06标段的实际工程案例,现以盾构渣土为研究对象,结合温室气体排放系数库与生命周期评价(LCA)软件,对盾构渣土资源化利用(用于制备同步浆液)的减碳效果及环境影响进行全面分析。通过将资源化利用的分析结果与传统处理方法进行对比,直观展现盾构渣土资源化利用的减碳潜力及环境效益。此外,构建环境评价模型,充分考虑渣土资源化利用过程中的各个中间环节,系统评估其碳排放与环境影响。以期为盾构渣土资源化利用提供科学依据,推动城市轨道交通工程绿色低碳发展。

## 1 碳排放评价方法与数据来源

### 1.1 生命周期碳排放评价方法

生命周期评价(LCA)是一种评价产品(包括服务或系统)从原材料开采到最终处置全过程潜在综合环境影响的定量化分析方法。生命周期评价包括4个阶段:目的和范围的确定、清单分析、影响评价、解释<sup>[12]</sup>,其相互关系如图1所示。

碳排放是温室气体排放的简称,包含二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)、甲烷(CH<sub>4</sub>)等。根据不同

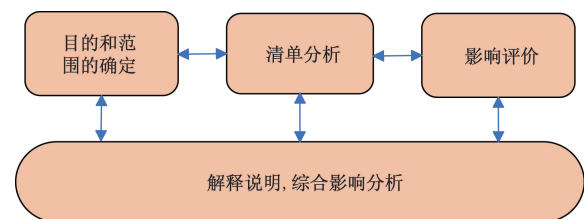


图1 生命周期评价框架

Fig. 1 Life cycle assessment framework

气体对温室效应的贡献,所有温室气体都换算成CO<sub>2</sub>当量<sup>[19]</sup>。

本文研究运用 LCA 理论,依托苏州地铁 8 号线 06 标段,以其产生的盾构渣土为研究对象,对盾构渣土进行资源化利用(制备同步浆液)的减碳情况进行定量分析,并对其碳排放当量(CO<sub>2</sub> equivalent, CO<sub>2</sub>eq)与环境影响进行合理地估算。

## 1.2 工程概况及数据来源

苏州市轨道交通 8 号线工程土建施工项目 VIII-TS-06 标,包括:地下两层岛式车站:南泽庄站、古楼站;盾构区间:南泽庄站-唐庄站-古楼站(唐庄站改造)。其中南-唐区间盾构隧道左右线合计 2 925.67 m,唐庄站-古楼站区间左右线合计 3 103.30 m。南泽庄站~唐庄站区间,盾构穿越的土层为:③3 黏质粉土,④2 粉砂夹粉土,⑤1 粉质黏土,⑥1 黏土,区间穿越③3 微承压水层。唐庄站-古楼站盾构区间,盾构穿越的土层为:③3 黏质粉土,④1 粉质黏土,④2 粉砂夹粉土,⑤1 粉质黏土,⑥1 黏土,区间穿越③3 微承压水层。

本文研究采用的隧道长度、盾构直径、运输距离和施工机械能耗等数据主要来源于苏州轨道交通 8 号线 06 标段工程实例。相关数据如表 1 所示。

本文研究采用的碳排放因子数据如表 2 所示,主要来源于 CPCD(中国产品全生命周期温室气体排放系数库)<sup>[20]</sup>。

清单分析采用过程法,数据分为前景数据和背景数据两部分。前景数据是指从直接测量或基于源头直接测量的计算中获得的单位过程或活动的定量值,包含材料及能源的消耗量,数据来源于标书、设计数据、技术手册或相关机构的统计数据等。

背景数据指间接测量、计算或获得单位过程的量化值,包含各类建材和能源的碳排放因子,可从 IPCC、生命周期数据库、现有文献和规范中获取<sup>[16]</sup>。

表 1 施工数据汇总

Table 1 Summary of construction data

参数类别	参数	数值
隧道	隧道总长/km	6.03
	盾构直径/m	6.8
	管片外径/m	6.6
	每环理论注浆量/m <sup>3</sup>	2.9
	每环实际出土量/m <sup>3</sup>	52
	管片环数	5 080
机械	盾构功率/kW	945
	盾构推进速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	40
	渣土筛分机 GTS2265 功率/kW	30
	螺旋输送机功率/kW	5.5
	皮带机功率/kW	30
	混凝土搅拌机功率/kW	25

