

土壤修复技术的可持续性评价^①

——以原位稳定/固化技术和异位填埋技术为例

李青青¹, 罗启仕^{1*}, 郑伟², 李小平¹

(1 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 2 华东师范大学图书馆, 上海 200241)

摘 要: 土壤修复技术的可持续性评价是评价土壤修复工程的可持续性和选择土壤修复技术的重要依据。本研究以上海某重大工程的污染场地土壤修复为例, 运用多标准分析法(MCA), 从人体健康、社会、能源消耗以及环境保护等角度, 对两种典型的修复技术(原位稳定/固化, 异位填埋)的可持续性进行综合分析和评价。结果表明, 稳定/固化技术是一种较为经济且环境污染少的可持续的修复方法; 填埋技术不仅经济成本较高, 而且温室气体排放种类多, 对社会的可持续发展较为不利。

关键词: 土壤修复; 技术可持续性; 原位稳定/固化; 异位填埋

中图分类号: Q938.1+3

长期以来, 无论是国际还是国内方面, 各国的政府机构和环保人士都对大气污染和水体污染问题较为重视。直到 20 世纪 90 年代以后, 世界各国尤其是西方发达国家意识到土地资源的缺乏以及土壤和地下水被污染的严重性, 因此投入了大量人力、物力对污染土和地下水污染进行整治、管理和研究。目前, 国际上已开发的污染土修复技术的种类很多, 如稳定/固化技术, 填埋技术、生物修复、植物修复、热解析技术、水洗技术等等, 但是缺乏对修复技术本身的可持续性发展评价。通常而言, 每一种修复技术都可以在污染场地原位处理或者挖掘后异位堆放或填埋, 继而采用修复技术进行处理(对于生物、病原体及放射性物质导致的土壤污染的修复技术需特殊考虑和处理)。选择修复技术和工程时应慎重考虑, 因为如果修复行为处置不当, 不但经济损失巨大, 而且很有可能对环境造成再次污染。因此如何对土壤修复工程进行可持续的系统预测和评价是非常值得关注的。

本文基于欧盟组织 CLARINET 和英国开发的污染土可持续发展的指标评分系统, 制定了评价原则, 运用多标准分析法(MCA), 结合社会、环保和经济因素, 对修复技术进行综合评价和总结, 在原位稳定/固化技术和异位填埋技术两者之间筛选出有利于可持续发展的污染土修复技术。同时, 本文对未经修复处

理的污染土也进行了可持续性发展的评分, 并与上述两种技术的评分结果进行了比较。

1 评价方法学

1.1 可持续发展的评价准则

以Bardos等^[1]、Harbottle等^[2]研究为基础, 可持续性土壤修复的 5 条评价准则为:

准则 1: 修复工程带来的长期利益远大于修复工程本身付出的代价。其中, 利益和代价的评估涵盖经济因素和非经济因素。经济因素包括修复引起的土地价格的变动, 包括对周边土地价格的影响; 场地的前期调查和监测费用、现场的施工费用、专家咨询费、人力资源费、后续的维护费、以及异地处置费等。非经济利益评估包括因土地功能的转变所面临的再次利用的风险; 因污染和修复工程带给公众的健康风险; 工程实施后周边环境质量的改变等。

准则 2: 修复工程对环境产生的不良影响应小于不采取修复工程对环境产生的影响。环境的不良影响可以是土壤性状的变化; 周边水质、空气质量和生态环境的恶化; 人类健康受到的影响, 土地部分功能的丧失; 以及污染物的宿命问题等等。

准则 3: 修复工程的实施对环境的影响应减至最小, 并且可以用具体的环境指标衡量。这些指标包括工程

①基金项目: 上海市科委世博科技专项(06dz05810)和国家 863 计划资源环境技术项目(2007AA06A401)资助。

* 通讯作者(qsluo99@yahoo.com.cn)

作者简介: 李青青(1976—), 女, 上海人, 硕士, 工程师, 主要从事土壤修复方面的研究。 E-mail: obgliqq@gmail.com

实施中空气污染物的排放,自然资源的直接利用,能量的消耗,材料的利用以及废弃物的再次利用率等。

准则 4:采用修复方法时还应考虑修复工程对环境产生的影响给子孙后代带来的风险。因此长期的环境监测,修复后的维护,地下土层和地下水的活动情况;土地的管理事宜;污染物持久性的降解过程以及土壤的持续性利用问题都应该在考虑范围之内。

