

# 基于生命周期评价法的挡土墙环境影响分析<sup>\*</sup>

李丽华<sup>1</sup> 张怡心<sup>1</sup> 屠娴哲<sup>1</sup> 梅利芳<sup>1#</sup> 宋 杨<sup>2</sup>

(1.湖北工业大学土木建筑与环境学院,湖北省生态道路工程技术研究中心,湖北 武汉 430068;

2.河北省岩土工程安全与变形控制重点实验室(河北水利电力学院),河北 沧州 061000)

**摘要** 挡土墙作为建筑领域常见构造物,合理优化与控制其生命周期内能源消耗及污染物排放,对发展低碳经济、控制全球变暖意义重大。针对挡土墙开展生命周期评价,研究3种挡土墙对环境的影响,对其特征化指标、加权综合指标以及墙高对其指标结果及变化率的影响规律进行对比分析。结果表明,重力式挡土墙对环境造成的负面影响最大,悬臂式挡土墙次之,加筋土挡墙最小,其中原材料生产阶段对3种挡土墙加权综合指标贡献最大。当墙高大于4 m时,重力式挡土墙与悬臂式挡土墙加权综合指标均大于加筋土挡墙,选择加筋土挡墙对环境的负面影响更小。通过对挡土墙生命周期评价,可以量化分析其对环境的影响,并可选取最佳墙高,有助于挡土墙设计低碳的可持续性发展。

**关键词** 生命周期评价 挡土墙 墙高 环境影响评价

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2023.05.013

**Environmental impact assessment of retaining walls based on life cycle assessment** LI Lihua<sup>1</sup>, ZHANG Yixin<sup>1</sup>, TU Xianzhe<sup>1</sup>, MEI Lifang<sup>1</sup>, SONG Yang<sup>2</sup>. (1. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei Ecological Road Research and Engineering Center, Hubei University of Technology, Wuhan Hubei 430068; 2. Hebei Key Laboratory of Geotechnical Engineering Safety and Deformation Control (Hebei University of Water Resources and Electric Engineering), Cangzhou Hebei 061000)

**Abstract:** Retaining wall is a common structure in the architecture. It is significant to optimize and control the energy consumption and pollutant emission in the life cycle of retaining wall for developing low-carbon economy and controlling global warming. In this paper, retaining wall was considered as the evaluation object, and its life cycle was evaluated. The influence of 3 kinds of retaining wall on environment, the characteristic index, the weighted comprehensive index and the wall height's influence on the index result and the change rate were compared and analyzed quantitatively and qualitatively. The results showed that the gravity retaining wall had the greatest influence on the environment, the cantilever retaining wall took the second place, and the reinforced retaining wall had the least. The production of raw materials contributed greatly to the weighted comprehensive index of the three kinds of retaining walls. When the wall height was large than 4 m, the weighted comprehensive index of gravity retaining wall and cantilever retaining wall was larger than that of reinforced retaining wall, and the selection of reinforced retaining wall had less negative impact on environment. Through the life cycle assessment of retaining wall, its environment impact could be quantitatively analyzed, and the best wall height could be chosen, which was helpful to the low-carbon sustainable development of retaining wall design.

**Keywords:** life cycle assessment; retaining wall; wall height; environmental impact

建筑业作为温室气体排放的主要来源,贡献了全球1/3温室气体排放,且其能源消耗占全球的30%~40%<sup>[1]</sup>;而挡土墙作为建筑领域常见构造物,合理优化与控制其生命周期内能源消耗及污染物排放,对发展低碳经济、控制全球变暖具有深远意义<sup>[2]</sup>。我国虽然在生命周期评价(LCA)方面研究起步较晚,但是国家对于资源环境及可持续性发展等

环境问题越来越重视。国务院在“中国制造2025”中提出“加强产品全生命周期绿色管理”,建立“绿色制造标准体系”及“绿色设计与评价得到广泛应用”<sup>[3-4]</sup>。因此,基于LCA研究挡土墙的环境影响,针对性控制其能源消耗,并减少其温室气体排放尤为重要。

近年来,国外许多学者已对挡土墙进行LCA,

第一作者:李丽华,女,1978年生,博士,教授,主要从事路基、加筋土、环境岩土等方面的研究工作。#通讯作者。

\*武汉市应用基础前沿专项项目(No.2020020601012278);国家自然科学基金资助项目(No.51978237);湖北工业大学杰出人才基金资助项目(No.XJ2021000501)。

并分析其对环境的影响。PONS 等<sup>[5]411</sup>、ZASTROW 等<sup>[6]1038</sup>分析不同类型挡土墙对环境的影响,结果表明石笼墙与砖石墙对环境的影响更小。FRISCHKNECHT 等<sup>[7]</sup>对比分析重力式挡土墙与土工格栅加筋土挡墙环境影响,结果表明土工格栅加筋土挡墙具有明显环境优势。DAMIANS 等<sup>[8]</sup>、DJADOUNI 等<sup>[9]</sup>对比分析了不同挡土墙的能源消耗、温室气体排放及环境影响。

我国关于挡土墙的相关研究,主要针对其力学特性。李丽华等<sup>[10-11]</sup>对基于数值建模及大型室内试验,研究挡土墙力学性能。LCA 相关研究开展较晚,在土木工程领域的应用主要集中在路桥及房建领域。李肖燕<sup>[12]</sup>对比分析了水泥路面与沥青路面的能耗及污染物排放。刘淑芬<sup>[13]</sup>分析与总结了高速铁路和高速公路基础设施建设阶段能源消耗及环境排放特征。郑晓云等<sup>[14]</sup>构建装配式建筑 LCA 模型,并计算某装配式建筑碳排放总量。秦骛等<sup>[15]</sup>计算某地铁站全生命周期碳排放总量,并分析其碳排放特征及规律。

