

不同再生骨料生产模式的环境影响评价 ——以浙江省为例

陈文江¹, 陆鑫星², 叶建军¹, 毛建东¹, 孔德玉², 章玉容²

(1. 浙江省钱塘江流域中心, 浙江 杭州 310020; 2. 浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要:建筑废弃物的资源化过程与其生产方式密切相关, 由于处理过程和运输距离的差异, 采用集中式处理工厂和移动式破碎站生产再生骨料时, 两者的环境影响具有明显差异。立足于浙江省基于三维数字地球确定运输距离, 科学定量地给出了 2 种再生骨料生产方式的生命周期环境影响清单, 开展了相应的生命周期环境负荷和环境效益评价。研究结果表明: 集中式处理工厂环境负荷主要产生于材料运输阶段, 占总环境负荷的 53.42%; 移动式破碎站的环境负荷则主要来源于骨料外运和残渣的焚烧与填埋, 分别占总环境负荷的 37.26% 和 25.54%。虽然移动式破碎站生产 1 t 再生骨料的环境负荷低于集中式处理工厂, 但集中式处理工厂具有更高的生产效率、年产量和生产能力, 极大地提高了其年环境效益, 利用集中式生产再生骨料其年环境效益比移动式高 44.44%。因此, 在碳达峰碳中和背景下, 可大力推广采用集中式生产再生骨料。

关键词:再生骨料; 生产模式; 生命周期评价; 环境负荷; 环境效益

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1006-4303(2024)02-0164-08

Environmental assessment of recycled aggregate with different production modes: taking Zhejiang province as an example

CHEN Wenjiang¹, LU Xinxing², YE Jianjun¹, MAO Jiandong¹, KONG Deyu², ZHANG Yurong²

(1. Qiantang River Basin Center of Zhejiang Province, Hangzhou 310020, China; 2. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: The recycling of construction and demolition (C&D) wastes is closely related to its production mode. Due to the difference in production process and transport distance, the environmental impact of recycled aggregate produced by fixed or mobile C&D wastes treatment plants is obviously different. Therefore, this paper adopts the life cycle assessment (LCA) method by taking Zhejiang province as an example, determines the transport distance based on the software LocaSpace Viewer, provides the life cycle inventory of two recycled aggregate production modes, and conducts the life cycle impact assessment. The research results indicate that the materials transport stage is the main stage which causes the environmental burden of recycled aggregate produced by fixed C&D wastes treatment plants, which accounts for 53.42% of the total environmental burden. However, the stages of aggregate transport, residues incineration and landfill account the majority of the environmental burden for mobile C&D wastes treatment plants, which is 37.26% and 25.54%, respectively. In general, although the environmental burden of recycled aggregate produced by mobile C&D wastes treatment plants is lower than that by fixed C&D wastes treatment plants due to the higher production efficiency, production output and production capacity, the annual environment benefit of fixed C&D wastes treatment plants can be improved significantly, which is 44.44% higher than that of mobile C&D wastes treatment plants. Therefore, in the context of carbon peak and carbon neutrality, it is advisable to promote using fixed C&D wastes treatment plants to produce recycled aggregate.

Keywords: recycled aggregate; production mode; life cycle assessment; environmental burden; environmental benefit

收稿日期: 2022-11-18

基金项目: 浙江省科技计划项目——双边产业联合研发计划项目(2022C04025)

作者简介: 陈文江(1974—), 男, 江西峡江人, 高级工程师, 研究方向为土木工程材料与管理, E-mail: 565890223@qq.com。

大量建筑垃圾的产生制约着城市的可持续发展,将建筑垃圾高效资源化利用已成为国内外研究热点。有数据显示1万t建筑垃圾大约需要667m²来填埋。如果将建筑垃圾用于生产再生骨料,不仅可以减少约三分之一的天然石材开采,而且可以减少大量的土地占用。采用科学方法评价建筑废弃物资源化利用过程产生的环境影响,有助于改进其生产过程,减轻环境负担^[1]。现有研究^[2-4]往往通过对比使用原材料生产天然骨料和建筑垃圾生产再生骨料的环境影响,指出再生骨料具有较好的环境效益,提出运输距离是影响再生骨料环境负荷的主要因素,再生骨料的环境效益随着再生骨料取代率的提高而增大。然而,建筑废弃物的资源化过程与其生产方式密切相关,由于处理过程和运输距离等差异,采用集中式厂区和移动式破碎站生产再生骨料时,两者的环境影响具有明显差异^[5-6]。

为了更科学地评价不同生产模式下再生骨料生产过程产生的环境影响,采用生命周期评价方法^[7],基于集中式生产和移动式生产2种模式,从建筑垃圾的运输、破碎筛分、残渣的运输和焚烧填埋过程,到再生骨料的生产和使用,构建考虑生产模式影响的再生骨料环境影响清单,并开展相应的环境影响评价研究。

