

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2021.0112

潘思涵,宋易南,汪军,等.2021.耦合健康风险与生命周期评价的场地修复环境经济影响评估[J].环境科学学报 41(10):4306-4314

Pan S H, Song Y N, Wang J, et al. 2021. Coupling health risk assessment and life cycle assessment for environmental and economic impact assessment of site remediation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 41(10): 4306-4314

耦合健康风险与生命周期评价的场地修复环境经济影响评估

潘思涵¹, 宋易南¹, 汪军², 王健², 侯德义^{1,*}

1. 清华大学环境学院, 北京 100084

2. 重庆市生态环境科学研究院, 重庆 401147

摘要: 我国污染场地数量众多, 对当地环境和健康安全造成了巨大威胁, 亟待开展治理修复, 同时也需要关注修复过程的绿色可持续性. 本文基于绿色可持续修复(GSR)的理念, 提出了健康风险评价(HRA)和生命周期评价(LCA)耦合的评估框架, 用于计算结合健康风险和修复二次环境影响的净环境效益(NEB), 并以中国西南地区某多环芳烃和汞污染的工业场地为例, 在现行的修复目标制定框架内, 对不同修复目标下的NEB进行了评估. 结果表明, 在不同权衡选择下, 案例最佳的修复目标带来的NEB是直接选择筛选值目标的1.6~15倍, 单位经济投入带来的NEB是直接选择筛选值的3~7倍. 决策者可应用提出的综合评估框架, 平衡当地环境质量改善和修复过程的二次影响, 以提高场地修复工程的环境经济可持续性.

关键词: 土壤污染; 多环芳烃; 汞; 重金属; 污染场地修复; 绿色可持续修复

文章编号: 0253-2468(2021)10-4306-09

中图分类号: X196

文献标识码: A

Coupling health risk assessment and life cycle assessment for environmental and economic impact assessment of site remediation

PAN Sihan¹, SONG Yinan¹, WANG Jun², WANG Jian², HOU Deyi^{1,*}

1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084

2. Chongqing Academy of Ecological and Environmental Sciences, Chongqing 401147

Abstract: A large number of contaminated sites in China pose a great threat to the local environment, health and safety. It is urgent to carry out remediation and pay attention to the sustainability of remediation processes. Based on the concept of green and sustainable remediation (GSR), this study proposes an assessment framework, coupling health risk assessment (HRA) and life cycle assessment (LCA) to calculate the net environmental benefits (NEB) associated with health risks and secondary environmental impacts of site remediation. A case study was conducted at an industrial site polluted by polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and mercury in Southwest China. The assessment framework was established to select the most appropriate remediation goal. NEBs of different remediation goals were calculated. The results show that under a wide range of scenarios, if the 'best' remediation goal is chosen, the NEB can increase by 1.6~15 times and the NEB brought by unit economic investment can increase by 3~7 times in comparison with directly selecting the screening value as the remediation goal. We conclude that decision makers can apply the proposed comprehensive assessment framework and achieve a better balance between local environmental quality improvement and the secondary impact of remediation processes in order to achieve better environmental and economic sustainability.

Keywords: soil contamination; PAHs; mercury; heavy metal; site remediation; green and sustainable remediation

1 引言(Introduction)

土壤环境质量是生态环境和人居安全重要的组成部分, 土壤的可持续管理与联合国提出的多条可持续发展目标(SDG), 包括粮食安全、用水安全、

生物多样性等都息息相关(Hou *et al.*, 2020a; 2020c). 2014年发布的《全国土壤污染调查公报》显示, 在调查的630万km²的土壤中超标点位率达16.1%(环境保护部, 2014). 我国城市中的工业企业改造、搬迁后, 遗留的污染地块据估计超过50万个

收稿日期: 2020-12-25

修回日期: 2021-03-18

录用日期: 2021-03-18

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2018YFC1801300)

作者简介: 潘思涵(1998—), 女, E-mail: sihanpan@outlook.com; * 责任作者, E-mail: houdeyi@tsinghua.edu.cn

(宋昕等, 2015; 李雪等, 2019). 随着《土壤污染防治行动计划》、《土壤污染防治法》等政策法规的出台, 我国开展了大量的污染场地修复工程实践. 有研究表明, 若采取不当的修复方式, 一方面可能带来严重的二次污染事件(钟心植, 2018), 另一方面容易导致修复不足或过度修复的问题(侯德义等, 2016). 因此, 在解决土壤污染问题的同时, 也需要关注场地修复的可持续性(侯德义等, 2016; Rizzo *et al.*, 2016).

绿色可持续修复 (Green and Sustainable Remediation, GSR) 是近十几年来国际修复界重要的进展, 也是我国修复行业的一个重要发展方向(朱雪强等, 2013). GSR 最早是由美国州际技术与监管委员会 (ITRC) 在 2011 年提出的, 其含义是通过合理地选择修复方式以及使用资源, 使得场地修复工作能够达到对人类健康和环境的净收益最大化 (ITRC, 2011). 与 GSR 相似的概念包括“绿色修复” (Green remediation) 和“可持续修复” (Sustainable remediation), 前者更强调用自然的方法进行修复, 减少修复过程的环境足迹 (USEPA, 2008), 后者更强调对于场地修复需要综合评估环境、经济和社会的影响, 保障当代人和子孙后代的可持续发展 (Hou *et al.*, 2020b), 而“绿色可持续修复”则综合这两者的概念, 提出要因地制宜选择工艺流程, 平衡社区目标、经济影响和净环境影响以减轻对受体的污染风险 (Hou *et al.*, 2020b). 如今社会各界对于环境可持续发展有越来越多的认同和追求, 污染地块修复的绿色可持续性也逐渐得到重视 (中国环境保护产业协会, 2020).

