

张静宇,周玲莉,周静妍,等.典型污染场地风险管控技术的全生命周期碳足迹核算与评价[J].中国环境科学,2025,45(5):2932-2940.

Zhang J Y, Zhou L L, Zhou J Y, et al. Life cycle carbon footprint accounting and assessment of risk management and control technologies of typical contaminated sites [J]. China Environmental Science, 2025,45(5):2932-2940.

## 典型污染场地风险管控技术的全生命周期碳足迹核算与评价

张静宇<sup>1,2</sup>,周玲莉<sup>2\*</sup>,周静妍<sup>2</sup>,吴文成<sup>2</sup>,吴颖欣<sup>2</sup> (1.安徽大学资源与环境工程学院,安徽 合肥 230601; 2.生态环境部华南环境科学研究所,广东 广州 510535)

**摘要:**以华南地区某典型重金属污染场地为案例,采用排放因子法和生命周期影响评价法,对固化/稳定化+阻隔回填技术的全生命周期碳足迹进行核算与量化评估.结果表明,固化/稳定化+阻隔回填的碳排放强度为 0.190t CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> 污染土.主处理、场地建设和阻隔回填是最主要的碳排放单元过程,分别占总碳排放的 33.7%、32.7%和 31.9%;关键碳排放来源为混凝土和固化/稳定化药剂的生产,分别占总碳排放的 51.9%和 33.4%.本案例综合环境影响评分为 84.3kPt,风险管控实施过程对人体健康的影响最大,主要的贡献因素是工程施工造成的细颗粒物形成和全球变暖.

**关键词:** 固化/稳定化; 阻隔回填; 全生命周期; 碳足迹

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)05-2932-09

**Life cycle carbon footprint accounting and assessment of risk management and control technologies of typical contaminated sites.** ZHANG Jing-yu<sup>1,2</sup>, ZHOU Ling-li<sup>2\*</sup>, ZHOU Jing-yan<sup>2</sup>, WU Wen-cheng<sup>2</sup>, WU Ying-xin<sup>2</sup> (1.School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China; 2.South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510535, China). *China Environmental Science*, 2025,45(5): 2932~2940

**Abstract:** This study conducted a comprehensive life cycle assessment of the carbon footprint associated with the solidification/stabilization combined with barrier backfilling (SSB) technology through a typical heavy metal-contaminated site case in South China. Using the emission factor method and life cycle impact assessment approach, we quantified the environmental impacts across the entire remediation process. The results revealed that the SSB technology exhibited a carbon emission intensity of 0.190t CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> contaminated soil. The most important carbon emission unit processes were primary treatment (33.7%), site construction (32.7%), and barrier backfilling (31.9%). Material production emerged as the principal emission source, with concrete manufacturing contributing 51.9% and solidification/stabilization reagents accounting for 33.4% of total emissions. The comprehensive environmental impact score of this case reached 84.3kPt. The implementation process of risk control exerted the most significant human health impacts, which were primarily contributed by the formation of fine particulate matter during construction activities and the global warming potential.

**Key words:** solidification/stabilization; barrier backfill; life cycle assessment; carbon footprint

近年来,随着我国工业化和城市化的快速发展,城市及周边地区出现了大量污染地块,对周围环境和人体健康造成了较大影响<sup>[1]</sup>.污染场地风险管控和修复可以降低土壤风险,实现污染场地再开发安全利用,保障社会经济的可持续发展.随着国家“双碳”目标的提出,开展污染场地修复的绿色低碳评估,探索碳减排路径逐渐受到重视<sup>[2]</sup>.2023年12月生态环境部发布了《关于促进土壤污染绿色低碳风险管控和修复的指导意见》,明确提出要以风险管控和修复全过程绿色低碳水平为目标,研究制定适用于土壤污染风险管控和修复全过程的环境足迹评估工具和碳核算方法<sup>[3]</sup>.然而我国污染场地风险管控和修复研究起步较晚,风险管控和修复技术的绿色低

碳评估还处于萌芽阶段,尚未系统形成污染场地风险管控和修复技术的碳足迹核算方法,并针对相关技术开展碳足迹核算.因此,精准解析不同风险管控与修复技术单元过程碳排放特征是推动绿色可持续修复的关键,也是当前国家面临的重要需求.

常用的碳足迹核算与影响评价方法包括碳排放因子法<sup>[4]</sup>、物料平衡法、实测法、环境足迹分析法<sup>[5]</sup>、SiteWise<sup>TM</sup>工具<sup>[6]</sup>、生命周期评价法<sup>[7]</sup>等,其中基于全生命周期评价的碳排放因子法能够准确、全面地分析污染治理修复全生命周期过程的输入、输

收稿日期: 2024-09-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3703302)

\* 责任作者,高级工程师, zhoulingli@scies.org

出及其造成的环境排放和影响,是国际公认的主流碳核算和环境影响评价方法<sup>[8-10]</sup>.目前已有学者通过收集案例或修复方案,对不同污染场地的风险管控和修复技术进行了碳排放初步测算和环境影响评价<sup>[11-17]</sup>.例如,前人基于生命周期方法,并结合碳排放因子对热脱附技术进行碳足迹核算,结果表明,碳排放的主要来源是热脱附修复过程<sup>[10]</sup>;电力及燃气等能源使用的碳排放贡献在 80%以上<sup>[12-13]</sup>;将化石能源全部替换为太阳能、风电等清洁能源时,碳减排潜力可达 31%~40%<sup>[14]</sup>.基于生命周期方法,结合 CML 特征化模型、Recipe 2016 模型等环境影响模型,有学者对水泥窑协同处置技术进行了环境影响定量评价,结果表明,熟料煅烧阶段的环境影响最大<sup>[15]</sup>;材料消耗和燃料燃烧的碳排放贡献之和高达 80%<sup>[16]</sup>;当采用污泥作为材料和燃料代替品时,该技术减碳率可达 20%<sup>[17]</sup>.但由于存在污染场地特异性、系统边界取舍误差、缺乏代表性排放因子以及数据清单不完整等问题,已有研究中鲜有关注不同单元过程的碳排放,并对排放因子和核算结果开展不确定性和敏感性分析.

