

污染场地修复生命周期评估程序与模型的研究进展*

董璟琦^{1,2} 张红振^{2#} 雷秋霜² 王金南² 吴舜泽² 骆永明³ 张天柱⁴

(1.中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083;2.环境保护部环境规划院,北京 100012;

3.中国科学院烟台海岸带研究所,山东 烟台 264003;4.清华大学环境学院,北京 100084)

摘要 污染场地绿色修复和可持续管理逐渐成为国际上倡导的发展方向,修复过程对环境产生的影响日益受到重视。生命周期评估(LCA)作为一种可评估项目全过程环境影响的新兴技术,可以从污染场地自身环境改善的角度进行效益评估,同时解决污染场地修复工程本身可能在区域和全球尺度上产生的其他负面影响,在污染土壤、底泥、地下水修复管理决策中已有较多应用。从评估程序、评估模型、不确定性研究等方面对污染场地修复 LCA 进行论述,为中国污染场地绿色修复和可持续管理中使用 LCA 方法提供参考。

关键词 土壤 地下水 绿色修复 生命周期评估 评价技术

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2016.12.017

Review of LCA procedure and models for contaminated site remediation DONG Jingqi^{1,2}, ZHANG Hongzhen², LEI Qiushuang², WANG Jinnan², WU Shunze², LUO Yongming³, ZHANG Tianzhu⁴. (1. College of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083; 2. Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012; 3. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai Shandong 264003; 4. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Green remediation and sustainable management of contaminated sites have been initiated worldwide in recent years, as the environmental impacts caused by remediation processes drawing more and more attentions. Being an innovative technology to evaluate overall environmental impacts of projects, LCA evaluates the effects of improving the contaminated sites' environment. Besides, LCA assesses other negative impacts caused by remediation projects in both regional and global scales. The method has been applied in many remediation management cases of contaminated soil, sediment and groundwater. Herein, the studies of LCA on contaminated site remediation from the perspectives of procedures, modeling and uncertainties were reviewed, which could provide references for applying LCA on contaminated site green remediation and sustainable management in China.

Keywords: soil; groundwater; green remediation; LCA; evaluation technology

绿色修复和可持续管理逐渐成为国际上污染场地修复倡导的发展方向。发达国家污染场地修复管理重视绿色修复技术的研发应用和政策扶持,侧重于全过程的综合协调和利益相关方的全面参与,倡导可持续污染场地风险管理和多目标决策,强调修复工程的整个生命周期可能对环境产生的影响,不再仅限于修复工程实施单个方面^[1-3]。而我国污染场地修复还处于起步阶段,修复技术多以高能耗、见效快的异位修复为主,修复工程多以实现修复目标、削减污染场地自身风险为侧重点,鲜有关于绿色修复技术与政策的相关研究和实践的报道^[4-5]。总结发达国家污染场地修复生命周期评估(LCA)的方法

和经验,对于开展我国污染场地绿色修复和可持续管理研究具有重要意义。

1 污染场地修复 LCA 概述

LCA 从社会、经济、环境 3 方面综合对污染场地修复开展可持续管理评价,而其他类似评价方法,例如净环境效益评价(NEBA)和费用效益分析(CBA)则主要从环境、经济层面开展一维或二维评估。LCA 的首要环境影响是污染场地范围内的污染物健康风险和生态风险;二次环境影响是区域和全球范围内修复工程所产生的环境影响;若考虑三次环境影响,则将 LCA 又拓展至经济和社会影响

