

污染地块修复与风险管控后期管理体系初探^①

刘增俊¹, 许贺峰¹, 樊艳玲^{1,2*}, 彭 政³, 王丽芳³, 王 东⁴, 周利强⁴, 李国傲¹

(1 北京市生态环境保护科学研究院, 北京 100037; 2 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 3 生态环境部对外合作与交流中心, 北京 100035; 4 重庆市固体废物管理中心, 重庆 401120)

摘 要: 开展地块后期管理是保障人居安全及彻底打赢土壤污染防治攻坚战的关键一环。针对污染地块调查与风险评估、修复与风险管控、效果评估各阶段存在的不确定性, 以及修复后地块存在污染物浓度反弹和风险管控措施失效等可能风险, 有必要开展污染地块修复和风险管控后期管理研究。为此, 基于欧美国家污染地块管理经验, 综合考虑我国污染地块环境管理要求, 确定了需开展后期管理的地块类型, 分析了后期管理过程中长期监测、运行维护、制度控制及回顾性评估 4 种措施的重要作用, 初步构建了污染地块修复和风险管控后期管理框架体系, 明确了长期监测对象与目的、监测点位、监测指标、监测频次与周期, 运行维护内容, 制度控制措施, 回顾性评估要求及后期管理的终止条件。实施后期管理是贯彻落实《中华人民共和国土壤污染防治法》的重要体现, 将为污染地块修复和风险管控后的安全再利用提供重要保障。

关键词: 污染地块; 风险管控; 后期管理; 长期监测; 制度控制; 回顾性评估

中图分类号: X53 **文献标志码:** A

Preliminary Research on Management System of Contaminant Land After Remediation and Risk Management

LIU Zengjun¹, XU Hefeng¹, FAN Yanling^{1,2*}, PENG Zheng³, WANG Lifang³, WANG Dong⁴, ZHOU Liqiang⁴, LI Guoao¹

(1 Beijing Municipal Research Institute of Eco-Environmental Protection, Beijing 100037, China; 2 College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3 Foreign Environmental Cooperation Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100035, China; 4 Chongqing Solid Waste Management Center, Chongqing 401120, China)

Abstract: The post-remediation management is a critical step of protecting the health of people and realizing the goals set by “the Fight of Preventing and Controlling Soil Pollution”. Considering the uncertainties associated with different stages of risk management and remediation of soil contamination, and the possibilities of rebound in pollutants concentrations or the failure of risk management measures, it is essential to study the effects of different post-remediation management practices. In this study, we comprehensively considered the current environmental management requirements of contaminated sites in China, and analyzed the effect of four different management measures including long-term monitoring, operation and maintenance, institutional control, and retrospective review. Comparisons were made between common practices in our country and those in western countries. Our study established a framework for remediation and risk management of contaminated sites by outlining the general requirements to determine monitoring locations, target pollutants, duration and frequency of monitoring, facilities that require operation and maintenance, adequacy of institutional control, the overall requirements for retrospective review and terminal condition. The implementation of post-remediation management constitutes an important aspect of the Soil Pollution Prevention and Control Law of the People’s Republic of China, and will underpin the safety reuse of contaminated sites after remediation and risk management.

Key words: Contaminated site; Risk management; Post-remediation management; Long-term environmental monitoring; Institutional control; Retrospective review

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1801405, 2019YFC1806103)资助。

* 通讯作者(flylinger@163.com)

作者简介: 刘增俊(1980—), 男, 河南封丘人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤污染防治研究。E-mail: lzengj@126.com

土壤环境安全是维护国家生态安全和推进生态文明建设的重要基础。与欧美国家相比,我国土壤污染防治工作起步较晚,在借鉴欧美国家污染场地管理经验^[1-4]基础上形成了我国的污染地块环境管理思路,即将地块污染风险控制在人体健康可接受水平以下的风险管理理念^[5]。2019 年 1 月 1 日实施的《中华人民共和国土壤污染防治法》^[6](以下简称“土壤法”)明确提出“风险管控、修复活动完成后,需要实施后期管理的,土壤污染责任人应当按照要求实施后期管理”,首次从法律层面对后期管理提出要求,但尚未明确需开展后期管理的地块类型、技术要求以及监管机制与责任划分。国内实际工作中仅在风险管控与修复效果评估报告中给出后期管理建议,具体实施、监管以及相应的技术要求涉及较少,难以支撑后期管理工作的有效开展。