固化/稳定化技术具有费用低、时间短、易工程实施等优势,是我国重金属污染场地最常用的风险管控技术之一.当前对该技术的研究,主要集中在材

料、设备工艺条件、污染特性对修复效果、能耗优化的影响<sup>[18-19]</sup>,对固化/稳定化技术开展碳核算和评价的研究较少,有学者将能源矿物燃料排放量与单位 GDP 产值排放系数法相结合折算出其碳排放强度<sup>[20]</sup>.阻隔回填可以长期封存土壤,以确保风险管控措施长期有效,这种方式在酸雨较普遍的华南地区应用尤其广泛.阻隔回填涉及大量水泥使用和工程施工,其碳排放涉及的单元过程多、差异大,但当前对阻隔回填的碳排放影响和贡献鲜有量化评估,对固化稳定化+阻隔回填这种典型风险管控技术的碳排放关键因素研究仍十分缺乏,从而对其碳减排和环境损害防控对策制定缺乏科学依据.

本研究基于生命周期思想,通过划分固化/稳定化+阻隔回填的单元过程,建立生命周期系统边界,构建生命周期数据清单,并结合生命周期评价法、碳排放因子法进行生命周期碳足迹核算和环境影响定量评价,以此分析污染修复碳足迹和环境影响的关键贡献因素,提出固化/稳定化+阻隔回填的碳减排建议,研究成果将为我国重金属污染场地风险管控技术的绿色低碳发展提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 系统边界

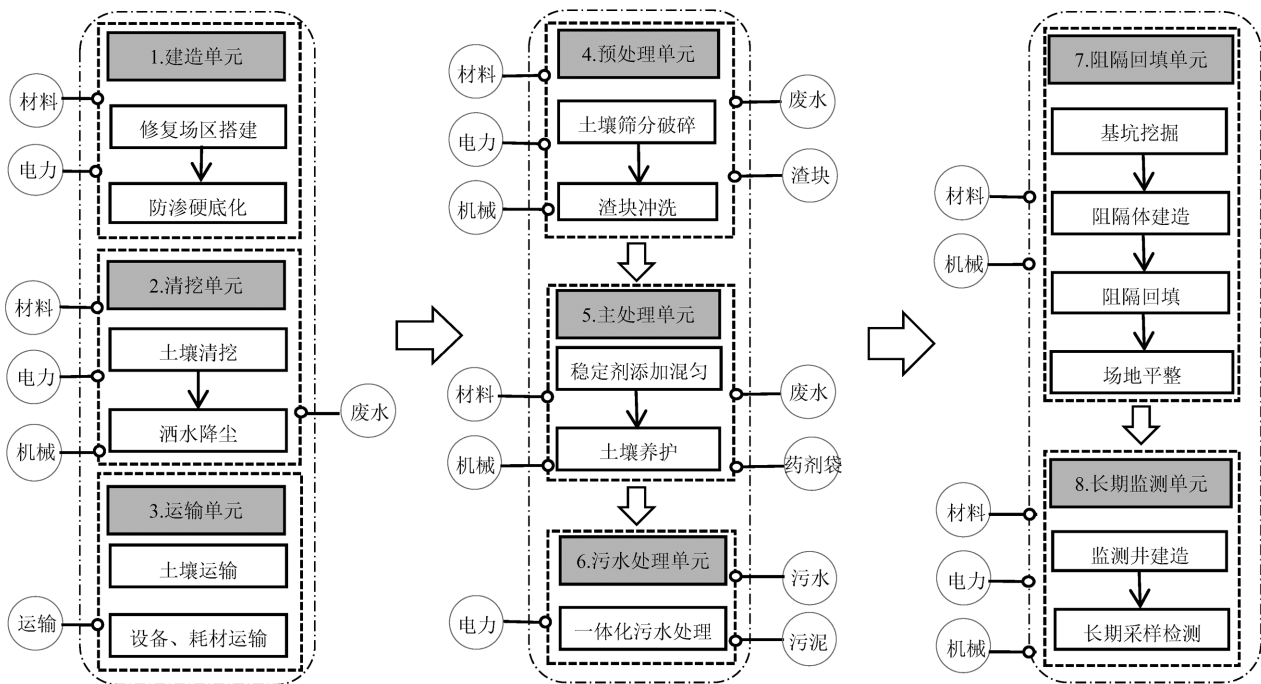


图 1 固化/稳定化+阻隔回填的生命周期系统边界

Fig.1 Life cycle system boundaries of SSB

基于 life cycle assessment (LCA)系统边界的取舍原则,本研究的系统边界包括固化/稳定化+阻隔回填技术在实际场地中从治理修复过程开始到完成阻隔回填和长期监测全过程的关键环节,共有 8 个单元过程,即:建造单元、清挖单元、运输单元、预处理单元、主处理单元、污水处理单元、阻隔回填单元和长期监测单元,不包含场地前期调查风险评估、制定修复方案以及后期效果评估以及施工过程中环境监理等管理过程(图 1)。

## 1.2 碳足迹核算

**1.2.1 碳排放量核算** 本研究采用排放因子法开展碳排放核算,其基本原理是依照生命周期数据清单,针对各碳排放源选取合适的排放因子,以活动水平数据与排放因子的乘积作为该项排放源的排放估算值,具体计算过程及公式可参考孟豪等<sup>[21]</sup>文献。碳排放源可分为 4 类:(1)材料生产的碳排放  $E_m$ ;(2)机械用能的碳排放  $E_p$ ;(3)交通运输的碳排放  $E_t$ ;(4)电力消耗的碳排放  $E_e$ 。各类碳排放之和即为风险管控全过程的总碳排放  $E_{CO_2}$ ,单位都为  $t CO_2$ 。计算公式如式(1)所示:

$$E_{CO_2} = \Sigma(E_m + E_p + E_t + E_e) \quad (1)$$

**1.2.2 碳排放强度核算** 为消除不同污染场地、风险管控与修复技术、管控时限等带来的差异,使用碳排放强度(修复每方量或每吨污染土壤的碳排放)来对污染治理修复全生命周期碳排放与修复技术之间的关系进行量化,使评价结果具有可比性。

本研究选取修复每方量污染土的碳排放为碳排放强度。计算公式如式(2)所示:

$$T_{CO_2} = E_{CO_2} / V \quad (2)$$

式中: $T_{CO_2}$ 为碳排放强度, $t CO_2/m^3$ 污染土; $E_{CO_2}$ 为总碳排放量, $t$ ; $V$ 为污染土方量, $m^3$ 。

## 1.3 环境影响评价

生命周期影响评价是对修复所涉及到的材料、能源等展开定量评估,将其转化为环境影响的过程<sup>[22]</sup>。本研究采用 SimPro 评估软件,选取 ReCiPe 2016 终点影响评价模型对污染场地固化/稳定化+阻隔回填的全生命周期过程进行评价。具体过程为:首先,采用 ReCiPe 2016 模型,将生命周期清单数据特征化为全球变暖-人体健康(GH)、全球变暖-陆地生态系统(GT)、全球变暖-淡水生态系统(GF)、平流层臭氧耗损(SO)、电离辐射(IR)、臭氧形成-人体