第一作者:董璟琦,女,1986年生,博士研究生,助理研究员,研究方向为环境风险与污染修复。# 通讯作者。

* 国家自然科学基金资助项目(No.71403097);国家“863 计划”项目(No.2013AA06A211)。

评估。

自 1999 年起,针对污染场地修复 LCA 框架的研究就已逐渐开展并日趋拓展。VOLKWEIN 等^{[6]263-264}在其构建的污染场地修复 LCA 模型框架中将污染场地修复排放区分为近域排放范围和远程排放范围,前者包括污染场地内和距污染场地 250 m 内产生的排放,近域排放范围以外的为远程排放范围。DIAMOND 等^{[7]788-789}提出的污染场地修复 LCA 框架包括原材料和能源消耗、污染场地过程边界、废物管理 3 部分内容。近年来,通过对传统污染场地修复 LCA 进一步拓展研究,GUINÉE 等^[8]将传统 LCA 扩展为生命周期可持续分析(LCSA)。美国可持续修复论坛(SURF)在 2011 年的《修复行业环境足迹分析和 LCA 评估技术导则》中构建了包括污染场地内操作管理(O & M)、监测井(MW)和场地外输入输出环境影响的流程图^{[9]43-48},为污染场地环境可持续评估提供了技术方法。LEMMING 等^{[10]392-394}在综述前人研究的基础上,提出场地修复 LCA 概念框架包括上游能源和材料消耗(生产阶段)、原位或异位直接修复(使用阶段)和下游废弃物处置(终止阶段)3 部分。HOU 等^{[11]1083-1085}在污染场地修复 LCA 方法中提出了结合环境、社会、经济主要影响类别的可持续评价体系。总体而言,污染场地修复 LCA 旨在涵盖污染场地修复管理全过程,并对整体过程中所可能产生的环境、经济和社会影响开展评估。

2 污染场地修复 LCA 程序

国际标准化组织(ISO)提出的通用 LCA 程序包括确定目标和范围、清单分析(LCI)、生命周期影响评估(LCIA)和结果分析 4 个阶段^[12-13]。SURF 针对污染场地修复 LCA,将具体步骤细化为九步法:确定目标和范围、确定功能单元、建立系统边界、建立环境影响指标、LCI、环境影响评估、参数敏感性与不确定性分析、结果表征、提交评估报告,具体程序见图 1。

2.1 确定目标和范围

确定目标和范围是 LCA 过程中至关重要的步骤。确定目标旨在说明开展污染场地修复 LCA 的目的和原因,以及研究结果的预期应用领域。通常污染场地修复 LCA 的目标可分为两种:(1)用于修复活动开展前的修复方案比选评估;(2)在修复实施后开展生命周期回顾性评价。其中,前者可作为污染场地修复管理决策支持的依据;后者可提供修复技术的影响基准,从而为进一步改善修复技术提供参照。

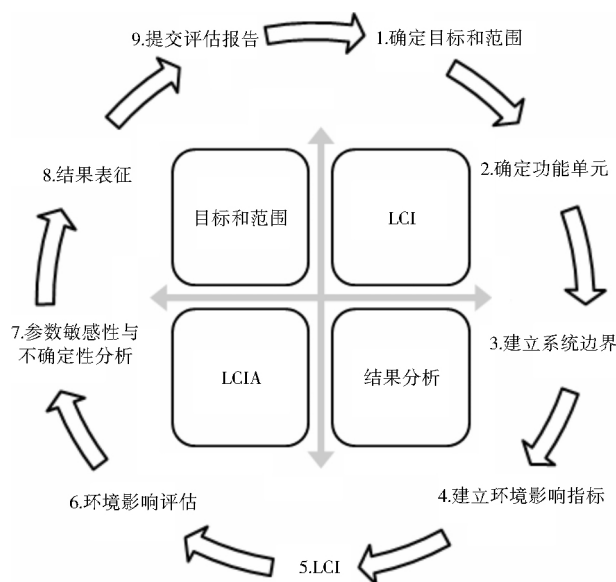


图 1 污染场地修复 LCA 程序

Fig.1 Process of LCA for contaminated site remediation

确定范围是为了保证研究的空间、时间和评价深度满足规定目标。所有的系统边界、功能单元、评价时间、修复技术流程、LCIA 模型、影响类型等要素都应该在范围界定中表述清楚。SUER 等^[14]认为评价土壤修复最重要的是界定时间和空间范围以及评价二次环境过程可能产生的环境影响。而 LEMMING^[15]则认为范围应包括系统边界、时间边界和技术与环境边界,以及 LCA 类型的选择(边际 LCA 和结果 LCA)。范围界定的准确程度和与评价目标的契合度将影响 LCA 结果的可靠性。

2.2 LCI

LCI 是针对某一系统过程整个生命周期阶段进行数据收集、整理、审核,并将数据与单元过程或功能单元进行关联的过程。在污染场地修复中特指对污染场地修复工程在整个生命周期内的能量、原材料消耗量与对环境的排放进行以数据为基础的客观性量化过程。污染场地修复 LCI 的核心是建立以功能单元表达的修复系统的输入和输出,其所使用的清单数据的准确性和污染场地适用性对于最终 LCA 结果的不确定性至关重要。

