doi:10.3969/j.issn.1001-4616.2026.03.016

盾构渣土现场机制砂石生产与外运处置的碳排放对比及减排效益分析

曹小卫[1,3],章邦超[2],王顺生[3],蔡才武[2],宋　康[4],李继宁[4,5]

(1.广州地铁集团有限公司,广东 广州 510330)
(2.中铁建华南建设有限公司,广东 广州 511458)
(3.广州地铁建设管理有限公司,广东 广州 510330)
(4.广东省科学院生态环境与土壤研究所,广东 广州 510650)
(5.南京师范大学环境学院,江苏 南京 210023)

[**摘要**]　利用盾构渣土生产机制砂石对全面节约战略的实施和碳达峰碳中和的推进具有重要意义,但是目前我国针对盾构渣土生产机制砂石碳减排效应的研究还比较欠缺. 本研究以广花城际铁路某工区为案例,基于生命周期评价(life cycle assessment,LCA)方法,构建了盾构渣土外运处置与现场生产机制砂石的碳排放核算模型. 在此基础上,系统评估了现场资源化利用方式相较于传统外运处置路径的碳减排效益,并进一步估算了机制砂石生产与回用所具有的减碳潜力. 结果表明:相较简单外运处置(设定运输距离为 50 km),利用盾构渣土生产机制砂石并进行资源化利用产生的碳减排量可超过 3.03 kg CO_2/t,若将案例工区全部盾构渣土(1 000 环)用于机制砂石生产,可实现约 10 601 t CO_2e 的碳减排效益. 进一步通过机制砂石产品运输距离优化、废弃泥饼再利用等措施,可进一步扩大碳减排效益. 本研究可为盾构渣土资源化利用过程中碳减排评估方法与标准的构建提供方法支撑,同时为机制砂石行业低碳发展相关决策提供科学依据.

[**关键词**]　渣土资源化,机制砂石,生命周期评价,碳排核算,碳减效应
[**中图分类号**]X705　[**文献标志码**]A　[**文章编号**]1001-4616(2026)03-0146-07

Carbon Emission Comparison and Mitigation Benefit Analysis of On-site Manufactured Sand/gravel Production versus Off-site Disposal of Shield Muck

Cao Xiaowei[1,3], Zhang Bangchao[2], Wang Shunsheng[3],
Cai Caiwu[2], Song Kang[4], Li Jining[4,5]

(1.Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou 510330, China)
(2.China Railway Construction South China Construction Co., Ltd., Guangzhou 511458, China)
(3.Guangzhou Metro Construction Management Co., Ltd., Guangzhou, 510330, China)
(4.Institute of Eco-environmental and Soil Sciences, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)
(5.School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The utilization of shield muck for manufactured sand and gravel (MSG) production holds significant potential for advancing the national strategy of resource conservation and promoting carbon peaking and carbon neutrality goals. However, current research in China on the carbon reduction potential of producing MSG from shield muck remains limited. This study takes a section of the Guangzhou-Huadu Intercity Railway as a case and employs a life cycle assessment (LCA) approach to establish a carbon emission accounting model for both off-site disposal and on-site MSG production from shield muck. Based on this model, the study systematically evaluates the carbon reduction benefits of on-site resource utilization compared to traditional off-site disposal and further estimates the carbon mitigation potential associated with the production and reuse of MSG. The results show that, compared to conventional off-site disposal (assuming a transport distance of

收稿日期:2025-04-08.
基金项目:广东省科学院专项资金项目(2023010103,2022010104-2).
通讯作者:章邦超,硕士,高级工程师,研究方向:城市轨道交通技术管理. E-mail:154151053@qq.com

50 km),on-site MSG production from shield muck can reduce carbon emissions by more than 3.03 kg CO_2 per ton. If all shield muck generated from the case section(1000 rings) is used for MSG production,the total carbon reduction benefit could reach approximately 10601 t CO_2e. Furthermore,additional measures such as optimizing transport distances for MSG products and reusing dewatered filter cakes could further enhance carbon reduction. This study provides methodological support for the development of carbon reduction assessment frameworks and standards for the resource utilization of shield muck and offers scientific guidance for low-carbon decision-making in the MSG industry.