1 再生骨料生产的环境影响评价

1.1 系统边界

目前再生骨料的主流生产模式有集中式和移动式2种。集中式生产模式是指在固定车间利用固定设备建立生产线进行流水生产,移动生产模式是指利用可移动式设备在处理现场直接对建筑垃圾进行就地处理。笔者以上述2种骨料生产模式为研究对象开展建筑垃圾资源化处理研究,系统边界包含建筑垃圾的产生、垃圾运输、预处理、破碎筛分、骨料/残渣运输以及最后的残渣处置,其中集中式生产模式比移动式多一个垃圾运输阶段,而移动式生产模式需要对建筑垃圾进行预处理。

1.2 集中式生产模式清单分析

1.2.1 运输阶段清单分析

本阶段主要计算由原材料运输车辆的油耗造成的环境影响清单,可分为运距确定和车辆清单分析2部分。

建筑垃圾运输距离对骨料清单的影响很大,以往研究往往采用经验或假设确定运输距离,降低了研究结果可信度。为提高生命周期评价结果的准确

性,笔者以浙江省为例,采用三维数字地球(Lo-caSpace Viewer, LSV)软件确定运输距离,为运输阶段清单构建提供数据支撑。采用LSV软件搜索并标注浙江省共10个市(由于舟山市为群岛地级市,交通运输工具难以确定,因此舟山不予以考虑)的主要建筑垃圾固定处理中心、建筑垃圾填埋场和采石场,估算各区域中心至固定处理中心、残渣至建筑垃圾填埋场和采石场至加工厂的运输距离,再根据调研收集和整理各市的年垃圾处理量,结果如表1所示。

表1 各地级市至固定处理中心/填埋场/采石场的平均运距及年处理量

Table 1 Average distance and annual handling capacity from fixed treatment centre/landfill/quarry by city

市级地区	平均运距/km			年处理量/万t
	建筑垃圾至固定处理中心	残渣至填埋场	天然骨料至加工厂	
嘉兴	14.19	34.23	34.35	110.0
湖州	14.55	27.07	41.43	120.0
杭州	17.51	20.58	46.97	850.0
宁波	20.06	35.04	24.65	409.1
温州	16.86	18.62	36.21	100.0
绍兴	17.79	20.84	25.90	182.5
金华	15.54	20.49	45.40	100.0
衢州	22.56	27.28		40.0
台州	18.13	38.22	35.94	150.0
丽水	37.84	41.82		35.0

计算建筑垃圾运输至固定处理中心、残渣至填埋场、采石场至加工厂的平均运距 S ,有

$$S = \sum_{i=1}^{10} \frac{N_i S_i}{N} \quad (1)$$

式中: N_i 表示第 i 个地级市的建筑垃圾年处理量; S_i 表示第 i 个地级市运输的平均运距; N 表示浙江省建筑垃圾年处理总量。计算可知浙江省建筑垃圾运输至固定处理中心的平均运距为18.04 km,浙江省残渣运输至填埋场的平均距离为26.16 km,浙江省天然骨料运输至加工厂平均距离为38.11 km。

目前建筑垃圾的运输主要采用中大型柴油货车,根据亿科环境科技有限公司的CLCD数据库^[8],10t轮式柴油货车运输1t货物行驶1 km、华东电网1 kWh电力和1 kg柴油的环境影响清单如表2所示。

表2 相关类型的环境影响清单
Table 2 Environmental impact inventory

环境影响 评价项目	能源消耗/kg			大气污染/kg					
	原煤	原油	天然气	CO ₂	SO ₂	NO _x	CO	CH ₄	颗粒物
柴油货车	2.83×10^{-3}	0.038 3	1.02×10^{-3}	0.161	1.98×10^{-4}	4.85×10^{-3}	1.13×10^{-3}	5.69×10^{-4}	2.98×10^{-7}
华东电网	5.97×10^{-1}	3.34×10^{-3}	6.28×10^{-3}	0.927	3.63×10^{-3}	2.70×10^{-3}		2.73×10^{-3}	6.96×10^{-5}
柴油	4.73×10^{-2}	1.31	7.87×10^{-5}	3.500	3.56×10^{-3}	5.56×10^{-2}	2.75×10^{-2}	3.44×10^{-4}	7.69×10^{-3}

浙江省再生骨料生产过程中原材料利用率约为85%,即每生产1 t再生骨料需要1.176 t建筑垃圾,产生0.176 t残渣废弃物。结合浙江省建筑垃圾运输

至固定处理中心的平均运距和10 t轮式柴油货车的车辆清单可得基于生产1 t再生骨料的集中式生产模式下运输阶段的环境影响清单,结果如表3所示。

表3 集中式生产1 t再生骨料的生命周期环境负荷清单

Table 3 Life cycle environmental load inventory of 1 t recycled aggregate produced by fixed C & D wastes treatment plant

