

工程渣土综合利用的生命周期评价案例*

迂晓轩¹, 高昊元¹, 齐贺¹, 梁琨¹, 王星云¹, 彭孟啟¹, 鲁官友², 周鼎¹
(1. 中建科技集团有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518000; 2. 中国建筑技术中心, 北京 100037)

摘要: 近年来,随着国内经济的发展,新建及改建的建筑数量越来越多,建筑垃圾的增长也越来越快,占总固体废弃物的比例也越来越高。因此,在环保意识逐步完善的背景下,建筑垃圾的环保、安全问题也逐步暴露在大众面前,如何安全、环保、有效地处置建筑垃圾成为了极大的挑战和亟待解决的难题。末端治理的模式已经没有办法使得各类产业可持续地发展下去,因此生命周期评价已经广泛应用于各个产业,为单一产品或者多个产品的评估提供了新的视角,将生命周期评价引入建筑垃圾处置的行业中,也可以为政策和企业提供新的思路 and 角度。

关键词: 建筑垃圾; 工程渣土; 生命周期评价; 深圳

中图分类号: TU5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-9422(2021)08-0164-08

Case Study: Life Cycle Assessment of Simultaneous Treatment and Recycle of Engineering Sediment Waste

YU Xiao-xuan¹, GAO Hao-yuan¹, QI He¹, LIANG Kun¹, WANG Xing-yun¹,
PENG Meng-qi¹, LU Guan-you², ZHOU Ding¹

(1. China Construction Science & Technology Group Co. Ltd., Shenzhen Branch, Shenzhen 518000, Guangdong, China; 2. China Construction Technical Center, Beijing 100037, China)

Abstract: In recent years, with the development of the domestic economy, the amount of newly built and rebuilt constructions has increased greatly. The growth of construction waste has been surprisingly fast with higher contributions to the total solid waste amount. Therefore, with environmental awareness awakening, safety and environmental issues of the construction and demolition waste (C&D waste) have gradually exposed to the general public. How to dispose C&D waste safely, environmentally and effectively has become a great challenge. End treatment has failed to make various industries sustainable, therefore, life cycle assessment (LCA) has been widely applied to assess single product or multiple products in various industries to provide brand new insights. Introducing LCA to C&D waste treatment industry will bring new ideas and insights for policy makers and enterprises.

Keywords: Construction and Demolition waste (C&D waste); engineering sediment; Life Cycle Assessment (LCA); Shenzhen

0 引言

在国内经济快速发展的背景下,建筑垃圾的产生量居高不下,其被安全并环保处置的重要性凸显。建筑垃圾中的工程渣土也因其性质相对稳定,早期没有得到足够的重视,处置依赖于填埋。然而随着监管的缺失和大量的非法堆积,最终造成了巨大的安全事

故。随着舆论压力的增长和监管力度的加大,建筑垃圾的资源化综合利用得到了一定的发展,但是对相关项目的评价仍旧少见。本文结合生命周期评价的基本理论,及实际案例的经济效益(成本及营收),对工程渣土的综合利用案例进行评价,为工程渣土的处置方向提出建议和思考。

1 建筑垃圾概况及其管理现状

1.1 建筑垃圾概况

2019年由生态环境部主导,在全国范围内启动了

收稿日期: 2020-08-18; 修回日期: 2021-08-19

* 基金项目: 国家重点研发计划资助项目: 建筑垃圾源头减量化关键技术及标准化研究与示范(2017YFC0703301)

“无废城市”建设试点的工作,涵盖 11 座城市(广东深圳、江苏徐州等)及 5 个区域。“无废城市”的重点在于固体废弃物(包括生活垃圾、工业固体废弃物、农业固体废弃物、医疗垃圾、建筑垃圾、危险固体废弃物等)的减量化和资源化,旨在促进国家的静脉产业、提倡循环经济的发展^[1,2]。建筑垃圾的组分中惰性成分为主(>80%),相较生活垃圾、医疗垃圾或者其他固体危废等,活性或有害性偏低,因此建筑垃圾受到的重视程度一直偏低,然而随着国内经济建设的发展,建筑垃圾的总量逐年增高,在 2018 年的建筑垃圾总量就已经高达 18 亿 t,约占当年总固体废弃物的 40%^[3]。在 2015 年发生的深圳光明山体滑坡事件,造成楼房坍塌、人员伤亡事故。该事件是由余泥渣土的非法倾倒和堆砌造成的,给大众和相关部门敲响了警钟,使建筑垃圾的危害引起各部门重视^[4]。

根据 CJJ/T 134—2019《建筑垃圾处理技术标准》的定义,建筑垃圾分为五类:工程渣土、工程泥浆、工程垃圾、拆除垃圾和装修垃圾。在不同的标准、规范中,其分类也都略有区别,例如在 SJG622019《建筑废弃物排放限额标准》中,各类建筑物的建筑垃圾被定义为建筑废弃物,施工废弃物用来指代工程垃圾,拆除废弃物来指代拆除垃圾等。在本文中,采用 CJJ/T 134—2019《建筑垃圾处理技术标准》的术语和定义。