Key words:muck recycling,manufactured sand and gravel,life cycle assessment,carbon accounting,carbon reduction effect

我国是世界最大的砂石生产国和消费国. 但受生态环境保护、资源整合等方面的影响,国家已严格限制河道采砂,优质天然砂石日益紧缺,机制砂石正在逐步成为建筑用砂石的主要来源. 最新研究表明,1995—2020 我国砂石供应量激增约 400%,其中天然砂消费自 2010 年碳达峰之后快速下降,同时机制砂占比由 20%快速上升至 80%左右,实现了由天然砂向机制砂的战略转型[1]. 2019 年,工业和信息化部联合十部委发布《关于推进机制砂石行业高质量发展的若干意见》[2],明确提出支持机制砂石产业发展,到 2025 年形成较为完善合理的机制砂石供应保障体系,产品质量需符合 GB/T 14684《建设用砂》等相关标准. 同时,年产 1000 万吨及以上的超大型机制砂石企业产能占比应达到 40%,利用尾矿、废石、建筑垃圾等固体废弃物资源化生产机制砂石的比重显著提升.

机制砂石等作为水泥、混凝土等材料的上游产品,其碳足迹对下游水泥、混凝土乃至建筑业的碳排放有重要的意义[3-4]. 目前已有一些研究开始关注机制砂石的碳排放核算工作[5-8]. Zhu 等[6]采用实际测量法、工艺分析法、投入产出分析法相结合的方法建立了机制砂的碳排放计算模型,得到机制砂和机制碎石的碳排放系数分别为 7.65 kg CO_2e/t 和 8.48 kg CO_2e/t. 还有研究报道称机制砂的碳排放因子为 41.7 kg CO_2e/t 和 6.6 kg CO_2e/t[7-8]. 但相关工作多聚焦于常规原料下的集中式生产场景,较少涉及以工程渣土,尤其是盾构渣土为原料进行现场资源化利用的路径.

随着城市地下空间开发的加速推进,盾构法因其施工效率高、安全性强、机械化程度高等优势,已在轨道交通、市政道路、城市综合管廊等地下工程中得到广泛应用. 与此同时,盾构施工过程中产生的工程渣土也在短时间内大量产生,然而,渣土处置技术存在技术路径单一、处理能力不足等问题,难以实现规模化快速消纳[9]. 我国盾构渣土资源化利用极低,远低于欧美和日韩等发达国家[10]. 巨大量级盾构渣土的不当处置带来严重的环境污染和资源浪费等问题,也成为阻碍盾构安全高效施工的一大难题. 因此,亟需提升资源化利用效率,并推动其规模化、高值化应用. 现有研究表明,通过将盾构渣土进行资源化利用,可产生显著的经济效益[11-14]. 盾构渣土资源化利用带来的碳减排效益近年来也引起了高度关注[15-19]. 将盾构渣土通过机制砂生产工艺加工成砂/石进行再次利用,既减少了弃渣的占地面积,又实现了渣土的资源化利用. 研究表明深圳地铁某隧道区间盾构渣土资源化利用共产出 33 523.62 m^3 再生砂,每 1 m^3 再生砂的碳排放强度为 8.47 kg CO_2e,再生砂可替代原生砂用于同步注浆或外售,可为案例项目带来 126.22 t CO_2e 的减碳效益[15]. 但是,当前尚缺乏用于评估盾构渣土制备机制砂石过程碳足迹的系统碳排放核算方法,也缺乏对其相较传统外运处置路径的减排效益分析. 因此,构建面向盾构渣土现场资源化路径的碳排放核算框架,对于推动盾构渣土低碳高值利用、提升城市基础设施建设绿色水平具有重要意义.

本研究以典型盾构渣土机制砂石生产工艺生命周期碳排放为研究对象,建立盾构渣土生产机制砂石的碳排放核算模型,对比盾构渣土常规外运方式与机制砂石资源化利用方式的碳排放量,揭示盾构渣土制备机制砂石及回收利用的碳减排效果,为盾构渣土综合利用的碳减排效应核算提供参考.