准则 5:决策过程还应注重社会中利益相关方的参与性。这些参数都具有社会性,相对较为复杂,因而在此不作具体讨论。

上述 5 项准则可以用若干参数来量化,每一参数可以用若干指标来细分和衡量(如空气污染物的排放可用 SO_2 和 CO 作为指标排放物进行衡量)。

1.2 可持续发展的评价方法

根据评价准则,本文采用多标准分析(MCA)评价方法来综合评估土壤修复方法。

该方法采用场地风险评分系统,主要对 6 类母指标进行评估,包括人体健康和安全;当地环境的影响;第三方利益相关者;土地的再利用;全球环境影响以及能源的消耗。6 类母指标又细分为 20 类子指标,并对其进行打分。其中,最关键的母指标和子指标权重分为 1,其他指标根据自身的重要性,权重按比例增减,然后用各自得分乘以权重后得最终得分。

1.3 可持续评价的数据收集

1.3.1 污染场地简介 本文收集的数据源于上海某污染场地的修复工程,同时借鉴英国某相似污染场地的评分系统^[3]。上海某污染场地地处市中心,土质原为淤积层,上覆有沙、黏土和砖屑混合制成的人工填土,还有水泥层。在修复之前,该场地主要用于工业用地,水泥层和土层受到严重的重金属污染及轻微的有机物污染。

该地块污染土的土方量约为 1500 方,2700 多 t,污染土全部转移至城乡结合部的填埋场,运输距离约为 60 km。经挖掘和覆土后,原地块的土壤质量达到修复标准。根据国外经验,该地块的污染土壤运用现场稳定/固化技术完全可以满足土壤修复的目标浓度。但是稳定/固化技术相对于挖掘填埋来讲,现场工程所需的时间较长,需要消耗一定量的稳定/固化材料,如膨润土、干泥、灌浆、水泥等。

1.3.2 原始数据的收集 根据该污染地块挖掘填埋的实际情况,经过现场勘探和咨询,收集了 6 类母指标,20 类子指标的数据,包括①人体健康风险:主要了解和收集场地中重金属污染物对当地和周边居民生活安全和人体健康的影响程度;②当地环境质量:主要考虑场地中污染物对周围地下水、土壤和生态环境产生影响的情况;③第三方/持股者的关注:主要考虑政府、投资者、土地使用者、周边居民对污染场地重建的信心和支持度;④土地使用:主要考虑修复所需的时间以及修复工程对当地和周边景观的影响。因为该污染地块地处上海市中心,因此修复所用时间和对周边景观的影响程度尤显重要;⑤全球环境:温室气体效应是全球环境可持续发展关注的重点。⑥自然资源和能源的消耗:主要关注稳定/固化技术中消耗的原材料,以及挖掘填埋修复工程实施中各类施工设备消耗的能源以及运输过程中消耗的原油等。

2 结果

2.1 上海某污染场地的 MCA 评价

表 1 是上海某污染场地 MCA 评价所选取的母指标和子指标及其权重;表 2、3 和 4 是具体评估标准和得分。

从表 1 可以看出,MCA 权重分中,人体健康与安全指标最为重要,故母指标的权重分设定为 1,其他 5 类母指标根据当地的实际情况及重要性判定其权重分。在具体的评分表中,每个子指标的打分范围在 -100 到 +100 之间。-100 表示该修复行为在这类指标中对人体、社会或环境产生了最严重的负面影响,而 +100 则为最佳。这个评分系统具有一定的不确定性,属半定量评分。因此,这个评分表中分值是根据污染场地的实际修复情况而评定,而且每个母指标和子指标都有其特殊性,如母指标“土地使用”中子指标“景观影响”的分值在城市、郊区和农村可以相差很远,而母指标“人体健康和安全”则在任何地方都具有很高的重要性,分值的取向较为统一。

根据表中的风险评分和各指标的权重得分,填埋的最终得分为 -553.2,稳定/固化的最终得分为 131.0,无修复行为的最终得分为 -216.3。从综合得分可以看出,稳定/固化技术最占优势,实施挖掘填埋或不采用任何修复手段并不利于社会可持续性的发展。