表 2 碳排放因子汇总

Table 2 Summary of carbon emission factors

类型	CO <sub>2</sub> 排放因子
电力/[kgCO <sub>2</sub> eq·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.803
汽油/(kgCO <sub>2</sub> eq·kg <sup>-1</sup> )	3.74
柴油/(kgCO <sub>2</sub> eq·kg <sup>-1</sup> )	3.797
30 t 重型柴油货车运输/[kgCO <sub>2</sub> eq·(t·km) <sup>-1</sup> ]	0.078
P. 042.5 普通硅酸盐水泥/(kgCO <sub>2</sub> eq·t <sup>-1</sup> )	799
砂/(kgCO <sub>2</sub> eq·t <sup>-1</sup> )	11.8
粉煤灰/(kgCO <sub>2</sub> eq·t <sup>-1</sup> )	8
膨润土/(kgCO <sub>2</sub> eq·t <sup>-1</sup> )	47.8

注:电力的碳排放因子源于 CPCD(中国产品全生命周期温室气体排放系数库)的 2020 年江苏省电网碳足迹排放因子;因为常规盾构工程中注浆材料主要由 P. 042.5 普通硅酸盐水泥、砂、粉煤灰、膨润土构成,故于表中列出其碳排放因子。

因为本工程的前景数据较易获得,综合考量计算碳排放采用因子法。而对于环境影响的各种参数,由于相关数据库尚不完善,故采用软件计算得出相关结果。

## 2 盾构渣土处理的碳排放模型构建

### 2.1 碳排放计算方法

#### 2.1.1 材料生产

材料生产多在施工现场外完成,本研究考虑的材料包括盾构渣土、常规盾构浆液使用的水泥、砂、膨润土、粉煤灰等。其碳排放计算公式为

$$C_{eM} = \sum_{i=1}^a m_i E_i \quad (1)$$

式(1)中: $C_{eM}$ 为原料生产阶段的总碳排放量,kgCO<sub>2</sub>eq; $a$ 为材料类型; $m_i$ 为第*i*种工程所需材料的质量,t; $E_i$ 为第*i*种生产 1 t 材料的碳排放因子,kgCO<sub>2</sub>eq。

#### 2.1.2 材料运输

施工材料在从生产厂家到施工现场的运输过程中,运输车辆及机械消耗能源产生碳排放,本文研究考虑的运输车辆及机械包括柴油货车、龙门吊、传送带等。其碳排放计算公式为

$$C_{eT} = \sum_{i=1}^b m_i D_i E_i \quad (2)$$

式(2)中: $C_{eT}$ 为材料运输阶段的总碳排放量,kgCO<sub>2</sub>eq; $b$ 为运输材料类型; $m_i$ 为第*i*种运输材料的质量,t; $D_i$ 为第*i*种材料运输距离,km; $E_i$ 为第*i*种运输材料单位质量单位距离的碳排放因子,kgCO<sub>2</sub>eq。

#### 2.1.3 机械处理

施工现场需要各种施工机械处理材料,本文研究考虑的施工机械包括渣土筛分机、混凝土搅拌站、螺旋输送机、推土机等。其碳排放计算公式为

$$C_{eP} = \sum_{i=1}^c V_i w_i t_i \quad (3)$$

式(3)中: $C_{ep}$ 为材料处理阶段的碳排放,kgCO<sub>2</sub> eq;  
 $c$ 为需要处理材料的类型; $V_i$ 为第*i*种需要处理材料的  
的总体积,m<sup>3</sup>; $w_i$ 为制备机械处理1 m<sup>3</sup>第*i*种材料的  
耗电量,kW; $t_i$ 为制备机械处理第*i*种材料的工作时  
间,t。

