

发达国家污染场地修复技术评估实践 及其对中国的启示

张红振^{1,2} 於方¹ 曹东¹ 王金南¹ 张天柱² 骆永明³

(1. 环境保护部环境规划院环境风险与损害鉴定评估研究中心, 北京 100012; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084;
3. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003)

摘要 近年来, 中国工业化进程造成的场地污染问题逐渐凸显, 各地发现的污染场地数目众多, 引发了巨大的环境风险与安全隐忧。在介绍发达国家污染场地管理历程的基础上, 分析了发达国家开展绿色和可持续污染场地修复评估研究和实践的主要方法, 重点阐述了修复技术筛选矩阵、多目标决策支持技术、费用效益分析、生命周期评估和场地生态环境价值评估与恢复等方法的应用。最后建议加强对中国污染场地修复产业现状调研和趋势预测, 为研究和制定适合绿色和可持续修复技术研发和应用的政策体系提出政策建议和研究方向。

关键词 污染场地 方案优选 绿色修复 费用效益分析 生命周期评估

近年来, 中国工业化进程造成的场地污染问题逐渐凸显, 各地发现的污染场地数目众多, 引发了巨大的环境风险与安全隐忧。然而, 中国的污染场地修复与管理无论从技术储备、市场培育, 还是从管理制度方面都处于初期阶段, 在具体应对场地污染时存在各方责权不清、融资渠道不畅、技术力量不足和操作流程不顺等棘手问题。污染场地基础信息缺失、土地利用规划协调不够以及区域层面缺少污染场地管理统筹考虑, 造成目前的污染场地管理决策缺少客观分析和科学依据。为应对日益严峻的场地污染形势和确保城市化进程中的环境安全, 国内针对污染场地调查、风险评估、修复技术和管理政策等方面已开展了系列研究^[1-3]。国家和北京、重庆等地方已开展了一些污染场地修复的试点示范工程, 制定的污染场地相关法规和技术导则已经出台或在征求专家意见阶段。目前, 中国污染场地修复技术自主研发呈蓬勃发展趋势, 污染场地修复的管理体系、技术规范、融资和责任追究机制也在逐渐完善当中。如何充分利用国内现有污染场地管理政策和修复技术基础, 做好具体污染场地的修复管理成为摆在每一位决策者面前的难题。

发达国家在应对污染场地的法律法规、管理制度、技术储备和资金来源渠道等方面已形成了较完备的制度体系, 制定了基于风险的污染场地调查、评估、修复技术和环境质量标准等系列技术文件^[4-7]。虽然各国污染场地修复管理机构已建立了污染场地

调查、分级、评估、修复与管理流程, 由于场地污染类型多样, 涉及工程、经济、管理、土壤、水文、化学、地理等诸多学科, 污染场地修复及管理评估技术一直都是相关领域学者研究和实践的热点问题。反思国内污染场地管理存在的问题, 借鉴国外污染场地管理实践经验, 在满足场地环境风险处于最大可接受风险水平的前提下, 研究提出科学合理的污染场地修复决策流程, 构建场地修复技术筛选矩阵, 进行污染场地修复的费用效益分析(CBA)和生命周期评估(LCA), 从区域层面调控污染场地的修复与管理, 对节约污染场地管理社会成本、科学制定区域污染场地管理和应对策略、推动污染场地修复技术和市场理性发展、恢复污染区域生态功能等方面具有急迫且重要的意义。

1 发达国家污染场地修复与管理的实践

从 20 世纪 60 年代开始, 发达国家的环境修复理念从 1960 年的堆放抛弃开始, 发展到 1990 年挖取填埋和焚烧处置为主, 再到 2010 年的资源修复、生物降解和循环再利用阶段。早期的污染场地修复决策以污染鉴定和最大程度地削减土壤污染带来的潜在风险为目标, 从去除土壤污染物、切断污染物对受体的暴露途径、改变土地利用方式 3 条途径降低土壤污染带来的风险问题。随后, 欧美等国的修复实践逐渐认识到修复决策的过程中仍需考虑修复措施的环境、经济效益等核心及非核心因

第一作者: 张红振, 男, 1980 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事环境风险与损害评估工作。