表 1 MCA 权重及判断标准
Table 1 Weights and criterions of MCA

分类	标准	权重			判断标准
		原位	场外	分类	
人体健康与安全	当地健康风险	1	0.5	1	当地居民受污染影响较大；场外居民影响不大
	公共健康风险	1	0.5		
当地环境	地表水质	1	0.7	0.9	保护河流和湖泊是该项目的目标之一
	地表水量	0.2	0.2		水体未被用于提取，对水量的影响较小
	地下水水质	0.8	0.7		现场：浅含水层，未用于饮用，但对于河流水质较为重要； 场外：由于附近有湖泊，具有一定的重要性
	地下水水量	0.2	0.2		现场：未用于抽取，对于河流具有一定的重要性；场外： 由于附近有湖泊，具有一定的重要性
	空气质量（污染）	0.7	0.5		扬尘较多队当地人群造成影响，而场外人口数量少
	质量/土壤结构	0.7	0.1		现场：对于施工具有一定的重要性；场外：由于具有填埋物， 重要性不大
	生境/生态	0.7	0.3		现场：市区重要性为高；场外：填埋场较为偏远，人口稀少
第三方/股份持有者的关注	第三方/持股者信任度	0.8	0.6	0.8	第三方的关注很大程度上决定了原污染地块和填埋场的发展趋势
	第三方/持股者可接受程度	1	0.7		
土地使用	修复期间	0.8	0.2	0.9	现场：由于亟待需要发展而变得很重要；场外：不重要
	景观影响	0.8	0.7		现场：由于在市区内进行重建，因此较为重要；场外：处于农村
	土地使用	1	0.6		由于土地压力，因此在市区非常重要
	周围土地的使用	0.8	0.6		
全球环境	空气质量（温室气体）	1	1	0.7	全球的重要性一等值权重
	自然资源的使用	1	1		
	非可循环废弃物	1	1		
能源消耗	电能的消耗	0.8	0.8	0.9	能源消耗具有全球等值权重
	原油的消耗	0.8	0.8		

注：该权重分的分值和判断依据主要源于英国环保局发表的研发报告^[3]。

表 2 经挖掘填埋处理的 MCA 评分
Table 2 Gradation of MCA after off site landfill treatment

分类	标准	分值				判断标准
		施工期		施工后		
		原位	场外	原位	场外	
人体健康与安全	当地健康风险	-100	-100	100	-20	由于污染物释放和场地操作（场内及场外）造成高风险。施工后，污染物被转移，原位无风险，而异位场地污染物散失风险较原位小
	公共健康风险	-100	-100	20	-5	施工期，灰尘及场内、外交通的污染影响，施工后，原位土地污染物清除、填埋场较小的污染物质散失风险改善土壤质量
当地环境	地表水质	0	0	50	-5	修复期间无效果。污染源清除，土壤现场地表水质得到改善。填埋场污染物质散失风险小，地表水质稍有影响
	地表水量	0	0	0	0	无影响
	地下水质	-5	0	100	-5	挖掘期间污染物散失风险小。施工后，尽管填埋过程存在少量散失风险，但工程清除了所有污染物质

续表 2

	地下水量	-100	0	0	-5	基础施工期间有干扰/脱水作用。填埋盖封/衬垫过程中可能存在少量的影响作用
	空气质量（污染）	-100	0	0	0	挖掘过程中有非温室气体排放，挖掘后有CO ₂ 、CH ₄ 和N ₂ O的排放
	土壤质量/结构	-100	-40	10	20	开挖造成场地土壤结构受到破坏。污染物全部转移至场外
	生态环境	-100	-80	50	-20	现场表面/土壤生境与处理场地表生境损失，虽然施工后污染仍处于处理场，但现场生态环境得到恢复
第三方/股份持有者的关注	第三方/持股者信任度	-100	-80	100	-60	信任与否主要取决于污染物存在的风险
	第三方/持股者可接受程度	-40	-20	100	-50	最大的噪音、灰尘和场内、外运输影响。施工后，现场无残留风险，但是填埋场存在的污染物质仍然不得人心
土地使用	修复期间	-50	-50	100	-50	时耗小于 1 个月（包括监测、挖掘和运输）
	景观影响	-50	-50	100	-100	填埋存在长期的影响负面
	场地内土地使用	0	0	100	-90	用途包括 6 类（住宅、工业、商业、农业、绿地和无绿化的开放式空地）。场外由于原材料提取和填埋损失 4 项用途
	周围土地的使用	-20	-20	100	-80	场内外土地拥塞造成最大的影响。施工后，现场土地污染物清除，土地得到再利用，但填埋存在污染物质
全球环境	空气质量（温室气体）	-30	0	-1	0	施工期和施工后均有温室气体的产生
	自然资源的使用	-100	0	0	0	清洁土の利用
	非可循环废弃物	-100	0	0	0	污染土的产生和转移
能源消耗	电能的消耗	-10	0	0	0	挖掘机、推土机、压路机以及运输车的使用
	原油的消耗	-30	0	0	0	