目前,多数研究主要集中在精准调查污染^[7]、科学评估风险^[8-9]、有效防控地块风险^[10-11]的基础理论与技术研究上,而针对修复后地块污染物浓度反弹、风险管控措施失效以及用地情景改变等可能造成后期风险增加的应对措施研究较少^[12]。本研究系统梳理了国内外污染地块后期管理经验,综合考虑我国污染地块环境管理要求,提出了后期管理主要技术要点,旨在为完善我国污染地块管理标准体系,为保障污染地块修复后安全利用提供理论与技术支持。

1 修复与风险管控后地块上潜在风险来源分析

1.1 地块调查至效果评估各环节潜在的不确定性

地下环境具有复杂性和异质性,现有的调查手段只能通过采集有限的样品来表征水文地质条件和污染物的分布情况,致使调查结果具有较大的不确定性。我国污染地块详细调查阶段土壤点位布设多按照每 1 600 m² 不少于 1 个点位,重点区域多按照每 400 m² 不少于 1 个点位^[13],而吴鹏等^[14]的研究表明,在 2 m×2 m 范围内不同点位对地块上污染物是否超标有不同的判定结果,距离 1 m 的相邻点位之间污染物的深度判定结果也不同。Jenkins 等^[15]的研究表明,不足 0.7 m 间距的样品之间浓度差异可达 19 倍。即使在扩散条件相对有利的地下水中,含水层介质的异质性也会造成污染物浓度较大的差别^[16]。

污染地块风险评估也存在一定的不确定性。风险评估模型通常假设一个地层中水文地质条件各向均

质,污染物分布均匀,忽略了其异质性。在暴露评估过程中,通常采用系统默认参数,不能充分体现场地特征。挥发性有机污染物的暴露评估未充分考虑污染物向上迁移过程中的衰减效应等^[17-18]。对地下水风险评估而言,通常主要考虑地下水的饮用途径,忽视了对地表水的影响及作为水资源的评估。

在我国,地下水修复效果评估采样持续时间至少为一年,往往不超过两年^[19],基于有限数据,通过统计分析以预测修复后污染物浓度持续低于修复目标值^[20]。但是,由于地层异质性对修复工程的开展具有较大的影响,大部分污染场地修复后,土壤和地下水中的特征污染物仍存在一定的残留浓度,尤其对于一些大型复杂污染场地,局部点位的残余污染物浓度甚至超过修复目标值数倍^[21],在有限的效果评估监测时间内,完全反映地下水中污染物的变化趋势存在较大的不确定性。

1.2 地块用地情景的变化

国内污染地块的修复和风险管控活动是基于特定用地情景下,将污染物浓度削减到一定浓度或切断特定暴露途径,进而确保地块人体健康风险不超过可接受水平。一旦用地情景发生改变,例如,土地利用方式或建(构)筑物结构发生改变等,修复目标值可能失去保护作用。

1.3 修复后污染物浓度反弹

地层与污染物的分布不均引起修复后地块污染物浓度反弹的重要因素。高渗透层中的污染物浓度下降后,低渗透层通过反向扩散作用充当二次污染源,修复达标后地下水中污染物浓度出现反弹,此情况可维持数十年之久^[22]。McGuire 等^[23]发现采用化学氧化技术修复的地块中,81%的监测井中出现了污染物浓度反弹的情况,其中 30%的污染物反弹浓度超过修复前的浓度。

1.4 参数修正及不可控因素

土壤法规定要适时更新有毒有害物质名录,美国环保署(EPA)会定期更新部分污染物的毒理学参数(<https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables>),科研工作者也致力于逐步完善风险评估体系^[8, 17-18]。一方面,修复后地块中残留污染物的停留时间较长,随着评估体系的不断完善,可能会出现满足之前的修复目标值仍达不到健康风险的要求;另一方面,不可预见的自然灾害,如洪水、地震等,可能改变水文地质条件和残留污染物的暴露途径等,从而出现风险不可接受的情况。

2 后期管理对象

美国要求污染源或地下水阻隔场地及地下水或地表水修复场地需开展运行维护、监测、制度控制、5 年回顾等后期管理，直至地块不限制使用且不限制暴露途径为止^[24]。澳大利亚要求无法达到修复目标值、修复后有残留污染物或污染物封存在原地地的地