素。污染场地风险管理演化出了更加灵活的污染控制策略,从土壤污染物削减/固定化、截断暴露途径、保护敏感受体 3 个方面选择最佳风险降低措施;最大限度降低风险水平也不再是风险管理/修复策略的唯一目标,转向了综合比较管理/修复措施的环境、经济和社会效益的多目标管理决策。以探寻最合理解决污染场地管理这一社会问题的途径为目标,以污染物在土壤/地下水中的环境化学行为及生物有效性为其核心研究内容。基于风险的污染场地管理策略已经被欧盟和北美等发达国家广泛采纳,决策支持系统的表达形式有文件导则、决策流程图、计算机软件等。以对污染场地的风险评价、修复技术研发及应用、污染物的土壤质量环境基准制定为关键技术手段;为具体场地的污染鉴定、风险表征、修复决策及后续管理提供理论支持、技术保障和法律依据(见图 1)。

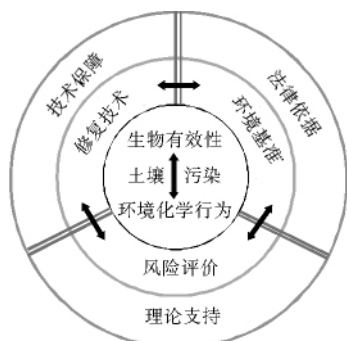


图 1 发达国家污染场地风险管理制度体系

当前发达国家的污染场地修复管理侧重于全过程协调和利益关系方的全面参与,强调修复工程的整个生命周期可能对周边环境产生的影响,而不再仅限于修复工程实施单个方面。美国环境保护署一直积极倡导“绿色场地”修复理念,将污染场地修复过程对环境的影响分为能源消耗、水资源消耗、空气污染、固废产生、场地生态功能破坏和其他资源消耗 6 个部分^[8],制定了降低污染场地修复环境影响的绿色修复计划,并于 2010 年提出了超级基金绿色修复战略^[9],设定了绿色修复战略目标和主要任务,包括研发技术导则和制定相关政策法规,制定污染场地风险管理全过程绿色化转变策略,开展绿色修复技术示范工程和评估技术研究等具体措施。另外,美国伊利诺斯州环境保护署设计了嵌入环境影响指标的场地修复技术筛选矩阵;加利福尼亚州有毒物质控制局提出了促进绿色修复技术实施的行动计划;明尼苏达州污染控制署开发的绿色修复实践工具包

可以实现基于网络的污染场地风险管控全过程环境影响降低决策支持^[10]。欧盟推进绿色修复技术相关组织和研究机构有欧洲土壤和地下水修复高效行动计划(EURODEMO)、欧洲工业场地修复网络(NICOLE)、土壤和地下水技术联盟(SAGTA)等,通过学术研究、举办论坛、公开宣传等方式积极推动绿色修复技术的推广使用。

2 污染场地修复技术评估常用方法

发达国家开展绿色和可持续污染场地修复评估研究和实践的主要方法有修复技术筛选矩阵、多目标决策支持技术、CBA、LCA、环境效益净值分析(NEBA)以及一些定量和半定量评估软件或模型。

2.1 场地修复技术筛选矩阵

在对本国污染场地修复技术市场、新型技术研发和使用情况进行调查分析的基础上,欧美等国构建的场地修复技术筛选矩阵已成为污染场地修复技术初筛最常用的决策支持工具。美国修复技术圆桌会议(FRTR)、欧盟组织污染土地复垦环境技术网络(CLARINET)和欧盟地下水和污染土壤修复信息系统(EUGRIS)以及北约现代社会挑战应对委员会(NATO/CCMS)等污染修复相关组织和研究机构都推荐在决策过程的初期阶段使用场地修复技术筛选矩阵来挑选备选修复技术。FRTR 编制的矩阵将现有的 59 种修复技术分成 14 大类,将每种技术的适用环境介质、技术成熟度、成本价格、适用污染物种类、技术推广程度、技术使用时间等集成在一张表格里,供污染场地修复决策者查询。污染场地修复技术的筛选一般分为 3 个阶段:修复调查与可行性研究、修复技术初筛和修复技术评价。场地修复技术筛选矩阵在 3 个阶段有不同详略和侧重的表格可供查询,使用流程见图 2。CLARINET 在系统调研欧盟污染场地修复情况的基础上,总结了各国现有的修复技术、使用效果及其市场份额。EUGRIS 和 NATO/CCMS 详细调研了欧洲各国污染场地修复案例,总结了各国污染场地管理模式、现有修复技术的使用情况、技术成熟度和各类修复技术成本费用等情况。英国环境局(EA)在提出该国污染场地风险评估和修复技术筛选详细流程的同时,也制定了包含英国现有修复技术特征的场地修复技术筛选矩阵。谷庆宝等^[11]在介绍美国修复技术选择体系的基础上,对中国污染场地修复技术的分类和筛选等方面提出了初步建议。由于缺乏污染场地修复技