目前,国外已有对挡土墙 LCA 的研究,而国内土木工程领域的 LCA 主要集中于路桥与房建领域,对挡土墙 LCA 研究较少,适用于我国挡土墙 LCA 体系仍有待完善。而 LCA 存在极强的地域局限性,这导致国外的研究成果不能完全适用我国。基于 LCA 方法,选取 3 种常见挡土墙类型,分别为重力式挡土墙、悬臂式挡土墙及加筋土挡墙,对比分析其生命周期全过程能源消耗及温室气体排放,并分析墙高对挡土墙的环境影响,确定不同挡土墙对环境影响的最佳墙高,从而为绿色建筑发展提供理论支持。

## 1 研究方法数据来源

本研究采用中国科学院生态环境研究中心 AGP 模型,背景数据来自中国生命周期数据库 (CLCD)和 Ecoinvent-Public 2.2.0。挡土墙全生命周期过程消耗大量建筑材料及不可再生资源,同时排放大量温室气体、粉尘和建筑垃圾,对能源消耗、温室效应和水体污染等环境问题产生一定的影响,针对以上环境问题选取 8 种环境影响类别作为特征化指标对挡土墙环境影响进行分析评价,特征化指标如下:中国资源消耗潜值 (CADP)用于表示不可再生能源消耗情况;全球变暖潜能 (GWP)用于表示温室效应对全球变暖的贡献;酸化潜能 (AP)用于表示酸性气体对酸化的贡献;富营养化潜能 (EP)用于

表示氮磷等营养物质对富营养化的贡献;可吸入无机物 (RI)用于表示可吸入无机物造成的人体损害;固体废物量 (WS)用于表示产生的固体废物量;淡水消耗量 (WU)和化学需氧量 (COD)分别用于表示用水量及对水体的污染情况。上述环境影响类型包括了我国面临的大部分环境热点问题。

### 1.1 目标与范围的定义

挡土墙的生命周期主要分为 5 个阶段,分别为原材料生产阶段、运输阶段、施工阶段、维护阶段和拆除回收阶段。

挡土墙稳定性主要包括抗倾覆稳定性、抗滑移稳定性和地基承载力稳定性,部分学者引入可靠度分析挡土墙稳定性。杜永峰等<sup>[16]</sup>建立重力式挡土墙结构抗倾覆稳定性和抗滑移稳定性的功能函数,施小平<sup>[17]</sup>分析影响悬臂式挡土墙稳定性的因素,结果表明挡土墙可靠度主要与填料内摩擦角、挡土墙背摩擦角、挡土墙基地摩擦系数和填土重度有关。周智海等<sup>[18]</sup>、李纯玉<sup>[19]</sup>、尹作华<sup>[20]</sup>和任波等<sup>[21]</sup>对影响挡土墙稳定性的相关性因素进行敏感性分析,结果表明填料的内摩擦角与黏聚力敏感性最高,对挡土墙稳定性影响最大。本研究根据有关设计规范规定,经承载能力极限状态最不利荷载效应组合验算,按抗震设防烈度为 7 度,基本加速度为 0.1 g 进行设计,取填料内摩擦角为 30°,基底摩擦系数为 0.30,均布荷载为 10~20 kPa。假定挡土墙填料物理性质一致,以保证挡土墙稳定性的一致性。

随着挡土墙高度的增加,其所消耗的资源与材料也逐渐增大,使其抵抗更大的土压力。而 ZASTROW 等<sup>[6]1039</sup>研究表明,不同的容许地面压力对挡土墙整体的影响很小。因此,本研究选取 1 m 标准截面挡土墙为功能单位。

### 1.2 清单分析

加筋土挡墙设计依照《水利水电工程土工合成材料应用技术规范》(SL/T 225—98),采用容许应力法,对加筋土挡墙进行筋材强度验算,确定其加筋间距与加筋长度。重力式挡土墙及悬臂式挡土墙设计基于《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)等标准规范,参照国家建筑设计标准图集《挡土墙(重力式、衡重式、悬臂式)》进行设计。本研究所用混凝土强度等级为 C20,其各材料质量比为水泥:水:砂子:碎石=0.47:1.00:1.34:3.13。所有材料均由 18 t 重型柴油货车通过公路运输到施工现场,运输阶段主要考虑运输工具的污染物排放、运输工具

表1 加筋土挡墙清单分析

Table 1 Inventory analysis of reinforced retaining wall

墙高/m	砂/kg	混凝土/m <sup>3</sup>	碎石/kg	土工格栅/kg	格宾网/kg	货车运输/(t·km)	柴油/kg	电力/(kW·h)
1	6 750	1.30	1 050	6	6.69	206.26	2.22	6.08
2	13 500	1.60	2 100	9	13.39	635.98	2.82	7.18
3	20 250	1.80	3 150	15	20.08	1 301.73	3.42	8.28
4	27 000	2.10	4 200	18	26.78	2 203.02	4.02	9.38
5	33 750	2.30	5 250	24	33.48	3 340.51	4.62	10.49
6	40 500	2.60	6 300	30	40.17	5 250.01	5.22	11.59

表2 悬臂式挡土墙清单分析

Table 2 Inventory analysis of cantilever retaining wall

墙高/m	砂/kg	混凝土/m <sup>3</sup>	钢筋/kg	货车运输/(t·km)	柴油/kg	电力/(kW·h)
2	13 146.84	0.72	50.26	368.89	2.09	3.15
3	19 708.45	1.12	90.34	837.05	2.60	4.92
4	26 232.73	1.72	167.21	1 502.78	3.12	7.57
5	32 836.19	2.55	276.92	2 536.81	3.67	11.25
6	390 430.32	3.49	373.18	3 818.94	4.24	15.38