1 研究方法

1.1 碳减排核算方法构建

1.1.1 边界确立

生命周期评价(LCA)是一种定量评估产品、工序或生产活动环境影响的技术,主要通过分析能源消耗、物质流动及废物排放来衡量环境负荷. 本研究以碳排放为核心指标,采用 LCA 方法比较盾构渣土直接外运与机制砂回用的环境影响(图 1). 研究系统边界涵盖两部分:(1)机制砂石生产,包括机械设备运行

和产品运输碳排放;(2)直接外运,涉及交通运输及施工设备因化石燃料燃烧和电力消耗产生的直接与间接碳排放. 核算范围截至盾构渣土或机制砂石离开施工场地,后续填埋及机制砂石生产系统的建造、拆除过程不计入碳排放核算.

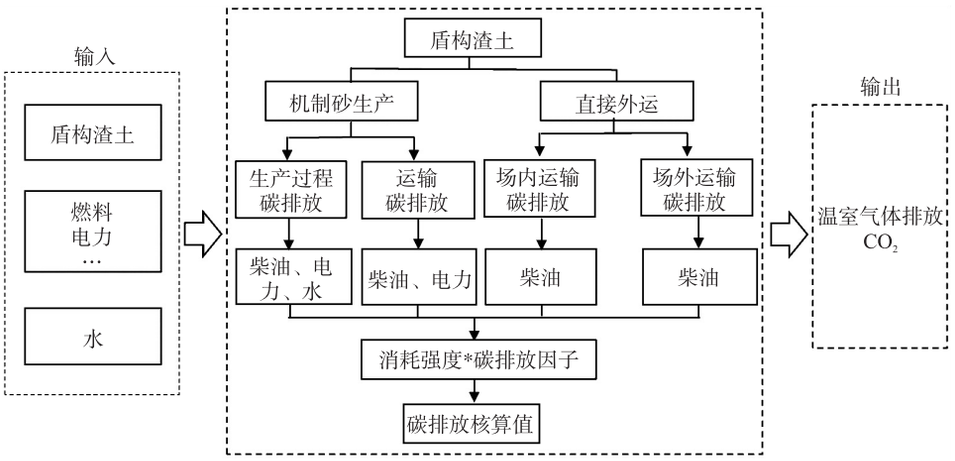


图 1　盾构渣土生产机制砂与外运处置系统边界

Fig. 1　System boundary of manufactured sand/gravel production using shield muck and external disposal of shield muck

1.1.2　*碳排放核算模型*

(1)盾构渣土直接外运碳排放

地铁盾构渣土的场外运输主要依赖公路运输,渣土车将其运至指定消纳场,碳排放主要来源于装车及运输过程中的柴油燃烧,具体计算见公式(1).

$$C_{t1}=M_D N_1 R_1 T_1+M_D D_D T_2, \tag{1}$$

其中,C_{t1}表示渣土直接外运碳排放,kg CO_2e;M_D 表示渣土的总量,t;N_1 表示单位渣土(t)装车所用装载机的台班数;R_1 表示每台班的定额油耗,kg/台班;T_1 表示柴油的碳排因子,kg CO_2e/kg;D_D 表示渣土的运输距离,km;T_2 表示渣土运输方式的碳排因子,kg CO_2e/(t·km).

(2)机制砂石生产过程及外运碳排放

根据《建筑碳排放计算标准》,当建材生产以低价值废料为原料时,可忽略其上游碳排放[20],因此盾构渣土的上游碳排放不纳入机制砂生产核算.

①机制砂石生产过程碳排放

渣土资源化利用涉及筛分、沉淀等处理环节,消耗水、电、油等能源并产生相应碳排放,其计算方法如下:

$$C_P=\sum_i^n E_i T_i, \tag{2}$$

其中,C_P 表示机制砂石生产过程的碳排放,kg CO_2e;E_i 表示机制砂石生产过程中第 i 种能源的消耗量;T_i 表示第 i 种能源的碳排因子.