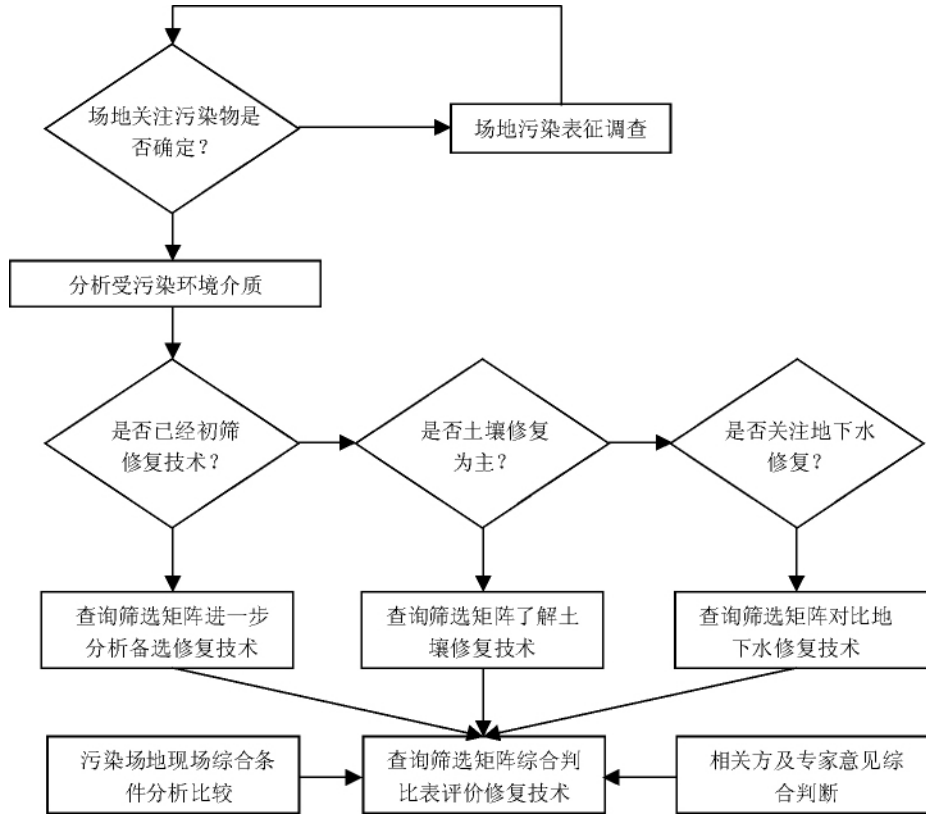


图2 场地修复技术筛选矩阵使用流程

术和市场调查的基础信息,国内尚没有场地修复技术筛选矩阵制定出来。

2.2 多目标决策支持技术

在依据本国修复技术制定场地修复技术筛选矩阵的基础上,欧美等国还提出适合各自国情的修复技术筛选决策模式和流程,常用的表达形式有文件导则、决策流程图、计算机软件等^[12]。构建基于层次分析(AHP)、多目标决策分析(MCA)等方法的决策支持工具成为该领域研究热点。CRITTO等^[13]建立了一套综合考虑修复技术特征和污染场地具体状况的两阶段污染场地修复技术筛选决策支持体系,先从修复技术库中初筛出可行的技术列表,然后采用MCA方法对列出的可行技术进行评分和排序。BELLO DAMBATTA等^[14]采用基于AHP的污染场地管理决策支持模型进行了实例验证。国内学者针对持久性有机污染物(POPs)污染问题从经济、环境、技术等指标方面提出了废物处置技术优选的AHP模型^[15,16]。