健康(OH)、细颗粒物的形成(FP)、臭氧形成-陆地生态系统(OT)、陆地酸化(TA)、淡水富营养化(FEU)、海洋富营养化(MEU)、陆地生态毒性(TE)、淡水生态毒性(FEC)、海洋生态毒性(MEC)、人体致癌毒性(HC)、人体非致癌毒性(HNC)、土地利用(LU)、矿产资源稀缺性(MR)、化石资源稀缺性(FR)、水资源消耗-人体健康(WH)、水资源消耗-陆地生态系统(WT)、水资源消耗-水生生态系统(WA)<sup>[23-24]</sup>等 22 类环境影响,再通过不同的损害方式归类为三类终点环境影响结果,即人体健康、生态系统和自然资源,单位分别为残疾调整生命年(DALY)、物种年(species.yr)、美元(USD)。本研究采用 Huijbregts 等<sup>[24]</sup>推导出的终点水平特征化因子将每单位影响源(如排放和资源开采)换算为有限数量的环境影响。计算公式如式(3)所示:

$$LCIA_c = \sum_{i=1}^n CF_i \times LCI_i \quad (3)$$

式中: $LCIA_c$ 为各类终点环境影响结果; $CF$ 为终点特征化因子; $LCI$ 为生命周期清单数据; $c$ 表示物质类别; $i$ 表示影响源类别。

最终,通过标准化和赋权对各类环境影响结果进行处理,得到单位统一的综合环境影响评价分值,单位为 kPt。环境影响评价的分值越高,代表该项的环境影响越大。计算公式如式(4)所示:

$$LCIA_{FC} = LCIA_c \times T \times W \quad (4)$$

式中: $LCIA_{FC}$ 为各终点影响类型的标准化评分值; $T$ 为标准化因子; $W$ 为权重因子。

## 1.4 敏感性和不确定性分析

碳足迹核算主要是基于碳排放相关假设设定、活动水平数据的获取和核算方法的选择,导致碳排放核算结果不确定的因素有很多,其中系统边界的定义、排放因子代表性、活动水平数据不完整或缺乏等是最主要因素<sup>[25]</sup>。本研究采用单因子敏感性分析法,对生命周期碳足迹核算评价中的机械用能、电力消耗、交通运输、混凝土生产和药剂生产 5 类碳排放因子进行敏感性分析,设置 $\pm 20\%$ 、 $\pm 10\%$ 等 4 个情景,计算全生命周期碳排放的变幅,评价碳排放因子对评价结果的影响。此外,本研究使用蒙特卡洛法对研究结果进行模拟,将正态分布作为随机变量的概率分布函数,使用 Oracle Crystal Ball 进行 1000 次独立重复模拟,对碳核算结果和环境影响评价结果

的不确定性进行分析。

## 1.5 研究案例

**1.5.1 研究案例概况** 选取华南地区某典型重金属污染地块为研究案例,该地块占地约 19 万  $m^2$ ,主要污染物为铅、砷、汞,污染深度 0~6m 不等,需修复的总土方量为 9990 $m^3$ ,地块规划为居住用地,按第一类用地进行修复.该案例采用固化/稳定化技术对污染土壤进行处理,经养护的土壤中污染物浸出浓度达标后,在场内地采取水泥箱体阻隔回填的方式进行风险管控,配套建设监测井,并开展 3 年的监测。

表 1 研究案例生命周期数据清单

Table 1 Life cycle inventory data of the research case

单元过程	物耗/设备及其使用情况	消耗量	单位	
建造单元	材料生产	铝合金	2.48 t	
		阻隔膜(高密度聚乙烯)	3.29 t	
		钢材	59.7 t	
		混凝土	1352 $m^3$	
	电力消耗	混凝土输送泵、混凝土摊铺机	2425	kW·h
清挖单元	机械用能	挖掘机-柴油	1.34 t	
	材料生产	自来水	540 t	
	电力消耗	雾炮机	165 kW·h	
运输单元	轻型货车	监测设备运输	4.20 t·km	
	中型货车	土壤运输	6133 t·km	
	重型货车	设备、耗材运输	110973 t·km	
预处理单元	机械用能	ALLU 筛分斗、铲车-柴油	4.33 t	
	材料生产	自来水	45.0 t	
	电力消耗	高压清洗机、污泥泵	4208 kW·h	
	机械用能	铲车、挖掘机、洒水车-柴油	1.72 t	
主处理单元	材料生产	氯化铁	33.1 t	
		硫酸铝	139 t	
		过磷酸钙	207 t	
		自来水	502 t	
污水处理单元	电力消耗	一体化污水处理设备	47.9 kW·h	
阻隔回填单元	机械用能	挖掘机、旋挖机、成孔钻机、压路机-柴油	4.38 t	
	材料生产	钢材	14.3 t	
		混凝土	1721 $m^3$	
		阻隔膜	10.9 t	
长期监测单元	材料生产	机械用能	XY100 型钻机-柴油	0.0412 t
			混凝土	0.0150 $m^3$
			石英砂	0.533 $m^3$
			膨润土	0.0450 $m^3$
			钢材	2.18 t
			PVC 管(聚氯乙烯)	0.0420 t
			过滤网	0.0250 t
	电力消耗	现场检测设备	8.50 kW·h	

**1.5.2 数据清单** 本研究通过查阅施工日志、施工

总结报告、效果评估报告以及访谈施工人员等方式获取研究案例各单元过程的数据清单(表 1),其中各类耗材、药剂、机器设备的用量和型号等数据可以直接从报告中获取;柴油消耗量、电力消耗量等数据需要通过施工过程所使用的设备型号、功率、时间等信息进行换算。

**1.5.3 排放因子** 碳排放因子来源于国内外排放因子

数据库、业内学者的研究成果、政府部门报告等.因不同地区的生产技术水平、资源和能源质量存在差别,使用排放因子法核算得到的碳排放量会存在差别<sup>[26]</sup>.因此,在收集排放因子时,优先从国内官方发布的排放因子数据集中选取,以更契合我国的碳排放实际情况,提高核算的准确性和可靠性.如电力排放因子参考生态环境部发布的《中国区域电网二氧化碳排放因子研究》<sup>[27-28]</sup>,柴油和大部分材料类(如铝合金、钢材)排放因子从生态环境部发布的《中国产品全生命周期温室气体排放系数集(2022)》<sup>[29]</sup>中选取.以上数据库中沒有匹配的,则参考国际数据库或国内文献中使用率高的排放因子数据,如固化/稳定化药剂从联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的排放因子数据库中选取,该数据库可以提供普适性排放因子<sup>[30]</sup>,混凝土和水资源的排放因子选自四川大学建筑与环境学院和亿科环境共同开发的《中国生命周期基础数据库》<sup>[31]</sup>.与研究案例相关的碳排放因子见表 2。