1.2 深圳市建筑垃圾管理现状

深圳市光明区事故发生后,相关部门认识到建筑垃圾监管工作的权责不清的问题。因此自 2015 年,深圳市明确由住房和建设局(住建局)统筹管理建筑垃圾。2000 年之前,由于待建地和低洼地分布广泛,深圳市整体处于“缺方”状态。在 2000 年后,特别是在 2008 年后二期轨道工程的开展,深圳市从“缺方”迅速转变为“弃方”,建筑垃圾的处置问题全面爆发^[5]。在 2012 年,深圳市规划新建 9 座建筑垃圾综合利用设施,并且选择 70 处场地为建筑垃圾受纳场的备用选址,然而因为环境保护、征地拆迁、选址冲突等实际问题,难以推进建筑垃圾受纳场和综合利用设施的建设工程^[5]。

在 2018 年,深圳市在前期工作的基础上,重点推进了 8 座建筑垃圾受纳场的建设工作。截至 2020 年,全市仅剩新屋围受纳场仍旧在受纳建筑垃圾,建筑垃圾管理的难度日益增高^[6]。2020 年 1 月起,深圳市实施 SJG622019《建筑废弃物排放限额标准》和 SJG632019《建设工程建筑废弃物减排和综合利用技术标准》,修订了《深圳市建筑废弃物运输和处置管理办法》,并于同年发布《深圳市建筑废弃物管理办法》,2020 年 7

月 1 日起生效,旨在使得所有的建筑垃圾的去向都有迹可查^[7]。现阶段管理工作的重心前移,从仅仅强调安全运输及末端消纳,到重视源头排放及处置资源化,并且希望通过推动建筑垃圾综合利用行业的可持续性发展,得到建筑垃圾资源化有良好的行业生态。

深圳市已经存在不少从事经营建筑垃圾资源化的企业,例如,深圳市华威环保建材有限公司、深圳市为海建材有限公司、深圳市宏恒星再生科技有限公司等。由于轨道工程的快速推进,现场工程泥浆的处置项目也越来越普遍,主要将工程泥浆中的砂石骨料分离而出,剩余泥浆通过脱水压滤后形成泥饼,最终运输至集中受纳场填埋处置。在 2020 年的《深圳市建筑废弃物管理办法》中,规定泥浆必须经过干化处理才能运送出场,也大力推进工地配备工程泥浆的现场处置设备。然而,固定式综合利用厂的对象主要仍旧是拆除垃圾,目前阶段也应该力求固定化综合利用厂处置对象的多样性。

根据《深圳市余泥渣土受纳场专项规划(2011—2020)》中的计算方法,以深圳市坪山区为例,对该区的建筑垃圾(按种类计算)未来 4 年(2020 年—2023 年)的产生量进行预测分析,结果如表 1 所示^[5]。随着深圳市轨道二期工程在未来几年内接近尾声,远期的工程泥浆的产生量可能会低于最近几年,然而由于坪山区的开发程度较其他市区比较低,整体工程建设量依旧很大,未来 4 年坪山区的整体建筑垃圾的产生量都不低于 460 万 m³,建筑垃圾管理的压力依然巨大。

表 1 深圳市坪山区未来 4 年的建筑垃圾的预测产生量(万 m³)

年份	2020	2021	2022	2023
工程垃圾	77.06	77.48	77.89	78.30
拆除垃圾	40.90	40.90	40.90	40.90
工程渣土中的道路改造垃圾	70.19	71.31	72.43	73.54
装修垃圾	8.70	8.94	9.17	9.38
工程渣土中的基坑土	231.19	232.43	233.67	233.67
工程泥浆中的盾构泥浆	99.09	133.53	30.82	61.63
总量	527.13	564.58	464.86	497.42

根据表 1 中的计算结果,对深圳市坪山区的各个建筑垃圾种类的百分比进行分析,如图 1 所示。从图中可以明显看出,工程渣土(基坑土:44%、道路改造垃圾:13%)和工程泥浆(19%)的占比较高。在现阶段的坪山区的建筑垃圾综合利用企业中,绝大多数企业都是对拆除垃圾进行综合利用,对其他种类的建筑垃圾的处置和利用严重不足。

2 基于 LCA 理论的项目评价方法

建筑垃圾的处置及资源化利用对于土地资源有限的城市发展是必然的选择,对于是否建设单个建筑垃圾综合利用设施的评价主要取决于该项目的地理

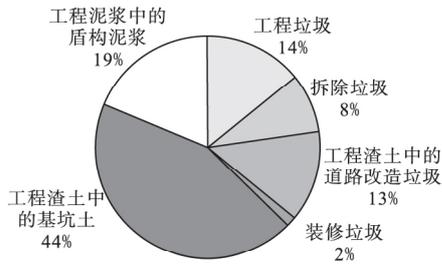


图1 深圳市坪山区未来4年的建筑垃圾的种类分析

条件、环境影响评价、社会稳定调查等，一般重点着眼于建筑垃圾的减量化和总产生量控制，几乎没有从生命周期的角度出发，对整体项目的环境效益进行量化^[8]。建筑垃圾综合利用项目的种类也常常局限于拆除垃圾的循环利用，缺少对其他种类的建筑垃圾的规划和布局。因此，本文从生命周期评价的角度出发，对工程渣土综合利用产线的环境效益进行评价，为建筑垃圾的管理规划提供新的视角。