环境影响 类型	能源消耗/kg			大气污染/kg						土地占用 面积/m ²
	原煤	原油	天然气	CO ₂	SO ₂	NO _x	CO	CH ₄	颗粒物	
材料运输	6.00×10^{-2}	8.13×10^{-1}	2.16×10^{-2}	3.42	4.20×10^{-3}	1.03×10^{-1}	2.40×10^{-2}	1.21×10^{-2}	6.32×10^{-6}	
破碎筛分	1.97	1.10×10^{-2}	2.07×10^{-2}	3.06	1.20×10^{-2}	8.91×10^{-3}	0.00	9.01×10^{-3}	2.30×10^{-4}	
残渣运输	1.30×10^{-2}	1.76×10^{-1}	4.70×10^{-3}	7.41×10^{-1}	9.12×10^{-4}	2.23×10^{-2}	5.20×10^{-3}	2.62×10^{-3}	1.37×10^{-6}	
残渣焚烧	1.66×10^{-2}	4.60×10^{-1}	2.76×10^{-5}	1.23	1.25×10^{-3}	1.95×10^{-2}	9.65×10^{-3}	1.21×10^{-4}	2.70×10^{-3}	
残渣填埋	1.44×10^{-2}	1.91×10^{-1}	9.02×10^{-5}	5.21×10^{-1}	5.63×10^{-4}	8.12×10^{-3}	4.00×10^{-3}	8.43×10^{-5}	1.12×10^{-3}	9.67×10^{-3}
合计	2.07	1.65	4.71×10^{-2}	8.97	1.89×10^{-2}	1.62×10^{-1}	4.28×10^{-2}	2.39×10^{-2}	4.06×10^{-3}	9.67×10^{-3}

1.2.2 破碎筛分清单分析

破碎筛分阶段是制备再生骨料的主要阶段,原材料被运至集中式处理工厂后一般通过振动给料机和运输带运送至颚式破碎机进行一次破碎,筛选后通过圆锥式破碎机或者反击式破碎机进行二次破碎,筛分出再生粗骨料后通过制砂机和洗砂机等进一步制成再生粉体和再生轻骨料,整个制备过程能耗主要来自于各设备的电力消耗。

由于集中式在制备再生骨料时往往是多套设备、多种机型同时运行,互相作用,不能单纯用机械设备的基本参数来判断其耗电量。相关企业调研数据显示,生产1 t再生骨料需消耗8元,其中5元为人工费用,3元为电费,按照工业用电标准0.9元/kWh来计算,生产1 t再生骨料需消耗3.3 kWh的电能,由表2可计算得到破碎筛分阶段的环境负荷清单(表3)。

1.2.3 废弃物最终处置阶段清单分析

1.2.1节所述每生产1 t再生骨料会产生0.176 t的残渣废弃物,结合求得的运输距离(26.16 km)和运输车辆环境影响清单,可得到生产1 t再生骨料产生的残渣至填埋场的运输清单(表3)。

目前大部分残渣中的有机物均采用高温焚烧+填埋的方式进行处理,一般生活垃圾高温焚烧处理

后其容量可减少85%^[9],即剩余的15%的残渣需要填埋处理。韦保仁等^[10]指出,每吨垃圾焚烧时需消耗2.345 kg的柴油,填埋1 t建筑垃圾需消耗2.388 L柴油和0.173 kWh电能,同时土地占用面积为 9.67×10^{-3} m²,故根据表2可得到生产1 t再生骨料的焚烧和填埋清单(表3)。

1.3 移动式生产模式的清单分析

与集中式生产模式相比,移动式生产模式的建筑垃圾来源于施工现场等地,即无须将建筑垃圾运至处理现场,然而移动式所制再生骨料一般需要外运至相关工厂进一步制备再生产品。因此,在计算生命周期清单时,移动式生产模式的清单主要包括预处理清单、破碎筛分清单、外运清单和废弃物的最终处置清单。

1.3.1 预处理阶段清单分析

建筑垃圾进行破碎筛分前需要在工厂原料堆放场地上对原料进行预处理,剔除部分无用成分,将超尺寸的大块原料、钢筋等打碎剪切为符合生产要求和需求的尺寸,主要能源消耗来自于切割器械的运行。预处理阶段主要消耗能源为柴油,每处理1 t建筑垃圾耗油量为0.12~0.14 L^[11],取其平均值0.13 L。由于再生骨料的转化率仅与原材料的成分

有关,故可认为移动式的再生骨料转化率约为 85%,生产 1 t 再生骨料预处理消耗柴油 0.128 kg,则由柴油环境负荷清单可计算得到预处理阶段的清单,结果如表 4 所示。

表 4 移动式生产 1 t 再生骨料的生命周期环境负荷清单

Table 4 Life cycle environmental load inventory of 1 t recycled aggregate produced by mobile C & D wastes treatment plant