块开展长期监测与制度控制^[21, 25]。加拿大规定风险管控场地需开展监测与制度控制，部分场地的管理可能是永久的^[26-27]。通过对欧美国家后期管理场地类型梳理可以看出，风险管控场地、修复周期较长的场地、修复后仍有残留污染物的场地需要开展后期管理。我国现有技术文件中涉及后期管理的具体情况见表 1。

表 1 不同技术文件中有关后期管理对象的规定
Table 1 Stipulations of post-remediation management objects in different technical guidelines

技术文件	后期管理对象的规定
《工业企业场地环境调查评估与修复工作指南(试行)》 ^[28] (2014 年)	选择的修复技术方案没有彻底消除污染，依赖于对土壤、地下水等的使用限制，或者使用了物理和工程控制措施的地块
《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则(试行)》 ^[29] (HJ25.5—2018)	修复后土壤中污染物浓度未达到 GB36600—2018 第一类用地筛选值的地块；实施风险管控的地块
《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》 ^[19] (HJ25.6—2019)	实施风险管控的地块
广州市污染地块修复后环境监管工作要点(试行) ^[30] (2020 年)	(一)涉及采用土壤污染风险管控措施的地块。包括采用原地原位阻隔、原地异位阻隔等污染物总量未降低，或虽采取减量化技术但未降低至修复目标值以下的风险管控类地块 (二)规划用途属于 GB 36600—2018 第二类用地，土壤的污染物含量经修复后达第二类用地修复目标值但未达到第一类用地修复目标值的地块 (三)地下水中有毒有害污染物(重金属、VOCs、SVOCs 等)含量超过相应筛选值且存在不可接受的健康风险，使用原位阻隔等风险管控措施的；或有毒有害污染物含量超过筛选值但经评估认为人体健康风险可接受，无需进行治理修复的地块

风险管控地块中污染物仍留存在地块内,因此需开展后期管理。规划为二类用地，修复后土壤污染物浓度满足修复目标值但未达到 GB 36600—2018^[31]第一类用地筛选值的,以及地下水修复后满足修复目标值但未达到 GB/T 14848—2017^[32]中地下水使用功能对应标准值的,由于其土地和地下水资源使用受限,所以仍需开展后期管理。受地层异质性、修复不确定性、技术局限性等因素的影响,修复后土壤或地下水中污染物浓度存在反弹风险的,需开展后期管理。

结合我国污染地块治理修复实际,建议后期管理对象可包括:①实施风险管控的地块,例如固化/稳定化、地下水垂向阻隔、水平阻隔(覆盖)等地块;②修复后土壤中污染物浓度仍超过 GB36600—2018^[31]中第一类用地筛选值的地块;③修复后地下水中污染物浓度仍超过 GB/T 14848—2017^[32]中地下水使用功能对应标准值的地块;④修复后易发生污染物浓度反弹的地块,例如土壤六价铬稳定化、地下水抽出/处理地块等。

3 后期管理工作流程与措施

美国超级基金场地中,阻隔设施建设完成经操作

与功能性确认后直接进入运行维护阶段;地下水修复设施建设完成并经操作与功能性确认后,首先开展长期响应(包括运行、维护、监测、药剂投加等),若 10 年后仍未达到修复目标,则将监管责任由美国环保署转移给州政府,继续开展运行维护^[24]。场地从国家优先控制名录中删除后可根据需求继续开展运行维护、制度控制和 5 年回顾^[24, 33]。澳大利亚要求达到修复目标但需开展长期监测/制度控制的场地和未达到修复目标但无法继续进行修复的场地,需制定场地管理计划,在执行长期监测与制度控制过程中,经与业主及管理部门沟通确认无需继续开展场地管理后,即可终止^[25]。加拿大采用十步骤法开展污染地块管理,依次为识别疑似地块、历史回顾、初步检测、地块分类、详细检测、地块再分类、制定修复/风险管理策略、执行修复/风险管理策略、验收及长期监测。采用阻隔等措施的风险管控场地在达到风险管控目标后进入长期监测阶段,长期监测包括采样检测与制度控制^[26-27]。英国环保署规定修复验收合格后需要开展长期监测与维护的场地,进入长期监测与维护阶段,长期监测过程中若出现监测数据不可接受,则需再次启动修复^[34]。可见,针对有需求的场地,美国