## 2 结果和讨论

### 2.1 碳排放结果分析

研究案例使用固化/稳定化+阻隔回填技术对 9990 $m^3$  污染土进行风险管控共产生 1898t  $CO_2$ ,碳排放强度为 0.190t  $CO_2/m^3$  污染土.本文对比了文献中报道的不同污染修复技术的碳排放强度(图 2).从图 2 可以看出,不同修复技术的碳排放强度之间存在较大的差异,清挖和填埋的碳排放强度最高<sup>[32]</sup>,其次是水泥窑协同处置<sup>[16]</sup>、气相抽提<sup>[20]</sup>、异位热脱附<sup>[14]</sup>,化学淋洗和化学氧化<sup>[20]</sup>的碳排放强度最低.固化/稳定化+阻隔回填的碳排放强度处于中等偏低水平,表明该技术在降低碳排放强度方面具有较好的优势.尽管不同文献中研究案例的修复技术和污染物的修复目标值不同,但治理修复的最终目标都是实

现地块的安全利用,因此将不同技术和不同案例的碳排放量转化为统一度量的碳排放强度,可以更好的反映不同治理修复技术的碳排放趋势.

表 2 研究案例涉及的碳排放因子

Table 2 Carbon emission factors associated with the research case

类型	材料/能源	排放因子	单位	来源
材料生产	混凝土	0.321	t CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	[31]
	铝合金	15.8	t CO <sub>2</sub> /t	[29]
	阻隔膜	0.570	t CO <sub>2</sub> /t	[29]
	钢材	2.42	t CO <sub>2</sub> /t	[29]
	水资源	1.68 × 10 <sup>-4</sup>	t CO <sub>2</sub> /t	[31]
	氯化铁	0.180	t CO <sub>2</sub> /t	[30]
	硫酸铝	0.500	t CO <sub>2</sub> /t	[30]
	过磷酸钙	2.70	t CO <sub>2</sub> /t	[30]
	石英砂	0.0600	t CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	[29]
	膨润土	0.0400	t CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	[29]
	PVC管	1.77	t CO <sub>2</sub> /t	[29]
	过滤网	5.98	t CO <sub>2</sub> /t	[29]
	机械用能	柴油	3.15	t CO <sub>2</sub> /t
电力消耗	电力	4.45 × 10 <sup>-4</sup>	t CO <sub>2</sub> /(kW·h)	[27]
交通运输	轻型货车	8.30 × 10 <sup>-5</sup>	t CO <sub>2</sub> /(t·km)	[29]
	中型货车	4.20 × 10 <sup>-5</sup>	t CO <sub>2</sub> /(t·km)	[29]
	重型货车	4.90 × 10 <sup>-5</sup>	t CO <sub>2</sub> /(t·km)	[29]

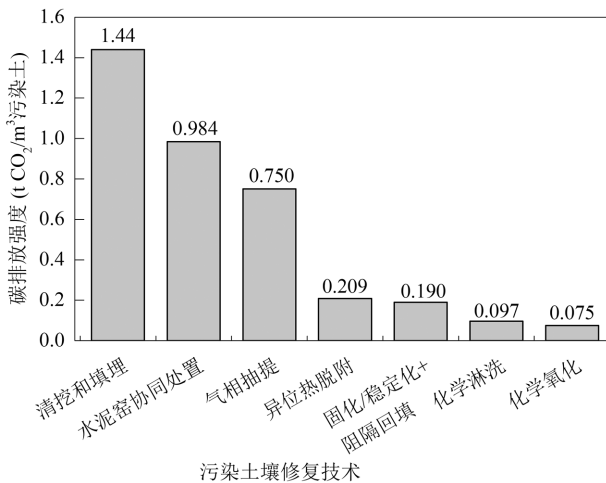


图 2 各修复技术的碳排放强度

Fig.2 Carbon emission intensity of each remediation technology

由各单元过程的碳排放量(图 3)可知,本研究案例碳排放主要来源于主处理单元、建造单元和阻隔回填单元,分别占总碳排放量的 33.7%、32.7%和 31.9%;预处理单元、运输单元、长期监测单元和清挖

单元的碳排放分别占 0.817%、0.300%、0.286%和 0.231%;污水处理单元的碳排放较小,可忽略不计.

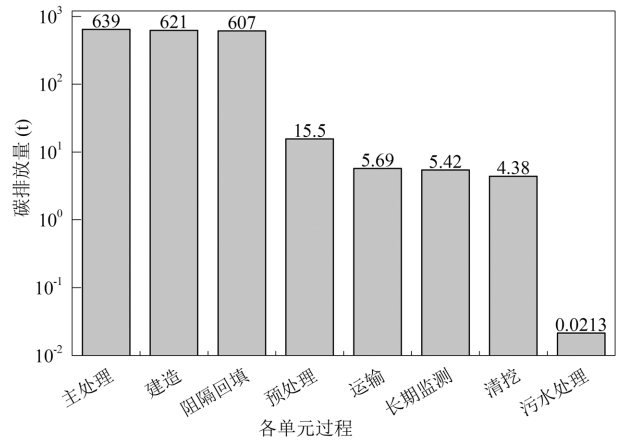


图 3 固化/稳定化+阻隔回填各单元过程碳排放量

Fig.3 Process-specific carbon emissions in SSB implementation

## 2.2 碳排放关键因素

不同类型碳排放源的碳排放占比见图 4(a).其中,材料生产的碳排放量最高,占 97.6%.机械用能、交通运输、电力消耗产生的碳排放分别占 1.96%、0.299%、0.161%,表明固化/稳定化+阻隔回填的主要碳排放源是材料生产.Zheng 等<sup>[33]</sup>核算了水泥窑协同处置、热脱附、固化/稳定化的碳排放,结果表明,三种修复方案中材料生产的碳排放量均占总碳排放量的 45%以上,其中固化/稳定化技术材料生产的碳排放占比高达 78.6%,与本研究结论一致.

对材料生产的碳排放量进行详细分析可知(图 4(b)),碳排放占比最多的是混凝土和固化/稳定化药剂的生产,分别排放了 986t CO<sub>2</sub>和 634t CO<sub>2</sub>,占材料生产碳排放量的 53.2%和 34.2%,其次是钢材、铝合金、阻隔膜,分别占 9.95%、2.11%、0.436%;其他材料生产导致的碳排放仅占 0.024%.因此,该技术碳排放关键因素是混凝土和药剂的生产,减少混凝土和药剂的使用或采用绿色低碳原料生产混凝土和药剂至关重要.