环境影响 类型	能源消耗/kg			大气污染/kg						土地占用 面积/m ²
	原煤	原油	天然气	CO ₂	SO ₂	NO _x	CO	CH ₄	颗粒物	
预处理	6.05×10^{-3}	1.68×10^{-1}	1.01×10^{-5}	4.48×10^{-1}	4.56×10^{-4}	7.12×10^{-3}	3.52×10^{-3}	4.40×10^{-5}	9.84×10^{-4}	
破碎筛分	1.03	5.77×10^{-3}	1.09×10^{-2}	1.60	6.28×10^{-3}	4.67×10^{-3}	0	4.72×10^{-3}	1.20×10^{-4}	
残渣运输	1.30×10^{-2}	1.76×10^{-1}	4.70×10^{-3}	7.41×10^{-1}	9.12×10^{-4}	2.23×10^{-2}	5.20×10^{-3}	2.62×10^{-3}	1.37×10^{-6}	
残渣处置	3.10×10^{-2}	6.50×10^{-1}	1.18×10^{-4}	1.75	1.81×10^{-3}	2.76×10^{-2}	1.36×10^{-2}	2.05×10^{-4}	3.82×10^{-3}	9.67×10^{-3}
骨料、残渣 外运	2.83×10^{-2}	3.83×10^{-1}	1.02×10^{-2}	1.61	1.98×10^{-3}	4.85×10^{-2}	1.13×10^{-2}	5.69×10^{-3}	2.98×10^{-6}	
合计	1.11	1.38	2.59×10^{-2}	6.15	1.14×10^{-2}	1.10×10^{-1}	3.36×10^{-2}	1.33×10^{-2}	4.93×10^{-3}	9.67×10^{-3}

1.3.2 破碎筛分阶段清单分析

破碎筛分阶段是移动式生产模式生产再生骨料的主要阶段,此阶段将预处理后的建筑垃圾经过破碎、筛分、分拣和运输等工序生产出再生骨料并分选出无用的废弃物残渣,该过程主要为移动式破碎站的电能消耗。

由于移动式破碎站具有可移动性,其运行时间并无规律,因此用移动式破碎站的理论电能消耗即通过移动式破碎站的功率与处理能力的比值来反映,不同型号的移动式破碎站功率和处理能力会有差异,导致理论耗电量不同。根据爱采购网给出的移动式破碎站设备型号的相关参数,如电机功率、处理量和耗电量等,确定移动式生产模式生产 1 t 再生骨料的耗电量,计算得其平均耗电量为 1.729 kWh。根据表 2 给出的华东电网清单,可得移动式破碎筛分阶段的环境负荷清单(表 4)。

1.3.3 骨料外运阶段的清单分析

一般移动式破碎站所生产的再生骨料需要就近运至相关再生制品工厂进一步制备再生产品,由于移动式破碎站的生产地点为施工场地,其位置非固定且难以测量,因此假设运输距离为 10 km,运输采用 10 t 轮式柴油货车。据表 2 的柴油货车环境影响清单和运输距离得到移动式外运阶段的环境负荷清单(表 4)。

1.3.4 废弃物最终处置阶段的清单分析

与集中式处理工厂相同,移动式破碎站产生的废弃物也同样被运至填埋场进行焚烧填埋,由于再生骨料的转化率仅与原材料的成分有关,故可认为移动式的再生骨料转化率约为 85%,其填埋清单与集中式相同。残渣处置和外运的环境负荷清单见表 4。

1.3.5 清单结果汇总与修正

再生骨料具有双重属性,既是废弃砖、混凝土拆除后的废弃物,又是混凝土产品生产的原材料,因此,在计算生命周期时不能仅考虑生产过程造成的环境负荷,还应考虑生产过程中产生的环境效益。建筑垃圾资源化利用可有效避免将建筑垃圾运输至堆积场造成的环境负荷及土地占用。一般建筑垃圾采用就近堆存方式,假设采用 10 t 轮式柴油货车运输,运距为 10 km。此外,根据我国目前垃圾存量约 70 亿 t 及占地面积约 1 200 万 hm²,估计 1 t 垃圾占用土地资源为 0.076 m²/t。由表 2 柴油货车的环境影响清单可计算出生产 1 t 再生骨料的废弃物堆存清单,并基于废弃物堆存清单对集中式生产模式和移动式生产模式的生命周期清单进行修正,得集中式生产模式与移动式生产模式的修正生命周期环境负荷清单,如表 5 所示。

表 5 生产 1 t 再生骨料的修正后生命周期环境负荷清单

Table 5 Revised life cycle environmental load inventory of 1 t recycled aggregate

环境影响 类型	能源消耗/kg			大气污染/kg						土地占用 面积/m ²
	原煤	原油	天然气	CO ₂	SO ₂	NO _x	CO	CH ₄	颗粒物	
废弃物 堆存清单	-3.33×10^{-2}	-4.50×10^{-1}	-1.20×10^{-2}	-1.89	-2.33×10^{-3}	-5.70×10^{-2}	-1.33×10^{-2}	-6.69×10^{-3}	-3.50×10^{-6}	-0.89×10^{-1}
修正后集 中式清单	2.04	1.20	3.51×10^{-2}	7.08	1.66×10^{-2}	1.05×10^{-1}	2.95×10^{-2}	1.72×10^{-2}	4.06×10^{-3}	-7.93×10^{-2}
修正后移 动式清单	1.08	9.30×10^{-1}	1.39×10^{-2}	4.26	9.07×10^{-3}	5.30×10^{-2}	2.03×10^{-2}	6.61×10^{-3}	4.93×10^{-3}	-7.93×10^{-2}