表3 重力式挡土墙清单分析

Table 3 Inventory analysis of gravity retaining wall

墙高/m	砂/kg	混凝土/m <sup>3</sup>	钢筋/kg	货车运输/(t·km)	柴油/kg	电力/(kW·h)
2	1 350	1.47	6.05	483.34	2.19	6.48
3	20 500	3.01	6.05	1 257.29	2.82	13.24
4	27 000	4.90	7.90	2 503.96	3.49	2 503.96
5	33 750	8.00	7.90	4 673.37	4.27	4 673.37
6	40 500	10.99	7.90	7 456.49	5.04	7 456.48

消耗能源和资源随之产生的污染物排放。其中,运输工具的污染物排放主要与运输量有关,货车运输指标计算公式见式(1):

$$T = \sum M_i \times D_i \quad (1)$$

式中: $T$ 为货车运输指标,t·km; $M_i$ 为 $i$ 材料使用量,t; $D_i$ 为 $i$ 材料运输距离,km。

建筑维护阶段考虑混凝土碳化对挡土墙的环境影响。虽然混凝土的碳化会对结构产生不利影响,但是通过吸收空气中的 $\text{CO}_2$ ,混凝土对 $\text{CO}_2$ 起到固定作用,对环境的影响是有利的<sup>[22-25]</sup>。

根据菲克第一定律得出混凝土生命周期内 $\text{CO}_2$ 碳化公式<sup>[26]</sup>,见式(2):

$$C = \frac{k \cdot \sqrt{t}}{1\ 000} \cdot A \cdot r \cdot H \cdot K \cdot L \cdot \epsilon \quad (2)$$

式中: $C$ 为混凝土 $\text{CO}_2$ 碳化量,kg; $k$ 为比率因子, $\text{m}/\text{a}^{\frac{1}{2}}$ ; $t$ 为使用寿命,a; $A$ 为暴露在空气中的混凝土面积, $\text{m}^2$ ; $r$ 为碳酸钙质量分数,%; $H$ 为混凝土的水泥质量浓度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $K$ 为水泥中熟料质量分数,%; $L$ 为熟料中CaO质量分数,%; $\epsilon$ 为 $\text{CO}_2/\text{CaO}$ 分子量比,即44/56。

拆除回收阶段参考文献<sup>[26]</sup>研究内容,认为建筑拆除回收阶段的排放量占建筑施工阶段10%。3

种挡土墙清单分析如表1至表3所示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 归一化结果

以3种挡土墙各特征化指标最大值为基准,以百分比形式对3种挡土墙特征化指标进行对比分析,并分析各清单物质对特征化指标的贡献率。挡土墙高度为6 m时,3种挡土墙归一化后特征化指标如图1所示,3种挡土墙各清单物质对各特征化指标贡献率如图2所示。

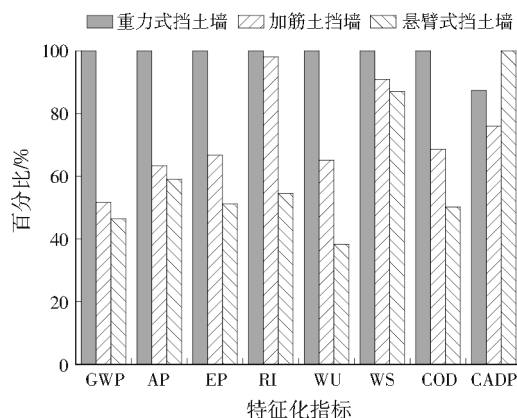


图1 特征化指标对比

Fig.1 Comparison chart of characteristic index

重力式挡土墙GWP、AP、EP、RI、WU、WS和

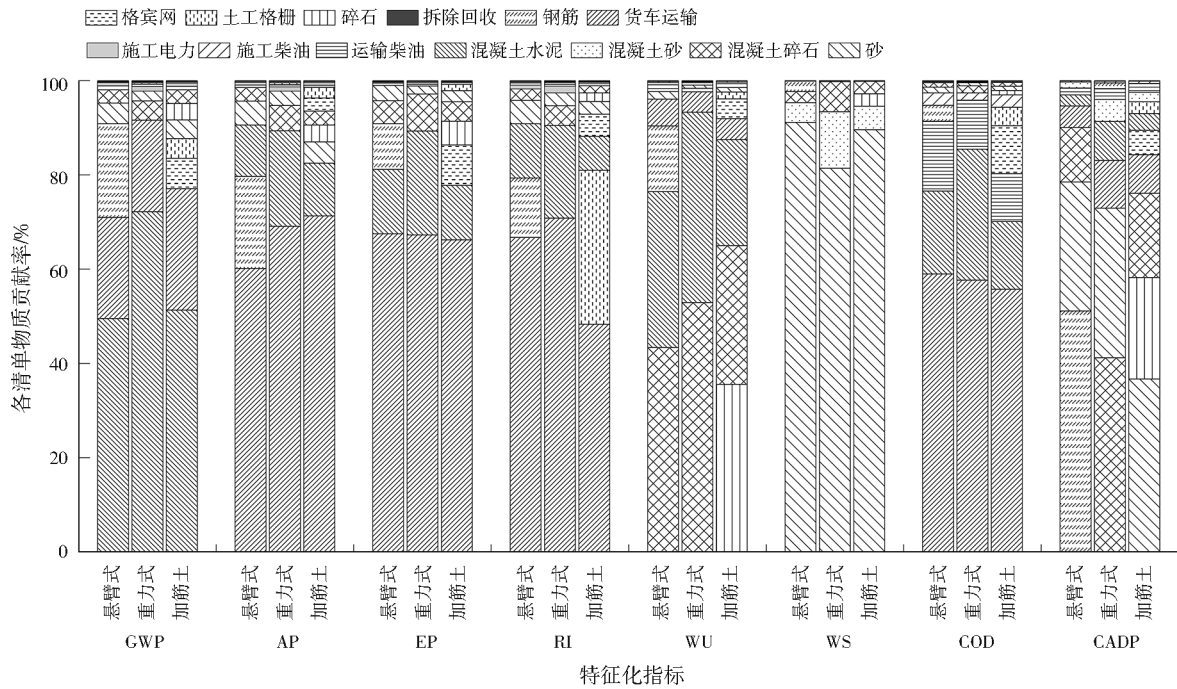


图2 各清单物质对特征化指标贡献率  
Fig.2 The contribution rate of each listed substance to characteristic index