2.1.4 总碳排放量

总碳排放为材料生产、材料运输与机械处理的  
碳排放量之和,其碳排放计算公式为

$$C_{el} = C_{em} + C_{et} + C_{ep} \quad (4)$$

式(4)中: $C_{el}$ 为某一过程的总碳排放量,kgCO<sub>2</sub> eq;  
 $C_{em}$ 为原料生产阶段的总碳排放量,kgCO<sub>2</sub> eq; $C_{et}$ 为  
材料运输阶段的总碳排放量,kgCO<sub>2</sub> eq; $C_{ep}$ 为材料处  
理阶段的碳排放,kgCO<sub>2</sub> eq。

2.2 盾构渣土常规处理(以填埋计)碳排放计算

盾构渣土常规处理包括盾构开挖、现场初步处  
理、运输和填埋4个阶段,这一过程的系统边界如  
图2所示。系统边界是通过一组准则确定哪些单元  
过程属于产品系统的一部分<sup>[15]</sup>。

(1)盾构开挖阶段:主要碳排放由盾构机掘进  
过程中电能的消耗。

(2)现场初步处理阶段:现场初步处理主要是  
将盾构开挖出的渣土进行脱水和筛分处理,方便后  
续的运输。此过程中碳排放主要由处理设备消耗的  
电能产生。

(3)运输阶段:盾构渣土的运输阶段包括将其  
从开挖面运输到现场初步处理场地的短途运输,和  
将处理完成的渣土运送到填埋场的长途运输。其中,  
短途运输主要碳排放由施工场地的龙门吊、传送带  
等机械设备消耗的电能产生,而长途运输的碳排放  
则由柴油车辆消耗的燃料产生。

(4)填埋阶段:盾构渣土在消纳场填埋过程的  
碳排放主要由推土机消耗的柴油产生。

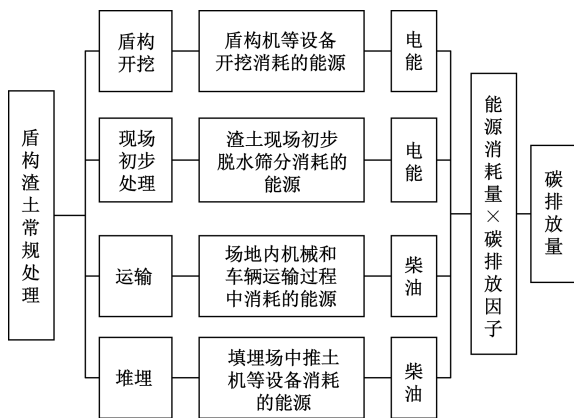


图2 盾构渣土常规处理(以填埋计)碳排放的系统边界

Fig. 2 System boundary of carbon emissions from conventional treatment of shield muck( measured by burial)

2.3 标准浆液碳排放计算

利用水泥作为固化剂处理盾构渣土,将其制备  
为同步注浆材料的配比以质量份数计为水泥:砂:  
粉煤灰:膨润土:水=10:80:40:6:43。

(1)原料生产阶段:原料生产过程中的碳排放  
由各种原材料生产过程产生。生产1 t水泥产生  
CO<sub>2</sub>约799 kg,生产1 t河砂产生CO<sub>2</sub>约11.8 kg,生  
产1 t粉煤灰产生CO<sub>2</sub>约8 kg,生产1 t膨润土产生  
CO<sub>2</sub>约47.8 kg。

(2)运输阶段:水泥的运输阶段指将水泥从工  
厂运输到施工场地的过程,期间的碳排放主要由运  
输车辆消耗的柴油产生。

(3)同步浆液制备阶段:水泥制备同步浆液阶  
段主要由搅拌机将水泥和水拌合制备成浆液,期间  
的碳排放主要由搅拌机消耗的电能产生。一台搅  
拌机每小时可处理约25 m<sup>3</sup>原材料,其功率为  
25 kW,处理所有浆液共耗电约1.47 × 10<sup>4</sup> kW·h。

2.4 固废处理渣土碳排放计算

当前中国基础设施建设用砂石骨料年需求量  
超过200 × 10<sup>8</sup> t,可开采利用的天然河砂锐减<sup>[21]</sup>,  
盾构渣土经过处理充当细骨料,减少对天然河砂的  
使用。盾构渣土资源化处理包括渣土运输、胶凝材  
料运输及同步浆液制备三个阶段。胶凝材料中高  
炉矿渣与电石渣的比例为8:2,质量比重为渣土浆  
液的10%。这一过程的系统边界如图3所示。