王波等人以深圳市塘朗山建筑垃圾环境产业园为研究对象，利用生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)的方法，对该项目进行系统评价，通过对拆除垃圾的处置及循环利用工艺的技术研究，确立评价模型的边界，确定其分析清单，对清单内容逐一盘点，根据生命周期理论对评价的结果进行解释，得到了初步的结论：对建筑拆除垃圾的综合利用处理对环境带来的负面影响远远低于将其直接填埋，值得在各地推广应用^[9]。

本文采取类似的技术路线，以建筑工程渣土为处置对象，以深圳市坪山区为定位背景(建筑垃圾的组成成分均采用本地区的数据)，以生命周期评价理论为基础，结合生命周期成本(Life Cycle Costing, LCC)分析，对类似项目进行环境效益分析。本文分析方法基本遵循了ISO14040的技术框架：①目标与范围的确定；②清单分析；③影响评价；④评价解释。具体技术路线如图2所示。

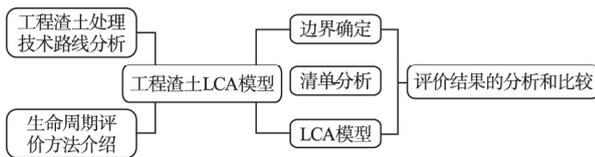


图2 本文环境效益分析采取的技术路线

3 工程渣土综合利用案例分析

3.1 工程渣土 LCA 模型构建

3.1.1 工程渣土处理技术路线分析

对工程渣土的处置及循环利用的核心在于将弃置的渣土中附加值较高的砂石分离而出，这个过程称作泥砂分离，分离出的砂石可以作为再生骨料直接利用，或者作为骨料继续去生产再生建材等。实现泥砂

分离的工艺流程多种多样，其本质就是将渣土根据其粒径分离开。经过设备商调研、实际案例考察及严谨的可行性分析最终确定了本文的工艺流程。在本文中，泥砂分离的工艺流程见图3。最终渣土被分为三级：0.075~0.5 mm、0.5~5 mm、>5 mm，分别可作为细砂、中砂及粗砂回收。该工艺流程主要针对于深圳市坪山区的工程渣土的性质，可适应处理含泥量或者含砂量较高的工程渣土。

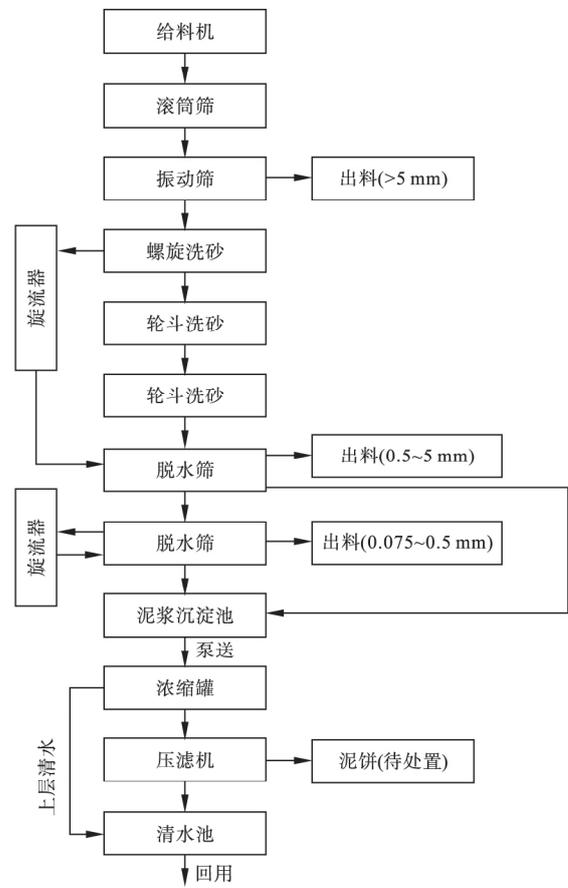


图3 泥砂分离工艺流程图

3.1.2 工程渣土综合利用 LCA 方法

工程渣土的综合利用过程涉及众多步骤，在运输、处置、资源化、末端再处置等不同阶段中，均存在对资源的消耗以及对环境产生负面的影响，造成环境负荷。本文在明确分析边界之后，对各个单一阶段的环境负荷进行研究，并且得出单一阶段在整个LCA中的比重，从而得到工程渣土综合利用工艺中，环境成本的分布情况，对管理和改善提出依据和方向。

3.1.2.1 边界确定

本文研究对象为深圳市坪山区产生的工程渣土的综合利用过程，因此，将该工程渣土的产生定义为生命周期的开始直至无法循环利用部分的末端处置完成的整个过程。对于该案例的边界定义，可见图4。

3.1.2.2 清单分析

在边界确定后，LCA的单元过程和相关的单元行

为也相应地确定,因此可以开始 LCA 的清单分析。清单分析明确了需要的数据及该系统边界的输入和输出,是通过对该工艺过程的资源能源消耗、环境排放等总体影响的数据化分析。数据的来源途径有多

种,可以为相关企业直接提供,通过文献数据、公开的报告类的相关数据进行类比,未公开的数据报告和现存 LCA 的数据库使用的参数数据等。本文中涉及的清单分析的相应内容可见表 2 列举。