目前,污染场地特定的 LCI 尚未建立,相关研究采用通用的 LCI 数据库,如基于国家层面的丹麦 EDIP 数据库、美国的 US LCI 数据库、欧盟层面的参考生命周期数据库(ILCD)、瑞士 Ecoinvent 数据库等。这些通用数据库包括运输、原材料消耗、能耗等场地修复 LCA 必需的清单数据,但污染场地特有的数据,例如活性炭生产、原位化学药剂或反应材料生产等信息缺乏,使采用通用数据库计算的 LCA 结

果存在较大不确定性。VOLKWEIN 等^{[6]266-267} 在开发的污染场地修复 LCA 模型中包含了 42 种通用 LCA 数据清单,并对 54 项单元过程提供了基础数据。PAGE 等^[16] 在 LCA 框架的案例研究中通过实际工程报告数据、专家咨询等方式构建了其清单数据。CADOTTE 等^[17] 在其构建的 LCI 中包括了 4 种修复技术的环境负荷、设备、能耗、电耗,并使用了 Ecoinvent 数据库中的二次环境影响数据。美国能源部也在其网站上公布了 US LCI 数据供下载,其中包含废物管理和污染场地修复模块。这些研究对提供污染场地相关的 LCI 具有一定帮助,但总体来说污染场地 LCI 仍面临着不确定性大、数据可获得性较差等问题。

2.3 LCIA

LCIA 是针对 LCI 的输入、输出量化结果开展环境影响评价的过程,用以说明修复工程中各环境交换过程的相对重要性以及每个生产阶段或修复技术单元过程的环境影响贡献。LCIA 是 LCA 的核心内容,一般包括影响类型、类型参数和特征化模型的选择,将 LCI 结果划分到影响类型(分类),类型参数结果的计算(特征化)3 个基本过程。

目前国际上常用的 LCIA 影响类型可分为全球影响和局部影响。其中全球影响主要包括不可再生资源消耗、全球变暖、臭氧层消耗、可更新资源的消耗、酸化、富营养化等;局部影响主要包括固体废物堆积、健康毒性、生态毒性、土地利用等。针对污染场地的特定 LCA 影响类型还包括土壤质量参数变化、生态环境损害和人类社会扰动等^{[7]790-792}。此外,污染场地 LCIA 影响类型也分为首要环境影响和二次环境影响,前者主要指污染场地目标污染物所直接产生的局部范围内的毒性风险,后者则指污染场地修复工程实施过程中所产生的对区域乃至全球范围内环境介质的影响。由于涵盖不同的影响类型,采用不同的特征化模型和计算方法,目前国际上存在有较多的 LCIA 模型,采用不同模型开展 LCA 研究也会在一定程度上影响结果的一致性。

2.4 结果分析

将 LCIA 结果通过图表等形式表现出来,并对结果进行合理阐释,即为 LCA 的结果分析。通常污染场地修复 LCA 结果分析可包括:(1)首要环境影响的各类影响类别(主要是健康和生态风险或毒性评估)的归一化结果;(2)二次环境影响的各类影响类别(全球变暖、酸雨、能源资源消耗等传统 LCA 影响类别)的归一化结果;(3)综合 LCA 或社会经济

LCA 等其他涉及三次环境影响的各类影响类别。也有研究将 LCA 结果进行货币化统一,评估污染场地及其修复活动带来的环境损失,以便于计算环境污染损害,对比不同污染场地的环境影响等^[18]。

3 污染场地修复 LCA 模型

目前,国际上通用的 LCA 模型较多。使用最多的是荷兰 PRé Consultants 公司开发的 SimaPro 商业软件,其中包含有 ReCiPe 2008、Eco-indicator 99、IMPACT 2002+、CMLCA 2001、EDIP 2003 等应用广泛的 LCA 模型及 Ecoinvent v2、US LCI 等清单数据库^[19]。LCA 模型的区分主要是在于 LCIA 模型,其可分为损害为主的模型(即终结点模型)和面向问题的模型(即中间点模型)。

终结点模型将各环境影响类型再进行分类汇总,得出每个大类的环境影响,可用于对最终造成的环境损害进行评估,例如 Eco-indicator 95、Eco-indicator 99、EPS 2000 等模型。中间点模型则未将环境影响归结到人类、资源、自然环境的大类中,而是针对各个详细的环境影响类别给出评价结果,例如 EDIP 97、EDIP 2003、CMLCA 2001、TRACI 2.1 等模型。有些 LCA 模型,例如 IMPACT 2002+ 和 ReCiPe 2008,综合了上述两种模型,既包括若干类中间影响类别,又将中间影响类别归纳到最终损害大类中,对于两个层次的影响均给出了计算结果。各种主流 LCA 模型及主要特性见表 1。本研究针对 3 种典型 LCA 模型,即 EDIP 2003、CMLCA 2001 和 TRACI 2.1 进行介绍。