(1)盾构渣土运输阶段:盾构渣土用作制备同  
步浆液的运输过程仅包括将渣土运至制备场地的  
运输。

(2)胶凝材料运输阶段:使用盾构渣土制备同  
步浆液,需掺入一定配比的胶凝材料,本工程采用  
高炉矿渣和电石渣,二者分别为炼钢和制乙炔的  
副产物,均为固体废料。其碳排放主要由运输过

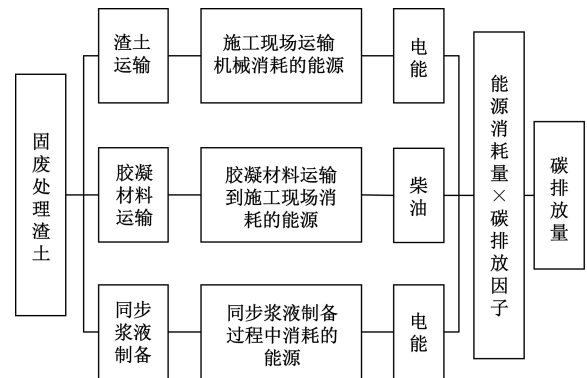


图3 盾构渣土资源化处理(制备同步浆液)碳排放的系统边界

Fig. 3 System boundary of carbon emission from shield muck recycling treatment( preparation of synchronous slurry)

程产生,故不考虑其生产过程中的碳排放。胶凝材料运输阶段的碳排放主要由运输车辆消耗的柴油产生。

(3)同步浆液制备阶段:同步浆液制备是将盾构渣土、胶凝材料和水按一定比例拌合,制备成流动性填充材料。

用于制备渣土再生同步浆液的渣土约  $1.14 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,工程渣土剩余  $2.53 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。这部分渣土可用于制备工程回填材料。

### 2.5 废弃渣土制备工程回填料碳排放计算

制备工程回填料需以电石渣与高炉矿渣为渣土改良材料。按照渣土质量的 15% 添加电石渣与高炉矿渣制成的改良剂,改良剂中高炉矿渣与电石渣的比例为 8:2。

(1)盾构渣土运输阶段:工程剩余的渣土可用于对周边 20 km 内的工程或者路基进行回填。此过程的碳排放由车辆将渣土运至周边工程产生。

(2)渣土改良材料运输阶段:盾构渣土不能直接作为回填料,可使用电石渣与高炉矿渣对齐进行改良,此阶段为将电石渣与高炉矿渣运输到施工现场的碳排放。

(3)工程回填料制备阶段:工程回填料制备阶段的碳排放主要由机械消耗的能源产生。

故盾构渣土资源化利用的减碳量为渣土常规处理与渣土资源化利用的碳排放之差。

## 3 环境影响分析

### 3.1 环境影响综合评价方法

环境影响评价指将清单数据分类特征化,并采用不同环境影响类型来解释清单分析结果。本文中研究中采用 CML-IA baseline 的分类方法及当量评

价模型,选取 6 种环境影响类型参数 ( $G_{WP}$ 、 $A_P$ 、 $A_{DP}$ 、 $E_P$ 、 $R_1$ 、 $P_{OCP}$ ) 来评价环境影响<sup>[22]</sup>。其中  $G_{WP}$  为全球变暖潜值,主要与  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  等温室气体的排放量有关; $A_P$  为环境酸化潜值,与  $\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等酸性气体排放有关; $A_{DP}$  为非生物资源消耗潜值,与大气、水、土地、能源、矿产等非生物资源的消耗有关; $E_P$  为富营养化潜值,与含氮气体排放有关; $R_1$  为可吸入无机物; $P_{OCP}$  为光化学污染潜值,与  $\text{NO}_x$  气体有关。