超级基金场地是在操作与功能性确认后,而澳大利亚、加拿大和英国则是在修复验收后,开展相应的监管措施。

我国污染地块管理技术环节包括土壤污染状况调查和土壤污染风险评估、风险管控、修复、风险管控效果评估、修复效果评估、后期管理等,且土壤法中明确要求“风险管控、修复活动结束后,需要实施后期管理的,土壤污染责任人应当按照要求实施后期管理”,基于此,综合考虑国外相关管理经验,初步提出我国后期管理的工作流程(图 1)。

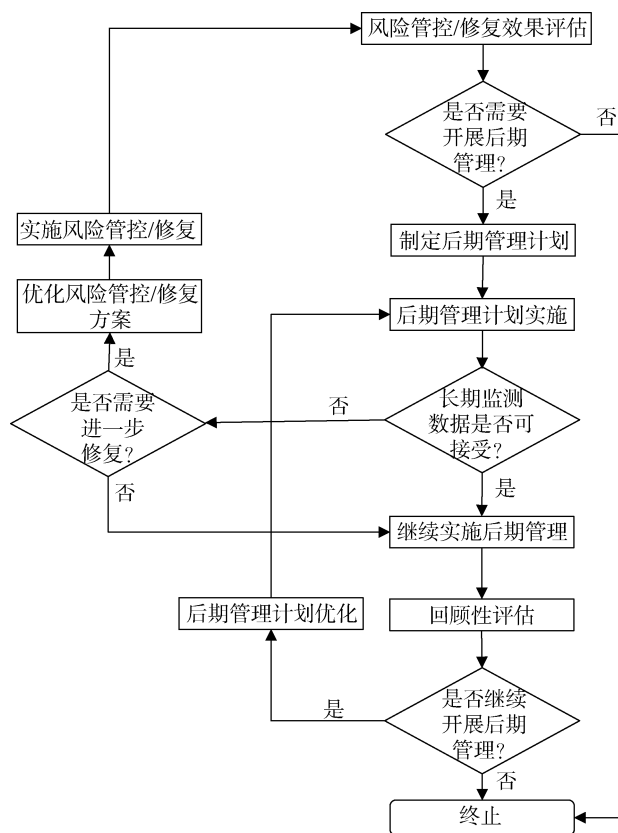


图 1 污染地块修复与风险管控后期管理流程图

Fig. 1 Flowchart for post-remediation management of contaminant land after remediation and risk management

后期管理的措施包括长期监测、运行维护、制度控制及回顾性评估,在后期管理计划制定过程中,针对不同后期管理对象,根据地块水文地质特点、修复与风险管控情况、残留污染物特性与分布、周边敏感受体等信息,选择一种或多种后期管理措施。如图 2 所示,后期管理对象(一)、(三)、(四)在后期管理阶段需开展长期监测、运行维护、制度控制和回顾性评估;后期管理对象(二)仅需开展制度控制和回顾性评估,若地块上还采取了一定的风险管控措

施,则参照后期管理对象(一)实施后期管理,若土壤中污染物浓度还存在反弹风险,则参照后期管理对象(四)实施后期管理。

4 长期监测

4.1 长期监测对象与目的

美国环保署规定需开展长期监测的类型包括污染源与地下水围堵,例如源控制、填埋覆盖、地下水阻隔、水力控制等;地下水和地表水修复,例如原位修复、监测自然衰减等^[35]。通过长期监测,评估补救措施的有效性^[36]。位于美国南卡罗来纳州查尔斯顿海军武器站的 12 号固体废物管理区地下水受到氯代烃的污染,在污染羽下游设置一道渗透反应墙,两年后在渗透反应墙的南端监测井中发现污染物浓度上升,补充调查表明污染羽已从南侧越过渗透反应墙流入下游^[37]。