2 再生骨料环境效益清单构建与结果分析

再生骨料一般被用于替代天然砂石骨料以生产各种再生产品,可认为再生骨料的生产和使用会减少市场对天然骨料的需求,从而节约了这部分天然骨料的生产和消耗,故可认为是再生骨料产生的环境效益。

表 6 天然骨料的生命周期环境负荷清单

Table 6 Life cycle environmental loads inventory of natural aggregates

单位: kg/t

环境影响类型	能源消耗				大气污染					
	原煤	原油	天然气	矿山石	CO ₂	SO ₂	NO _x	CO	CH ₄	颗粒物
骨料运输阶段	1.08×10^{-1}	1.46	3.89×10^{-2}		6.14	7.55×10^{-3}	1.85×10^{-1}	4.31×10^{-2}	2.17×10^{-2}	1.14×10^{-5}
天然骨料制备阶段	9.95×10^{-1}	4.46×10^{-1}	1.03×10^{-5}	1 176.5	2.70	7.15×10^{-3}	2.31×10^{-2}	9.24×10^{-3}	4.59×10^{-3}	2.70×10^{-3}
合计	1.1	1.90	4.92×10^{-2}	1 176.5	8.84	1.47×10^{-2}	2.08×10^{-1}	5.23×10^{-2}	2.63×10^{-2}	2.71×10^{-3}

结合 2 种再生骨料生产模式的环境负荷与环境效益(以天然骨料生命周期清单的负值来表示),并基于生产能力来确定移动式与集中式生产模式生产再生骨料的环境效益,以年环境效益表示。一台移动式设备每年理论上可处理建筑垃圾约 43.01 万 t,即生产再生骨料 36.56 万 t,而一组集中式设备每年理论上可处理建筑垃圾约 73.53 万 t,即生产再生骨料 62.50 万 t^[13]。根据天然骨料和再生骨料的环境影响清单以及两种生产模式

由 1.2.1 节可知天然骨料运输至加工厂运距 C 为 38.11 km,根据运输车辆(10 t 轮式柴油货车)和平均运距可确定运输阶段清单,结果如表 6 所示。天然骨料相较于再生骨料,其生产工艺较为简便,主要为开采矿山石的设备消耗和破碎筛分时的机械消耗。李小冬等^[12]指出生产 1 t 天然骨料需消耗 1.64 kWh 的电能和 0.4 L 的柴油,取柴油质量浓度为 0.84 g/mL,可知需要消耗 1.64 kWh 的电能和 0.336 kg 的柴油,天然骨料的制备清单见表 6。

的年产量,可计算得到再生骨料的年环境效益清单 C_i ,即

$$C_i = (C_{Zi} - C_{Ti}) \times N \quad (2)$$

式中: C_i 表示第 i 种环境影响的年环境效益清单; C_{Zi} 表示第 i 种环境影响的再生骨料清单数据; C_{Ti} 表示第 i 种环境影响的天然骨料清单数据; N 为生产模式的年产量。

结合式(2)和表 6 可得 2 种生产模式年环境效益生命周期清单,结果如表 7 所示。

表 7 年环境效益生命周期清单

Table 7 Annual environmental benefit inventor

生产模式	能源消耗/万 kg				大气污染/万 kg						土地 占用/m ²
	原煤	原油	天然气	矿山石	CO ₂	SO ₂	NO _x	CO	CH ₄	颗粒物	
集中式	58.75	-43.75	-8.81×10^{-1}	-7.35×10^{-4}	-110.00	1.19×10^{-1}	-6.44	-1.43	-5.69×10^{-1}	8.44×10^{-2}	-4.96
移动式	-0.73	-35.46	-1.29	-4.30×10^{-4}	-167.44	-2.06×10^{-1}	-5.67	-1.17	-7.20×10^{-1}	8.12×10^{-2}	-2.90

3 再生骨料环境影响分类、特征化与归一化

根据 ISO 标准^[7]对各类环境指标进行影响分类,分为 6 大类,即不可再生资源消耗(Abiotic depletion potential,ADP),以铈当量衡量;温室效应(Global warming potential,GWP),以 CO₂ 当量衡量;酸化效应(Acid potential,AP),以 SO₂ 当量衡量;光化学烟雾(Photochemical ozone creation potential,POCP),以乙烯当量衡量;人体健康损害(Health toxic,HT),以 1,4-二氯苯当量衡量;土地

占用(Land use,LU)。不同清单种类造成同一类环境影响的损害程度不同,因此需要确定一个当量因子将不同污染物质的影响转化为统一的特征化指标。特征化是指在清单结果基础上,基于特征化因子 C_{ij} ,将清单物质数量 M_j 汇总为针对主要环境影响类型的特征化指标,计算式为

$$EI_i = \sum_i \sum_j (M_j \times C_{ij}) \quad (3)$$

式中: EI_i 表示第 i 种环境影响类型的环境影响特征值; M_j 表示产品 j 的清单数量; C_{ij} 表示产品 j 针对 i 种环境影响类型的特征化因子。CLCD 数据库^[8]给出了各类环境影响特征化因子。