②运输碳排放

渣土资源化处理后会形成可再次利用的砂/石和废弃的泥饼,均需要运输至相应的场地. 运输过程中运输载具能源消耗会产生碳排放,具体运输过程产生的碳排放计算方法见公式(3).

$$C_{t2}=\sum_j^n M_j D_j T_j, \tag{3}$$

其中,C_{t2}表示产品运输的总碳排放,kg CO_2e;M_j 表示第 j 产品的运输总量,t;D_j 表示第 j 种产品的运输距离,km;T_j 表示第 j 种产品运输方式的碳排因子,kg CO_2e/(t·km).

盾构渣土生产机制砂石的碳排放(C_R)包括机制砂生产过程碳排放(C_P)及机制砂石与废弃泥饼运输碳排放(C_{t2}),见公式(4).

$$C_R=C_P+C_{t2}. \tag{4}$$

1.2 碳减排量计算

机制砂石可作为再生建材应用于其它项目或盾构施工,实现资源化利用并降低碳排放,具体碳减排计算如下:

$$C_m = \sum_{g}^{n} M_g EF_g, \tag{5}$$

其中,C_m 表示产品用作再生建材的碳减排量,kg CO_2e;M_g 表示第 g 种再生建材的总量,t;EF_g 表示第 g 种建材的碳排因子,kg CO_2e/t.

相较外运处置,盾构渣土生产机制砂石及回用的总碳减排量 C_J 计算方法如下:

$$C_J = C_{t1} - C_R + C_m. \tag{6}$$

计算中涉及的碳排因子见表 1.

表 1 碳排因子汇总

Table 1 List of main carbon emission factors

类型	碳排放因子	类型	碳排放因子
电能/(kg CO_2e/kWh) *	0.440 3	砂/(kg CO_2e/t)	2.510
柴油/(kg CO_2e/kg)	3.110 0	碎石/(kg CO_2e/t)	2.180
水/(kg CO_2e/t)	0.168 0	重型柴油货车运输(载重 30 t)/(kg CO_2e/(t·km))	0.078

数据来源:* 来源于生态环境部发布的 2022 年省级(广东)电力平均二氧化碳排放因子;其它碳排因子取自 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》

2 案例介绍

本研究以广花城际铁路二工区为例,该区采用 TBM/土压平衡双模盾构,主要地质为花岗岩. 区间盾构环数约 10 000 环,单环开挖直径 8.9 m,长度 1.6 m,产生渣土约 100 m^3 共 350 t,日均掘进 14 环. 机制砂石工厂临近盾构工区,具体工艺流程如图 2 所示. 工厂运行功率 1 000 度/h,单环耗电 500 度. 主要设备包括 2 台挖掘机、2 台装载机,每日工作 10 h,单环柴油消耗 54.64 kg. 日均用水 30 m^3,单环 2.14 m^3. 机制砂石工厂产出 10~20 m 石子(40%,140 t)、5~10 m 石子(20%,70 t)、砂(20%,70 t)、泥饼(20%,70 t).

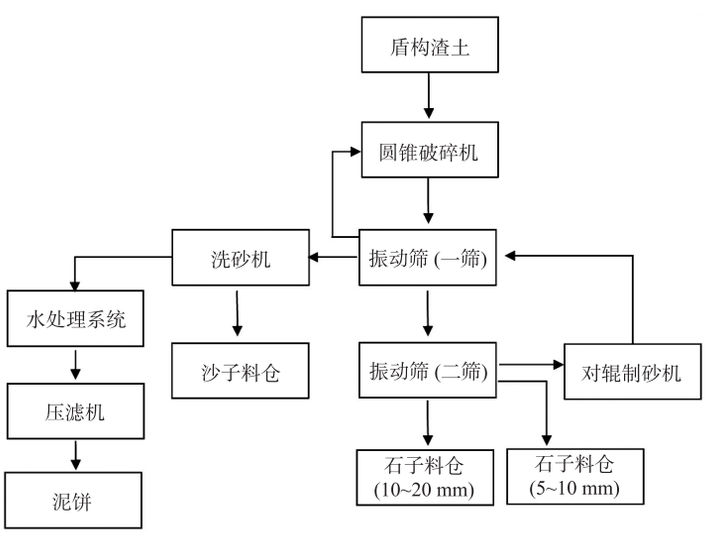


图 2 盾构渣土生产机制砂石工艺流程图

Fig. 2 Process flow chart of manufactured sand/gravel production using shield muck