注：表中的分值可参考英国EPA发表的研发报告^[3]和CLARINET的总结报告^[4]，下同。

表 3 经稳定/固化处理的 MCA 评分

Table 3 Gradation of MCA after in situ S/S treatment

分类	标准	分值				判断标准
		施工期		施工后		
		原位	场外	原位	场外	
人体健康与安全	当地健康风险	-30	-5	90	0	较少污染物排放量及现场操作。较少的场外运输。由于污染物质所造成的长期风险降低，基本无场外影响
	公共健康风险	-2	-6	0	0	少量灰尘/气味，场外交通和灰尘相对较低。由于污染物被固化，随后只需对场地稍作建设（无场外影响）
当地环境	地表水质	0	0	40	0	改进后，可阻止现场污染物质到达河流
	地表水量	0	0	-20	0	由于固化材料影响，降低了土地渗透性
	地下水水质	0	0	95	0	减少了污染物质迁移至地下水
	地下水量	0	0	-100	0	降低了土地渗透性
	空气质量（污染）	-73	0	0	0	有少量的非温室气体和大量的温室气体的排放
	质量/土壤结构	-40	0	-40	0	pH 增加，土地紧实度及渗透性降低。预期的残留物质稳定
	生境/生态	-100	0	-40	0	修复期间土壤和表层栖息地效益损失。尽管由于污染物质风险降低，土壤生境持续损失
第三方/股份持有者的关注	第三方/持股者信任度	0	0	0	0	暂无资料
	第三方/持股者可接受程度	-1	-1	90	0	场地内外相对较低的噪音、粉尘、气味和运输影响。污染风险大多数被清除

续表 3

土地使用	修复期间	-100	0	0	0	时耗 2 个月
	景观影响	0	0	0	0	基本无影响
	场地内土地使用	0	0	83	-8	潜在的土地未来用途,可作为以下 5 类中的任意一种(住宅、商业、工业、绿地和无绿化的开放式空地)
	周围土地的使用	-10	-5	90	0	现场及场外拥塞影响较小。施工后:清除污染,重新利用土地
全球环境	空气质量(温室气体)	-100	0	10	0	施工期有大量的温室气体的产生,施工后:固化剂具有吸收温室气体的功能
	自然资源的使用	-9	0	0	0	施工期间使用膨润土、水等自然资源
	非可循环废弃物	0	0	0	0	无
能源消耗	电能的消耗	-5	0	0	0	钻孔机、搅拌机的使用
	原油的消耗	-10	0	0	0	