### 3.2 盾构渣土制备同步浆液碳排放量计算结果

基于本研究构建的碳排放模型,以苏州市轨道交通 8 号线 06 标为例,估算盾构渣土常规处理的全生命周期碳排放量,使用普通硅酸盐水泥作为注浆材料的全生命周期碳排放量及使用盾构渣土加以胶凝材料制成同步浆液的全生命周期碳排放量。各阶段产生的碳排放情况如表 3 所示。

盾构渣土常规处理:本工程共生成渣土  $2.64 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。若采用常规处理手段,简单地填埋,将会侵占大量土地,对填埋场造成极大的压力。在考虑土体的最后可松性系数 1.03 后,若填埋深度为 5 m,渣土堆填将会占用土地  $5.28 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,若填埋深度为 10 m,则占用土地  $2.64 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。

使用 8% 高炉矿渣和 2% 电石渣掺入盾构渣土浆液后,制成同步浆液作为注浆材料与废弃渣土制备工程回填料这两种资源化利用方式。相比盾构渣土的常规处理和使用普通硅酸盐水泥混合渣土制备注浆材料的碳排放减少  $2.75 \times 10^6 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ ,减碳比例达 61% 以上。

其中,利用盾构渣土制备注浆浆液相比标准浆液可直接减少 97% 左右的渣土排放量,剩余部分渣土可拌合工业固废作为路基填筑材料,相比渣土常规处理减少约 44% 的碳排放<sup>[18]</sup>。

表 3 盾构渣土处理各阶段碳排放数据

Table 3 Carbon emission data of each stage of shield residue treatment

过程	阶段	碳排放量/( $\text{kgCO}_2\text{eq}$ )	合计/( $\text{kgCO}_2\text{eq}$ )
盾构渣土常规处理(以填埋计)	盾构开挖	$1.75 \times 10^6$	$3.00 \times 10^6$
	现场初步处理	$1.16 \times 10^4$	
	运输	$1.16 \times 10^6$	
	填埋	$7.45 \times 10^4$	
制备标准浆液	原料生产	$1.42 \times 10^6$	$1.49 \times 10^6$
	原料运输	$5.56 \times 10^4$	
	同步浆液制备	$1.09 \times 10^4$	
固废处理渣土(制备同步浆液)	盾构渣土运输	$5.98 \times 10^4$	$8.66 \times 10^4$
	胶凝材料运输	$1.59 \times 10^4$	
	同步浆液制备	$1.09 \times 10^4$	
废弃渣土制备工程回填料	盾构渣土运输	$1.05 \times 10^6$	$1.65 \times 10^6$
	渣土改良材料运输	$3.53 \times 10^5$	
	工程回填料制备	$2.42 \times 10^5$	

### 3.3 污染气体排放核算

为了探究不同过程对于环境的影响,根据Ecoinvent数据库中的数据,估算出盾构渣土常规处理环境影响与注浆用水泥产生的7种污染气体:CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、NMVOC(非甲烷挥发性有机化合物)的排放量<sup>[23]</sup>,相关数据如表4所示。由表4可以看出采用固废处理渣土排放的各类污染气体的量均小于常规处理与标准浆液排放。

表4 污染气体排放量  
Table 4 Polluting gas emission

污染气体/ (kg·m <sup>-3</sup> )	盾构渣土 常规处理	标准浆液	电石渣-高炉 矿渣处理渣土
CO <sub>2</sub>	2.88 × 10 <sup>6</sup>	1.15 × 10 <sup>6</sup>	1.99 × 10 <sup>4</sup>
CH <sub>4</sub>	3.11 × 10 <sup>-4</sup>	7.14 × 10 <sup>-4</sup>	7.11 × 10 <sup>-6</sup>
SO <sub>2</sub>	1.09 × 10 <sup>4</sup>	1.19 × 10 <sup>3</sup>	1.92 × 10 <sup>-5</sup>
NO <sub>x</sub>	2.04 × 10 <sup>4</sup>	2.16 × 10 <sup>3</sup>	1.37 × 10 <sup>2</sup>
PM <sub>10</sub>	4.11 × 10 <sup>3</sup>	3.06 × 10 <sup>2</sup>	1.77 × 10
PM <sub>2.5</sub>	2.7 × 10 <sup>3</sup>	1.43 × 10 <sup>2</sup>	9.97
NMVOC	2.05 × 10 <sup>3</sup>	1.96 × 10 <sup>2</sup>	1.77 × 10