2.3 CBA

采用AHP或MCA方法虽然能够对污染场地修复方案进行优选和排序,但评估结果仍具有较大的主观成分,为进一步量化污染场地修复方案评估

结果,CBA、费用效果分析(CEA)方法逐渐成为污染场地修复管理中较为常用的评估方法^[17]⁶¹³⁵。CBA作为一种常用的环境经济学方法从20世纪80~90年代就在宏观环境政策评估领域有较广泛的应用^[18],随着各国对污染场地环境问题的关注程度升高,欧洲一些国家的学者逐渐尝试从区域或国家层面对污染场地修复策略的费用效益进行分析。VAN WEZEL等^[19]比较了不同贴现率水平下荷兰污染场地修复的费用效益情况,指出荷兰土壤修复的净现价值(NPV)取决于污染成因和类型、修复技术、土地当前用途、当地人口密度等因素。SCHWARZENBACH等^[20]采用物质流分析的方法对瑞士某地区1988—1996年异位土壤修复产生的多环芳烃(PAHs)、锌和石油烃类污染物的去向作了详细分析。LEMMING等^[21]⁹¹⁶⁵对某三氯乙烯污染场地修复的环境影响进行了定量评估,结果表明与异位修复相比,原位生物修复法具有明显降低环境影响的特点。

美国、加拿大、英国、荷兰等发达国家都在污染场地管理的相关文件中要求进行具体污染场地修复方案的CBA,并对评估步骤做出了指导性说明^[22-27]。GOLDAMMER等^[28]构建了基于CBA的

表 1 修复技术评估工具比较分析

评估技术原理	工具	修复技术	国家或地区	评估范围与标准				参考文献
				风险评估	修复费用	绿色/可持续性	社会经济因素	
MCA+LCA	REC 软件	植物修复	欧盟	✓	✓	✓		[4,19]
LCA	ABA 软件		欧盟	✓	✓	✓		[19]
MCA	DESYRE		意大利	✓	✓	✓	✓	[17]
MCA	DARTS		意大利	✓	✓	✓	✓	[17]
LCA	USES-LCA	生物活性炭吸附	美国		✓	✓	✓	[8]
LCA		PRB	美国		✓	✓	✓	[8]
LCA	The Sinsheim Model		德国			✓		[17]
CBA	SARR	气提+挖除	美国		✓	✓		[24]

污染场地修复决策模型,并用于场地生态功能恢复方案决策中。KENNEY 等^[29]构建了一套同时考虑污染场地修复后的生态服务功能的 CBA 模型,并用于美国 Superfund 场地修复案例。

2.4 LCA

CBA 虽然可以从污染场地自身环境改善的角度进行环境效益评估,但无法解决污染场地修复工程的实施有可能在提高污染场地环境质量的同时在区域和全球尺度上产生其他负面影响,而 LCA 作为一种可以全面评估项目全过程环境影响的新兴技术,在污染场地管理决策中已有一定应用^[30,31]。LCA 在污染场地修复领域的研究和应用主要集中在为修复技术提供环境影响基准、污染场地修复工程环境影响后评估、优化和筛选备选污染场地修复方案 3 个方面。

早期的污染场地修复 LCA 实践主要基于美国安大略环境署设计的污染场地修复 LCA 框架体系,主要侧重于污染场地修复方案的筛选和优化设计^[32]。PAGE 等^[33]采用该框架对加拿大某铅污染场地的挖掘—处置修复技术进行了 LCA 研究,对污染场地修复给当地、区域和全球范围的环境影响进行了评估。由于污染场地修复实地数据获取困难及相关研究的匮乏,也有学者采用简易生命周期评估(Streamlined LCA)方法结合污染场地风险评估结果来对污染场地修复产生的环境影响进行研究,以结合更多相关信息进行污染场地修复方案的优选决策^[34]。TOFFOLETTO 等^[35]采用 LCA 方法对魁北克某柴油污染场地修复工程进行了回顾性评价。CADOTTE 等^[36]采用 LCA 方法对某低密度非水相有机液体(LNAPL)污染场地修复方案进行筛选。LESAGE 等^[37]采用一种四阶段序列 LCA 方法对某污染场地修复工程和后继土地开再发整个过程的环境影响进行了评估。SUER 等^[38]用 LCA 方