3.1 EDIP 2003

EDIP 2003 是由 EDIP 97 改进而来,最初目的是为了评价产品和材料生产造成的环境影响,属于中间点模型,基于人均当量的归一化和环境影响政治削减目标权重进行操作^{[20]1104-1106}。EDIP 2003 的最大特点是在特征化模型中包括了导致非全球影响的毒性暴露,并将空间异质性与特征因子关联,无论考不考空间区别都可以使用该模型。其中的有害废物、废渣、资源等影响类别直接从 EDIP 97 延续,但新增了不同暴露途径(包括空气、水、土壤)的健康毒性影响,同时将水体生态毒性分成急性和慢性两种。EDIP 2003 中暴露因子的设定主要依据污染物特性(长衰期和短衰期)、场地人口密度和污染排放高度(1、25、100 m),其对空间异质性的考虑和暴露毒性的影响分类尤其适合局部和全球范围污染分布明显的污染场地修复。

表 1 污染场地修复的主要 LCA 模型及其特性
Table 1 Summary of LCA models and their characteristics applied in contaminated site remediation

年份	国家或机构	模型	分类	特性
1990	瑞典	环境优先权模型		应用成本的概念进行环境影响评估,通过建立社会公认的社会环境安全目标,将环境问题转化成为一种社会成本
1991	瑞士	生态目标评估模型		可直接评价产品的环境影响,不需分类。以特定的区域内环境问题参数值与政府既定的环境目标值之差来评估对环境的影响
1995	荷兰	Eco-indicator 95	终结点模型	用单一的环境生态指数来描述系统的环境影响特性
1997	丹麦	EDIP 97	中间点模型	包含全球变暖、酸化、富营养化、人体毒性、生态毒性、臭氧消耗、光化学臭氧诱导形成的潜在影响
2003	丹麦	EDIP 2003	中间点模型	根据 EDIP 97 改进的模型,增加了一些在空间上有区别的特征模型,其预测结果与实际更为一致,而且更容易、更明确地解释对环境的破坏
1997	ISO	ISO 140042		对清单数据进行技术处理并选择分析步骤(包括数据分类和特征化处理、数值归一化、分级排序等)
1999	荷兰	Eco-indicator 99	终结点模型	基于对环境损害的原理进行环境影响评价,其环境可定义为产品资源、人类健康、生态系统 3 个方面
2000	瑞典	EPS 2000	终结点模型	通过对不同的环境影响指标取值来避免对环境保护目标的负面影响,影响类型包括生物多样性、产品、人类健康、资源和美学价值
2001	莱顿大学环境研究中心	CMLCA 2001	中间点模型	以全球年环境影响总值为标准,将影响分为材料消耗、能源消耗和污染 3 个大类,采用中间点分析减少了假设的数量和模型的复杂性
2002	瑞士联邦技术研究所	IMPACT 2002+	结合中间点模型与终结点模型	结合了 CML 2001 的中间点模型和 Eco-indicator 99 的结合点模型
2002	美国环境保护署 (USEPA)	TRACI 2.1	中间点模型	基于《USEPA 超级基金风险评估导则》、《USEPA 暴露因子手册》、美国国家酸雨评估项目等,强化了毒性和健康风险评估,将影响因子分为致癌因子和非致癌因子
2008	荷兰	ReCiPe 2008	结合中间点模型与终结点模型	结合了 CML-IA 的中间点模型和 Eco-indicator 99 的终结点模型,提出 18 种中间点影响类型,并将其归纳至人类健康、生态系统和资源成本 3 种终结点类型
2004	日本	LIME	终结点模型	由先进工业科学与技术国家研究所提出,包括特征化、损害评估和赋权的日本国民经济归一化,还包括 11 种环境影响类别,归结到人类健康、社会福利、生物多样性和植物生产力 4 种损害类型