3 结果与讨论

3.1 盾构渣土直接外运碳排放

盾构渣土全部外运时,碳排放主要来自装载与运输. 单环管片盾构产生渣土(350 t)需使用约 0.25 个台班装载机装车,柴油定额消耗为 58.75 kg 柴油/台班[21]. 根据我国标准 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》,重型柴油货车运输(载重 30 t)碳排因子为 0.078 kg CO_2e/(t·km). 如果渣土消纳场与施工地

点距离范围为 0~100 km,通过计算可得渣土外运碳排放情况(图 3). 单位盾构渣土装车产生碳排放为 0.13 kg CO_2e/t,渣土运输部分碳排放随着外运距离的增加而增加,外运距离设定为 15、30、50 和 100 km 时碳排放分别为 1.17、2.34、3.90 和 7.80 kg CO_2e/t. 上述结果表明,渣土运输过程为直接外运情景中碳排放的主导贡献,应该鼓励短距运输或者规划配套渣土资源化设施,降低渣土外运处理的碳排放.

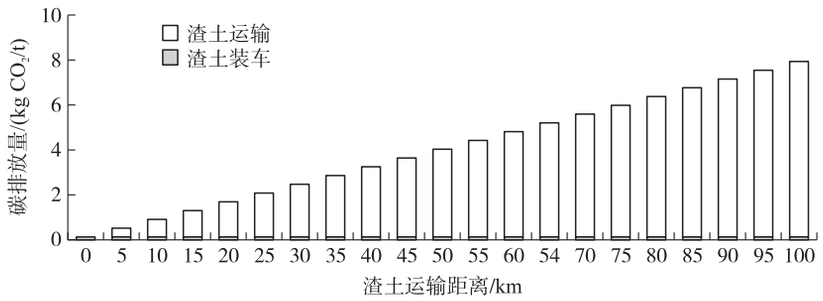


图 3　盾构渣土直接外运碳排放

Fig. 3　Carbon emissions from direct transportation of shield muck

3.2　盾构渣土生产机制砂石及外运碳排放

如图 4 所示,处理 1 t 盾构渣土的碳排放量约为 1.12 kg CO_2e,该过程碳排放主要来源于处理过程中电能及柴油的消耗,碳排放分别为 0.63 kg CO_2e/t 和 0.49 kg CO_2e/t,占比分别为 56.4%和 43.5%. 而水资源消耗的碳排放占比极小,几乎可以忽略. 前人研究表明采矿废石制备机制砂的碳排放主要集中于能源消耗阶段,其单位产品碳排放量为 10.89 kg CO_2e/t,且运输环节碳排放占比高达 90%,而破碎、筛分等生产环节仅占 10%[5]. 这一结果与本研究机制砂生产阶段的碳排放水平基本吻合,进一步验证了机制砂生产环节能耗核算的可靠性. 相较于传统模式,本研究通过空间协同布局优化(即机制砂工厂紧邻盾构井)实现了渣土运输环节的全程省略,凸显了“就地处理-就地利用”模式在减碳方面的显著优势. 机制砂厂产品同样需要外运处置,参考渣土外运处置碳排放计算方法,假设砂、石和泥饼外运距离统一设定为 15、30、50 和 100 km 时,碳排放分别为 1.17、2.34、3.90 和 7.80 kg CO_2e/t. Attri 等[22]对机制砂工厂产能和机制砂产品运输距离变化情景下的 CO_2 排放量进行了敏感性分析,发现相较于工厂产能,CO_2 排放量对运输距离的变化更为敏感,证实运输环节是机制砂全生命周期碳排放的关键敏感性因素.