法评估了能源植物修复技术和挖掘填埋修复技术用于某原油污染场地对环境的影响,结果表明种植柳树作为能源植物能够大大降低修复措施对环境的影响水平。HIGGINS 等^[39]尝试采用 LCA 方法比较不同基质可渗透反应墙(PRB)技术修复某地下水污染场地的环境影响,并提出了削减修复工程环境影响的建议。LEMMING 等^{[21]9165}采用 LCA 方法分析某三氯乙烯污染场地 3 种修复方案的环境影响,应用其新研发的健康和生态毒理(USEtox)环境影响分析模型评估了修复方案对污染场地地下水和人体健康毒性的影响。国内学者针对生命周期在环境领域中的应用也开展了系列研究,冯嫣等^[40]构建了基于 LCA 方法的 POPs 污染控制技术评估系统。也有学者针对中国生命周期参考数据库模型和方法的构建及不同区域农业生产的 LCA 开展了研究^[41,42],但针对污染场地修复的 LCA 研究尚未见报道。

主要修复技术评估工具比较分析见表 1。

2.5 场地生态环境价值评估与恢复

CBA 和 LCA 方法为污染场地修复和管理提供了强有力决策支持手段,但筛选出的污染场地修复方案实施后虽然能够以较低成本将污染场地环境风险控制在最大可接受水平以下,在后继恢复污染造成的场地生态功能损害时两者并不能很好的相互支持。因此,当前国际上针对污染场地修复与管理研究和实践的重点已经从单一的场地污染识别、风险评估、修复技术和管理制度方面转向如何建立协调统一的污染场地环境风险削减、降低污染场地修复成本、利于场地再开发和满足后继生态环境服务功能恢复的整体优化管理策略方面。目前,针对生态环境服务功能价值评估的方法还不成熟,在宏观层面,COSTANZA 等^[43]建立了一套生态系统服务功能价值评估方法,初步估算全球生态系统每年产生

的服务价值约在 16 万亿~54 万亿美元。但在不同类型的生态系统以及不同尺度上的服务功能类型划分、价值评估及受损生态功能恢复等方法学和计算结果可信度方面仍没有达成共识^[44,45]。

针对污染场地的生态服务功能损害评估研究仍处在起步阶段。HAMBY^[46]综述了支持污染场地修复后期生态环境恢复的修复技术特征。JEF-FREE 等^[47]对澳大利亚北部的 Finnis 河在遭受含 Cu、Zn 等重金属的酸性采矿废水污染期间及采取修复措施后野生鱼类资源的恢复状况进行了调查统计。BURGER^[48]在污染场地修复、生态恢复和自然资源损害评估之间联系和区别的分析基础上,初步提出了基于最小环境风险和降低污染场地全过程管理成本的污染场地综合应对策略。在美国,STAHL 等^[49]探讨了污染场地生态风险评估和自然资源损害评估之间协调进行、污染场地调查信息共享的可行性,分析了两者耦合的技术、法规和操作流程障碍及其解决途径。GALA 等^[50]在生态风险评估和自然资源损害评估重叠内容的分析基础上,探讨了两者评估程序集成技术。MUNNS 等^[51]初步提出了构建统一度量生态风险水平和自然资源损害的“生态货币”估算技术。GOUGUET 等^[52]建立了生态风险与自然资源损害综合评估的技术和操作流程。面对严峻的污染场地管理形势,欧盟也在致力于协调各国基于风险的污染场地管理模式和经验,试图从修复标准^[53,54]、技术市场^[55]、政策法规^[56]和决策机制^{[17]6139}上建立统一的污染场地管理策略,但针对污染场地生态环境资源损害评估与恢复的实例报道还非常少。国内学者仅从宏观上对资源环境价值、生态服务功能价值评估的理论、方法及其应用开展了研究^[57,58]。欧阳志云等^[59]初步估计了中国陆地生态系统生态服务功能的经济价值。但尚未见针对污染场地生态环境资源损害评估的报道。

3 中国污染场地修复与管理的启示

中国污染场地修复还处于起步阶段,目前尚没有关于绿色修复技术与政策的相关研究和实践。目前,国内已实施的污染场地修复工程案例以异位修复为主,主要采用焚烧、危废填埋等处理处置技术,虽然能够在较短时间内解决场地污染问题,但修复工程能耗高、资源消耗量大、产生水/气/固二次污

染、土壤资源功能丧失且具有较高环境风险隐患。虽然一些环境友好的修复技术如植物修复、微生物修复、原位土壤气提和淋洗技术在中国的研发呈现蓬勃发展趋势,但除一些示范工程外,实际应用案例稀少。与发达国家积极倡导绿色修复技术、原位修复技术应用比例已达到 50% 以上的现状相比,我国具有较大差距。建议加强对中国污染场地修复产业现状调研和趋势预测,研究和制定适合绿色和可持续修复技术研发和应用的政策体系,具体包括如下方面:

(1) 构建基于中国修复技术水平及潜力的场地修复技术筛选矩阵,建立基于环境修复成本的污染场地环境损害评估定值技术和管理办法,为中国污染场地修复技术优选和场地环境损害评估提供方法学依据。

(2) 建立并优化中国污染场地修复决策流程,建立基于 CBA 的污染场地修复方案评估技术,建立污染场地修复方案筛选决策模型。建立典型地区污染场地数据库,构建区域污染场地修复 CBA 模型并进行实证研究。

(3) 构建中国污染场地修复技术 LCA 框架体系,界定污染场地修复技术 LCA 目标与范围,开展污染场地修复生命周期清单分析,构建污染场地修复技术 LCA 环境影响评估模型,为提出中国污染场地修复方案 LCA 推荐方法、优化污染场地修复与管理提供基础依据。

参考文献:

- [1] 骆永明. 中国土壤环境污染态势及预防、控制和修复策略[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(12): 27-31.
- [2] 李发生, 严增光. 污染场地术语手册[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] 李广贺, 李发生, 张旭, 等. 污染场地环境风险评估与修复技术体系[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- [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] 张红振, 骆永明, 夏家淇, 等. 基于风险的土壤环境质量标准国际比较与启示[J]. 环境科学, 2011, 32(3): 224-231.
- [6] 赵沁娜, 杨凯. 发达国家污染土地置换开发管理实践及其对我国的启示[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(7): 540-544.
- [7] 余勤飞, 文方, 侯红, 等. 发达国家污染场地分类机制及其对中国的启示[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(11): 78-83.
- [8] U. S. EPA. Green remediation: incorporating sustainable environmental practices into remediation of contaminated sites[R]. Washington, D. C. ; U. S. EPA, 2008.
- [9] U. S. EPA. Superfund green remediation strategy[R]. Washington, D. C. ; U. S. EPA, 2010.