表4 特征化指标权重因子  
Table 4 Weight factor of characteristic index

项目	GWP	WU	EP	AP	WS	COD	RI	CADP
权重因子	$1.74 \times 10^{-1}$	$1.66 \times 10^{-1}$	$1.12 \times 10^{-1}$	$1.03 \times 10^{-1}$	$8.50 \times 10^{-2}$	$7.90 \times 10^{-2}$	$7.80 \times 10^{-2}$	$2.03 \times 10^{-1}$

表5 各清单物质加权综合指标  
Table 5 The weighted comprehensive index of each listed substance

清单物质	重力式挡土墙	加筋土挡墙	悬臂式挡土墙
砂	$1.74 \times 10^{-9}$	$1.74 \times 10^{-9}$	$1.69 \times 10^{-9}$
混凝土水泥	$7.58 \times 10^{-10}$	$1.81 \times 10^{-10}$	$2.40 \times 10^{-10}$
钢筋	$4.69 \times 10^{-11}$		$2.22 \times 10^{-9}$
混凝土砂	$2.56 \times 10^{-10}$	$6.12 \times 10^{-11}$	$8.12 \times 10^{-11}$
混凝土碎石	$1.69 \times 10^{-9}$	$4.05 \times 10^{-10}$	$5.37 \times 10^{-10}$
碎石		$7.64 \times 10^{-10}$	
土工格栅		$1.05 \times 10^{-10}$	
格宾网		$2.59 \times 10^{-10}$	
货车运输	$1.45 \times 10^{-9}$	$9.17 \times 10^{-10}$	$7.43 \times 10^{-10}$
运输柴油	$9.29 \times 10^{-11}$	$6.28 \times 10^{-11}$	$6.65 \times 10^{-11}$

COD最大,说明重力式挡土墙对环境的影响在全球变暖、酸化、富营养化等方面较大;悬臂式挡土墙CADP最大,说明其在生命周期过程中消耗资源量最大。悬臂式挡土墙与加筋土挡墙的GWP和AP较接近,而重力式挡土墙远大于前两者,其相较于悬臂式挡土墙与加筋土挡墙,GWP分别增加53.6、48.4个百分点,AP分别增加41.0、36.7个百分点。加筋土挡墙EP、RI、WU和COD大于悬臂式挡土墙,且差距较大,相较于加筋土挡墙,悬臂式挡土墙的EP、RI、WU和COD分别减少15.6、43.6、26.9、18.5个百分点。3种挡土墙WS差异较小,重力式挡土墙分

别为悬臂式挡土墙、加筋土挡墙的109.1%、113.0%。

## 2.2 特征化指标

本研究权重因子采用层次分析法(AHP)进行分析,各特征化指标权重因子如表4所示。由此得到各清单物质加权综合指标见表5,各清单物质对加权综合指标贡献率见图3。

由计算可得,当墙高为6m时,重力式挡土墙、悬臂式挡土墙、加筋土挡墙加权综合指标分别为 $6.03 \times 10^{-9}$ 、 $5.57 \times 10^{-9}$ 、 $4.49 \times 10^{-9}$ 。重力式挡土墙加权综合指标最大,其次为悬臂式挡土墙,加筋土挡墙最小。说明重力式挡土墙对环境造成的总体影

响最大,加筋土挡墙对环境的影响最小,为3种挡土墙中最环保的方案。

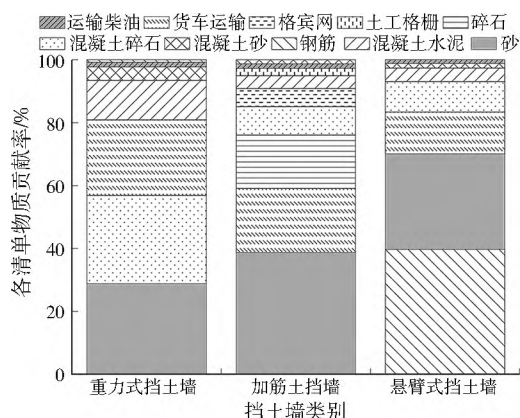


图3 各清单物质对挡土墙加权综合指标贡献率  
Fig.3 The contribution rate of each listed substance to the weighted comprehensive index of retaining wall

原材料生产阶段为3种挡土墙生命周期环境影响的主要来源,分别为重力式挡土墙、加筋土挡墙、悬臂式挡土墙加权综合指标的74%、78%、85%;在原材料生产阶段,对重力式挡土墙加权综合指标影响较大的清单物质为砂、混凝土碎石和混凝土水泥,贡献率分别为29%、28%和13%;对加筋土挡墙影响较大的为砂、碎石、混凝土碎石和格宾网,贡献率分别为39%、17%、9%和6%,对悬臂式挡土墙影响较大的为钢筋、砂和混凝土碎石,贡献率分别为40%、30%和10%。