目前基于 GSR 思想的相关研究主要集中在土壤修复技术和工程实施方面 (胡新涛等, 2012; Huysegoms *et al.*, 2018), 鲜有对修复目标制定的评估和优化研究 (Hou *et al.*, 2017). 相比于比选确定修复技术方案, 将 GSR 的理念融入修复项目更前期的阶段, 如修复目标的制定, 更有利于提高修复的

可持续性 (Rizzo *et al.*, 2016). 我国已初步建立了基于风险管控的场地修复体系 (姜林等, 2017), 针对超过《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB36600—2018) 规定筛选值的土壤污染物, 需要通过风险评估确定修复目标. 然而在实际操作中, 可能出现诸如直接选择筛选值作为目标的情况 (王斌等, 2018; 周友亚等, 2019). 欧美国家的污染场地修复经历了 40 年的发展, 在修复目标确定方面的经验有一些值得借鉴之处. 例如, 荷兰对于场地类别的划分和管理非常精细, 同时强调风险管控而不是彻底清除污染 (魏旭, 2018); 美国在确定污染地块的修复目标值方面有一个不断优化的过程, 其可接受的致癌风险水平为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$, 具体修复目标和方案是随着调查和可行性研究的深入逐步优化再确定的 (王斌等, 2018).

综上, 基于 GSR 的理念, 如何通过修复目标的选择平衡土壤修复带来的效益和修复本身造成的二次环境影响值得进一步研究. 因此, 本研究旨在提出一种量化评估模型, 用于综合评价不同修复目标下场地修复的环境经济效益, 并进行案例验证分析.

2 研究案例与方法 (Case study and methods)

2.1 场地和修复方案

2.1.1 场地概况 本案例地块位于中国西南地区, 原为冶炼行业用地. 厂内主要生产设备、机械设施均已拆除. 场地地层主要由第四系人工填土、第四系粉质粘土层、侏罗系中统沙溪庙组基岩层组成. 自然条件下, 该场地地下水补给主要为大气降雨, 勘察过程中未发现稳定地下水位. 按照规划, 修复后的场地将作为居住用地. 根据场地调查结果, 整个场地中需要进行治理修复的污染物包括: 苯并 [a] 芘、苯并 [a] 蒽、苯并 [b] 荧蒽和重金属汞. 场地中以有机污染土壤为主, 也有少量有机物与汞复合污染的土壤. 场地浓度平均值见表 1.

表 1 采样点监测浓度平均值和修复目标设置值

Table 1 Mean value of sampling points and remediation goals

污染因子	平均浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	目标 1/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	目标 2/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	目标 3/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	目标 4/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	目标 5/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	目标 6/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
苯并 [a] 芘	2.95	5.5	2.2	1.1	0.55	0.3	0.2
苯并 [a] 蒽	3.79	55	22	11	5.50	2.0	1.0
苯并 [b] 荧蒽	3.53	55	22	11	5.50	2.0	0.6
汞	0.83	33	18	12	8.00	4.0	1.5

注: 1) 目标 1 采用 GB36600—2018《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准 (试行)》第一类用地的管制值; 2) 目标 4 采用 GB36600—2018《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准 (试行)》第一类用地的筛选值; 3) 目标 6 采用污染地块所处地区的地方标准中居住用地的筛选值.

2.1.2 修复目标设置 土壤修复目标的设定参考国家和地方的土壤环境质量标准或风险评估标准.按照现行标准要求,若污染物浓度高于标准中给出的管制值,必须进行修复;若低于管制值但高于筛选值,则需要进行评估,确定后续修复或管控工作;若低于筛选值,则认为风险可接受无需进行修复.为了研究不同修复目标下的修复工程的环境经济影响,在可能的修复目标范围内设置了6个修复目标,具体数值列于表1中.

根据场地调查得出的污染物浓度分布图,用“以直代曲”的原则,划出不同修复目标下的修复区域,从而计算出实际场地的修复方量.结果显示,在较“宽松”的修复目标下(目标1~3),只需对有机物污染土壤进行修复;而趋于严格的修复目标(目标4~6)则需要修复有机污染土壤以及汞和有机物复合污染土壤,待修复的土壤方量详见表2.

2.1.3 修复技术路线 根据修复方案设计,选择异位化学氧化修复技术修复有机污染土壤;异位热脱附修复技术修复复合污染土壤.异位化学氧化包括筛分预处理、土壤与氧化药剂混合、暂存养护3个阶段;热脱附主要过程包括筛分预处理(降低含水率),之后应用燃气燃烧热传导技术进行热脱附,天然气燃烧的烟气进入加热管与土壤堆体换热,使污染物在高温下脱除.修复后的土壤回填,污染物以蒸气形式脱附后用活性炭吸附有机物和汞蒸气.此外,预处理环节投入的药剂为氧化钙,氧化过程药剂为过硫酸钠.预处理和热脱附环节为主要用水环节,分别用于调整土壤含水率以及冷凝.废水主要通过加入絮凝剂沉淀进行处理,达标后排入管网.预处理阶段筛分出的建筑垃圾及石块等大粒径物料清洗后回填.生活垃圾、污泥和废弃活性炭(危废)分别外运并在有资质的处理厂焚烧处置.