3.2 CMLCA 2001

CMLCA 2001 是莱顿大学环境研究中心于 2001 年在《荷兰生命周期评估导则》中提出的一套 LCA 影响类别识别模型,属于中间点模型,基于 CML-IA,可将影响结果归一化,但不包括权重和附加值。将影响类别主要分为基本影响种类(在大部分 LCA 模型中都包括)、附加影响种类(列举了评估指标,但实际应用较少)和其他影响种类(不包括评估指标,无法定量评价)。其中,基本影响种类主要包括非生物资源消耗、气候变化、臭氧层损耗、健康毒性、水体生态毒性、海洋生态毒性、陆地生态毒性、光化学氧化剂、酸化、富营养化等^[21]。对于生态毒性和健康毒性的模拟基于多媒介 USES-LCA 模型。导则中还提供了约 1 500 种 LCI 结果的特征化因子供参考^{[20]1108-1109}。CMLCA 2001 包括传统 LCA、社会 LCA(SLCA)和 LCSA,同时涵盖环境经济 LCA (IO-LCA),综合 LCA、生命周期成本 (LCC)和生态有效性分析(E/E)等评价功能,可为污染场地可持续环境管理提供评价工具。

3.3 TRACI 2.1

TRACI 2.1 是 USEPA 开发的基于美国实际情况和清单数据的 LCA 模型,属于中间点模型,包括分类、特征化和归一化 3 个步骤。其最初设计目的是为推进美国 LCA 研究,但模型本身也可用于污染防控和可持续评估。其所关注的潜在影响包括臭氧层损耗、全球变暖、酸化、富营养化、对流层臭氧或雾霾形成、生态毒性、人体微效应、致癌效应、非致癌效应、化石燃料消耗和土地利用等。其特征化因子的选择参考了《USEPA 超级基金风险评估导则》、《USEPA 暴露因子手册》、美国国家酸雨评估项目等;健康风险评估参数中,选取了 USEPA 的参考剂量作为计算潜在健康风险的参数^{[20]1105-1106}。TRACI 2.1 是依赖污染场地信息的评估模型,对于许多环境影响类别而言,可以根据污染场地的不同而进行设定,但本身也提供了美国平均值供参考^[22]。

4 不确定性分析

不确定性是 LCA 受到质疑的最大原因之一。

通常认为,LCIA 是 LCA 中难度和不确定性最大的部分。REAP 等^[23]针对 LCA 的 4 个阶段提出了包括数据来源及可信度、时间跨度、边界选择、权重和估值等共计 15 个尚未解决的关键问题,并根据其对评估结果影响的大小和敏感度进行了排序,认为 LCIA 阶段是整个 LCA 过程中不确定性最主要的来源之一。目前针对削减 LCIA 阶段不确定性的研究主要从以下几个方面进行:

(1) 开展不确定性来源分析研究

BARE^[20]¹¹⁰⁷⁻¹¹⁰⁸系统梳理了常用的 Eco-indicator 99、EDIP 97、EPS 2000、IMPACT 2002 +、TRACI 2.1 等多种模型,并从中间环境效应、影响后果、危害权重取值等方面对各种模型从健康影响、环境破坏和自然资源消耗等方面进行了对比分析。美国 SURF 提出的污染场地修复 LCA 九步法中,建立系统边界时修复活动的时空范围和修复技术边界确定、LCIA 阶段中间效应指标和损害后果(最终指标)计算、特征化过程中的模型选择和参数取值是 LCA 结果产生不确定性甚至错误的主要来源^[9]³⁹⁻⁴²、^[24]¹⁹⁻²¹。最近构建的 ILCD 对于提高 LCIA 的基础数据可对比性也具有较大帮助^[25]。HOU 等^[26]针对抽出处理、原位生物修复、可渗透反应墙(PRB)、原位化学还原 4 种修复技术,分析了污染范围、水文地质、化学条件、污染场地位置和权重因子对 LCA 结果的敏感性,同时探讨了不同原材料对最终环境影响类别的贡献度大小,表明不同污染场地条件和修复技术条件都可能对 LCA 最终评价结果产生较大影响。虽然这些致力于 LCIA 标准化和 LCIA 不确定性分析工作的尝试对于完善 LCA 模型本身和推进 LCA 技术在污染场地修复领域的应用发挥了很好的作用,但整体上来看,LCA 的研究和应用还处于初级阶段,评估结果存在较大不确定性,仍需要逐步建立更全面更细致的标准化体系。