进一步分析混凝土的使用情况可知(图 5(a)),建造单元和阻隔回填单元因使用混凝土分别排放了 434 和 553t CO<sub>2</sub>,各占总混凝土使用产生的碳排放量的 44.0%和 56.0%;长期监测单元混凝土用量较少,碳排放量仅占 0.0005%,与其他两项相比贡献可忽略不计.建造单元中混凝土用于修复大棚、待检区、药剂

仓库等区域的硬底化防渗,混凝土用量为 1352m<sup>3</sup>.研究案例中混凝土阻隔箱体体积约为 10933m<sup>3</sup>,混凝土用量为 1579m<sup>3</sup>.若建造和阻隔回填单元不使用混凝土,本研究案例的碳排放量将下降 50%以上.因此,降低碳排放的途径主要有:(1)发展可集中处置污染土壤的修复工厂,以减少传统修复技术因重复性建造工作导致的混凝土消耗,可使建造单元碳排放强度减少 0.0048t CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> 污染土<sup>[34]</sup>;(2)修复达标土壤不进行阻隔填埋,而是采用原地覆膜压实回填,相关过程只涉及施工机械和运输工具的能耗,可使该单元的碳排放强度减少 0.059t CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> 污染土<sup>[35]</sup>;(3)对修复达标土壤实施资源化利用,如作为路面的亚基层材料,碳排放可减少 35%<sup>[33]</sup>.通过上述方式大幅度降低混凝土的使用,是未来固化/稳定化技术减少碳排放的重要方向.

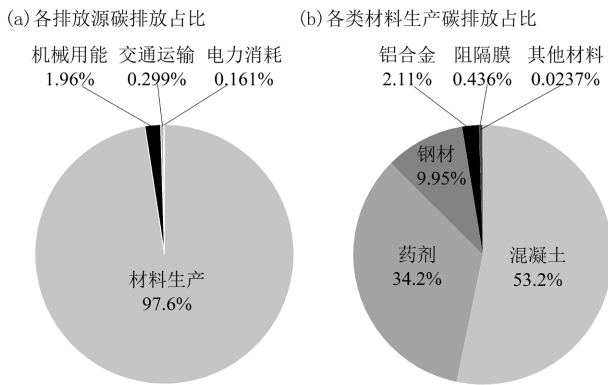


图 4 固化/稳定化+阻隔回填全过程的碳排放源占比及各类材料生产碳排放占比

Fig 4 Proportion of carbon emissions contributions in the life cycle process of SSB by source category and by construction material production

本研究案例共使用铁基类还原稳定化药剂(含亚铁离子、硫化物、磷酸盐等) 379t,药剂使用产生的碳排放占主处理单元碳排放量的 99.2%.统计文献中固化/稳定化案例使用不同药剂的碳排放情况可知,使用水泥时碳排放强度最大(0.795t CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> 污染土)<sup>[36]</sup>,其次是活性炭(0.554t CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> 污染土)与生物炭(0.159t CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> 污染土)<sup>[37]</sup>,碳排放贡献较小的是生石灰与海泡石(0.088t CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> 污染土)<sup>[38]</sup>、B01 型辅助添加材料(0.068t CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> 污染土)<sup>[20]</sup>、PFSC 药剂(0.053t CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> 污染土)<sup>[35]</sup>,铁基类材料的碳排放贡献处于中等水平.目前有很多学

者在研发新型固化/稳定化剂<sup>[39-40]</sup>,但缺乏工程案例和碳排放评估数据,成为绿色低碳材料研发的瓶颈.因此,还需进一步强化模拟计算和中小试实验来开展碳排放评估,以此筛选低碳、可靠的固化/稳定化材料.

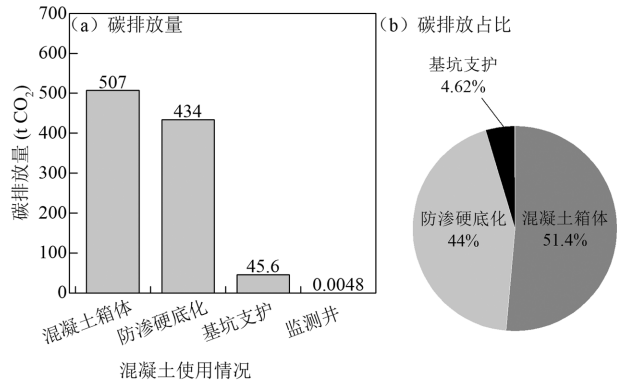


图 5 固化/稳定化+阻隔回填全过程中混凝土使用产生的碳排放量及占比

Fig.5 Contribution analysis of concrete-related carbon emissions in SSB life cycle

### 2.3 环境影响评估

由 22 类环境影响类型归类为三类终点影响(图 6)可知,固化/稳定化+阻隔回填过程对人体健康、自然资源和生态系统都有一定程度的影响.其中,对人体健康的影响为 4.86DALY,主要贡献来自细颗粒物形成(FP)和全球变暖-人体健康(GH),两者导致的伤残生命年数为 1.73DALY 和 1.69DALY,是其他影响因素的四倍以上;对自然资源的影响为 118780USD,主要贡献来自化石燃料开采的额外成本(112000USD);对生态系统的影响为 0.009species.yr,主要来自于全球变暖-陆地生态系统(GT)和陆地酸化(TA),两者导致的局部物种损失为 0.0051species.yr 和 0.0015species.yr.

对比农用地钝化技术案例(949.94kPt)<sup>[38]</sup>,本案例技术环境影响较低.从不同影响类别来看,整个风险管控过程对人体健康的影响最大(81.1kPt).从不同单元过程来看(图 7),主处理、阻隔回填和场地建造单元过程的环境影响贡献最大,这与碳排放的主要贡献单元过程一致,表明这些单元过程对碳排放和人体健康的影响有双重贡献.

以主处理单元为例,该单元因使用机械设备消耗化石燃料而导致的大量碳排放对全球变暖产生

了贡献,从而影响了人体健康;其次,清挖、搅拌和养护等操作产生的大量扬尘是细颗粒物的主要来源,也是影响人体健康的重要原因.根据《逸散性工业粉尘控制技术》计算得知,处理 9990m<sup>3</sup> 污染土约产生 478.02kg 扬尘,尽管施工过程中会使用雾炮机等设备减少扬尘,但并不能完全消除颗粒物对人体健康的影响.