此外,为了更好地认识所研究的产品系统中每个环境影响指标的相对大小,需要将特征值除以相应的归一化基准值。归一化基准值通常为某一年某地区的特征化指标总量,故归一化结果为无量纲数据。归一化计算式为

$$NEI_i = \frac{EI_i}{N_i} \quad (4)$$

表8 集中式生产1 t再生骨料的环境负荷归一化结果

Table 8 Environmental load normalization for producing 1 t recycled aggregate by fixed C&D wastes treatment plant

环境影响类型	ADP/kg	GWP/kg	AP/kg	POCP/kg	HT/kg	LU/g
原材料运输	4.91×10^{-15}	8.90×10^{-14}	3.19×10^{-13}	1.01×10^{-13}	4.81×10^{-14}	0
破碎筛分	6.68×10^{-17}	7.87×10^{-14}	7.62×10^{-14}	2.24×10^{-14}	7.44×10^{-15}	0
残渣运输	1.06×10^{-15}	1.93×10^{-14}	6.90×10^{-14}	2.20×10^{-14}	1.12×10^{-14}	0
残渣处置	3.92×10^{-15}	4.21×10^{-14}	8.83×10^{-14}	3.34×10^{-14}	1.30×10^{-14}	2.37×10^{-15}
废弃物堆存	-2.71×10^{-15}	-4.93×10^{-14}	-1.77×10^{-13}	-5.63×10^{-14}	-2.66×10^{-14}	-2.18×10^{-14}
总负荷	7.24×10^{-15}	1.80×10^{-13}	3.77×10^{-13}	1.23×10^{-13}	5.31×10^{-14}	-1.94×10^{-14}

表9 移动式生产1 t再生骨料的环境负荷归一化结果

Table 9 Environmental load normalization for producing 1 t recycled aggregate by mobile C&D wastes treatment plant

环境影响类型	ADP/kg	GWP/kg	AP/kg	POCP/kg	HT/kg	LU/g
预处理	1.01×10^{-15}	1.07×10^{-14}	2.28×10^{-14}	8.59×10^{-15}	3.64×10^{-15}	0
破碎筛分	3.51×10^{-17}	4.11×10^{-14}	4.00×10^{-14}	1.17×10^{-14}	3.91×10^{-15}	0
残渣运输	1.06×10^{-15}	1.93×10^{-14}	6.90×10^{-14}	2.20×10^{-14}	1.12×10^{-14}	0
残渣处置	3.92×10^{-15}	4.21×10^{-14}	8.83×10^{-14}	3.34×10^{-14}	1.30×10^{-14}	2.37×10^{-15}
外运	2.31×10^{-15}	4.19×10^{-14}	1.50×10^{-13}	4.78×10^{-14}	2.45×10^{-14}	0
废弃物堆存	-2.71×10^{-15}	-4.93×10^{-14}	-1.77×10^{-13}	-5.63×10^{-14}	-2.66×10^{-14}	-2.18×10^{-14}
总负荷	5.61×10^{-15}	1.06×10^{-13}	1.94×10^{-13}	6.74×10^{-14}	2.96×10^{-14}	-1.94×10^{-14}

根据表7提供的2种生产模式年环境效益清单,经特征化和归一化处理,可得到集中式生产模式

式中: NEI_i 表示第*i*种环境影响类型归一化值; N_i 表示第*i*种环境影响类型的归一化基准值,该基准值来源于谢凯等^[14]的研究结果。对相关数据按照式(3,4)进行特征化及归一化计算,可得集中式生产模式和移动式生产模式的特征化环境负荷结果,如表8,9所示。

和移动式生产模式年环境效益的归一化结果,结果如表10所示。

表10 集中式生产模式和移动式生产模式年环境效益的归一化结果

Table 10 Normalized annual environmental benefits of fixed and mobile C&D wastes treatment plant

生产模式	ADP/kg	GWP/kg	AP/kg	POCP/kg	HT/kg	LU/g
集中式	-8.72×10^{-11}	-2.97×10^{-12}	-1.84×10^{-11}	-5.79×10^{-12}	-2.96×10^{-12}	-1.22×10^{-12}
移动式	-5.11×10^{-11}	-4.44×10^{-12}	-1.75×10^{-11}	-5.44×10^{-12}	-2.62×10^{-12}	-7.11×10^{-13}

4 两种再生骨料生产模式的环境影响分析

4.1 环境影响阶段分析

由表8,9可计算得到2种再生骨料生产模式的各阶段环境负荷占比关系:原材料运输阶段是集中式生产模式的主要环境负荷产生阶段,占总环境负荷的53.42%;而移动式的环境负荷主要来源于移动式骨料的外运和残渣的焚烧与填埋,分别占总环境负荷的37.26%和25.54%。