(2) 尝试使用污染场地实际信息以减少污染场地修复 LCIA 的不确定性

由于污染场地修复 LCIA 在计算首要环境影响的量化表征时,大多数情况仍使用通用的污染归趋和暴露模型,与污染场地目标污染物的迁移扩散和受体暴露的实际情况存在一定差异,造成首要环境影响的最终计算结果有较大偏差。GODIN 等^[27]针对某垃圾填埋场,联合采用地下水迁移扩散模拟和 LCA 技术对自然衰减、挖取并原地密闭处置、挖取并原地部分处置、挖取并焚烧处置 4 种处置方案进行了影响评价,虽然 LCA 结果表明自然衰减的影

响最小,但地下水迁移模拟结果表明高浓度的污染物会持续滞留在地下水中超过 50 a,若采用自然衰减作为修复方案必须进行完整的污染场地环境风险评估。LEMMING 等^[10]³⁹⁵⁻³⁹⁶提出将污染场地地下水污染迁移模型与 LCA 相结合,利用污染场地风险评估结果作为 LCA 首要环境影响,利用相关模型计算二次环境影响,并对比了长期监控、原位还原热脱附、原位化学氧化和长期监控结合活性炭治理 4 种修复技术的 LCA 结果。HELLWEG 等^[28]构建了基于污染场地的土壤-地下水重金属污染迁移模型,综合考虑了重金属的化学形态、迁移特征等,提出了适用于瑞士的模型参数推荐值,并将该模型嵌入到现有的 LCIA 多介质模型中,降低了 LCIA 阶段健康风险评估的不确定性。这些将污染场地实际信息纳入 LCIA 过程的研究在降低 LCIA 不确定性方面起到了一定作用,但污染场地修复 LCIA 仍缺乏统一的技术模型。此外,这些尝试利用污染场地基础数据进行 LCIA 研究的大多数案例集中在污染场地修复阶段,没有从污染场地调查、评估、修复和再开发/生态恢复的全过程开展 LCIA 研究,同时还存在 LCIA 模型过于简单,没有针对污染场地信息和修复方案开发专门的场地修复 LCIA 环境影响评估模型的问题^[29]。

(3) 通过完善 LCIA 模型和采用概率方法分析 LCA 不确定性

蒙特卡洛方法作为分析不确定性因素的常用技术,已被用于污染场地风险评估模型优选和污染场地修复 LCA 评估结果的不确定性分析。HUNG 等^[24]²¹⁻²²采用蒙特卡洛方法系统分析了 LCA 过程中 LCI 和 LCIA 阶段的不确定性,并以台湾市政固废管理为例比较了 Eco-indicator 99、EDIP 2003、EPS 2000、IMPACT 2002 + 和 LIME 等 5 种 LCA 模型的评估结果差异,发现考虑 LCI 和 LCIA 阶段的不确定性时,健康影响、生态毒性、光化学烟雾的影响结果有明显差异。LO 等^[30]将贝叶斯蒙特卡洛方法和 LCA 联合建立的概率 LCA 模型与传统 LCA 模型进行对比分析,发现概率 LCA 可提供更多信息,包括识别主要影响参数和降低评估结果的偏差。HOU 等^[11]¹⁰⁹⁰⁻¹⁰⁹¹通过采用传统 LCA 模型与考虑社会经济因素的 IO-LCA 相结合的模型,纳入更多的评价过程、数据和影响类别来增加 LCA 评价的准确性,降低不确定性。上述针对污染场地修复 LCA 不确定性的研究表明,在 LCIA 阶段的不确定性来源分析方面已取得一定进展,然而,大部分场

地修复 LCA 不确定性研究都集中在采用常规 LCIA 模型的不确定性分析方面,缺少在充分利用污染场地修复基础信息的前提下进行 LCA 结果不确定性分析的尝试。另外,进行污染场地修复 LCA 结果不确定性分析时,在参数敏感性方面涉及更少,且主要采用一些局部灵敏度方法进行定性或半定量的参数敏感性分析。