2.2 可持续性评估方法

2.2.1 总体评估框架 进行GSR评估需要综合考虑修复污染土壤带来的直接健康效益和二次环境影响,也需要考虑经济投入和利益相关方的参与(Hou *et al.*, 2020a).生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)常用于评价修复全生命周期,即修复各个环节,包括场地临建、土壤开挖、预处理、修复过程、废气废水和固废处置过程的环境影响,从而进行可持续性评估(Ridsdale *et al.*, 2016).有研究(Visentin *et al.*, 2019)分析了2007—2018年在场地修复领域利用LCA的发表文献,发现近几年研

究数量正处于上升阶段.本研究参考SURF-US (Favara *et al.*, 2011)提出的针对场地修复工程的LCA导则,该导则在ISO标准(ISO, 2006)的基础上进行了细化.流程包括:确定评估目标、范围和功能单元、设置系统边界、建立生命周期清单、进行环境影响评价、不确定性和敏感性分析、结果阐释等.健康风险评估(Health Risk Assessment, HRA)可以直接用于评估污染环境介质导致受体增加的健康风险(陈月芳等, 2019),也可用于确定污染场地修复目标.早在1999年就有应用案例(Swartjes, 1999)并且至今仍有发展和应用(张厚坚等, 2010;姜林等, 2013).

传统的修复决策中缺乏对健康风险和生命周期环境影响的综合考虑,故本研究以基于LCA与HRA结合的方法建立评估框架.耦合LCA和风险评估是研究者长期关注的问题,有的耦合程度较深(如计算层面),有的耦合程度较浅(如仅结合结果进行半定量的分析).结合二者的局限性主要在于两种方法的关注环节和评估目标有所不同,较难直接比较.尽管如此,结合两种评估方法有助于全面地描述事物对于人体健康和环境的影响(Guinée *et al.*, 2017).本研究提出的综合评价可持续性的方法见图1.

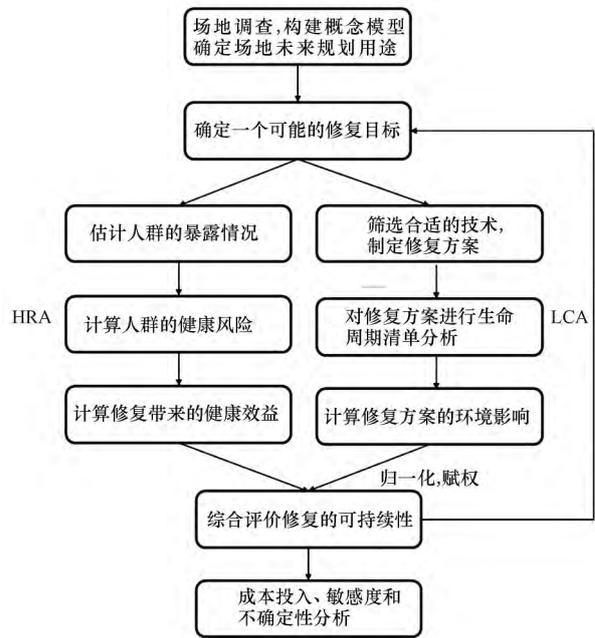


图1 耦合LCA和HRA的评估框架

Fig.1 Framework coupling LCA and HRA

本研究首先对目标场地确定不同的修复目标,

设定相应的修复方案,之后分别计算出场地修复带来的积极的直接环境影响(健康风险的降低)和修复过程带来的负面的二次环境影响,再通过赋权的方式计算净环境效益,评价修复方案的可持续性。此外,评估框架中引入了利益相关方的决策,也讨论了成本投入以及敏感性分析。

2.2.2 生命周期评价(LCA) ①评估目标和范围 本次生命周期评估目标为比较不同修复目标下,修复相应划定的受污染土壤带来的环境影响。功能单元分别为修复某一目标下划定的污染土壤方量至该目标设定值,基准流为相应方量的修复完成的土壤。例如目标1情景的功能单元为:修复 346 m^3 土壤使得苯并[a]芘、苯并[a]蒽、苯并[b]荧蒽和汞的浓度分别不高于 5.5 、 55 、 55 和 $33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;基准流为 346 m^3 修复完成的土壤,考虑时间周期 50 年,以此类推。处理流程和系统边界如图 2 所示。本次评估考虑了修复流程主要消耗的能源、材料、试剂(2.1.3

节)、用水、交通运输环节,废水、废气处理环节,和最终产生的固废处置环节。显示在图 2 中的内容均考虑在边界内,未显示的上下游过程不计入评估内容。

②生命周期清单数据来源 本研究生命周期清单的数据主要来自于修复方案设计,方案中没有的数据通过以下渠道获取:①对于部分设备的参数,询问相关设备供应商;②对于场地临建、废水处理等环节的参数,参考类似案例中的数据;③对于热脱附时长、活性炭吸附容量等技术相关参数,参考文献研究(罗锦英,2009;杨益,2011;葛欣宇,2016;勾立争等,2018;张学良等,2018;沈宗泽等,2019;杨玉洁等,2019)。不同目标下的关键数据清单列于表 2 中。其中,由于修复过程中土壤、材料、试剂等都涉及交通运输,于表中单独将总交通运输消耗列出,假设均由货车陆运,主要消耗为柴油。