表 4 不采取修复措施的 MCA 评分

Table 4 Gradation of MCA under non-treatment

分类	标准	分值				判断标准
		施工期		施工后		
		原位	场外	原位	场外	
人体健康与安全	当地健康风险	0	0	5	0	由于自然衰减，可随着时间推移而逐渐改善
	公共健康风险	0	0	0	0	无影响
当地环境	地表水质	0	0	-100	0	预计可最终形成河道污染
	地表水量	0	0	0	0	无影响
	地下水水质	0	0	5	0	由于自然衰减，可随着时间推移而逐渐改善
	地下水水量	0	0	0	0	无影响
	空气质量（污染）	0	0	0	0	无排放
	质量/土壤结构	0	0	5	0	由于自然衰减，可随着时间推移而逐渐改善
	生境/生态	0	0	0	0	无影响
第三方/股份持有者的关注	第三方/持股者信任度	0	0	-10	0	污染物的存在对土地的使用具有风险
	第三方/持股者可接受度	0	0	-100	0	不愿意接受污染物质的继续存在（包括附近居民，未来的土地使用者以及开发商）
土地使用	修复期间	0	0	0	0	不适用
	景观影响	0	0	0	0	无影响
	土地使用	0	0	0	0	无影响
	周围土地的使用	0	0	-100	0	影响周围土地功能的使用
全球环境	空气质量（温室气体）	0	0	-1	0	有少量CO ₂ 气体排放
	自然资源的使用	0	0	0	0	无
	非可循环废弃物	0	0	0	0	无
能源消耗	电能的消耗	0	0	0	0	无修复工程，无能源消耗
	原油的消耗	0	0	0	0	

3 讨论

3.1 LCA 法与 MCA 法的比较

目前,与MCA法类似的有生命周期分析法(LCA)。LCA法主要用于危险废物管理可持续性方面的评估,考虑 3 类指标。①人体健康和安全风险指标。

可以运用污染场地风险评价模型(CLEA),以有毒有害污染物的平均日暴露剂量(ADE)和参考剂量(ID)的比值(ADE/ID),或人体每日耐受摄入量(TDI)作为风险程度衡量标准。②生态评估指标。对于土壤的生态系统(或部分生态系统)而言,橡树岭国家实验

室ORNL^[5]的风险评价信息系统中的生态基准工具可以作为生态系统评估的标准。③气体的排放。主要考虑温室气体和非温室气体排放效应。

与MCA法不同的是,LCA法缺乏对社会、人文和经济方面的考虑,并且没有将各种参数合计为单一的代表性数值,因此难以统一论断。

3.2 两种修复技术的比较

填埋技术是最早使用的污染土壤修复技术,工程本身较为简单,成本费用低,依然是至今为止最受欢迎的一种土壤修复技术,因此被普遍使用^[6]。但是考虑到填埋技术本身的缺陷性,最近欧盟的填埋条例^[7]中明确表示要逐步减少填埋修复技术的使用。因此,稳定/固化修复技术正日渐成为一项主要的土壤修复技术。稳定固化技术的优点体现在工程实施的速度快,有利于场地重建,无异地污染,原材料使用成本相对较低。

相比而言,稳定/固化技术起步较晚,但发展迅速,取得的成果明显。欧洲、日本、美国、加拿大在土壤固化技术应用方面有很多成功的例子。Harbottle等^[8]经过2年的监测表明,稳定/固化的修复现场状态良好,渗滤液中污染物浓度满足环保的要求。Board等^[9-10]和Al-Tabbaa等^[11]也对运用稳定/固化技术进行的污染土壤的修复工程持续了3~5年的调查监测,结果表明:达到修复效果的污染地块无明显的土壤恶化趋势。我国也研制了多种固化剂,并且部分成果已经从实验室走到了应用第一线。上海对Cu、Zn、As污染土的稳定/固化技术开展了研究,研制了固化剂,并取得了实际应用成果。目前,科研工作者们对于稳定/固化修复技术在中等时间范围内所获得的实际修复效果已具有一定的信心。但是目前仍缺乏长期的监测数据,这也正是国际上相关研究讨论的热点。

3.3 可持续性评价的意义

从MCA法的评价结果可以看出:对于重金属污染土壤,进行无害化处理的稳定/固化技术不失为一条可持续的发展之路,可以更好地实现土壤和土地的再次开发和利用。当然,为了降低稳定/固化技术中所需的原材料的能耗,可以进一步研发新型的、低能耗的、可持续利用的固化材料使得稳定/固化技术得以持续和推广。

对于填埋技术来说,尽管清理掉了土壤中大部分的污染物,但是如果找不到合适的清洁土壤进行回填,就无法在短期内实现土地的再利用。因此,需尽可能地通过污染土循环再利用的方法,使得用于填埋的土壤量降到最低,同时减少填埋土地的使用。

土壤属非再生的自然资源。从发展的观点来看,土壤污染后必须进行修复,方可再利用。再利用的关键在于土壤修复技术和工程的可持续性。本文所研究的土壤修复技术的可持续性评价准则及方法为土壤的可持续性利用提供了思路。