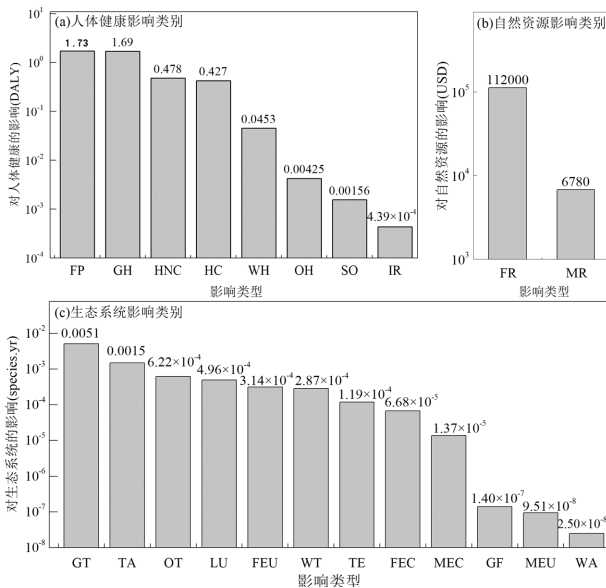


图 6 固化/稳定化+阻隔回填全过程三类终点环境影响结果

Fig.6 Characterization of three endpoint environmental impact categories in SSB life cycle

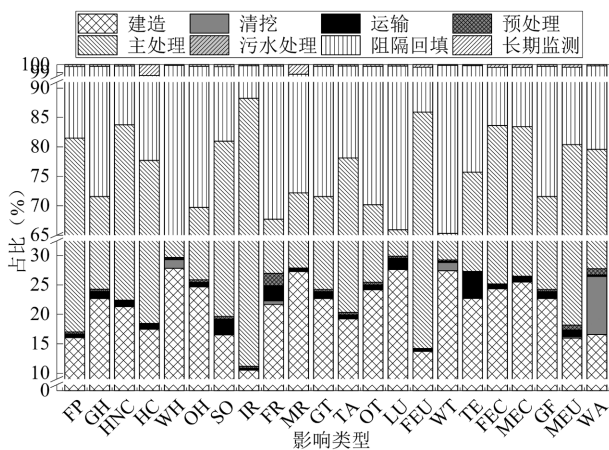


图 7 各单元过程产生的环境影响占比

Fig.7 Process contribution to environmental impact categories

### 2.4 敏感性和不确定性分析

根据敏感性分析结果可知(图 8),假设 5 项碳排放因子在±20%间变动时,混凝土生产和药剂生产

因子敏感性曲线的斜率较大,表明敏感性较高,其碳排放量的变幅分别在 1700~2095t 和 1771~2024t 之间,是影响全生命周期碳核算的重要因素,而机械用能、电力消耗和交通运输的敏感性都较低.

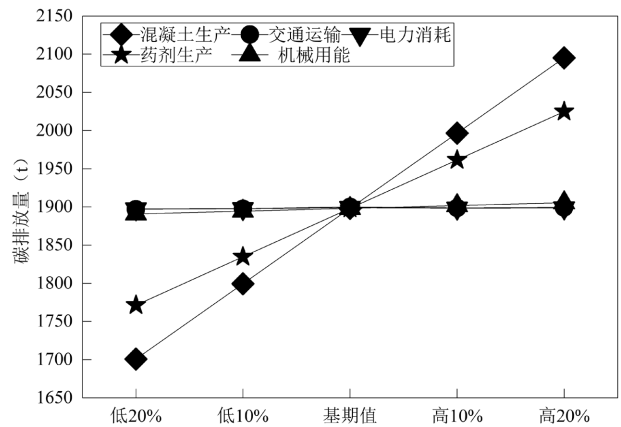


图 8 碳排放因子敏感性分析

Fig.8 Sensitivity analysis of carbon emission factors

不确定性分析表明,本研究中固化/稳定化+阻隔回填的碳排放平均值为 1895t,中间值为 1892t,95%置信区间为 1690~2055t.变异系数为 4.69%,波动性较小,表明碳排放核算结果的不确定性较低,碳排放核算结果具有一定的代表性(图 9(a)).综合环境影响评价不确定分析显示,综合评分平均值为 84.3kPt,95%置信区间为 67.9~103.6kPt.变异系数为 6.40%,波动性较小,表明环境影响评价的不确定性也在可接受范围内(图 9(b)).

### 3 结论

3.1 固化/稳定化+阻隔回填技术的碳排放强度为 0.190t CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> 污染土,其碳排放强度处于中等偏低水平,具有较明显的碳减排优势.

3.2 固化/稳定化+阻隔回填技术碳排放量最大的单元为主处理、建造和阻隔回填单元,关键碳排放因素是混凝土和药剂生产.因此,通过积极发展修复工厂模式、开拓固化/稳定化达标土壤的资源化利用方向、采用原位覆膜压实回填、开发低碳长效的固化/稳定化药剂等途径,是该技术碳减排的重要路径.

3.3 该案例的综合环境影响评价表明该固化/稳定化+阻隔回填过程对人体健康、生态系统和自然资源都造成了一定程度的影响,其中对人体健康影响最大.对环境贡献最大单元为主处理、阻隔回填

和建造单元。

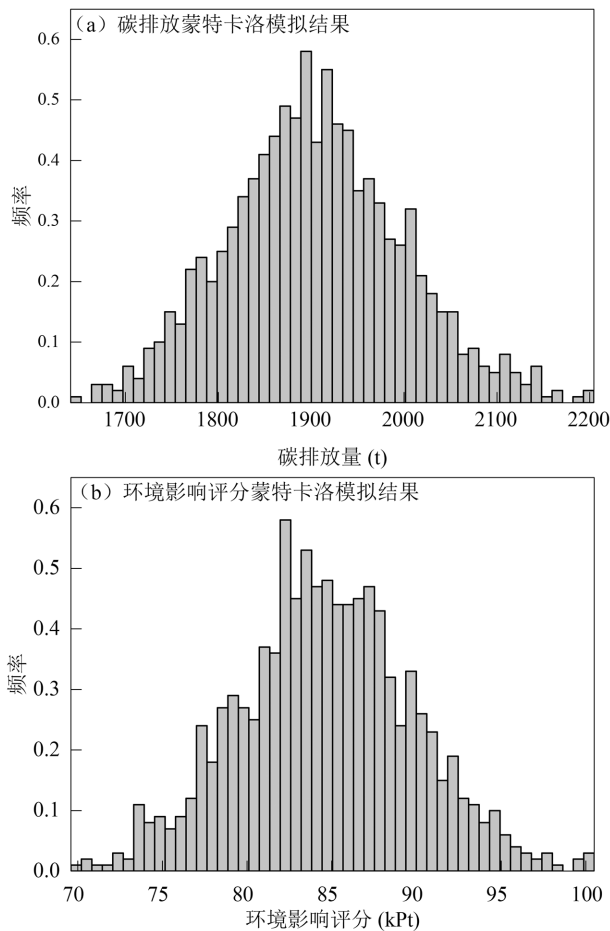


图9 碳排放量和环境影响评分蒙特卡洛模拟结果

Fig.9 Monte Carlo simulation results of carbon emissions and environmental impact scores