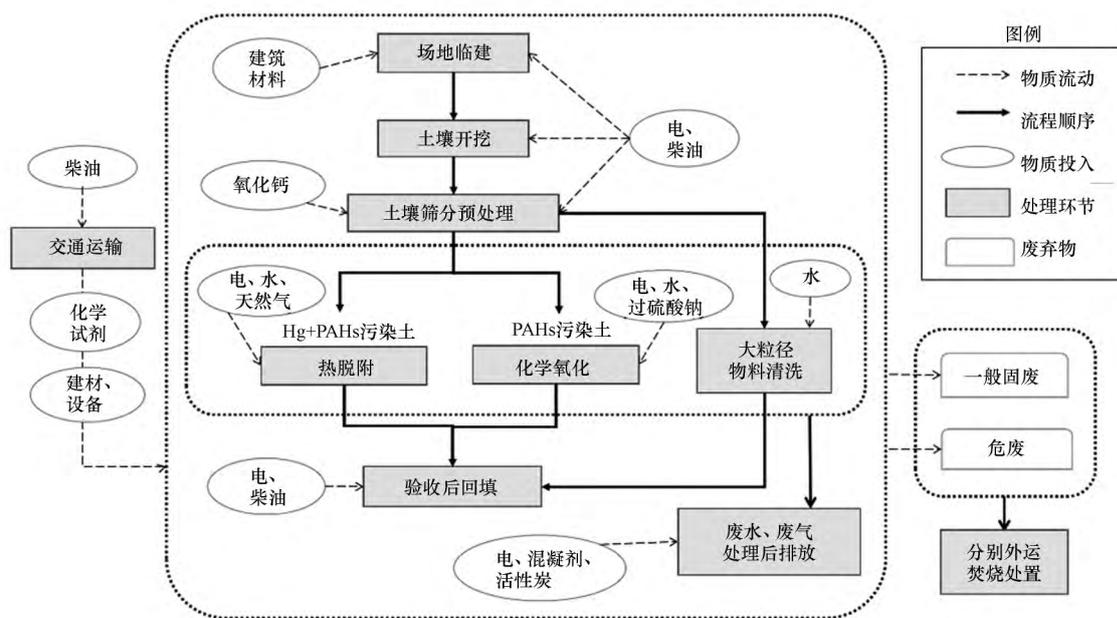


图 2 生命周期评价的系统边界

Fig.2 System boundary of LCA

③生命周期环境影响评价 本研究使用 openLCA 1.10.2 软件,选择欧盟 Environmental Footprint 数据库以及对应的方法计算环境影响。该软件为开源软件,Environmental Footprint 为免费数据库,因此使用该软件和数据库可以为研究者和从业者提供便利,能够有更广泛的受众(Ciroth, 2007),有已发表的研究使用该软件进行生命周期

评价(Grudziński *et al.*, 2016)。本研究采用的环境影响评价方法是基于 USEtox (Fantke *et al.*, 2017) 和 Impact2002+ (Jolliet *et al.*, 2003) 发展而来,另有相应的归一化方法和赋权方法(Serenella Sala *et al.*, 2017; Serenella *et al.*, 2018),使不同影响类型的结果转化为可比较的无量纲形式并得到一个综合得分。

表 2 不同目标下待修复土壤方量和生命周期清单关键数据

Table 2 Soil volume and essential data of life cycle inventory under different remediation goals

项目	子项目	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4	目标 5	目标 6	单位
待修复有机污染土壤		346.0	695.7	1871.4	4863.8	5107.0	3408.0	m ³
待修复复合污染土壤		0	0	0	385.8	405.1	2612.0	m ³
能源	电* †	4170.0	8313.0	22360.5	86244.6	90420.0	210888.5	kWh
	柴油(挖掘设备) †	3679.8	7399.2	19903.0	55831.4	58623.0	64024.2	L
	天然气*	0	0	0	19279.8	20146.4	116099.4	GJ
水*		40.00	69.57	187.14	6044.96	6311.21	33721.99	m ³
材料和试剂	混凝土 †	240.0	288.0	432.0	672.0	672.0	1036.0	t
	HDPE †	1425.0	2137.5	2850.0	4275.0	4275.0	5700.0	kg
	PVC †	450.0	675.0	900.0	1350.0	1350.0	1800.0	kg
	氧化钙*	5190.6	10435.7	28071.1	78744.2	82681.4	90299.2	kg
	过硫酸钠*	23902.0	33462.7	37366.0	31213.7	32619.3	21262.6	kg
废弃物	一般固废 ‡	0.52	0.52	0.69	1.56	1.56	2.71	t
	废弃活性炭 ‡	0	0	0	0.4	4.0	29.4	t
交通运输	柴油(货车运输) †	2046.9	2097.2	2236.7	7753.2	7767.9	13234.2	L

注: * 表示数据来源于修复方案设计资料; † 表示数据来源于相似案例; ‡ 表示数据来源于文献.

2.2.3 健康风险评价 (HRA) 《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(以下简称《导则》)中介绍了详细的健康风险计算方法(生态环境部, 2019). 本研究计算经口摄入土壤、皮肤接触土壤、吸入土壤颗粒物、以及吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物 4 种暴露途径. 由于该地块的污染物总体深度较浅, 不超过 1.5 m, 故不考虑来自下层土壤的气态污染物影响; 由于该地区未见稳定地下水位, 故也不考虑地下水中的污染物影响. 根据地块调查的结果, 表层土壤厚度对于 3 种有机污染物取 150 cm, 对于汞取 50 cm, 其余参数都选取《导则》中的推荐值.

2.2.4 净环境效益 (NEB) 计算 为了耦合计算场地修复工程的环境影响以及修复工程带来的健康效益, 本文中 LCA 和 HRA 的结果均以伤残寿命调整年(Disability adjusted life years, DALYs)表示, 意为因过早死亡而丧失的寿命年数和因残疾而丧失的可用于生产的寿命年数之和(WHO, 2021). LCA 的结果中, 人体健康影响以相对毒性单位(comparative toxic units, CTUh)表示, 意为人口中增加的发病数, 该结果可以通过参数变换转换为 DALYs (Fantke *et al.*, 2017). 健康风险的计算主要参考文献中报道的多环芳烃类和汞在不同暴露情形下导致的 DALYs (Steckling *et al.*, 2017; Goel *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2021), 再根据本场地实际的污染物浓度降低值、暴露途径以及影响人数调整得到.

NEB 计算方法如式(1)所示.

$$NEB = S_{HRA} - \frac{S_{LCA}}{f} \quad (1)$$

式中, S_{HRA} 为修复工程带来的健康效益 (DALYs); S_{LCA} 为修复工程的环境影响得分 (DALYs); NEB 为净环境效益 (DALYs).

f 为可变参数 $f > 0$, 它表示决策者认为修复带来的二次环境影响和当地环境质量提升(健康风险降低)改善的相对重要程度相差几倍, f 越大则代表决策者认为当地环境质量越重要. 有类似研究中比较二次环境影响和当地环境质量, 提出可能的参数 f 为 1~256 (Hou *et al.*, 2017). 作为一主观参数, 本文将讨论其取值对结果带来的影响.