砂与碎石是我国生产能力和消费量最大的矿产资源,在开采过程中,大部分人工砂石料系统采用爆破开采岩石,过程中伴有大量粉尘及少量CO、NO<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>等气体产生;砂石生产过程需各种大型机械进行破碎、筛分及输送,消耗大量电力及燃料,且燃料燃烧产生大量CO<sub>2</sub>,对GWP、AP影响较大。

混凝土主要材料为水泥,其熟料煅烧过程需对石灰石进行煅烧分解,产生大量CO<sub>2</sub>;且熟料煅烧以煤为燃料,燃烧过程中会释放大量SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>等污染气体,对AP、EP和GWP影响较大<sup>[27-29]</sup>。少熟料胶凝材料的推广与应用能有效控制水泥碳排放量与使用量,并结合优化挡土墙前期设计,强化其建设施工过程的工程管理,促使水泥熟料用量下降,从而达到节能减排的目的。

由图1、图2可得,重力式挡土墙GWP、AP和EP远大于其他两种挡土墙,且砂、混凝土碎石和混凝土水泥对挡土墙GWP、AP和EP贡献率较高。重力式挡土墙依靠自身重力来维持其在土压力作用下的稳定性,建设过程中主要采用大量混凝土进行

整体浇筑,其混凝土用量远大于其他两种挡土墙,而混凝土主要材料为砂、碎石与水泥;砂与碎石对GWP贡献较大,水泥对AP、EP影响较大,所以重力式挡土墙GWP、AP和EP远大于其他两种挡土墙。

悬臂式挡土墙采用钢筋混凝土结构,主要靠底板上的填土重量来维持挡土墙的稳定。钢筋生产过程需要消耗大量金属物质及资源,对CADP贡献较大,所以悬臂式挡土墙CADP最大。由表4可得,CADP权重因子最大,说明其对加权综合指标影响最大,而悬臂式挡土墙CADP最大,即使其他7类指标均远小于重力式挡土墙,但悬臂式挡土墙加权综合指标却为重力式挡土墙的92.3%。PONS等<sup>[5]416</sup>研究表明,对钢筋进行回收利用可有效减少挡土墙9.6%~12.4%CO<sub>2</sub>排放量。张建良等<sup>[30]</sup>研究表明,可以通过提高废钢利用率,减少中国钢铁工业污染物排放量。

运输过程分别占重力式、加筋土、悬臂式挡土墙加权综合指标的24%、20%和13%。运输阶段污染物排放过程主要包括运输工具的污染物排放、运输工具消耗能源和资源随之产生的污染物排放。本研究采用柴油货车为运输工具,其尾气中含有大量SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>,对AP、EP影响较大。车辆燃料的燃烧过程会排放大量颗粒物质和烟尘,对RI、COD影响较大。因此,减少挡土墙运输阶段对汽油、柴油等不可再生资源的消耗,是降低挡土墙环境影响的重点。在交通产生的直接排放方面,可通过降低对公路货运的依赖,使用铁路等电气化程度较高的运输方式,达到减少碳排放的目的。

综上所述,对挡土墙加权综合指标贡献最大的为挡土墙原材料生产阶段,与文献[5]、[31]、[32]的研究结果一致。对加权综合指标影响最大的清单物质主要为砂、碎石、混凝土碎石、混凝土水泥、钢筋及货车运输,针对其生产工艺进行改进,或减少其用量,是控制挡土墙生命周期环境影响的有效途径。

### 2.3 敏感性分析

敏感性分析用于表示清单数据对各指标的灵敏度。通过敏感性分析,得出产品生命周期中对环境影响最大的过程,根据此结果对产品进行改进,其计算公式见式(3):

$$S_{ij} = \frac{\Delta I_i / I_i}{\Delta T_j / T_j} \quad (3)$$

式中: $S_{ij}$ 为*i*材料对*j*指标的敏感性; $\Delta I_i$ 为*i*材料清单数据的变化量; $I_i$ 为*i*材料的清单数据总量;

$\Delta T_j$  为由于  $i$  材料的清单数据变化所引起的  $j$  指标的变化量;  $T_j$  为  $j$  指标数值。

对挡土墙加权综合指标贡献较大的阶段为原材料生产阶段及运输阶段,因此上述阶段中的关键参数对加权综合指标结果影响较大。根据图 3,选取对挡土墙贡献率较大的清单物质分别进行敏感性分析,结果如图 4 至图 6 所示。