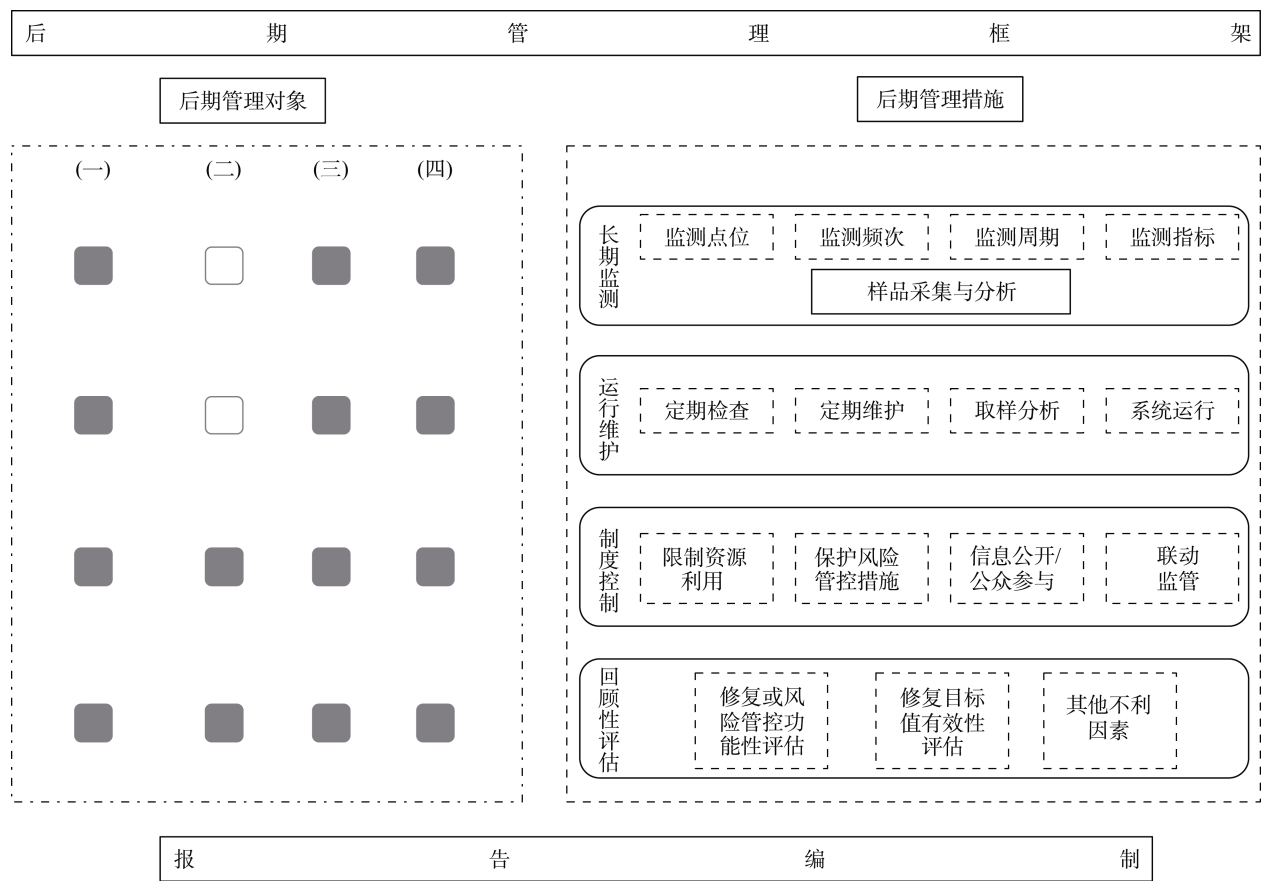
澳大利亚场地修复验收后需开展长期监测的类型包括无法达到修复目标、污染物封存于场地内(例如,固化/稳定化)、修复周期较长(例如,监测自然衰减、渗透反应墙)、修复后可能存在残留污染物(例如,源处理、抽出处理)、场地有持续管理需求。长期监测的目的是确定修复后地块是否持续满足修复目标、污染羽是否扩张,另外还需监测地下水流向、可能存在的有毒副产物、新泄漏的污染物,以确保不影响下游敏感受体^[21]。

借鉴国外长期监测经验,初步建议我国需开展长期监测的地块类型可包括实施风险管控的地块、修复后地下水中污染物浓度仍超过 GB/T 14848—2017 中地下水使用功能对应标准值的地块、修复后易发生污染物浓度反弹的地块。长期监测的目的主要为评估风险管控设施是否持续有效,监测地下水污染状态是否发生变化,预警修复后污染物浓度是否反弹。

4.2 长期监测点位设置示例

为评估风险管控设施是否持续有效,通常在紧邻风险管控设施上游、下游和两侧分别设置监测点^[38],点位数量根据场地的水文地质条件和管控面积设置,原则上不少于 5 个,也可根据实际情况进行调整。国内常用典型土壤风险管控措施固化/稳定化修复的长期监测点布设如图 3 所示。