2.2.5 经济投入计算 本研究估算了不同目标下的经济投入, 包括固定资本支出与运行支出, 根据项目技术方案中对各项技术综合成本的估算. 取异位化学氧化的综合单位成本为 1500 元·m⁻³, 异位热脱附的综合单位成本为 2500 元·m⁻³, 按照表 2 中所列的待修复土壤方量估算总经济投入.

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 不同修复目标下的二次环境影响

3.1.1 生命周期环境影响评价结果 经归一化后的不同影响类型的二次环境影响如图 3 所示. 修复目标趋于严格导致了环境影响的显著上升, 修复从目标 3~目标 4, 各种环境影响约增长了 2~7 倍, 主要原因是热脱附技术的引入用于修复汞污染土壤.

修复至目标 4~目标 6 的环境影响增长的主导因素则是按照修复目标划定的修复方量的增加.其中,从目标 5~目标 6 标准进一步严格带来热脱附修复方

量增加了 5 倍以上,因此环境影响也大大增加.Hou 等(2017)的研究也表明修复目标的选择会极大地影响修复工程的二次环境影响.

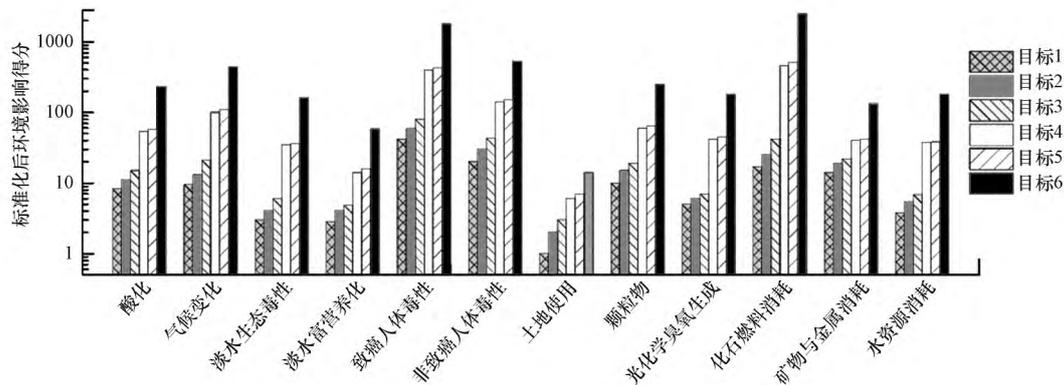


图 3 归一化后不同修复目标的二次环境影响 (midpoint)

Fig.3 Secondary environmental impact (midpoint) of the six remediation goals after normalization

在不同影响类型中,化石能源的消耗是最主要的,其次是人体毒性、酸化、气候变化等,也有研究报道了类似结果(Lemming *et al.*, 2010).而在投入项目对于环境指标的贡献方面,对目标 1~3 来说,化学氧化过程中投入的过硫酸钠在各个指标上都是贡献最大的,约为 40%~50%,之后是柴油(用于交通运输和土壤开挖)等项目;目标 4~6 中,热脱附技术投入的天然气是贡献最大的,约为 40%~70%.在类似研究中,尽管场地污染物和修复技术不尽相同,但气候变化、化石能源消耗和人体毒性均是占比较大的环境影响类型,且该部分影响主要来自于修复系统运行环节,尤其是在运用到热脱附技术的方案中,热脱附环节会带来巨大的能源投入(Lemming *et al.*, 2010; 胡新涛 *et al.*, 2012; Hou *et al.*, 2017).也有其它研究结果显示,占地、产生废弃物等因素的贡献更加重要(Cappuyns *et al.*, 2011; Cappuyns, 2013),这可能是场地、修复方案或模型建立的区别导致的.

3.1.2 二次环境影响得分 不同目标下修复工程的二次环境影响和修复单位方量土壤的二次环境影响结果如图 4 所示.随着修复标准逐渐严格,环境影响上升,但修复单位方量土壤的环境影响呈先下降后上升变化趋势.尤其是在最严格的修复目标 6 情况下,单位修复方量的环境影响是修复至目标 5 的 4 倍左右,主要原因是目标 6 相比目标 5 需要热脱附处理的土方量占比大大增加,从 7.3% 增加至

43.4%.比较热脱附环节和化学氧化环节的二次环境影响,前者主要表现在化石能源投入方面,而后者主要来自于化学试剂的生产.在修复目标一致的假设下,热脱附环节的二次环境影响比化学氧化更大.因此,将修复二次环境影响纳入考虑,将可能影响修复方案设计决策.

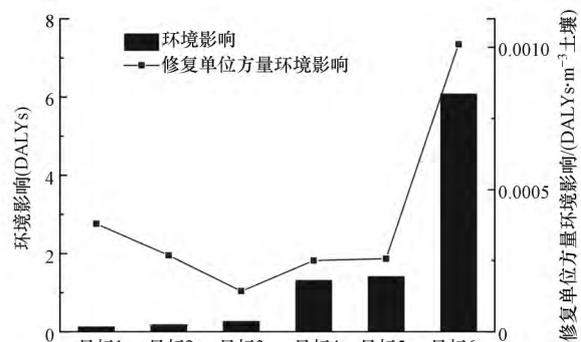


图 4 不同目标下场地修复的二次环境影响

Fig.4 Secondary environmental impacts of remediation projects under different goals

3.2 不同修复目标的 HRA 结果

以 DALYs 为单位的 HRA 结果列于表 3 中,表示修复至该目标能够降低的健康风险.对于前 4 个目标而言,汞都无需进行修复或去除的量很少,故修复苯并[a]蒽、苯并[b]荧蒽对于健康风险改善贡献较大;而目标 5 和目标 6 下汞的去除逐渐成为健康风险改善的主要贡献部分.