3.3　机制砂石资源化利用碳减排分析

盾构渣土生产的机制砂石可实现资源化利用,并赋予其碳减排效益. 如图 5 所示,1 t 盾构渣土产生石子和砂资源化利用对应碳减排量为 1.81 kg CO_2e. 其中 10~20 mm 石子、5~10 mm 石子和砂资源化利用对应的碳减排量分别为 0.87 kg CO_2e、0.44 kg CO_2e 和 0.50 kg CO_2e,占比分别为 48.2%、24.1%和 27.7%. 由于案例工区位于市区,距离城郊渣土消纳场所的典型距离选定为 50 km,类似地,机制砂工厂产生泥饼外运距离也定为

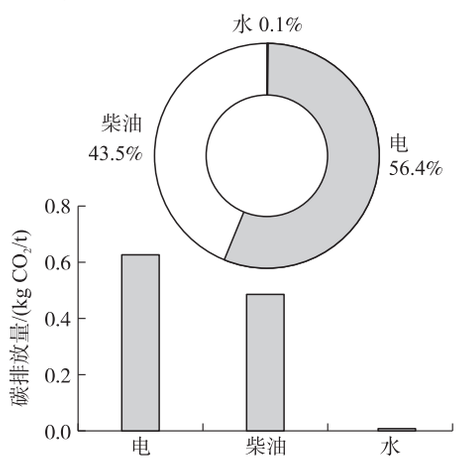


图 4　盾构渣土生产机制砂石碳排放

Fig. 4　Carbon emissions from manufactured sand/gravel production using shield muck

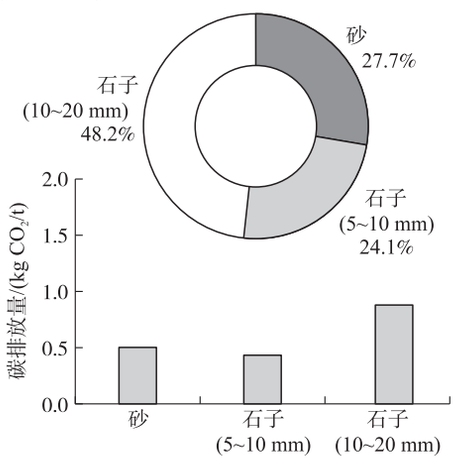


图 5　机制砂石再利用场景下的碳补偿量

Fig. 5　Carbon emission reduction in manufactured sand/gravel reuse scenario

50 km. 根际实际情况,机制砂石的外运距离则要近的多,假定设为 15 km. 此外,本研究案例中少量 5~10 mm 石子可在盾构施工程中现场回用,平均每环用量约为 6 t. 根据公式 6 的计算可得,相较简单外运处置,利用盾构渣土生产机制砂石并进行资源化利用后的碳减排量为 3.03 kg CO_2e/t. 根据工程设计量,该工区总共需要盾构约 10 000 环,总共可产生 350 万 t 盾构渣土. 若所有渣土全部采用本研究案例生产机制砂石进行资源化利用,可带来约 10601 t CO_2e 的碳减排效益. 若广花城际其它盾构渣土同样进行机制砂生产及回用,碳减排效益将会进一步扩大. 需要注意的是,盾构渣土和泥饼的外运处置运输距离的设定(如 50 km)可能导致碳减排效益结果的不确定性,实际运输距离的变化会对碳减排效益产生影响. 而且,由于机制砂石产生量及回用量可能根据施工进度及回用需求差异存在波动,导致碳减排效益存在一定误差.

本案例仅考虑泥饼外运处置的碳排放核算,而泥饼同样具备资源化利用的潜质,如土方回填/回用、建材(新型墙材、免蒸免烧陶粒、改性陶粒、复合混凝土等)生产原料、园林种植土制备等[11,23-25],这些资源化利用过程同样对碳减排具有正向效益. 例如,李化建等[13]提出利用压滤后泥饼生产转材并用于建筑非承重墙、围墙以及装饰等,实现盾构渣土的闭环处理. 他们进一步计算得出生产 1 m^3 再生免烧砖的碳排放强度为 96.7 kg CO_2e,与传统标准混凝土砖相比,再生免烧砖的碳减排效益显著(约 239 kg CO_2e/m^3). 但是,未来应进一步研究、系统评估不同泥饼资源化路径的碳减排潜力,进而为盾构渣土资源化利用路径优化和低碳技术推广提供参考.