#### 4 展望

在国家倡导因地制宜、绿色低碳开展土壤污染治理的政策背景下,建议加快推动污染场地修复碳核算和绿色可持续评估体系构建,建立我国污染场地碳核算评估和全生命周期评估的清单数据库,统一评价标准和评价方法。

绿色可持续修复旨在污染场地达到修复目标的同时最大限度减少风险管控或修复过程的环境影响,所以需要在治理修复过程各阶段采用提高能源效率、减少材料使用、节约用水及减少温室气体排放的方法。但是除环境影响以外,绿色可持续修复还需要考虑治理修复对经济和社会方面的影响,以平衡环境效益最大化与社会和经济的成本和收益,便于管理机构、土地使用权和施工单位综合决策。

因此,基于投入产出全生命周期评价修复过程的环境、社会和经济效益来确定环境净效益也是未来开展绿色可持续评估的重要发展方向。

#### 参考文献:

- [1] Chang B B, Chen L. Land economic efficiency and improvement of environmental pollution in the process of sustainable urbanization: case of Eastern China [J]. Land, 2021,10(8):845.
- [2] 杨洁,叶春梅,司马菁珂,等.“双碳”目标下污染场地原位热处理技术发展趋势 [J]. 环境工程学报, 2022,16(11):3517-3529.
- [3] Yang J, Ye C M, Sima J K, et al. Discussion on development trend of in-situ thermal treatment technology for contaminated sites under dual-carbon target [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022,16(11):3517-3529.
- [4] 生态环境部.关于促进土壤污染风险管控和绿色低碳修复的指导意见 [EB/OL]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk05/202312/t20231219\\_1059420.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk05/202312/t20231219_1059420.html),2023-12-15/2024-09-06.
- [5] 蒋旭东,王丹,杨庆.碳排放核算方法学 [M]. 北京:中国社会科学出版社, 2021:302.
- [6] Jiang X D, Wang D, Yang Q. Carbon emission accounting methodology [M]. Beijing: China Social Sciences Press.
- [7] 龚先河,王健,范例,等.基于化学氧化和堆式热脱附技术修复污染土壤的环境足迹分析 [J]. 环境工程技术学报, 2024,14(5):1608-1616.
- [8] Gong X H, Wang J, Fan L, et al. Environmental footprint analysis of remediation of contaminated soil based on chemical oxidation and ex-situ thermal pile desorption technology [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024,14(5):1608-1616.
- [9] 肖萌,刘瑞平,李香兰,等.基于 SiteWise-(TM)工具的污染场地修复环境足迹分析 [J]. 中国环境科学, 2024,44(1):278-287.
- [10] Xiao M, Liu R P, Li X L, et al. Environmental footprint analysis of site remediation based on the SiteWise-(TM) [J]. Chinese Environmental Science, 2024,44(1):278-287.
- [11] 张琦峰,方恺,徐明,等.基于投入产出分析的碳足迹研究进展 [J]. 自然资源学报, 2018,33(4):696-708.
- [12] Zhang F Q, Fang K, Xv M, et al. Research progress on carbon footprint based on input-output analysis [J]. Journal of Natural Resources, 2018,33(4):696-708.
- [13] 童庆蒙,沈雪,张露,等.基于生命周期评价法的碳足迹核算体系:国际标准与实践 [J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2018,(1):46-57,158.
- [14] Tong Q M, Shen X, Zhang L, et al. Carbon footprint accounting systems based on life cycle assessment: international standards and practices [J]. Journal of Hua zhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2018,(1):46-57,158.
- [15] 杨宗帅,魏昌龙,宋昕,等.生命周期评价研究及其在我国土壤修复领域的应用进展 [J]. 土壤通报, 2023,54(4):966-977.
- [16] Yang Z S, Wei C L, Song X, et al. Development of life cycle assessment and its applications in soil remediation in China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023,54(4):966-977.
- [17] 许维通,王昆,宋广翰,等.有机污染土壤异位热脱附修复的碳足迹分析 [J]. 中国资源综合利用, 2024,42(11):208-212.
- [18] Xu W T, Wang K, Song G H, et al. Carbon footprint analysis of ex-situ thermal desorption remediation of organic contaminated soil [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2024,42(11):208-212.
- [19] Amponsah N Y, Wang J Y, Zhao L A review of life cycle greenhouse gas (GHG) emissions of commonly used ex-situ soil treatment technologies [J]. Journal of Cleaner Production, 2018,186:514-525.
- [20] 姜文超.污染场地热脱附技术的绿色低碳评价与措施研究 [J]. 环境污染与防治, 2023,45(8):1189-1194.