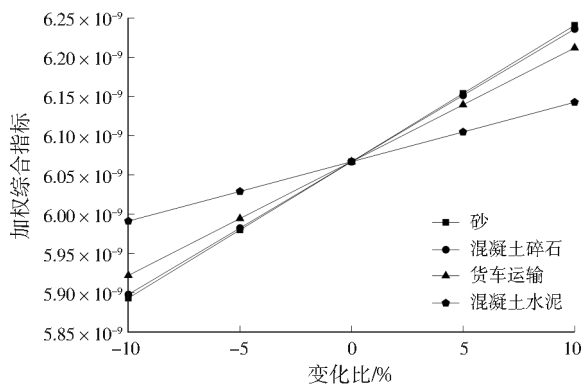


图 4 重力式挡土墙敏感性分析

Fig.4 Sensitivity analysis of gravity retaining wall

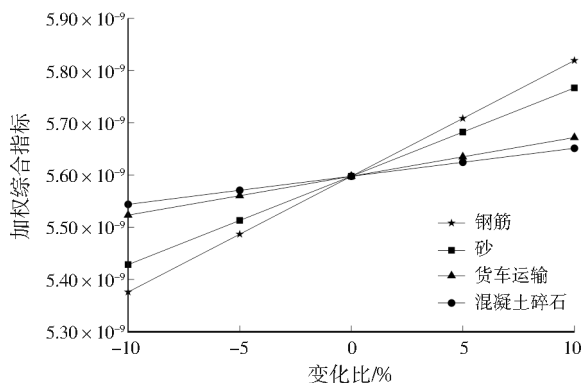


图 5 悬臂式挡土墙敏感性分析

Fig.5 Sensitivity analysis of cantilever retaining wal

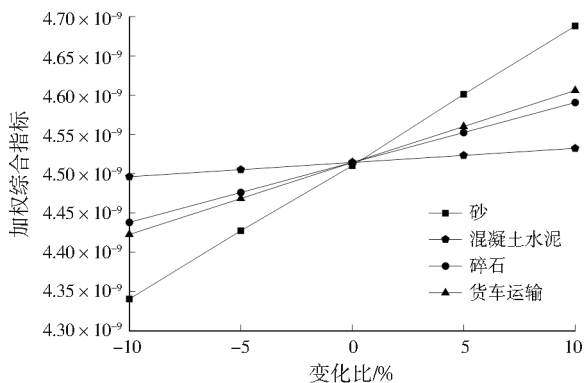


图 6 加筋土挡土墙敏感性分析

Fig.6 Sensitivity analysis of reinforced retaining wall

由图 4 至图 6 可知,加权综合指标结果与上述清单物质变化比呈线性关系,可根据其斜率判断各清单物质对加权综合指标的敏感性大小。重力式挡土墙敏感性较大的清单物质依次为砂、混凝土碎石、

货车运输及混凝土水泥。悬臂式挡土墙敏感性较大的清单物质依次为钢筋、砂、货车运输及混凝土碎石。加筋土挡土墙敏感性较大的清单物质依次为砂、货车运输、碎石及混凝土水泥。砂、钢筋、砂分别对重力式挡土墙、悬臂式挡土墙、加筋土挡土墙加权综合指标结果的影响幅度最大,针对其采取相关节能减排措施,是减少挡土墙生命周期环境影响的主要途径。

#### 2.4 墙高对挡土墙的环境影响

挡土墙的加权综合指标随墙高变化见图 7。3 种挡土墙加权综合指标均呈上升趋势,且重力式挡土墙与悬臂式挡土墙趋势相近。当墙高小于 4 m 时,加筋土挡土墙加权综合指标最大;当墙高大于 4 m 时,重力式挡土墙与悬臂式挡土墙加权综合指标均大于加筋土挡土墙,此时,加筋土挡土墙对环境的影响最小。随着墙高的增大,重力式挡土墙、加筋土挡土墙、悬臂式挡土墙在墙高从 2 m 增至 6 m 时加权综合指标增长率分别为 462%、199%、390%;重力式挡土墙加权综合指标增长率最大,对环境的影响增量最大。

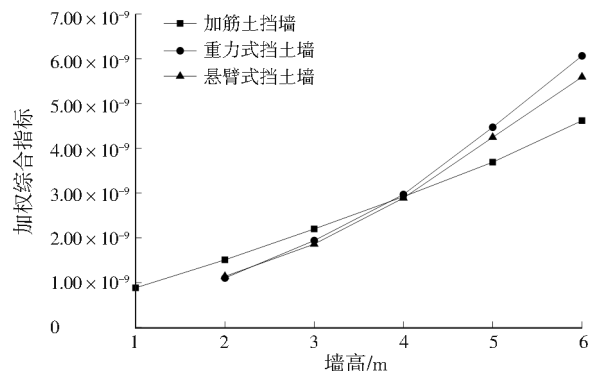


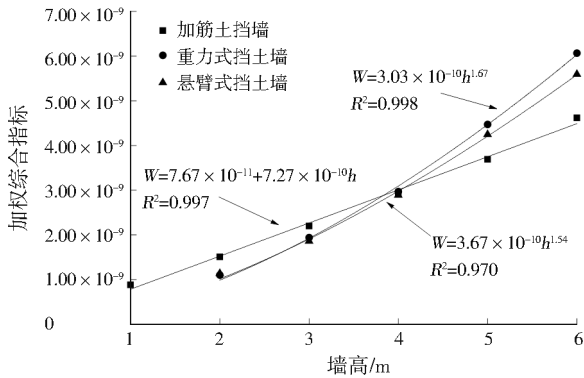
图 7 加权综合指标随墙高变化

Fig.7 Variation of weighted comprehensive index with wall height

#### 2.4.1 拟合曲线

由图 7 可知,随着墙高的增大,挡土墙的加权综合指标逐渐增大。挡土墙的加权综合指标与其墙高有良好的相关性。对其进行回归分析,得出挡土墙加权综合指标与墙高之间的关系式,拟合曲线见图 8。

加筋土挡土墙加权综合指标与墙高之间存在显著正相关关系,其拟合曲线呈线性关系增长,说明随墙高的增大,加筋土挡土墙加权综合指标增长量较为稳定。重力式挡土墙与悬臂式挡土墙加权综合指标拟合曲线呈幂函数形式增长,且其指数均大于 1,随着墙高的增大,两种挡土墙的加权综合指标增长量越来越大。重力式挡土墙幂指数(1.67)大于悬臂式挡土墙幂指数(1.54),说明其加权综合指标增长速度



注:W 为加权综合指标, h 为墙高。

图 8 挡土墙拟合曲线

Fig.8 Fitting curve of retaining wall

大于悬臂式挡土墙。

### 2.4.2 贡献率比值

为突出各清单物质贡献率受墙高的影响,使用贡献率比值描述墙高从 1 m 到 6 m 各清单物质贡献率变化,其值越接近 1,表示墙高对其贡献率影响越小。其计算公式见式(4):

$$\eta_{ctr} = \frac{\eta_m}{\eta_2} \quad (4)$$

式中: $\eta_{ctr}$ 为各清单物质贡献率比值; $\eta_m$ 为墙高为 m 时清单物质对加权综合指标贡献率; $\eta_2$ 为基准墙高时清单物质贡献率。