(4) 联合使用其他决策支持方法完善场地修复 LCA 研究

有学者将 LCIA 与 NEBA、多目标决策分析 (MCDA) 等联合起来对污染场地修复管理的综合判断提供决策支持^[31]。ROGERS 等^[32] 构建了随机多属性生命周期影响评估 (SMA-LCIA), 尝试降低 LCIA 阶段由于不同类型环境影响权重取值不当引起的不确定性, 以生物能源、化石能源和电能的环境影响评估进行实例分析, 并将 SMA-LCIA 结果与传统 LCIA 结果进行了对比分析。LINKOV 等^[33] 联合了 MCDA、LCIA 和风险评估, 提出以针对新型人造纳米污染物环境管理、沉积物污染修复管理等新型环境问题的综合决策支持方法。SPARREVIK 等^[34] 综合运用风险评估、LCIA、费用效果分析 (CEA)、CBA 等方法构建了一种 MCDA 技术, 对比分析了环境修复造成的费用与生命周期环境影响, 提出了权衡生态服务价值和生态恢复费用的方法。然而, 由于 LCA 使用数据来源与其他评估方法的差异, 不同类型环境损害和不同方法评估结果的可对比性仍存在较大争议, 基于 LCA 与其他决策分析方法联合应用的研究较少且多数学者对结果持谨慎态度。

5 结论与展望

5.1 结论

(1) LCA 作为一种可全面评估项目全过程环境影响的新兴技术, 可以对污染场地本身的环境影响、修复项目产生的二次环境影响以及相应的社会经济影响进行综合评估, 从而实现污染场地修复可持续管理的目标, 是国际上开展绿色修复和可持续修复的重要评估方法。我国污染场地修复仍处于初级阶段, 可持续修复管理政策和方法研究与发达国家相比仍有较大差距。

(2) 污染场地修复 LCA 遵循国际 ISO 确立的目标和范围、LCI、LCIA 和结果分析 4 个阶段。LCA 模型的核心部分是 LCIA 模型, 主要包括终结点模型和中间点模型两种。污染场地修复 LCA 应

用较多的模型包括 EDIP 2003、CMLCA 2001、TRACI 2.1 等。

(3) 不确定性是 LCA 在污染场地修复应用中受到质疑的最大原因之一, 不同污染场地基础条件和修复技术条件都可能对 LCA 最终评价结果产生较大影响。目前已有研究从不确定性来源出发, 结合污染场地实际信息, 采用概率分析方法及其他决策支持方法等尝试降低 LCA 不确定性。不确定性分析仍是污染场地修复 LCA 研究中的重要组成部分, 在污染场地修复 LCA 实际应用中不可或缺。

5.2 展望

随着我国污染场地修复工作越来越受到中央和地方政府重视, 可持续修复管理和绿色修复是今后必然的发展趋势。如何摆脱当下高能耗、短平快的修复模式, 倡导低耗节能、综合高效、环境社会经济各方利益最大化的修复过程, 是我国污染场地修复管理面临的巨大挑战。污染场地修复 LCA 是开展可持续管理和绿色修复的重要方法。在总结发达国家污染场地修复 LCA 方法、经验与实际案例的基础上, 开展我国污染场地可持续管理实际案例研究, 将 LCA 应用于国内污染场地修复工程中, 是进一步的研究方向。

参考文献:

- [1] OWSIANIAK M, LEMMING G, HAUSCHILD M Z, et al. Assessing environmental sustainability of remediation technologies in a life cycle perspective is not so easy[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(3): 1182-1183.
- [2] USEPA. Green remediation: incorporating sustainable environmental practices into remediation of contaminated sites [R]. Washington, D.C.: USEPA, 2008.
- [3] ARCTANDER E, BARDOS P. Remediation of contaminated land technology implementation in Europe[R]. Berlin: Federal Environment Agency, 2002.
- [4] 张红振, 骆永明, 章海波, 等. 基于 REC 模型的污染场地修复决策支持系统研究[J]. *环境污染与防治*, 2011, 33(4): 66-70.
- [5] 胡新涛, 朱建新, 丁琼. 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*, 2012, 57(2/3): 129-137.
- [6] VOLKWEIN S, HURTIG H W, KLÖPFER W. Life cycle assessment of contaminated sites remediation[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1999, 4(5).
- [7] DIAMOND M L, PAGE C A, CAMPBELL M, et al. Life-cycle framework for assessment of site remediation options: method and generic survey[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1999, 18(4).
- [8] GUINÉE J B, HEIJUNGS R, HUPPES G, et al. Life cycle assessment: past, present, and futures[J]. *Environmental Science*