表 3 不同目标下 HRA 计算结果 (DALYs)

项目	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4	目标 5	目标 6
苯并[a]芘	0.102	0.119	0.128	0.148	0.161	0.165
苯并[a]蒽	0.122	0.293	0.332	0.349	0.358	0.370
苯并[b]荧蒽	0.135	0.155	0.176	0.186	0.192	0.194
汞	0	0	0	0.009	0.160	1.218
总和	0.358	0.568	0.637	0.692	0.871	1.947

3.3 NEB 结果与目标推荐

不同目标和参数 f 下的 NEB 结果列于表 4. f 越大, 则代表决策者越不重视修复的二次环境影响, 越倾向于选择严格的修复标准. 通常决策者会选择 $f \geq 1$, 即不会认为二次环境影响比当地环境质量更重要. 若结合对于二次环境影响的权衡, 盲目选择严格的修复目标有可能导致净环境效益为负, 以往研究也有类似结果 (Lemming *et al.*, 2013), 此时更推荐选择“温和”的修复目标 (Cundy *et al.*, 2013). 针对本案例, 在 $1 < f < 5$ 时, NEB 最优的修复目标为目标 2 或 3, 介于国家管制值和筛选值之间. 当 $f \geq 5$ 时, 最优的修复目标低于国家筛选值. 以 $2 \leq f \leq 4$ 区间为例, 选择最佳的修复目标带来的 NEB 是直接选择筛选值 (目标 4) 的 1.4~15 倍.

表 4 不同修复目标和参数 f 下的净环境效益 (DALYs)

f	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4	目标 5	目标 6
1	0.227	<u>0.381</u>	0.370	-0.623	-0.545	-4.136
1.5	0.271	0.443	<u>0.459</u>	-0.185	-0.073	-2.108
2	0.293	0.474	<u>0.503</u>	0.034	0.163	-1.094
2.5	0.306	0.493	<u>0.530</u>	0.166	0.305	-0.486
3	0.315	0.505	<u>0.548</u>	0.254	0.399	-0.080
3.5	0.321	0.514	<u>0.560</u>	0.316	0.467	0.209
4	0.326	0.521	<u>0.570</u>	0.363	0.517	0.427
4.5	0.329	0.526	0.577	0.400	0.556	<u>0.596</u>
5	0.332	0.530	0.583	0.429	0.588	<u>0.731</u>
6	0.337	0.536	0.592	0.473	0.635	<u>0.934</u>
10	0.345	0.549	0.610	0.561	0.730	<u>1.339</u>
20	0.352	0.558	0.623	0.626	0.800	<u>1.643</u>

注: 下划线标注的为在选定 f 下净环境效益最高的修复目标.

每 10 万元经济投入带来的 NEB 结果如图 5 所示. 其中单位投入获得 NEB 最高的修复目标是介于筛选值和管制值之间的目标 2, 其单位投入带来的 NEB 是以筛选值为修复目标 (目标 4) 的 3~7 倍. 随着目标趋于严格, 经济投入的边际效益有所下降. 目标 5~目标 6 的变化趋势与 f 的取值有关. f 越大, 表

示当地环境质量改善越重要, 严格的修复目标就更有优势.

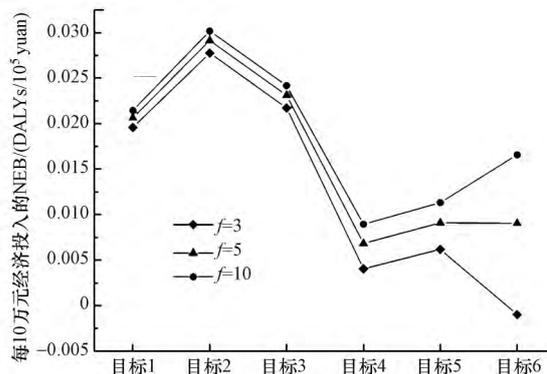


图 5 每 10 万元经济成本带来的净环境效益

Fig.5 NEBs brought by per 100000 yuan of economic cost

3.4 敏感性分析

在众多环境影响类别中, 参考归一化结果以及赋权过程中的重要程度, 选择气候变化、化石燃料消耗以及总环境得分做详细分析. 过硫酸钠和天然气投入分别是化学氧化和热脱附物质流的关键部分, 初步设计的过硫酸钠和天然气投入量较为保守, 因此假设过硫酸钠量为原始投加量的 0.75 倍和 0.5 倍, 天然气的量为原始投入量的 0.75 倍时仍然修复达标, 此时环境指标的影响结果如表 5 所示. 各个目标原始条件下相对得分为 100%, 对于目标 1~3, 如果投入 0.5 倍的过硫酸钠, 总环境影响得分可以降低为原始结果的 71.8%~79.1%; 对于目标 4~6, 若投入 75% 的天然气可以使总环境影响得分降为原先的 86.2%~90.2%. 有研究 (Lemming *et al.*, 2013) 也得出了类似的结论, 通过对原位热脱附案例的 LCA 分析发现改用清洁能源可以有效减少电力投入部分的环境影响. 可见, 进行 LCA 分析可以为修复工程改善环境效益提供方向.

而这些投入量的变化对于目标之间的相对比较没有很大影响, 即推荐最合适的修复目标仍然与 3.3 节的结果类似.