机制砂石工厂的建造和拆除阶段并未包含在碳排核算边界之内. 本研究显示机制砂石工厂建造期碳排放主要源于材料及机械设备,期间用到主要机械设备为 25 t 起重机共 200 个台班,消耗混凝土(C30)共 900 m^3,耗电量共约 30 000 度. 拆除阶段作为建设阶段的逆过程,能源消耗粗略估算为建设阶段能耗的 90%[11]. 根据我国标准 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》中起重机柴油用量及柴油碳排因子计算得到起重机碳排因子为 143.4 kg CO_2e/台班,综合计算可得机制砂石工厂建造期和拆除期主要材料和能耗的碳排放量为 352.5 t CO_2e. 可见,如果碳排放核算边界包含机制砂石工厂的建造和拆除,最终的碳减排效益将进一步增加.

此外,渣土消纳场填埋机械施工过程中的能源消耗也未包含在本研究碳排核算边界之内. 有研究表明填埋处置 1 m^3 渣土产生的碳排放量约为 89.4 kg CO_2e,其中近 8 成由填埋机械施工产生,运输及其它处理过程占比较少[15]. 还有研究报道称盾构渣土常规处理填埋阶段的碳排放仅为 1.03 kg CO_2e/m^3[18]. 造成这一显著差异的主要原因是填埋阶段系统边界的界定不同,尤其是高能耗施工机械(如推土机、压实机等)的碳排放是否被纳入核算范围. 因此,如果考虑渣土填埋施工过程的碳排放,可进一步增加机制砂石生产及回用策略的碳减排效益. 但是,未来研究应进一步明确系统边界,统一核算标准,尤其需涵盖填埋场施工全流程的机械能耗.

4 结论

随着我国轨道交通建设的持续推进,产生的巨量盾构渣土的安全处置是施工方及城市管理者需要面对的挑战之一. 本研究采用 LCA 方法,选取常规外运处置和现场生产机制砂石两种方式,构建了盾构渣土不同处置方式下的碳排放评估及减排效应计算方法. 在此基础上,以广花城际某盾构区间为例,量化了相较常规外运处置,现场生产机制砂及回用方式的碳减排效益. 研究结果如下:

(1)案例盾构渣土直接外运(设定运输距离为 50 km)的碳排放约为 4.03 kg CO_2e/t,其中渣土外运过程占近 97%.

(2)机制砂石工厂内生产石子和砂等产生的碳排放约为 1.12 kg CO_2e/t;而石子、砂和废弃泥饼运输碳排放与它们的运输距离直接相关.

(3)考虑机制砂石作为再生建材利用,1 t 盾构渣土产生的代替补偿效益约为 1.81 kg CO_2. 相较简单外运处置,利用盾构渣土生产机制砂石并进行资源化利用后的碳减排量可超过 3.03 kg CO_2e/t.

(4)若案例工区所有盾构渣土全部用于生产机制砂石资源化利用,可带来约 10 601 t CO_2e 碳减排效益.

上述研究方法和结果可为机制砂石生产行业的碳排放及碳减排核算提供参考. 结合研究结论,提出以下建议:

(1)进一步开展研究评估不同渣土性质(如含砂率、风化程度、矿物组成、含水率、饱水抗压强度等)、

不同工艺(干法制砂、半干法制砂、湿法制砂)及工艺参数(如破碎粒径、筛分流程、脱水处理方式等)影响下,机制砂石生产的碳排放及碳减排效益,加强对机制砂石生产工艺流程的能耗与碳排放监测管理能力,提升碳排放和碳减排的核算精度.

(2)加快突破性技术创新,实现机制砂石生产设备和工艺的更新迭代,借助绿色节能技术、人工智能技术等推动机制砂石行业的绿色化改造.

(3)探索机制砂石及附属产物如泥饼等的多元利用方式,提高渣土的资源化利用效率,深入挖掘渣土源机制砂石资源化利用策略的碳减排潜力.

(4)加快构建渣土生产机制砂石的碳排放核算和评价标准体系,为机制砂石生产及资源化利用参与碳减排市场提供支撑.