- [10] U. S. Sustainable Remediation Forum. Sustainable remediation white paper integrating sustainable principles, practices, and metrics into remediation projects[R]. Washington, D. C. : U. S. Sustainable Remediation Forum, 2010.
- [11] 谷庆宝, 郭观林, 周友亚, 等. 污染场地修复技术的分类、应用与筛选方法探讨[J]. 环境科学研究, 2008, 21(2): 197-202.
- [12] SAITO H, GOOVAERTS P. Selective remediation of contaminated sites using a two-level multiphase strategy and geostatistics[J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(9): 1912-1918.
- [13] CRITTO A, CANTARELLA L, CARLON C, et al. Decision support-oriented selection of remediation technologies to rehabilitate contaminated sites[J]. Integration Environment Assessment Management, 2006, 2(3): 273-285.
- [14] BELLO DAMBATTA A, FARMANI R, JAVADI A A, et al. The Analytical Hierarchy Process for contaminated land management[J]. Advanced Engineering Informatics, 2009, 23(4): 433-441.
- [15] 邢颖, 吕永龙, 史雅娟, 等. 焚烧、水泥窑和安全填埋法处置 PCBs 污染物技术优选[J]. 环境科学, 2007, 28(3): 673-678.
- [16] 赵娜娜, 李丽, 易爱华, 等. POPs 废物处置技术多目标决策筛选研究[J]. 环境科学研究, 2007, 20(3): 164-167.
- [17] ONWUBUYA K, CUNDY A, PUSCHENREITER M, et al. Developing decision support tools for the selection of "gentle" remediation approaches [J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(24).
- [18] 王金南. 环境经济学: 理论·方法·政策[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [19] VAN WEZEL A P, FRANKEN R O, DRISSEN E, et al. Societal cost-benefit analysis for soil remediation in the Netherlands[J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2008, 4(1): 61-74.
- [20] SCHWARZENBACH R C, SCHOLZ R W. A regional perspective on contaminated site remediation-fate of materials and pollutants [J]. Environmental Science & Technology, 1999, 33(14): 2305-2310.
- [21] LEMMING G, HAUSCHILD M Z, CHAMBON J, et al. Environmental impacts of remediation of a trichloroethene-contaminated site; life cycle assessment of remediation alternatives [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(23).
- [22] Canadian Council of Ministers of the Environment. Guidance document on the management of contaminated sites in Canada [R]. Winnipeg: Canadian Council of Ministers of the Environment, 1997.
- [23] BARDOS R D, NATHANAIL C P, WEENK A. Assessing wider environmental value of remediating land contamination; a review[R]. London: Environment Agency, 2000.
- [24] POSSTLE M, FENN T, GROSSO A, et al. Cost-benefit analysis for remediation of land contamination[R]. London: Environment Agency, 1999.
- [25] HARDISTY P E, OZDEMIROGLU E. Costs and benefits associated with remediation of contaminated groundwater; a framework of assessment[R]. London: Environment Agency, 2000.
- [26] HARDISTY P E, OZDEMIROGLU E. Costs and benefits associated with remediation of contaminated groundwater; a review of the issues[R]. London: Environment Agency, 1999.
- [27] HARDISTY P E, OZDEMIROGLU E. Costs and benefits associated with the remediation of contaminated groundwater application and example[R]. London: Environment Agency, 2002.
- [28] GOLDAMMER W, NUSSER A, SYSTEMPLANUNG B, et al. Cost-benefit analyses as basis for decision-making in environmental restoration[R]. London: Environment Agency, 1999.
- [29] KENNEY M, WHITE M. A cost-benefit model for evaluating remediation alternatives at superfund sites incorporating the value of ecosystem services[M]. London: Environment Agency, 2007.
- [30] ZHANG Yi, SINGH S, BAKSHI B H. Accounting for ecosystem services in life cycle assessment. Part I : a critical review [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(7): 2232-2242.
- [31] SUER P, NILSSON PALEDAL S, NORRMAN J. LCA for site remediation: a literature review[J]. Soil & Sediment Contamination, 2004, 13(4): 415-425.
- [32] DIAMOND M, 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): 788-800.
- [33] PAGE C A, DIAMOND 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.
- [34] VOLKWEIN S, HURTIG H W, KLOPPFER W. Life cycle assessment of contaminated sites remediation[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 1999, 4(5): 263-274.
- [35] TOFFOLETTO L, DESCHENES L, SAMSON R. LCA of ex-situ bioremediation of diesel-contaminated soil[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2005, 10(6): 406-416.
- [36] CADOTTE M, DESCHENES L, 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.
- [37] LESAGE P, EKVAL T, DESCHENES L, et al. Environmental assessment of brownfield rehabilitation using two different life cycle inventory models. Part 1: methodological approach[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2007, 12(7): 497-513.
- [38] SUER P, ANDERSSON SKOLD Y. Biofuel or excavation? - Life cycle assessment (LCA) of soil remediation options[J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(2): 969-981.
- [39] HIGGINS M R, OLSON T M. Life-cycle case comparison of permeable reactive barrier versus pump-and-treat remediation [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(24): 9432-9438.
- [40] 冯嫣, 吕永龙, 王铁宇, 等. 基于 LCA 的 POPs 控制技术系统评估方法研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(3): 709-716.
- [41] 李贞宇, 王旭, 魏静, 等. 我国不同区域玉米施肥的生命周期评价[J]. 环境科学学报, 2010, 30(9): 1912-1920.
- [42] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型[J]. 环境科学学报, 2010, 30(10): 2136-2144.
- [43] COSTANZA R, ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of