4.2 环境影响类型分析

集中式生产模式和移动式生产模式各阶段环境负荷归一化结果如图1所示。集中式生产模式和移动式生产模式原材料的主要成分为建筑垃圾,两者对不可再生资源消耗的负荷较小,可忽略不计;运输过程是再生骨料生产过程中必须着重考虑的重要因素,比如集中式的原材料运输阶段和移动式的外运阶段在温室效应、酸化影响、人体健康损害和光化学烟雾这几类环境负荷上影响较为显著;此外,两种生产模式都因避免了废弃物的堆存对环境产生显著影响。

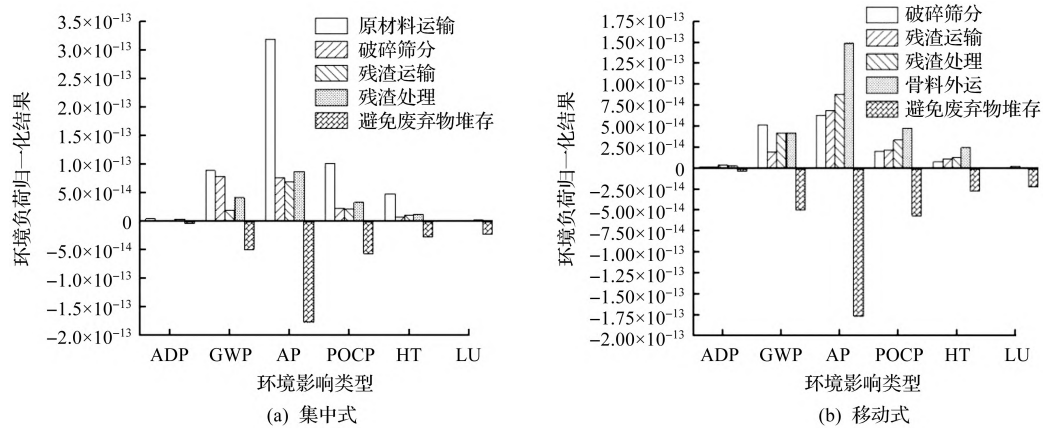


图 1 2 种再生骨料生产模式各阶段环境负荷占比

Fig. 1 Environmental burdens at different stages of 2 recycled aggregate production modes

4.3 2 种生产模式的环境负荷对比分析

集中式生产模式和移动式生产模式环境负荷归一化结果的对比分析如图 2 所示。由图 2 可知:集中式和移动式生产模式对各环境类型的负荷大小趋势一致,即酸化影响>温室效应>光化学烟雾>人体健康损害>不可再生资源消耗>土地占用。这是由于这 2 种再生骨料生产模式在运输阶段消耗了大量的柴油,而柴油的生产和燃烧会产生 SO_2 和氮氧化合物,将对环境产生明显的酸化影响。移动式生产模式在温室效应、酸化影响、光化学烟雾和人体健康损害方面的环境负荷均小于集中式,主要原因在于采用移动式破碎站生产再生骨料可就近处置建筑垃圾,而集中式生产模式需将垃圾运至集中式处理工厂,且设备较多,尽管生产的再生骨料较为精细,然而却增加了总体的生产耗电量。因此,移动式生产模式在温室效应、酸化影响、光化学烟雾和人体健康损害的环境负荷约为集中式生产模式的 50%。此外,由表 8,9 可知:集中式生产模式的总环境负荷值为 7.20×10^{-13} ,移动式生产模式的总环境负荷值为 3.83×10^{-13} ,即生产 1 t 再生骨料,移动式生产模式的环境负荷为集中式生产模式的 53.19%。

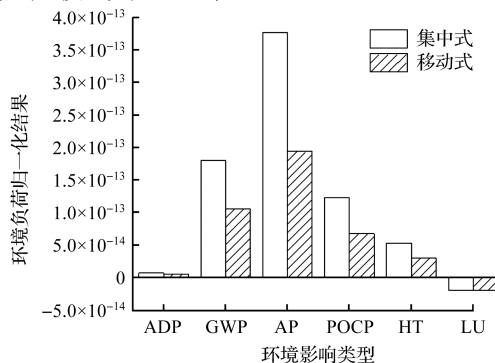


图 2 集中式生产模式与移动式生产模式的环境负荷归一化结果对比

Fig. 2 Normalized environmental impact between fixed and mobile C&D wastes treatment plant

4.4 2 种生产模式的环境效益对比分析

集中式生产模式和移动式生产模式年环境效益归一化结果的对比分析如图 3 所示。由图 3 可知:集中式生产模式和移动式生产模式的各类环境影响类别对年环境效益的贡献大小趋势一致,它们的主要年环境效益来源于降低了对不可再生资源的消耗,其分别占总环境效益的 74.53%,63.09%。其次,虽然采用集中式生产模式生产 1 t 再生骨料的环境负荷要高于移动式,但是集中式生产模式的生产效率更高,较高的年产量使集中式生产模式在降低酸化影响、光化学烟雾和人体健康损害方面的年环境效益基本与移动式持平,同时该生产模式能在指定时间内消耗更多的建筑垃圾并节约更多的天然骨料的开采,其在减少不可再生资源消耗和节约土地占用方面的年环境效益分别为移动式的 170.65%,171.59%。利用集中式生产再生骨料其年环境效益比移动式高 44.44%,相较于移动式生产模式,集中式生产模式具有更加显著的环境效益。