采用地下水垂向阻隔技术的风险管控场地,地下水监测点位布设如图 4 和图 5 所示。污染羽四周设置阻隔墙的,可在上游阻隔墙及两侧阻隔墙外各设置不



- (一) 实施风险管控的地块

(二) 修复后土壤中污染物浓度仍超过GB36600中第一类用地筛选值的地块

(三) 修复后地下水中污染物浓度仍超过GB/T14848中地下水使用功能对应标准值的地块

(四) 修复后易发生污染物浓度反弹的地块
- 采取的后期管理措施

不采取的后期管理措施

图 2 后期管理构架图

Fig. 2 Framework of post-remediation management

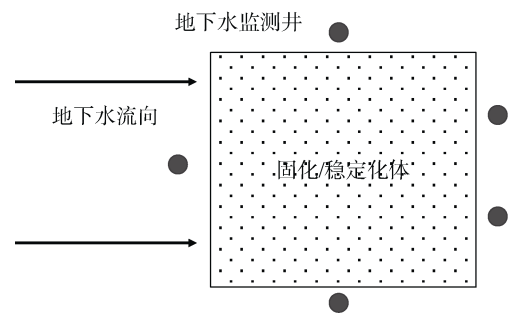


图 3 固化/稳定化修复长期监测井示意图

Fig. 3 Plan view of long-term monitoring wells for solidification/stabilization remediation

少于 1 个地下水监测点，下游阻隔墙外设置不少于 3 个地下水监测点(图 4)。仅在污染羽下游设置阻隔墙的，可在阻隔墙上游的污染羽两侧边界各设置不少于 1 个地下水监测点，阻隔墙两侧各设置不少于 1 个地下水监测点^[39-40]，阻隔墙下游设置不少于 2 个地下水监测点(图 5)。

借鉴澳大利亚长期监测点位布设原则^[21]，监测地下水污染状态是否发生变化的点位布设如图 6 所示。(I)对照点：在污染羽上游设置 1 个或多个，提供对照数据；(II)污染源监测点：在污染源内部设置 1 个或多个，监测污染源组分和浓度变化；(III)污染羽监测点：在污染羽内部设置多个，监测污染羽组分和浓度变化；(IV)侧向监测点：设置在污染羽两侧，监测污染羽边缘变化；(V)下游监测点：设置在污染羽的下游，监测污染羽向下游的迁移；(VI)预警监测点：设置在污染羽与受体(建筑物、河流等)之间靠近受体的地方，监测受体是否会受到污染羽的影响。

监测污染物浓度是否反弹，重点关注低渗透区与修复盲区。污染物与低渗透区位于含水层时，地下水监测井应设置在低渗透区的下游。若污染物具有挥发性，可在低渗透区上方的非饱和带设置土壤气监测井(图 7)。

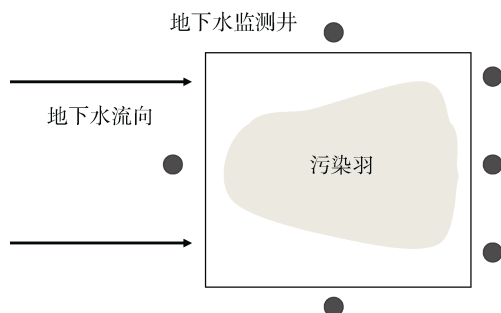


图 4 污染羽四周设置阻隔墙监测点位布设示意图
Fig. 4 Plan view of long-term monitoring barrier walls around pollution plume

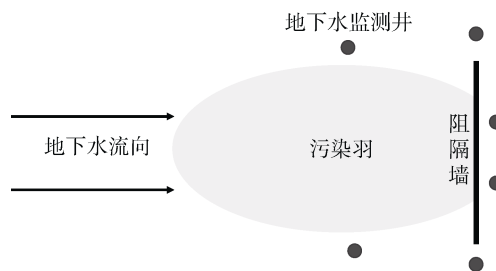


图 5 污染羽下游设置阻隔墙监测点位布设示意图
Fig. 5 Plan view of long-term monitoring barrier wall downstream of pollution plume