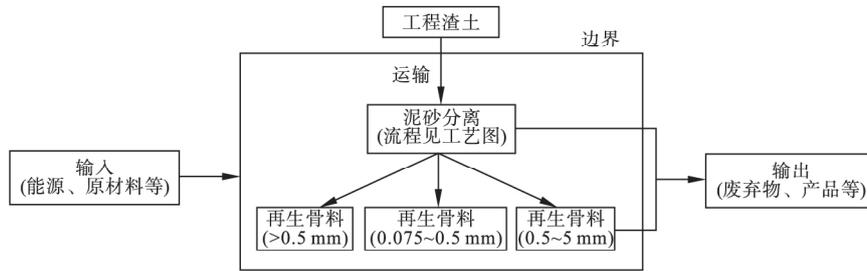


图4 工程渣土综合处理 LCA 边界

表2 工程渣土综合利用 LCA 清单分析列表

阶段	运输	泥砂分离	综合利用	末端处置
物质	1. 输入 2. 输出	工程渣土 再生骨料	— 再生建筑材料	— 弃置泥饼
能源	1. 输入 2. 输出	燃料 —	燃料、电力 —	燃料
环境负荷	机动车尾气等	废气、粉尘等	废气、粉尘等	废气、渗滤液等

3.1.2.3 参数选择

表 2 的清单分析中不同因素的数据应和各类的环境影响类型相匹配,即影响因子的确定。一般来说,环境影响因子分为以下 5 种^[10]: ①全球变暖:主要干扰因子有 CO₂、CO、CH₄、N₂O 等; ②酸化:主要干扰因子有 HCl、SO₂、H₂S 等; ③富营养化:主要干扰因子有 NO₃⁻、NO_x、NH₃、COD 等; ④光化学臭氧合成:主要影响因子为 VOC 和 CO 等; ⑤烟灰尘:主要干扰因子为烟尘、灰尘等。在具体计算过程中,会将具有相同环境影响的物质折合为该影响因子基准物来计算。例如,对于全球变暖的基准物为 CO₂(单位: kgCO₂/kg 物质)。CO 涉及两种影响因子,全球变暖和光化学臭氧合成,因此将 CO 的环境影响分别计入到两种因子中,70%计入全球变暖,剩余 30%计入光化学臭氧合成。

对于不同类的环境影响,需要将其标准化,不同类型的影响结果可以直接进行比较。数据的标准化需要采取同一时期的数据作为参考年份,本文中以 1990 年的标准人当量作为基准,与基准值进行比较确认其环境影响值的大小。得到了不同环境影响的标准化当量值后,需要确定各个影响因子的权重,这个过程主观性强、争议多,从不同的角度和理论出发都可以得到各异的结果,因此本文采取在国内应用最广泛的目标距离法来计算加权因子。在本文中,也参考类似项目的 LCA 模型,兼顾 LCC。因此,该处理过程将土建成本、运营成本及项目营收都纳入考虑范围^[9,11]。

3.2 工程渣土综合利用实例

3.2.1 案例基本情况

案例背景设置在深圳市坪山区,该工程渣土产线处理量定为 120 万 m³/年(200 m³/h,300 个工作日,每日工作时间为 20 h)。根据当地的工程渣土的来料特征,处置每立方米工程渣土需要辅料约 1 kg(絮凝剂类),产出约 0.08 m³粗骨料和 0.43 m³细骨料,以及产生约 0.32 m³的泥饼待弃置。产线的占地面积约为 5 000 m²,需要堆场面积约 10 000 m²,用作工程渣土、再生建材以及弃置泥饼的堆场。再生骨料可以继续生产成为更高附加值的建筑材料,本文暂时不考虑这一步骤。

3.2.2 清单分析

3.2.2.1 运输阶段

工程渣土的产生有时间和空间上较为集中的特性,如在某地一段时间内大量产生。因此,该类项目的选址应该尽量根据该地区当年的工程项目规划和工程进度来决定,这样服务半径一般较小,运输距离也都会比较近(<15 km)。深圳市已经全面启用了规格为 10 m³的新型泥头车,整车的运输成本约为 400 元,因此每立方米的工程渣土的运输成本约为 40 元/m³(考虑服务半径内的平均运距为 10 km)。

工程渣土的运输车辆处于燃油车和电动泥头车并存的阶段,能源消耗主要为燃油和电能:燃油汽车每百公里满载耗油约为 50 L(每升柴油约含有 37 000 kJ 能量)相当于工程渣土消耗 18 500 kJ/m³,柴油的密

度为 0.86kg/L,则相当于工程渣土消耗柴油 0.43 kg/m³;电动汽车每百公里满载耗电约为 140 kW·h 相当于工程渣土消耗 5 040 kJ/m³。假设燃油车和电动车分别占 50%,则工程渣土消耗柴油 0.215 kg/m³、能量 11 770 kJ/m³。

3.2.2.2 综合利用阶段

对于该项目的经济成本,主要分为原/辅料、燃料与动力、人工费、质检与研发、营销、管理、土建及设备与弃置泥饼处置等 8 个方面;经济收入主要来自两方面工程渣土的受纳费用和再生骨料的销售费用。作者根据项目实际情况作出相应计算,得到表 3,具体列举该项目的成本与收入。

表 3 工程渣土经济计算

序号	成本类别	每年成本/ (万元/年)	单位渣土成本/ (元/m ³)
1	主要原/辅材料	864	7.2
2	燃料与动力	1 041.7	8.7
3	人工费	242.3	2.0
4	质检与研发	1 632	13.6
5	营销	275.1	2.3
6	管理	887.5	7.4
7	土建及设备(折旧摊销后)	368.2	3.1
8	弃置泥饼处置	5 529.6	46.1
	合计	10 840.4	90.3