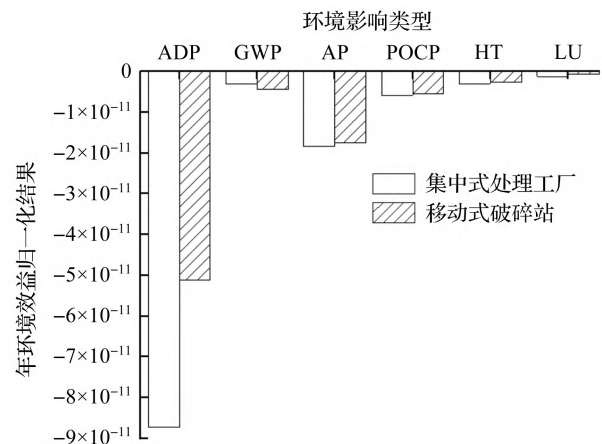


图 3 2 种再生骨料生产模式年环境效益的归一化对比

Fig. 3 Normalized annual environmental benefits of 2 recycled aggregate production modes

5 结 论

基于三维数字地球确定的运输距离和生命周期评价方法,详细给出了浙江省集中式和移动式生产模式生产再生骨料的生命周期环境影响清单,开展了相应的生命周期环境负荷影响评价。研究结果表明:生产再生骨料可以有效避免建筑废弃物堆积以及清运所造成的环境负荷和土地占用,集中式生产模式因避免了建筑垃圾的堆积和清运而产生的环境负荷占其总环境负荷的31.59%,而移动式生产模式占46.48%。集中式生产模式的主要环境负荷产生阶段为原材料运输,占总环境负荷的53.42%;移动式生产模式的环境负荷则主要来源于骨料外运和残渣的焚烧与填埋,分别占总环境负荷的37.26%,25.54%。总之,移动式破碎站生产1 t再生骨料的环境负荷低于集中式处理工厂,然而集中式具有更高的生产效率和较高的年产量,其在酸化影响、光化学烟雾和人体健康损害方面的年环境效益基本与移动式持平;同时由于集中式有较高的生产能力,使其能在指定时间内消耗更多的建筑垃圾并节约更多的天然骨料,在减少不可再生资源消耗和节约土地占用方面的年环境效益分别为移动式的170.65%,171.59%。因此,利用集中式生产再生骨料其年环境效益比移动式高44.44%,相较于移动式生产模式,集中式生产模式具有明显的环境效益。

参考文献:

- [1] 章玉容,徐雅琴,姚泽阳,等. 配合比设计方法对再生混凝土生命周期评价的影响[J]. 浙江工业大学学报, 2020, 48(6): 648-653.
- [2] FALESCHINI F, ZANINI M A, PELLEGRINO C, et al. Sustainable management and supply of natural and recycled aggregates in a medium-size integrated plant[J]. Waste management, 2016, 49: 146-155.
- [3] MARINKOVIĆ S, RADONJANIN V, MALEŠEV M, et al. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete[J]. Waste management, 2010, 30(11): 2255-2264.
- [4] HOSSAIN M U, POON C S, LO I M C, et al. Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA[J]. Resources, conservation and recycling, 2016, 109: 67-77.
- [5] 李景茹,郭红,刘寒,等. 深圳市建筑废弃物移动式资源化处置环境影响评价与分析[J]. 建筑经济, 2018, 39(6): 114-120.
- [6] 田金枝. 建筑垃圾生产再生骨料的综合效益分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [7] ISO copyright office. Environmental management-life cycle assessment-Principles and framework; ISO 14040: 2006[S]. Geneva International Organization for Standardization [iso], 2006.
- [8] 成都亿科环境科技有限公司. 中国生命周期核心数据库 Chinese Life Cycle Database - CLCD[OL]. <https://www.efootprint.net/database>. 2022.
- [9] 柴凯东. 城市生活垃圾处置技术方案优选的研究: 以舟山市为例[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
- [10] 韦保仁,王俊,田原聖隆,等. 苏州城市生活垃圾处置方法的生命周期评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2009, 19(2): 93-97.
- [11] 顾金土,陈云,苏杰,等. 建筑垃圾资源化生产线的设计和实践[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(4): 36-39.
- [12] 李小冬,王帅,孔祥勤,等. 预拌混凝土生命周期环境影响评价[J]. 土木工程学报, 2011, 44(1): 132-138.
- [13] 陆鑫星. 不同再生骨料生产模式及再生产品环境效益综合评价[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2022.
- [14] 谢凯. 建筑废弃物资源化环境负荷研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.

(责任编辑:应艳杰)