加筋土挡墙 4 种清单物质贡献率比值随墙高变化如图 9 所示。随墙高增大,货车运输贡献率比值呈上升趋势,混凝土水泥贡献率比值呈下降趋势,碎石与砂贡献率比值接近,且趋势平稳。货车运输增长趋势最明显,其贡献率比值大于 1,当墙高为 6 m 时,其值为 4.87,说明墙高对货车运输贡献率影响较大,墙高与加筋土挡墙货车运输贡献率存在正相关关系。混凝土水泥贡献率比值呈下降趋势,且其值小于 1;当墙高为 6 m 时,其值为 0.36,变化幅度小于货车运输,说明墙高与加筋土挡墙混凝土水泥贡献率存在负相关关系,且墙高对混凝土水泥贡献

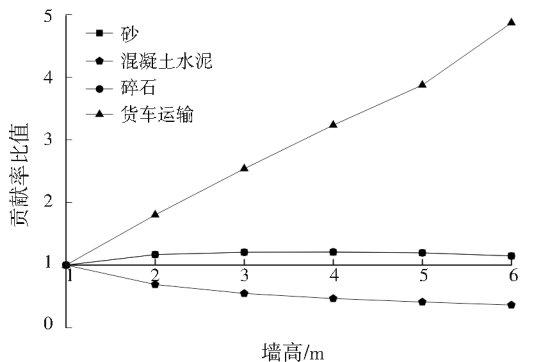


图 9 加筋土挡墙贡献率比值

Fig.9 Contribution ratio of reinforced retaining wall

率影响小于货车运输。随墙高增大,砂与碎石贡献率比值趋势平稳,且其值大于 1,墙高 6 m 时为 1.15,说明墙高的增大对砂与碎石贡献率影响较小,但两者之间仍存在正相关关系。

悬臂式挡土墙 4 种清单物质贡献率比值随墙高变化如图 10 所示。随墙高增大,货车运输、钢筋贡献率比值呈上升趋势,且两者贡献率比值均大于 1;砂、混凝土碎石贡献率比值呈下降趋势,且其贡献率比值均小于 1。货车运输贡献率比值变化率最大,当墙高为 6 m 时,其值约为初始值的 2 倍,为 2.11。货车运输贡献率与墙高之间存在正相关关系,且墙高变化对货车运输贡献率影响最大。钢筋贡献率比值变化率次之,当墙高为 6 m 时,其值为 1.51;说明钢筋贡献率与墙高之间存在正相关关系,且墙高对钢筋贡献率的影响小于货车运输。混凝土碎石贡献率比值变化趋势较为平缓,与 1 较为接近,且小于 1,说明混凝土碎石贡献率受墙高影响最小,但二者之间仍存在负相关关系。砂贡献率比值变化率大于混凝土碎石,当墙高为 6 m 时,其值为 0.61;说明砂贡献率与墙高之间存在负相关关系,且墙高对砂贡献率影响大于混凝土碎石,小于钢筋。

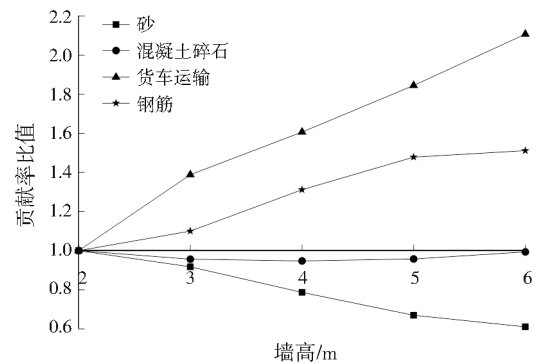


图 10 悬臂式挡土墙贡献率比值

Fig.10 Contribution ratio of cantilever retaining wall

重力式挡土墙 4 种清单物质贡献率比值随墙高变化如图 11 所示。随墙高增大,货车运输、混凝土

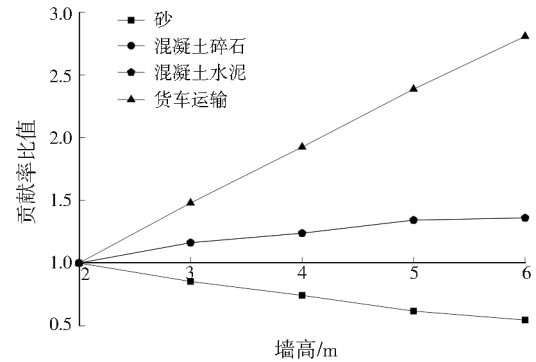


图 11 重力式挡土墙贡献率比值

Fig.11 Contribution ratio of gravity retaining wall

水泥和混凝土碎石贡献率比值均呈上升趋势,且其贡献率比值均大于1,说明其贡献率与墙高存在正相关关系,且货车运输贡献率受墙高变化影响最大;砂贡献率比值呈下降趋势,且其值小于1,说明砂贡献率与墙高存在负相关关系,且砂贡献率比值与1差值大于混凝土碎石和混凝土水泥,所以砂贡献率受墙高影响大于混凝土碎石及混凝土水泥,且小于货车运输。

### 3 结论

(1) 当墙高为6 m时,重力式挡土墙加权综合指标最大,其次为悬臂式挡土墙,再次为加筋土挡墙;说明加筋土挡墙对环境影响最小,为3种挡土墙中最环保的方案。

(2) 原材料生产阶段对挡土墙加权综合指标贡献率最大,其次为运输阶段。砂对重力式挡土墙、加筋土挡墙的加权综合指标敏感性最大,钢筋对悬臂式挡土墙的加权综合指标敏感性最大,针对上述清单物质采取相关节能减排措施,是减少挡土墙对环境的主要途径。

(3) 随墙高增大,3种挡土墙加权综合指标均呈上升趋势,当墙高小于4 m时,加筋土挡墙加权综合指标最大;当墙高大于4 m时,选择加筋土挡墙最优。

(4) 3种挡土墙加权综合指标与墙高之间存在显著正相关关系。加筋土挡墙拟合曲线呈线性关系,重力式挡土墙与悬臂式挡土墙拟合曲线呈幂函数形式,说明随着墙高的增大,加筋土挡墙对环境的影响增量较小,具有环境优势。

### 参考文献:

[1] 气候变化国家评估报告编写委员会.气候变化国家评估报告[M].北京:科学出版社,2007.