序号	收入类别	单位/ (万元/年)	单位渣土收入/ (元/m ³)
1	工程渣土受纳	5 760	48.0
2	再生骨料出售	8 716.8	72.6
	合计	1 4476.8	120.6

具体的泥砂分离工艺流程在 3.1 节中已详细介绍,实现该工艺的设备情况具体见表 4。成套设备的总功率为 1 209.5 kW 根据设计产能得到工程渣土消耗 21 771 kJ/m³。该工艺内部需要装载机、挖掘机等辅助器械进行物料运输等,工程渣土需要耗油 0.1 L/m³,因此,工程渣土的场内运输需要耗能 3 700 kJ/m³,柴油消耗 0.086 kg/m³。

工程渣土的泥砂分离的工艺流程中,从原料到出料,物料的含水率都不低,因此粉尘的产生会远低于其他建筑垃圾的综合处理工序(例如,建筑破拆物的破碎筛分等),粉尘产生量参考其他建筑废弃物处理工序取值为 0.13 kg/m³[9,11,12]。

3.2.2.3 末端处置阶段

经济成本分析已经列举在表 3 中,此处不重复讨论。工程渣土经过泥砂分离工序后,剩余泥浆经过压滤形成泥饼,含水率平均约为 35%,固体粒径小于 0.075 mm,在末端处置过程中(主要是填埋和压实),每立方米的工程渣土约产生 0.32 m³的泥饼,主要的能源消耗是作业过程中的柴油消耗,对于每立方米工

程渣土柴油消耗为 0.048 6 kg/m³,折算成能量为 2 092.8 kJ/m³。

表 4 工程渣土综合利用设备清单

序号	设备名称	功率/kW	台数
1	板链喂料机	37	1
2	波动给料机	37	1
3	输送机	27.5	1
4	滚筒清洗机	55	1
5	水平筛分机	37	2
6	双螺旋洗砂机	60	2
7	脱水筛	15	1
8	细砂回收系统	45	1
9	水洗砂出料输送机	22	1
10	振动筛上料输送机	15	1
11	振动筛出料输送机	7.5	2
12	泥饼输送机	4	10
13	自动泡药机	11	1
14	浓度监测及自动变量加药	15	1
15	自动刮泥臂及浓度调节系统	15	1
16	底流污水泵	45	1
17	压滤机柱塞入料泵	45	2
18	压滤机渣浆入料泵	132	3
19	厢式压滤机	21	5
20	污泥暂存池搅拌机	30	1
	合计	1 209.5	39

填埋过程中会有粉尘的产生,一般来说建筑垃圾填埋场的粉尘产生量为 0.316 mg/m³,影响高度为 5 m,影响半径为 500 m,每立方米填埋建筑垃圾的粉尘排放为 1.241 kg,因此每立方米的工程渣土会产生 0.397 kg/m³。填埋过程中会产生少量气体,以 CO₂、CH₄、CO 等为主。因此,末端处置阶段的大气中环境排放的单位值如表 5 所示。

表 5 末端处置阶段的大气中环境排放的单位值

成分	填埋作业排放值/ (kg/kg 柴油)	填埋过程排放值/ (kg/m ³ 渣土)
CO ₂	3.169	1.431
CO	0.037 8	0.049
SO ₂	0.000 407	
NO _x	0.006 95	
CH ₄	0.000 494	0.634
N ₂ O	0.000 581	
H ₂ S		0.546
NH ₃		0.207
粉尘		0.397

主要的环境排放还包括填埋过程中产生的渗滤液及气体,由于工程渣土产生的待填埋泥饼的有机质含量极低,几乎不存在微生物活性,因此渗滤液中常见的污染物 COD(化学需氧量)和 TOC(总有机碳)会非常低。渗滤液的产生量也会受到多种不同因素的影响,例如,工程渣土的原始性质、压滤过程中的加药量、封场的施工工艺及当地的雨水天气影响等,因

此对于渗滤液量只能根据在小范围做的测试结果,本文结合文献选定渗滤液的产生值为 32 L/m³ 工程渣土。对于末端处置阶段的渗滤液部分贡献的环境排放的清单分析见表 6。

3.2.2.4 清单分析汇总

根据运输阶段、综合利用阶段及末端处置阶段的分析,工程渣土运输阶段消耗柴油 0.215 kg/m³,综合利用阶段柴油消耗 0.086 kg/m³,末端处置阶段柴油

消耗为 0.048 6 kg/m³,汇总清单分析结果如表 7 所示。

表 6 末端处置阶段的渗滤液产生的环境排放的单位值

成分	渗滤液浓度/(mg/L)	工程渣土渗出量/(mg/m ³)
COD	24.2	2 420
NH ₃	0.382	38.2
Cd	N. D.	N. D.
Hg	N. D.	N. D.