- the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [44] PALMER M A, FILOSO S. Restoration of ecosystem services for environmental markets[J]. Science, 2009, 325(5940): 575-576.
- [45] BEY BENAYAS J M, NEWTON A C, DIAZ A, et al. Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: a meta-analysis[J]. Science, 2009, 325(5944): 1121-1124.
- [46] HAMBY D M. Site remediation techniques supporting environmental restoration activities: a review[J]. The Science of the Total Environment, 1996, 191(3): 203-224.
- [47] JEFFREE R A, TWINING J R, THOMSON J. Recovery of fish communities in the Finnis river, Northern Australia, following remediation of the Rum Jungle uranium/copper mine site[J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(14): 2932-2941.
- [48] BURGER J. Environmental management: integrating ecological evaluation, remediation, restoration, natural resource damage assessment and long-term stewardship on contaminated lands[J]. Science of the Total Environment, 2008, 400(1/2/3): 6-19.
- [49] STAHL J R G, GOUGUET R, CHARTERS D, et al. The nexus between ecological risk assessment and natural resource damage assessment under CERCLA [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2009, 5(4): 496-499.
- [50] GALA W, LIPTON J, CERNERA P, et al. Ecological risk assessment and natural resource damage assessment: synthesis of assessment procedures[J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2009, 5(4): 515-522.
- [51] MUNNS W R, HELM R C, ADAMS W J, et al. Translating ecological risk to ecosystem service loss[J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2009, 5(4): 500-514.
- [52] GOUGUET R G, CHARTERS D W, CHAMPAGNE L F, et al. Effective coordination and cooperation between environmental risk assessments and natural resource damage assessments: a new synthesis[J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2009, 5(4): 523-534.
- [53] CARLON C. Derivation methods of soil screening values in Europe. A review and evaluation of national procedures towards harmonization [R]. Ispra: Institute for Environment and Sustainability, 2007.
- [54] PROVOOST J, REIJNDERS L, SWARTJES F, et al. Parameters causing variation between soil screening values and the effect of harmonization[J]. Journal of Soils and Sediments, 2008, 8(5): 298-311.
- [55] Environment Agency. Model procedures for the management of land contamination [R]. London: Environment Agency, 2004.
- [56] FERGUSON C C, KASAMAS H. Risk assessment for contaminated sites in Europe. Volume 2: policy frameworks[M]. Nottingham: LQM Press, 1999.
- [57] 李文华. 生态系统服务功能价值评估的理论、方法与应用[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2008.
- [58] 裴辉儒. 资源环境价值评估与核算问题研究[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2009.
- [59] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. 生态学报, 1999, 19(5): 607-613.

编辑: 黄 菁 (修改稿收到日期: 2011-10-17)

(上接第 95 页)

标, 来确定合适的目标值; 通过专家咨询和部门沟通, 辅以情景分析等预测手段, 以压力—状态—响应 (PSR) 模型的双向沟通模式综合分析目标值的可达性, 最终确定指标值。

3 结论与建议

通过对温室气体的污染特性、碳排放的区域差异性以及当前我国 SEA 指标体系存在的问题的探讨, 提出将 SEA 中的低碳评价指标分为评价型指标和建议型指标, 以全面体现 SEA 的功能定位。

然而, 低碳发展是社会经济发展方式的一个低碳化过程, 不同的区域和行业可以根据自身特色选择不同的低碳化途径。由于我国碳排放的区域差异性和行业差异性而导致了低碳评价指标体系的构建原则和重点不同, 但本研究尚未能对此领域进行深入剖析。同时, 由温室气体的污染属性决定的 SEA 对碳排放的评价不能与以往的一般环境污染物评价采取同一种模式, 因此 SEA 低碳性的评价型指标和建议型指标都需要进行更加深入的完善。

参考文献:

- [1] 潘岳. 战略环评与可持续发展[J]. 环境保护, 2005(9): 10-14.
- [2] 常纪文. 二氧化碳的排放控制与《大气污染防治法》的修订[J]. 法学杂志, 2009(5): 74-76.
- [3] 贺灿飞, 梁进社. 中国区域经济差异的时空变化: 市场化、全球化和城市化[J]. 管理世界, 2004(8): 8-17.
- [4] 徐建华, 鲁凤, 苏方林, 等. 中国区域经济差异的时空尺度分析[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 57-68.
- [5] YOICHI K. Impact of carbon dioxide emission on GNP growth: interpretation of proposed scenarios presentation to the energy and industry subgroup, response strategies working group[R]. Paris: IPCC, 1989.
- [6] WANG Can, CHEN Jining, ZOU Ji. Decomposition of energy-related CO₂ emissions in China: 1957-2000[J]. Energy, 2005, 30(1): 73-80.
- [7] 徐国泉, 刘则渊, 姜照华. 中国碳排放的因素分解模型及实证分析: 1995—2004[J]. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(6): 158-161.
- [8] 魏一鸣, 刘兰翠, 范英, 等. 中国能源报告(2008): 碳排放研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [9] UNCSO. Indicators of sustainable development: guidelines and methodologies[EB/OL]. [2011-08-20]. <http://www.un.org/esa/sustdev/natlinfo/indicators/guidelines.pdf>.

编辑: 卜岩枫 (修改稿收到日期: 2011-10-11)