- & Technology, 2011, 45(1): 90-96.
- [9] FAVARA P J, KRIEGER T M, BOUGHTON B, et al. Guidance for performing footprint analyses and life - cycle assessments for the remediation industry[J]. Remediation Journal, 2011, 21(3).
- [10] LEMMING G, CHAMBON C J, BINNING P J. Is there an environmental benefit from remediation of a contaminated site? Combined assessments of the risk reduction and life cycle impact of remediation[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 112.
- [11] HOU Deyi, AL TABBAA A, LUO Jian. Assessing effects of site characteristics on remediation secondary life cycle impact with a generalised framework[J]. Journal of Environmental Planning and Management, 2014, 57(7).
- [12] ISO. Environmental management - life cycle assessment - principles and framework[R]. Geneva: ISO, 2006.
- [13] ISO. Environmental management - life cycle assessment - requirements and guidelines[R]. Geneva: ISO, 2006.
- [14] SUER P, NILSSON PÅLEDAL S, NORRMAN J. LCA for site remediation; a literature review[J]. Soil & Sediment Contamination, 2004, 13(4): 415-425.
- [15] LEMMING G. Environmental assessment of contaminated site remediation in a life cycle perspective[D]. Copenhagen: Technical University of Denmark, 2010.
- [16] PAGE A C, DIAMOND L M, CAMPBELL M, et al. Life-cycle framework for assessment of site remediation options: case study[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1999, 18(4): 801-810.
- [17] CADOTTE M, LOUISE D, SAMSON R. Selection of a remediation scenario for a diesel-contaminated site using LCA[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2007, 12(4): 239-251.
- [18] LEMMING G, HAUSCHILD M Z, BJERG P L. Life cycle assessment of soil and groundwater remediation technologies; literature review[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2010, 15(1): 115-127.
- [19] PRÉ Consultants. SimaPro database manual methods library [R]. Netherlands: PRÉ Consultants, 2014.
- [20] BARE C P. Critical analysis of the mathematical relationships and comprehensiveness of life cycle impact assessment approaches[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(4).
- [21] GUINÉE J B. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2002, 7(5): 311-313.
- [22] BARE J. TRACI 2.0; the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts 2.0[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2011, 13(5): 687-696.
- [23] REAP J, ROMAN F, DUNCAN S, et al. A survey of unresolved problems in life cycle assessment - Part 1: goal and scope and inventory analysis[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2008, 13(4): 290-300.
- [24] HUNG M L, MA H W. Quantifying system uncertainty of life cycle assessment based on Monte Carlo simulation[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2009, 14(1).
- [25] SALA S, PANT R, HAUSCHILD M, et al. Research needs and challenges from science to decision support. Lesson learnt from the development of the international reference life cycle data system (ILCD) recommendations for life cycle impact assessment[J]. Sustainability, 2012, 4(7): 1412-1425.
- [26] HOU Deyi, AL TABBAA A, GUTHRIE P, et al. Using a hybrid LCA method to evaluate the sustainability of sediment remediation at the London Olympic Park[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 83: 87-95.
- [27] GODIN J, MENARD J F, HAINS S, et al. Combined use of life cycle assessment and groundwater transport modeling to support contaminated site management[J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2004, 10(6): 1099-1116.
- [28] HELLWEG S, FISCHER U, HOFSTETTER T B, et al. Site-dependent fate assessment in LCA: transport of heavy metals in soil[J]. Journal of Cleaner Production, 2005, 13(4): 341-361.
- [29] LESAGE P, EKVAL T, DESCHENES L, et al. Environmental assessment of brownfield rehabilitation using two different life cycle inventory models[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2007, 12(6): 391-398.
- [30] LO S C, MA H W, LO S L, et al. Quantifying and reducing uncertainty in life cycle assessment using the Bayesian Monte Carlo method[J]. Science of the Total Environment, 2005, 340(1/2/3): 23-33.
- [31] MORAIS S A, DELERUE MATOS C. A perspective on LCA application in site remediation services; critical review of challenges[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 175(1/2/3): 12-22.
- [32] ROGERS K, SEAGER T. Environmental decision-making using life cycle impact assessment and stochastic multi-attribute decision analysis; a case study on alternative transportation fuels[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(6): 1718-1723.
- [33] LINKOV I, SEAGER T P. Coupling multi-criteria decision analysis, life-cycle assessment, and risk assessment for emerging threats[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(12): 5068-5074.
- [34] SPARREVIK M, BARTON D N, BATES M E, et al. Use of stochastic multi-criteria decision analysis to support sustainable management of contaminated sediments[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(3): 1326-1334.

编辑:徐婷婷 (收稿日期:2015-12-21)