### 3.4 环境影响结果分析

在生命周期评价中为了确定核算的系统边界,一般可选择采用“摇篮到大门”或者“摇篮到坟墓”的方式。“摇篮到大门”通常是指从原材料提取、完成产品本身的生产加工、包装,到出厂或下游客户的过程为核算边界。为了对盾构渣土制备同步浆液造成的环境影响的系统边界进行核算,绘制如图4所示的盾构渣土制备同步浆液CTW(cradle-to-gate)系统边界图。

盾构渣土常规处理约消耗电能2.44 × 10<sup>6</sup> kW·h,柴油3.09 × 10<sup>5</sup> kg。使用计算软件,对盾构渣土常规处理过程中的电能、柴油,常规注浆材料中的主

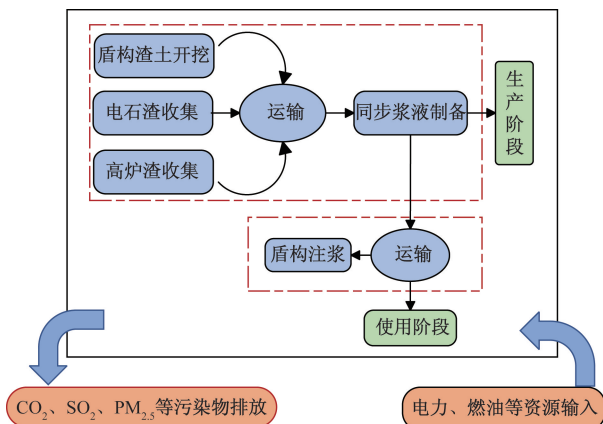


图4 盾构渣土制备同步浆液CTW系统边界图  
Fig. 4 CTW system boundary diagram of producing synchronous slurry from shield muck

要高污染材料P. O42.5水泥生产过程及使用固废处理渣土环境影响的计算<sup>[24-25]</sup>,得出本文研究中盾构渣土常规处理环境影响与注浆用水泥的6种环境影响类型参数计算结果,如表5所示。

表5 6种环境影响类型参数计算结果

Table 5 Calculation results of 6 types of environmental impact parameters

环境影响类型	盾构渣土 常规处理	标准浆液	电石渣-高炉 矿渣处理渣土
GWP/(kgCO <sub>2</sub> eq)	3.00 × 10 <sup>6</sup>	1.20 × 10 <sup>6</sup>	2.03 × 10 <sup>4</sup>
AP/(kgSO <sub>2</sub> eq)	2.34 × 10 <sup>4</sup>	2.61 × 10 <sup>3</sup>	1.03 × 10 <sup>2</sup>
ADP/(kgantimonyeq)	6.1 × 10 <sup>-3</sup>	6.3 × 10 <sup>-1</sup>	5.63 × 10 <sup>-2</sup>
EP/(kgPO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq)	4.36 × 10 <sup>3</sup>	7.98 × 10 <sup>2</sup>	2.46 × 10
RI/(kgPM <sub>2.5</sub> eq)	2.7 × 10 <sup>3</sup>	1.43 × 10 <sup>2</sup>	9.97
POCP/(kgC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq)	7.82 × 10 <sup>2</sup>	9.85 × 10	3.71

可以看出,盾构渣土若无法得到妥善处置,将会导致温室效应、酸化、水体富营养化、雾霾等环境危害的产生。使用固废处理盾构渣土制备注浆材料,不光可以减少渣土外运消耗能源,还能减少水泥等高能耗高碳排放材料的使用。

## 4 结论

以苏州轨道交通8号线06标段盾构渣土为研究对象。基于全生命周期评价方法,分析对比了利用工业固废处理盾构渣土的减碳效果及环境影响。得出以下结论。

(1)本工程排渣量为2.64 × 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>,所需同步注浆量为1.47 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,使用渣土制备注浆材料可减少砂用量1.20 × 10<sup>4</sup> t,膨润土用量898 t,粉煤灰用量5087 t。使用高炉矿渣与电石渣代替水泥作为胶凝材料,可减少水泥用量1496.76 t;用于制备注浆材料的盾构渣土为1.14 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,剩余的部分渣土以常规资源化方法制备工程回填料。