表 7 工程渣土综合处理清单分析汇总

类别	运输阶段	综合利用阶段	末端处置阶段	合计
经济成本/(元/m ³)	40	90.3		1.3 × 10 ²
CO ₂ /(kg/m ³)	6.81 × 10 ⁻¹	2.72 × 10 ⁻¹	1.585	2.539
CO/(kg/m ³)	8.13 × 10 ⁻³	3.25 × 10 ⁻³	5.10 × 10 ⁻²	6.23 × 10 ⁻²
SO ₂ /(kg/m ³)	8.75 × 10 ⁻⁵	3.50 × 10 ⁻⁵	1.98 × 10 ⁻⁵	1.42 × 10 ⁻⁴
NO _x /(kg/m ³)	1.149 × 10 ⁻³	5.98 × 10 ⁻⁴	3.38 × 10 ⁻⁴	2.43 × 10 ⁻³
CH ₄ /(kg/m ³)	1.06 × 10 ⁻⁴	4.25 × 10 ⁻⁵	6.34 × 10 ⁻¹	6.34 × 10 ⁻¹
N ₂ O/(kg/m ³)	1.25 × 10 ⁻⁴	5.00 × 10 ⁻⁵	2.83 × 10 ⁻⁵	2.03 × 10 ⁻⁴
H ₂ S/(kg/m ³)	0	0	5.46 × 10 ⁻¹	5.46 × 10 ⁻¹
NH ₃ /(kg/m ³)	0	0	2.07 × 10 ⁻¹	2.07 × 10 ⁻¹
COD/(kg/m ³)	0	0	2.42 × 10 ⁻⁶	2.42 × 10 ⁻⁶
VOC/(kg/m ³)	1.64 × 10 ⁻³	6.56 × 10 ⁻⁴	3.71 × 10 ⁻⁴	2.67 × 10 ⁻³
粉尘/(kg/m ³)	0	0.13	0.397	0.527

类比如上过程,如果将工程弃土不经过任何处理直接进行填埋,清单分析如表 8 所示,其中运输阶段的平均运输距离取值 35 km。

3.2.2.5 分类及标准化

首先根据清单分析的结果,将工程渣土的环境排放分类到 3.1.2 节的参数选择当中(全球变暖、酸化、富营养化、生态毒性、烟灰尘),根据不同环境参数的加权值得到相应参数的总影响潜值,其中当量数、基准值与目标距离权重的数值参考自文献[10]。工程渣土综合处理的结果见表 9,工程渣土直接填埋的结果见表 10,两者的对比值汇总表 11。

表 8 工程渣土直接填埋的清单分析汇总

类别	运输阶段	末端处置阶段	合计
经济成本(元/m ³)	200	144	344
CO ₂ (kg/m ³)	2.38	4.95	7.34
CO(kg/m ³)	2.84 × 10 ⁻²	0.159	0.188
SO ₂ (kg/m ³)	3.06 × 10 ⁻⁴	6.18 × 10 ⁻⁵	3.68 × 10 ⁻⁴
NO _x (kg/m ³)	5.23 × 10 ⁻³	1.06 × 10 ⁻³	6.28 × 10 ⁻³
CH ₄ (kg/m ³)	3.72 × 10 ⁻⁴	1.98	1.98
N ₂ O(kg/m ³)	4.38 × 10 ⁻⁴	8.83 × 10 ⁻⁵	5.26 × 10 ⁻⁴
H ₂ S(kg/m ³)	0	1.71	1.71
NH ₃ (kg/m ³)	0	0.647	0.647
COD(kg/m ³)	0	7.56 × 10 ⁻³	7.56 × 10 ⁻³
VOC(kg/m ³)	5.74 × 10 ⁻³	1.16 × 10 ⁻³	6.90 × 10 ⁻³
粉尘(kg/m ³)	0	1.24	1.24

表 9 工程渣土综合处理工艺清单分析汇总

分类	物质	排放质量/(kg/m ³)	参考物	当量数	影响潜值/[kg 参考物/(人·年)]	基准值/[kg 参考物/(人·年)]	标准化值	目标距离权重	标准化总影响潜值
全球变暖	CO ₂	2.539	CO ₂	1	18.5	8 700	2.13 × 10 ⁻³	0.83	1.77 × 10 ⁻³
	CO	4.36 × 10 ⁻²		2					
	CH ₄	0.634		25					
	N ₂ O	0.000 203		320					
酸化	SO ₂	1.42 × 10 ⁻⁴	SO ₂	1	1.42	36	3.93 × 10 ⁻³	0.73	2.87 × 10 ⁻²
	NH ₃	0.207		1.88					
	H ₂ S	0.546		1.88					
富营养化	NO _x	2.43 × 10 ⁻³	NO ₃ ⁻	1.35	3.84 × 10 ⁻³	62	6.19 × 10 ⁻⁵	0.73	3.84 × 10 ⁻³
	NO ₃ ⁻	-		1					
	COD	2.42 × 10 ⁻³		0.23					
光化学臭氧合成	VOC	2.67 × 10 ⁻³	C ₂ H ₄	0.6	2.16 × 10 ⁻³	0.65	3.32 × 10 ⁻³	0.53	1.76 × 10 ⁻³
	CO	1.87 × 10 ⁻²		0.03					
烟灰尘	灰尘 烟尘	0.527	烟灰尘	1 1	0.527	18	2.93 × 10 ⁻³	0.61	1.79 × 10 ⁻²