[2] 郑刚,龚晓南,谢永利,等.地基处理技术发展综述[J].土木工程学报,2012,45(2):127-146.

[3] 制造强国战略研究项目组.制造强国战略研究[M].北京:电子工业出版社,2015.

[4] 王喜文.中国制造2025解读[M].北京:机械工业出版社,2015.

[5] PONS J J, PENADÉS PLÀ V, YEPES V, et al. Life cycle assessment of earth-retaining walls: an environmental comparison[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 192.

[6] ZASTROW P, MOLINA M F, GARCIA S T, et al. Life cycle assessment of cost-optimized buttress earth-retaining walls: a parametric study[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 140.

[7] FRISCHKNECHT R, STUCKI M, BUSSER S, et al. Comparative life cycle assessment of geosynthetic versus conventional construction materials[J]. Ground Engineering, 2011, 45(10): 24-28.

[8] DAMIANS I P, BATHURST R J, ADROGUER E G, et al.

Sustainability assessment of earth-retaining wall structures[J]. Journal of Environmental Geotechnics, 2016, 16(4): 187-203.

[9] DJADOUNI H, TROUZINE H, CORREIA A G, et al. Life cycle assessment of retaining wall backfilled with shredded tires[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2019, 24(3): 581-589.

[10] 李丽华,李行,肖衡林,等.加筋土挡墙压实应力数值模拟分析[J].岩石力学与工程学报,2020,39(增刊1):3130-3138.

[11] 李丽华,石安宁,肖衡林,等.加筋土挡墙静载模型试验及其力学性能研究[J].岩土力学,2018,39(12):4360-4368.

[12] 李肖燕.基于LCA的水泥路面与沥青路面环境影响评价[D].苏州:东南大学,2015.

[13] 刘淑芬.基于LCA的京沪高速与京沪高铁基础设施建设环境影响比较研究[D].苏州:东南大学,2015.

[14] 郑晓云,徐金秀.基于LCA的装配式建筑全生命周期碳排放研究——以重庆市某轻钢装配式集成别墅为例[J].建筑经济,2019,40(1):107-111.

[15] 秦葵,袁艳平,蒋福建.地铁站建筑全生命周期碳排放研究——以成都三号线某站为例[J].建筑经济,2020,41(增刊1):329-334.

[16] 杜永峰,余钰,李慧.重力式挡土墙稳定性的结构体系可靠度分析[J].岩土工程学报,2008,30(3):349-353.

[17] 施小平.悬臂式挡土墙抗滑稳定性分析[J].南水北调与水利科技,2015,13(1):108-112.

[18] 周智海,王灿,陈芳.重力式挡土墙稳定性影响因素分析[J].公路与汽运,2015(2):126-128,160.

[19] 李纯玉.重力式挡土墙稳定性影响因素分析研究[J].工程勘察,2014,42(5):21-25.

[20] 尹作华.重力式挡土墙稳定性影响因素敏感性分析[J].科学技术创新,2018(31):95-96.

[21] 任波,魏新平.不同形式挡土墙的稳定性分析[J].路基工程,2014(2):148-152.

[22] FRANK C. Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete; influence on their carbon footprint[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2010, 15: 549-556.

[23] GARCIA SEGURA T, YEPES V, ALCALA J, et al. Hybrid harmony search for sustainable design of post-tensioned concrete box-girder pedestrian bridges[J]. Engineering Structures, 2015, 92(1): 112-122.

[24] GARCIA SEGURA T, YEPES V. Multiobjective optimization of post-tensioned concrete box-girder road bridges considering cost, CO<sub>2</sub> emissions, and safety[J]. Engineering Structures, 2016, 125(15): 325-336.

[25] POSSAN E, WILLIAM A, THOMAZ G A, et al. CO<sub>2</sub> uptake potential due to concrete carbonation: a case study[J]. Case Studies in Construction Materials, 2017, 6: 147-161.

[26] LAGERBLAD B. Carbon dioxide uptake during concrete life cycle - state of the art[J]. CBI Rapport, 2005, 2: 1-47.

[27] 仲平.建筑生命周期的能源消耗及其环境影响研究[D].成都:四川大学,2005.

[28] 姜睿,王洪涛.中国水泥工业的生命周期评价[J].化学工程与装备,2010(4):183-187.

[29] 宋晓玲,梁智霖,罗维,等.全工业固废原料制备水泥工艺的生命周期评价研究[J].环境科学学报,2021,41(12):5190-5199.

[30] 张建良,尉继勇,刘征建,等.中国钢铁工业空气污染物排放现状及趋势[J].钢铁,2021,56(12):1-9.

[31] 刘胜男.装配式混凝土建筑物化阶段碳足迹评价研究[D].大连:大连理工大学,2021.

[32] 肖雅心,杨建新.北京市住宅建筑生命周期碳足迹[J].生态学报,2016,36(18):5949-5955.

编辑:陈泽军 (收稿日期:2022-03-28)