(2)对于本项目,利用工业固废处理渣土,可减少碳排放4.6 × 10<sup>5</sup> kg/km,同时减少原料成本约46.7万元/km,具备显著的减碳效益与经济效益。

(3)使用电石渣和高炉矿渣这些工业固废代替水泥处理渣土,可降低96%环境酸化潜值,97%富营养化潜值,93%可吸入无机物,96%光化学氧化潜值,具有较大的环境保护效益。

(4)利用工业固废制备渣土浆液大幅减少了渣土外运和同步浆液原料生产及运输过程中的碳排放。此外,不同地层渣土的性质有一定差别,导致其适用不同的资源化利用方式,后续研究将基于此深化生命周期模型研究。

## 参 考 文 献

- [1] 马建宇. 助力打造隧道交通维修“数智时代”. 中新网内蒙古新闻[EB/OL]. (2023-12-25)[2024-07-25]. <https://www.nmg.chinanews.com.cn/news/20231225/42906.html>.  
Ma Jianyu. Help build the tunnel traffic maintenance “data intelligence era”. China News Inner Mongolia News[EB/OL]. (2023-12-25)[2024-07-25]. <https://www.nmg.chinanews.com.cn/news/20231225/42906.html>.
- [2] 薛丹璇, 朱晓东, 陈玥, 等. 环保型盾构渣土路面基层材料应用试验研究[J]. 公路, 2024, 69(3): 358-364.  
Xue Danxuan, Zhu Xiaodong, Chen Yue, et al. Research on application of environment-friendly shield residue road base material[J]. Highway, 2024, 69(3): 358-364.
- [3] 蔡基伟, 张瑞芳, 周奕菡, 等. 水泥固化法制备免烧渣土轻集料[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2021, 51(4): 466-472.  
Cai Jiwei, Zhang Ruifang, Zhou Yihan, et al. Fabrication of unburnt lightweight aggregate with waste soil solidified by cement[J]. Journal of Henan University (Natural Science Edition), 2021, 51(4): 466-472.
- [4] Gao W, Zhang H, Ren Q, et al. A low-carbon approach to recycling engineering muck to produce non-sintering lightweight aggregates: physical properties, microstructure, reaction mechanism, and life cycle assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 385. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135650.
- [5] Chen S, Jiang H, Xing H, et al. Research on preparation and performance of clay-based shield tunnel nonsintered bricks[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021. DOI: 10.1155/2021/8186851.
- [6] 刘慧刚. 南京长江新济洲泥水盾构施工废弃泥浆渣土资源化利用研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.  
Liu Hui-gang. Study on resource utilization of waste mud and residue of shield in Xinjizhou, Nanjing Yangtze River [D]. Nanjing: Southeast University, 2022.
- [7] 吴克雄, 李顺凯, 杨钊, 等. 废弃泥浆改性同步注浆材料试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(20): 277-281.  
Wu Kexiong, Li Shunkai, Yang Zhao, et al. Experimental study on the waste mud modified synchronous grouting materials[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(20): 277-281.
- [8] 管茂成. 流态地聚物固化土强度特性及其固化机理研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023.  
Guan Maocheng. Research on strength characteristics and curing mechanism of fluid geopolymer solidified soil[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2023.
- [9] Ni Z, Wang S, Zheng X, et al. Application of geopolymer in synchronous grouting for reusing of the shield muck in silty clay layer [J]. Construction and Building Materials, 2024, 419. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135345.
- [10] 张祖焯, 顾琳琳, 王振, 等. 南京盾构渣土工程特性及其微观结构[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(34): 15252-15258.  
Zhang Zulang, Gu Linlin, Wang Zhen, et al. Engineering properties and microstructure of shield muck in Nanjing[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(34): 15252-15258.
- [11] 陈林, 李彬, 陈胜邦, 等. 碱激发矿渣加固淤泥的物理力学性能与机理[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(2): 789-796.  
Chen Lin, Li Bin, Chen Shengbang, et al. Properties and mechanism of solidified silty sediment from alkali-activated slag[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(2): 789-796.
- [12] Yuan B, Liang J, Huang X, et al. Eco-efficient recycling of engineering muck for manufacturing low-carbon geopolymers assessed through LCA: exploring the impact of synthesis conditions on performance[J]. Acta Geotechnica, 2024. DOI: 10.1007/s11440-024-02395-9.