[参考文献]

[1] Wang H M, Wang P, Zhang X, et al. Substantial increase in China's manufactured sand supplysince 2010[J]. Nature Geoscience, 2024, 17: 833.

[2] 国家发改委. 关于促进砂石行业健康有序发展的指导意见[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-03/27/content_5496182.htm.

[3] Ren Q, Ding L C, Dai X D, et al. Optimizing mix design of concrete with manufactured sand forlow embodied carbon and desired strength using machine learning[J]. Construction and Building Materials, 2024, 457: 139407.

[4] Shen W G, Wu J L, Du X J, et al. Cleaner production of high-quality manufactured sand and ecological utilization of recycled stone powder in concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 375: 134146.

[5] 潘大伟,薛文多,牛乐,等. 采矿废石生产机制砂碳减排核算研究[J]. 化工矿物与加工,2025,54(2):1-8.

[6] Zhu X C, Zhang Y S, Liu Z Y, et al. Research on carbon emission reduction of manufactured sand concrete based on compressive strength[J]. Construction and Building Materials. 2023, 403: 133101.

[7] 刘敬疆. 碳足迹与绿色建材[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.

[8] 王雪艳,刘明辉,刘萱,等. 沙漠砂+机制砂混凝土力学性能及碳排放研究[J]. 土木工程学报,2022,55(2):23-30.

[9] 肖建庄,沈剑羽,段珍华,等. 工程渣土资源化基础问题与低碳技术路径[J]. 科学通报,2023,68(21):2722-2736.

[10] 张军辉,李海,杨豪,等. 盾构渣土资源化再利用技术研究综述[J]. 中外公路,2022,42(6):1-11.

[11] 匡建军,邱敏超,林四新,等. 地铁盾构渣土处理工艺及其资源化利用研究[J]. 现代城市轨道交通,2024(7):72-79.

[12] 谢亦朋,张聪,阳军生,等. 盾构隧道渣土资源化再利用技术研究及展望[J]. 隧道建设(中英文),2022,42(2):188.

[13] 李化建,黄法礼,王振,等. 铁路绿色隧道工程材料技术研究进展[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(11):1992-2000.

[14] Cui Y, Tan Z S, Wang J, et al. Research on reuse of shield soil dregs on synchronous grouting materials and its application [J]. Construction and Building Materials, 2023, 408: 133700.

[15] 李伟,陈刚,曹太波,等. 地铁盾构渣土资源化碳排放强度与减碳潜力研究[J]. 环境工程,2023,41(7):53-60.

[16] 曹鑫. 长大铁路隧道工程全生命周期碳排放及绿色施工碳减排分析[D]. 北京:北京交通大学,2023.

[17] 戴志仁,曹伟,刘福酉,等. 砂泥岩地层盾构渣土资源化利用路径探讨[J]. 铁道工程学报,2025,42(2):91-97.

[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.

[19] 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: 1-21.

[20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于发布国家标准《建筑碳排放计算标准》的公告[EB/OL]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2019/art_17339_240723.html.

[21] 周岩梅,赵一帆,郭逸涵,等. 铁路桥梁建设泥浆废水处理-机制砂生产组合工艺碳排放核算及综合评估[J]. 铁路节能环保与安全卫生,2024,14(1):1-9.

[22] Attri G K, Gupta R C, Shrivastava S. Comparative environmental impacts of recycled concrete aggregate and manufactured sand production[J]. Process Integration and Optimization for Sustainability, 2022, 6(3): 737-749.

[23] 韦童,崔皓,季璇,等. 盾构渣土泥饼消纳现状与资源化前景分析[J]. 广州建筑,2023,51(3):117-120.

[24] 张小连,谢色新,张晓平. 盾构工程泥浆处置及资源化利用[J]. 中国煤炭地质,2023,35(5):71-74,80.

[25] Sun X H, Chen Z Y, Sun Z B, et al. High-efficiency utilization of waste shield slurry: a geopolymeric flocculation-filtration-solidification method[J]. Construction and Building Materials, 2023, 387: 131569.

[责任编辑:杜忆忱]