4 结论 (Conclusions)

1) 本文建立了基于 LCA 与 HRA 耦合的方法, 评估修复工程的净环境效益 (NEB), 并以西南某污染场地为例, 研究了修复目标制定对环境效益的影响. 应用该方法有助于比较不同的修复情景, 更好地实现绿色可持续修复.

表 5 改变部分条件后重要环境指标的相对得分

Table 5 Relative scores of important environmental indicators under condition changes

参数	条件	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4	目标 5	目标 6
	原始条件	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
气候变化	0.5 S	77.3%	77.7%	84.2%	97.2%	97.3%	99.6
	0.75 S	88.6%	88.8%	92.1%	98.6%	98.6%	99.8%
	0.75 N	100.0%	100%	100%	92.5%	91.9%	88.5%
化石能源消耗	0.5 S	75.2%	76.6%	83.8%	98.8%	98.8%	99.8%
	0.75 S	87.6%	88.3%	91.9%	99.4%	99.4%	99.9%
	0.75 N	100.0%	100%	100%	83.5%	82.9%	80.3%
总环境影响	0.5 S	71.8%	72.2%	79.1%	96.8%	96.9%	99.5%
	0.75 S	85.9%	86.1%	89.6%	98.4%	98.4%	99.8%
	0.75 N	100.0%	100.0%	100.0%	90.2%	89.5%	86.2%

注: 0.5 S 代表投入 0.5 倍过硫酸钠, 0.75 S 代表投入 0.75 倍过硫酸钠, 0.75 N 代表投入 0.75 倍天然气。

2) 在计算 NEB 的过程中, 需要平衡当地环境质量改善和修复二次环境影响, 在本研究中以权重参数 f 的形式体现, f 取值越小表示利益相关方对于二次环境影响的问题越重视, 则倾向于选择温和的修复目标。本案例中, 以 $2 \leq f \leq 4$ 区间为例, 选择最佳的修复目标带来的 NEB 是直接选择筛选值(目标 4)的 1.6 ~ 15 倍。

3) 将经济因素纳入考虑, 评估单位经济投入下获得的 NEB 有助于进一步筛选综合效益最优的修复目标。

4) 本案例中, 化学氧化的药剂使用和热脱附的系统运行能耗是主要的二次环境影响来源, 针对以上环节, 采取使用绿色修复药剂、优化运行参数等手段降低修复系统能耗、利用可再生能源等方式, 可以有效提高修复的环境经济可持续性。

参考文献(References):

Cappuyns V. 2013. Environmental impacts of soil remediation activities: quantitative and qualitative tools applied on three case studies [J]. *Journal of Cleaner Production*, 52: 145-154

Cappuyns V, Bouckennooghe D, van Breuseghem L, et al. 2011. Can thermal soil remediation be sustainable? A case study of the environmental merit of the remediation of a site contaminated by a light non-aqueous phase liquid (LNAPL) [J]. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 8: 103-121

Chen Y, Liu J, Cao H, et al. 2021. Determining priority sources of PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbons by their contribution to disability adjusted life years [J]. *Atmospheric Environment*, 248: 118202-118212

Ciroth A. 2007. ICT for environment in life cycle applications open LCA — A new open source software for life cycle assessment [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12: 209-210

Cundy A B, Bardos R P, Church A, et al. 2013. Developing principles

of sustainability and stakeholder engagement for "gentle" remediation approaches: the European context [J]. *Journal of Environment Management*, 129: 283-291

陈月芳, 许锦荣, 段小丽, 等. 2019. 某焦化企业周边儿童重金属经口综合暴露健康风险 [J]. *中国环境科学*, 39: 4865-4874

Fantke P, Bijster M, Guignard C, et al. 2017. USEtox © 2.0 Documentation (Version 1.1) [M].

Favara P J, Krieger T M, Boughton B, et al. 2011. Guidance for performing footprint analyses and life-cycle assessments for the remediation industry [J]. *Remediation Journal*, 21: 39-79

Goel A, Ola D, Veetil A V. 2019. Burden of disease for workers attributable to exposure through inhalation of PPAHs in RSPM from cooking fumes [J]. *Environment Science Pollution Research*, 26: 8885-8894

Grudziński J, Krzywicka M, Bolibok Ł. 2016. Computer-aided environmental risk assessment of potato cultivation technology using openlca software [J]. *Journal of Ecological Engineering*, 17: 198-202

Guinée J B, Heijungs R, Vijver M G, et al. 2017. Setting the stage for debating the roles of risk assessment and life-cycle assessment of engineered nanomaterials [J]. *Nature Nanotechnology*, 12: 727-733

葛欣宇. 2016. 微波辅助改性煤基活性炭及对多环芳烃吸附性能研究 [M]. 新疆: 石河子大学

勾立争, 刘长波, 刘诗诚, 等. 2018. 热脱附法修复多环芳烃和汞复合污染土壤实验研究 [J]. *环境工程*, 36: 184-187+146

关睿, 黄源生, 何义亮. 2020. 河口岛屿农村地区原位与分散生活污水处理模式的环境与经济对比分析 [J]. *环境科学学报*, 40(5): 1894-1901

Hou D, O' Connor D. 2020b. Chapter 1-Green and Sustainable Remediation: Concepts, Principles, and Pertaining Research [M] //D. HOU, Sustainable Remediation of Contaminated Soil and Groundwater. Butterworth-Heinemann: 1-17

Hou D, Bolan N S, Tsang D C W, et al. 2020a. Sustainable soil use and management: An interdisciplinary and systematic approach [J]. *Science of the Total Environment*, 729: 138961