- [13] 陈坤阳, 周鼎, 粟月欢, 等. 城市轨道交通生命周期碳排放强度与碳减排潜力研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(5): 1-7.  
Chen Kunyang, Zhou Ding, Su Yuehuan, et al. Research on carbon emission intensity and reduction potentials of urban rail transit life cycle[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(5): 1-7.
- [14] 孙文昊, 郭亚林, 何应道, 等. 铁路隧道全生命周期绿色等级评价体系研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(S2): 59-68.  
Sun Wenhao, Guo Yalin, He Yingdao, et al. Green level evaluation system for whole life cycle of railway tunnels[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(S2): 59-68.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 环境管理 生命周期评价 原则与框架: GB/T 24040—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Environmental management-life cycle assessment-principles and framework: GB/T 24040—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [16] 李嘉豪, 刁明星, 沈奕, 等. 基于 SimaPro 的公路隧道建造阶段碳排放计算与构成评估[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(6): 20-28.  
Li Jiahao, Xi Mingxing, Shen Yi, et al. Calculation and composition assessment of the carbon emission in the construction phase of highway tunnels based on SimaPro[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(6): 20-28.
- [17] Wu H, Zhou W, Bao Z, et al. Life cycle assessment of carbon emissions for cross-sea tunnel: a case study of shenzhen-zhongshan bridge and tunnel in China[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 21. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03502.
- [18] 全昭熹, 陈湘生, 陈锋, 等. 基于生命周期评价方法的隧道施工渣土利用减碳效果分析[J]. 环境工程, 2023, 41(10): 91-98, 162.  
Quan Zhaoxi, Chen Xiangsheng, Chen Feng, et al. Analysis of carbon reduction effect of tunnel construction muck soil utilization based on life cycle assessment [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(10): 91-98, 162.
- [19] Wang X, Duan Z, Wu L, et al. Estimation of carbon dioxide emission in highway construction: a case study in southwest region of China [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 705-714.
- [20] 中国城市温室气体工作组. 中国产品全生命周期温室气体排放系数库[EB/OL]. [2024-06-04]. <http://lca.cityghg.com/>.  
China City Greenhouse Gas Working Group (CCG). CPD, China products carbon footprint factors database [EB/OL]. [2024-06-04]. <http://lca.cityghg.com/>.
- [21] 黄法礼, 程欢, 李化建, 等. 交通工程废弃混凝土再生砂的基本性能[J]. 铁道建筑, 2023, 63(11): 136-140.

- Huang Fali, Cheng Huan, Li Huajian, et al. Basic performance of recycled sand for waste concrete in traffic engineering[J]. Railway Engineering, 2023, 63(11): 136-140.
- [22] Zhang C, Hou Z, Chen C, et al. Design of 3D printable concrete based on the relationship between flowability of cement paste and optimum aggregate content[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 104. DOI: 10.1016/j.cemconcomp. 2019.103406.
- [23] 李刚, 郭晓璐, 余安明. 基于全生命周期评价的掺石灰石粉再生混凝土环境影响研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2023(12): 79-82, 88.
- Li Gang, Guo Xiaolu, She Anming. Study on environmental impact of recycled concrete with limestone powder based on whole life cycle assessment[J]. China Concrete and Cement Products, 2023(12): 79-82, 88.
- [24] 陈文广. 软土地基处理技术的 LCA 综合评价研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2013.
- Chen Wenguang. The comprehensive evaluation of soft soil foundation treatment in LCA method[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2013.
- [25] 丁宁, 杨建新, 吕彬. 中国省级火电供应生命周期清单分析[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7192-7201.
- Ding Ning, Yang Jianxin, Lü Bin. Life cycle inventory analysis of provincial thermal electricity in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7192-7201.