表 10 工程渣土直接填埋清单分析汇总

分类	物质	排放质量/ (kg/m ³)	参考物	当量数	影响潜值/ [kg 参考物/ (人·年)]	基准值/ [kg 参考物/ (人·年)]	标准化值	目标距离权重	标准化总 影响潜值
全球变暖	CO ₂	7.34		1					
	CO	0.131	CO ₂	2	57.3	8700	6.58 × 10 ⁻³	0.83	5.46 × 10 ⁻³
	CH ₄	1.98		25					
	N ₂ O	5.26 × 10 ⁻⁴		320					
酸化	SO ₂	3.68 × 10 ⁻⁴		1					
	NH ₃	0.647	SO ₂	1.88	4.42	36	0.123	0.73	8.97 × 10 ⁻²
	H ₂ S	1.71		1.88					
富营养化	NO _x	6.28 × 10 ⁻³		1.35					
	NO ₃ ⁻	-	NO ₃ ⁻	1	1.02 × 10 ⁻²	62	1.65 × 10 ⁻⁴	0.73	1.02 × 10 ⁻²
	COD	7.56 × 10 ⁻³		0.23					
光化学臭氧合成	VOC	6.90 × 10 ⁻³	C ₂ H ₄	0.6	8.28 × 10 ⁻³	18	1.27 × 10 ⁻²	0.53	6.75 × 10 ⁻³
	CO	5.63 × 10 ⁻²		0.03					
烟灰尘	灰尘	1.24	烟灰尘	1	1.24	18	6.89 × 10 ⁻²	0.61	4.20 × 10 ⁻²
	烟尘			1					

表 11 工程渣土综合处理和直接填埋的标准化总影响潜值对比

标准化总影响潜值	综合处理	直接填埋
全球变暖	1.77 × 10 ⁻³	5.46 × 10 ⁻³
酸化	2.87 × 10 ⁻²	8.9 × 10 ⁻²
富营养化	3.84 × 10 ⁻³	1.02 × 10 ⁻²
光化学臭氧合成	1.76 × 10 ⁻³	6.75 × 10 ⁻³
烟灰尘	1.79 × 10 ⁻²	4.20 × 10 ⁻²
合计	5.39 × 10 ⁻²	1.54 × 10 ⁻¹

3.2.3 生命周期评价

3.2.3.1 经济分析

仅从成本方面考虑,工程渣土的综合处理的成本约为 130 元/m³,而填埋的成本则为 344 元/m³。另外,工程渣土会涉及收取接纳费,而且经过泥砂分离后的砂石骨料,可以作为高质量的再生骨料进行销售,因此在销售份额理想的情况下,工程渣土的综合处理会产生收益约 120 元/m³,可以得出工程渣土的综合处理方案具有经济效益的结论。

3.2.3.2 环境影响分析

根据表 9 和表 10 的结果汇总可以看出,对于工程渣土的 5 类环境影响因子的数值(影响潜值和标准化影响潜值),综合处理的影响潜值均大大低于直接填埋的结果,对比结果汇总在图 5 中,其中光化学臭氧合成量和酸化气体降低最多,与直接填埋相比,光化学臭氧合成减少 73.9%,酸化的影响潜值降低 68%。同时,酸化也是 5 个影响因子占比最重的,因此综合利用对于降低这一环境影响的贡献极大。

根据本案例,该工程渣土综合处置产线的处理量为 120 万 m³/年,与直接填埋相比较,每年可以减少温室气体排放 46.5 万吨/年(CO₂ 当量),减少酸化气体排放 3.61 万吨/年(SO₂ 当量),少产生富营养化物质

7.66 吨/年(NO₃⁻ 当量),光化学臭氧合成量减少 7.34 万吨/年(C₂H₄ 当量),烟灰尘产生减少 856.4 万吨/年(烟灰尘当量)。对比可知,环境排放降低的最重要的原因是运输排放的减少,柴油中含有较高的杂质,相较于其他燃油,燃烧过程中也更容易因为不完全燃烧产生大气污染物。同时,填埋过程中也会有大气污染物生成,产生的渗滤液也含有环境污染物的排放。利用生命周期评价的理论,对工程渣土的综合利用和直接填埋两个过程进行量化的比较,能够更加直观地看出工程渣土综合利用是符合环境友好型的工程渣土处置方案。

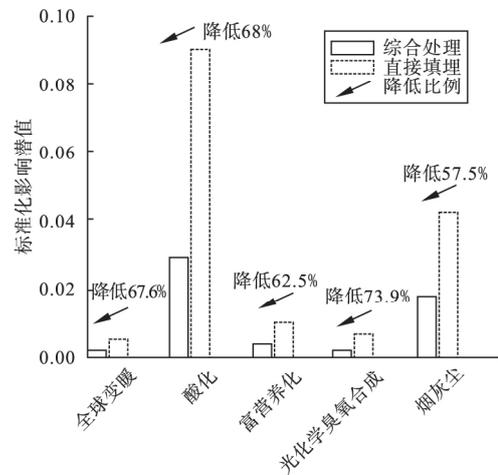


图 5 工程渣土的综合利用和直接填埋的影响潜值对比

4 结语

本文以深圳市坪山区为背景,以文中介绍的工程渣土案例为研究对象,进行了基于 LCA 理论的评价,并且考虑了经济成本,得出工程渣土的综合利用相较于传统的处置方式(直接填埋)具有更低的环境排放,

并且能够创造经济效益,是符合经济发展的环境友好型的工程渣土处置方案。

参考文献:

[1]陈云敏.环境土工基本理论与工程应用[J].岩土工程学报,2014,36(1):1-46.
 [2]张宝兵.我国城市静脉产业体系构建研究[D].北京:首都经济贸易大学,2013.
 [3]Peiwen Sun,Ning Zhang,Jian Zuo,et al.Characterizing the Generation and Flows of Building Interior Decoration and Renovation Waste: A Case Study in Shenzhen City[J].Journal of Cleaner Production,2020,260:121077.
 [4]Ning Zhang,Huabo Duan,Peiwen Sun,et al.Characterizing the Generation and Environmental Impacts of Subway-related Excavated Soil and Rock in China[J].Journal of Cleaner Production,2020,248:119242.
 [5]深圳市城市规划设计研究院有限公司.深圳市余泥渣土受纳场专项规划(2011-2020)[R].深圳:深圳市城市规划设计研究院有限公司,2012.
 [6]深圳市城市规划设计研究院有限公司.深圳市2018年度余泥渣土受纳场实施规划[R].深圳:深圳市城市规划设计研究院有限公司,2018.
 [7]深圳市住房和建设局.深圳市建筑废弃物管理办法[R].深圳:深圳市住房和建设局,2020.

(上接第163页)

5 结论

相较于传统的清洗工艺,高压水射流清洗技术清除过滤器上所形成的结垢物效果非常明显,且配以井下视频,过程可视。目前就沈阳市地下水源热泵井而言,在有条件情况下,采用高压水射流清洗应在全市大力推广。

参考文献:

[1]云桂春,成徐州.人工地下水回灌[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.
 YUN Guichun,CHENG Xuzhou.Artificial Groundwater Recharge[M].Beijing:China Construction Industry Press,2004.(in Chinese)
 [2]金光炎.地下水文学初步与地下水资源评价[M].南京:东南大学出版社,2009.
 Jin Guangyan.A Preliminary Study on Groundwater Literature and Evaluation of Groundwater Resources[M].Nanjing:Southeast University Press,2009.(in Chinese)
 [3]崔可锐.水文地质学基础[M].合肥:合肥工业大学出版社,2010.
 Cui Kerui.Hydrogeological Fundamentals[M].Hefei:Hefei University of Technology Press,2010.(in Chinese)
 [4]马最良,吕悦.地源热泵系统设计与应用[M].北京:机械工业出版社,2007.
 Ma Zuiliang,LYU Yue.Design and Application of Ground Source Heat Pump System[M].Beijing:Machinery Industry Press,2007.(in Chinese)
 [5]徐伟.中国地源热泵发展研究报告[R].北京:中国建筑工业出版

[8]刘婷婷,张劫,胡鸣明.建筑废弃物资源化环境效益分析:以重庆为例[J].中国环境科学,2018,38(10):3853-3867.
 [9]王波.基于生命周期评价的深圳市建筑垃圾处理模式研究[D].武汉:华中科技大学,2012.
 [10]唐维.机械产品生命周期设计评价方法及应用研究[D].杭州:浙江大学,2014.
 [11]罗朗.对基于生命周期评价的建筑行业环境影响问题分析[J].四川水泥,2018,(4):113.
 [12]傅梦,张智慧.建筑垃圾制免烧免蒸砖的环境影响评价[J].工程管理学报,2010,24(5):485-488.

作者简介:迂晓轩(1992),女,湖北人,毕业于阿尔伯塔大学,环境工程专业,博士,工程师,主要从事环境工程、环境修复、建筑废弃物相关研究(anranzhilv@163.com)。

名词小贴士: 静脉产业是垃圾回收和再资源化利用的产业,又被称为“静脉经济”、第四产业。其实质是运用循环经济理念,有机协调当今世界发展所遇到的两个共同难题——“垃圾过剩”和资源短缺,“变废为宝”,通过垃圾的再循环和资源化利用,最终使自然资源退居后备供应源的地位、自然生态系统真正进入良性循环的状态。

社,2013.

XU Wei.Development Report of Ground Source Heat Pumps in China[R].Beijing:China Construction Industry Press,2013.(in Chinese)
 [6]蒋能照,刘道平.水源、地源、水环热泵空调技术及应用[M].北京:机械工业出版社,2007.
 JIANG Nengzhao,LIU Daoping.Air Conditioning Technology and Application of Water Source,Ground Source and Water Ring Heat Pump[M].Beijing:Machinery Industry Press,2007.(in Chinese)
 [7]薛胜雄.高压水射流技术与应用[M].北京:机械工业出版社,1998.
 XUE Shengxiong.High Pressure Water Jet Technology and Application[M].Beijing:Mechanical Industry Press,1998.(in Chinese)
 [8]巩学梅.太阳能热水与地源热泵技术在建筑节能中的应用与优化[M].北京:中国电力出版社,2019.
 GONG Xuemei.Application and Optimization of Solar Hot Water and Ground Source Heat Pump Technology in Building Energy-saving[M].Beijing:China Electric Power Press,2019.(in Chinese)
 [9]周志芳.污染水文地质学[M].北京:高等教育出版社,2011.
 ZHOU Zhifang.Contamination Hydrogeology[M].Beijing:Higher Education Press,2011.(in Chinese)
 [10]张海秋.钻探工程技术[M].郑州:黄河水利出版社,2009.
 ZHANG Haiqiu.Drilling Engineering Technology[M].Zhengzhou:Yellow River Water Conservancy Press,2009.(in Chinese)

作者简介:赵丽丽(1991),女,辽宁人,建筑工程专业,研究方向为建筑工程(245991865@qq.com)。