Hou D, O' Connor D, Igalavithana A D, et al. 2020c. Metal

- contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1: 366-381
- Hou D, Qi S, Zhao B, *et al.* 2017. Incorporating life cycle assessment with health risk assessment to select the 'greenest' cleanup level for Pb contaminated soil [J]. *Journal of Cleaner Production*, 162: 1157-1168
- Huysegoms L, Rousseau S, Cappuyns V. 2018. Friends or foes? Monetized life cycle assessment and cost-benefit analysis of the site remediation of a former gas plant [J]. *Science of the Total Environment*, 619-620: 258-271
- 侯德义, 李广贺. 2016. 污染土壤绿色可持续修复的内涵与发展方向分析 [J]. *环境保护*, 44: 16-19
- 胡新涛, 朱建新, 丁琼. 2012. 基于生命周期评价的多氯联苯污染场地修复技术的筛选 [J]. *科学通报*, 57: 129-137
- 环境保护部, 国土资源部. 2014. 全国土壤污染状况调查公报 [M] // 环境保护部, 国土资源部
- ISO 2006. ISO 14040: 2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework [M].
- ITRC. 2011. Green and Sustainable Remediation: State of the Science and Practice [M] // I. T. A. R. COUNCIL.
- 姜林, 樊艳玲, 钟茂生, 等. 2017. 我国污染场地管理技术标准体系探讨 [J]. *环境保护*, 45(9): 38-43
- 姜林, 钟茂生, 梁竞, 等. 2013. 层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益评估 [J]. *环境科学*, 34(3): 1034-1043
- Joliet O, Margni M, Charles R, *et al.* 2003. IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 8: 324
- Lemming G, Hauschild M Z, Chambon J, *et al.* 2010. Environmental impacts of remediation of a trichloroethene-contaminated site: Life cycle assessment of remediation alternatives [J]. *Environmental Science & Technology*, 44: 9163-9169
- Lemming G, Nielsen S G, Weber K, *et al.* 2013. Optimizing the environmental performance of in situ thermal remediation technologies using life cycle assessment [J]. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 33: 38-51
- 李雪, 杨俊杰. 2019. 工业污染场地修复技术、现状及展望 [J]. *河南科技* 678(16): 147-149
- 刘凯辉, 徐建全. 2016. 纯电动汽车驱动电机全生命周期评价 [J]. *环境科学学报*, 36(9): 3456-3463
- 罗锦英. 2009. 改性活性炭对烟气中气态汞的吸附研究 [M]. 厦门: 厦门大学
- Ridsdale D R, Noble B F. 2016. Assessing sustainable remediation frameworks using sustainability principles [J]. *Journal of Environment Management*, 184: 36-44
- Rizzo E, Bardos P, Pizzol L, *et al.* 2016. Comparison of international approaches to sustainable remediation [J]. *Journal of Environment Management*, 184: 4-17
- Serenella S, Alessandro C, Rana P. 2018. Development of a weighting approach for the Environmental Footprint [M]. Publications Office of the European Union
- Serenella Sala, Eleonora Crenna, Michela Secchi, *et al.* 2017. Global normalisation factors for the Environmental Footprint and Life Cycle Assessment [M] // J. R. C. (JRC)
- Steckling N, Tobollik M, Plass D, *et al.* 2017. Global burden of disease of mercury used in artisanal small-scale gold mining [J]. *Annals of Global Health*, 83: 234-247
- Swartjes F A. 1999. Risk-based assessment of soil and groundwater quality in the Netherlands: Standards and remediation urgency [J]. *Risk Analysis*, 19: 1235-1249
- 沈宗泽, 陈有鑑, 李书鹏, 等. 2019. 异位热脱附技术与设备在我国污染场地修复工程中的应用 [J]. *环境工程学报*, 13(9): 2060-2073
- 生态环境部. 2019. 建设用地土壤污染风险评估技术导则 [M].
- 宋昕, 林娜, 殷鹏华. 2015. 中国污染场地修复现状及产业前景分析 [J]. *土壤* 47: 1-7
- USEPA. 2008. Green Remediation: Incorporating Sustainable Environmental Practices into Remediation of Contaminated Sites [M] // USEPA
- Visentin C, da Silva Trentin A W, Braun A B, *et al.* 2019. Application of life cycle assessment as a tool for evaluating the sustainability of contaminated sites remediation: A systematic and bibliographic analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 672: 893-905
- 王斌, 李晓东, 王积才, 等. 2018. 美国污染场地修复目标值制定对中国的启示 [J]. *世界环境*, (3): 36-40
- 魏旭. 2018. 荷兰土壤污染修复标准制度述评 [J]. *环境保护*, 46: 73-77
- WHO. 2021. DALYs / YLDs definition [OL]. 2021-03-01, https://www.who.int/mental_health/management/depression/daly/en/
- 杨益. 2011. 重庆市典型土壤中有机的赋存特征及其化学稳定性研究 [M]. 重庆: 西南大学
- 杨玉洁, 王春雨, 沙雪华, 等. 2019. 烃类污染土壤热强化气相抽提技术的脱附动力学 [J]. *环境工程学报*, 13(10): 2328-2335
- 张厚坚, 王兴润, 陈春云, 等. 2010. 典型铬渣污染场地健康风险评估及修复指导限值 [J]. *环境科学学报*, 30(7): 1445-1450
- 张学良, 李群, 周艳, 等. 2018. 某退役溶剂厂有机物污染场地燃气热脱附原位修复效果试验 [J]. *环境科学学报* 38(7): 2868-2875
- 中国环境保护产业协会. 2020. 污染地块绿色可持续修复通则 [M].
- 钟心植. 2018. 环境群体性事件的多元治理优化研究 [M]. 上海: 华东政法大学
- 周友亚, 姜林, 张超艳, 等. 2019. 我国污染场地风险评估发展历程概述 [J]. *环境保护*, 47: 34-38
- 朱雪强, 韩宝平, 许爱芹. 2013. 污染场地绿色可持续修复: 概念、框架及评估方法 [M]. 2013 中国环境科学学会学术年会; 昆明: 9