4 结语

尽管原位稳定/固化和异位填埋均没有破坏污染物或改变污染物特性,土壤污染物的存在依然是潜在的环境问题。异位填埋不仅经济成本较高,而且温室气体排放种类多,对社会的可持续发展较为不利,因此从发展的观点来看,异地填埋并非长久之计。比较而言,稳定/固化是较为经济且环境污染少的可持续发展的修复方法,采用稳定/固化处理则优于异地填埋。

土壤修复技术是一项涵盖地质学、化学、物理学、材料学、生物学和环境学的多学科综合技术。土壤修复技术种类繁多^[12],如何在某一特定的环境中因地制宜,选择和采用合理的修复技术对于创建当代环境友好型城市扮演着非常重要的角色。土壤修复技术的可持续性评价旨在指导对污染场地的修复方法进行适宜的选择,是社会可持续发展问题中有关于对污染土修复的可持续评价问题。

参考文献:

- [1] Bardos RP, Nathanail J, Pope B. General principles for remedial approach selection. *Land Contam. Recl.*, 2002, 10 (3): 137-160
- [2] Harbottle MJ, Al-Tabbaa A, Evans CW. Assessing the true technical/environmental impacts of contaminated land remediation-a case study of containment, disposal and no action. *Land Contamination & Reclamation*, 2006, 14(1): 85-99
- [3] Environmental Agency of Bristol, UK. Cost-Benefit Analysis for Remediation of Land Contamination. Technical Report, 1999
- [4] Rehabilitation Network for Environmental Technologies. Brownfields and Redevelopment of Urban Areas. A report from the Contaminated Land, 2002
- [5] Oak Ridge National Laboratory Ecological Benchmark Tool. http://rais.ornl.gov/cgi-bin/eco/ECO_select
- [6] Harbottle MJ, Al-Tabbaa A, Evans, CW. The technical sustainability of in-situ stabilization/solidification. *Stabilisation/solidification treatment and remediation // Proc. Int. Conf. on Stabilisation/Solidification Treatment and Remediation*, 2005: 159-170
- [7] Rivett MO, Petts J, Butler B, Martin I. Remediation of contaminated land and groundwater: experience in England and

- Wales. J. Environ. Manage., 2002, 65: 251–268
- [8] EU Landfill Directive. <http://www.defra.gov.uk/environment/waste/topics/landfill-dir/>
- [9] Board MJ, Reid JM, Fox DSJ, Grant DI. The Effects of Age on Cement Stabilized/Solidified Contaminated Material. Transport Research Laboratory Report 451. Crowthorne, UK, 2000
- [10] Board MJ, Reid JM, Fox DSJ, Grant DI. The long-term assessment of a cement stabilized/solidified contaminated made ground for use as a road construction material. Land Contam. Reclam., 2000, 8 (2): 75–85
- [11] Al-Tabbaa A, Boes N. Pilot in situ auger mixing treatment of a contaminated site. Part 4. Performance at 5 years. Proc. Inst. Civil Eng.–Geotech. Eng., 2002, 155(3):187–202
- [12] 蒋小红, 喻文熙, 江家骅, 曹卫承, 董成. 污染土壤的物理/化学修复. 环境污染与防治, 2006, 28(3): 210–214

Assessment of Technical Sustainability of Soil Remediation

——A Case Study of in situ Solidification/Stabilization and off Site Landfill

LI Qing-qing¹, LUO Qi-shi¹, ZHENG Wei², LI Xiao-ping¹

(1 Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China ; 2 Library, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: The sustainability of soil remediation is a key basis for assessing the sustainability of soil remediation engineering and selecting soil remediation techniques. This research took a contaminated site in Shanghai as a target, assessed the sustainability of two typical remediation techniques, in situ stabilization/solidification (SS) and off site landfill (SL), with the method of multi-criteria assessment (MCA). The results showed that S/S method was an economic option with less environmental pollution and better for sustainable development, while SL method was not only high in cost, but also emitted more green gases, which was unsuitable for social sustainable development.

Key words: Soil remediation, Technical sustainability, In situ stabilization/solidification, Off site landfill