- Jiang W C. Research on green low-carbon assessment and measures for thermal desorption technology applied in contaminated site [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2023,45(8):1189-1194.
- [13] Chen C, Zhang X M, Chen J A, et al. Assessment of site contaminated soil remediation based on an input output life cycle assessment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,263(1):121422.
- [14] 陈汐昂,王文兵,李瑞飞,等. 场地修复异位热脱附碳排放核算、优化与预测 [J]. *环境工程学报*, 2024,18(4):1073-1082.  
Chen X A, Wang W B, Li R F, et al. Accounting, optimization and prediction of carbon emission in ex-situ thermal desorption for site remediation [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2024, 18(4):1073-1082.
- [15] 侯星宇,张芸,戚昱,等. 水泥窑协同处置工业废弃物的生命周期评价 [J]. *环境科学学报*, 2015,35(12):4112-4119.  
Hou X Y, Zhang Y, Qi Y, et al. Life cycle assessment of co-processing industrial waste in a cement kiln [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015,35(12):4112-4119.
- [16] 吴翠华,于晓华,高军政,等. 典型水泥窑协同处置废弃物的碳排放核算及碳减排分析 [J]. *环境工程*, 2023,41(7):30-36,60.  
Wu C H, Yu X H, Gao J Z, et al. Carbon emission accounting and reduction analysis of waste collaborative disposal in typical cement kilns [J]. *Environmental Engineering*, 2023,41(7):30-36,60.
- [17] Pang D J, Mao Y P, Jin Y, et al. Review on the use of sludge in cement kilns: mechanism, technical, and environmental evaluation [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023,172(Suppl):1072-1086.
- [18] 张群丽,谢海云,陈家灵,等. 重金属污染土壤修复固化/稳定化技术研究现状及存在问题分析 [J]. *环境保护科学*, 2024,50(3):96-102.  
Zhang Q L, Xie H Y, Chen J L, et al. Research status of heavy metal contaminated soil remediation by solidification/stabilization technology [J]. *Environmental Protection Science*, 2024,50(3):96-102.
- [19] 王磊. 固化稳定化技术修复化工厂污染土壤中的实验研究 [J]. *天津化工*, 2023,37(1):47-49.  
Wang L. Experimental study on the remediation of contaminated soil in chemical plants by solidification and stabilization technology [J]. *Tianjin Chemical Industry*, 2023,37(1):47-49.
- [20] 薛成杰,方战强. 土壤修复产业碳达峰碳中和路径研究 [J]. *环境工程*, 2022,40(8):231-238.  
Xue C J, Fang Z Q. Path of carbon emission peaking and carbon neutrality in soil remediation industry [J]. *Environmental Engineering*, 2022,40(8):231-238.
- [21] 孟豪,董璟琦,张红振,等. 污染场地风险管控碳排放计算方法及案例分析 [J]. *中国环境科学*, 2023,43(S1):368-375.  
Meng H, Dong J Q, Zhang H Z, et al. Calculation method and case analysis of carbon emissions for risk control and management of contaminated sites [J]. *Chinese Environmental Science*, 2023,43(S1):368-375.
- [22] Liang T, Huo M C, Yu L, et al. Life cycle assessment-based decision-making for thermal remediation of contaminated soil in a regional perspective [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023,392:136260.
- [23] Peng H, Wang B F, Yang F L, et al. Study on the environmental effects of heavy metals in coal gangue and coal combustion by ReCiPe 2016 for life cycle impact assessment [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2020,48(11):1402-1408.
- [24] Huijbregts M A J, Steinmann Z J N, Elshout P M F, et al. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016,22(2):138-147.
- [25] 刘含笑,吴黎明,林青阳,等. 碳足迹评估技术及其在重点工业行业的应用 [J]. *化工进展*, 2023,42(5):2201-2218.  
Liu H X, Wu L M, Lin Q Y, et al. Carbon footprint assessment technology and its application in key industries [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023,42(5):2201-2218.
- [26] 李青青,苏颖,尚丽,等. 国际典型碳数据库对中国碳排放核算的对比分析 [J]. *气候变化研究进展*, 2018,14(3):275-280.  
Li Q Q, Su Y, Shang L, et al. Comparison analysis of China's emissions accounting by typical international carbon databases [J]. *Climate Change Research*, 2018,14(3):275-280.
- [27] 生态环境部. 中国区域电网二氧化碳排放因子研究(2023) [EB/OL]. <https://img54.hbzhan.com/4/20231030/638342598086069100426.pdf>, 2023-10-27/2024-09-06.
- [28] Zhang X X, Xu K L. Statistical data-based prediction of carbon dioxide emission factors of China's power generation at carbon peak in 2030 [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023,51:103633.
- [29] 生态环境部. 中国产品全生命周期温室气体排放系数集(2022) [EB/OL]. [https://www.caep.org.cn/sy/tdftzhyjzx/zxdt/202201/t20220105\\_966202.shtml](https://www.caep.org.cn/sy/tdftzhyjzx/zxdt/202201/t20220105_966202.shtml), 2022-01-05/2024-09-06.
- [30] Intergovernmental panel on climate change. IPCC emission factor database [EB/OL]. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>. 2023-06-06/2024-09-06.
- [31] 亿科环境科技公司, 四川大学建筑与环境学院. 中国生命周期基础数据库 [EB/OL]. <https://www.ike-global.com/#/products-2/chinese-lca-database-clcd>, 2021-09-26/2024-09-06.
- [32] Vocciante M, D'Auris A d F, Franchi E, et al. CO<sub>2</sub> footprint analysis of consolidated and innovative technologies in remediation activities [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,297(12):126723.
- [33] Zheng L R, Li Y Z, Qian C, et al. Carbon emission evaluation of roadway construction at contaminated sites based on life cycle assessment method [J]. *Sustainability*, 2023,15(16):12642.
- [34] 高丹,张帆,曹正操. 修复工厂模式研究及其在我国土壤修复领域的应用进展 [J]. *广东化工*, 2023,50(11):171-173.  
Gao D, Zhang F, Cao Z C, et al. Research on the remediation plant model and its application in the field of the contaminated soil remediation in China [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2023,50(11):171-173.
- [35] 周实际,孙慧洋,李颖臻,等. 污染土壤稳定化碳排放计算方法及案例研究 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(10):4840-4848.  
Zhou S J, Sun H Y, Li Y Z, et al. Carbon emission calculation method for contaminated soil stabilization and case study [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(10):4840-4848.
- [36] Gallagher P M, Spatari S, Cucura J. Hybrid life cycle assessment comparison of colloidal silica and cement grouted soil barrier remediation technologies [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 250-251:421-430.
- [37] Hou D Y, Gu Q B, Ma F Y, et al. Life cycle assessment comparison of thermal desorption and stabilization/solidification of mercury contaminated soil on agricultural land [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016,139:949-956.
- [38] 肖萌,孟豪,董璟琦,等. 农田污染钝化修复环境影响定量评估方法与案例分析 [J]. *中国环境科学*, 2023,43(7):3571-3581.  
Xiao M, Meng H, Dong J Q, et al. Quantitative assessment methodology and case studies on environmental impacts of passivation remediation of agricultural land pollution [J]. *Chinese Environmental Science*, 2023,43(7):3571-3581.
- [39] Chen T, Wang L H, He B, et al. Study on the solidification/stabilization of cadmium-contaminated soil by red mud-assisted blast furnace slag under excitation conditions [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 435(3/4):140505.
- [40] Jiang Q, He Y M, Wu Y L, et al. Solidification/stabilization of soil heavy metals by alkaline industrial wastes: A critical review [J]. *Environmental Pollution*, 2022,312(4):120094.

**作者简介:** 张静宇(2000-),女,河南安阳人,安徽大学硕士研究生,主要从事污染场地绿色可持续修复研究.Zhang\_jing\_yu\_zjy@163.com.