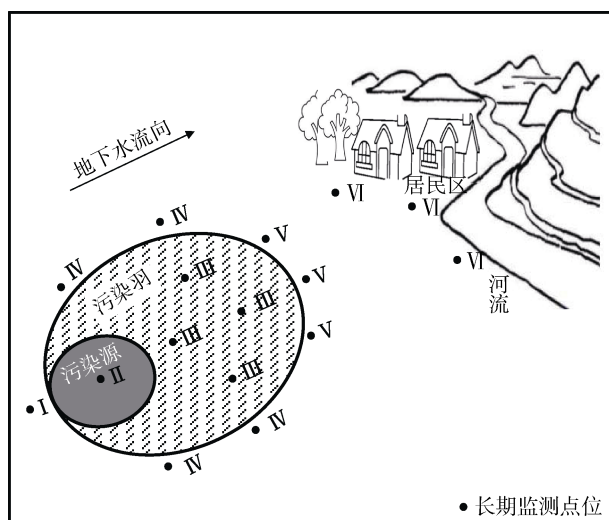


图 6 地下水污染羽长期监测井平面布设示意图

Fig. 6 Plan view of long-term monitoring wells for groundwater contaminant plume

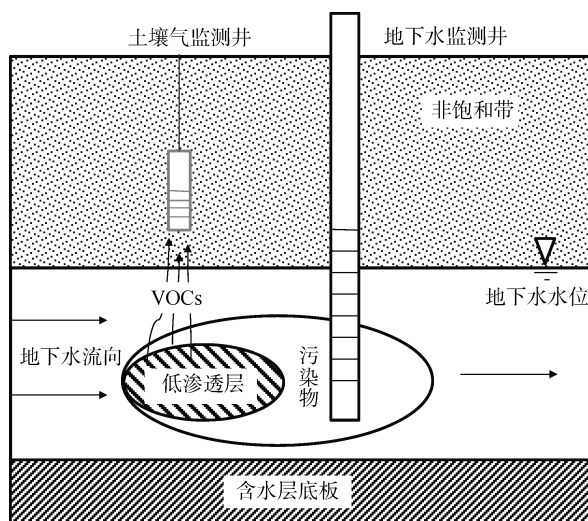


图 7 修复后低渗透层作为二次污染源向地下水中进行反向渗透示意图

Fig. 7 Schematic diagram of contaminant back diffusion from low permeability after groundwater remediation

4.3 长期监测指标

长期监测指标通常包括化学指标及地球化学指标等。化学指标主要指修复与风险管控的目标污染物及其可能产生的次生污染物；地球化学指标主要指 pH、矿化度、电子受体、电子供体等可能会影响污染物迁移转化的相关因素。

采用固化/稳定化措施的场地监测指标中除目标污染物，还应关注可能会对固化/稳定化稳定性造成影响的 pH 等；监测自然衰减时，除目标污染物和二次污染物，还应关注表征衰减进程的电子受体/供体和微生物指标；采用原位氧化修复的地块除目标污染物和二次污染物，还应关注重金属的浓度，尤其是氧化性敏感的重金属(如砷、镉、铬、铅等)，因为随着修复的进行，氧化还原条件会发生改变或有机结合态重金属再释放，可能导致重金属可溶性增强^[41]。

4.4 长期监测频次与周期

长期监测频次的设定应综合考虑水文地质条件、污染物特点、自然衰减速率、受体情况以及管理部门的有关要求等。澳大利亚要求监测时间间隔不大于溶解态污染物从污染点到监测点的迁移时间^[21]，例如，污染羽边缘距离下游监测井为 100 m，污染物在地下水中的最大迁移速率为 200 m/a，那么污染羽扩散到下游监测点的时间约计 6 个月，因此，可推荐监测频次为每半年 1 次；而新泽西州则要求监测频次不应大于污染羽迁移至最近受体时间的 1/2^[42]。固化/稳定化修复后建议地下水每季度监测 1 次，监测自然衰减从初始的每年 1 次可逐渐调整到每 4 年或 8 年 1 次^[38]。

长期监测的周期目前尚无统一的规定，针对固化/稳定化修复后场地，特拉华州要求 8 个季度的监测数据稳定达标即可终止监测；新泽西州要求至少开展 4 个季度的监测；其他很多州要求修复后每年监测

1 次,持续 3 年,以确认污染物持续低于修复目标值^[42]。

在我国,修复效果达标初判后,地下水至少满足 8 个批次且不少于 1 年的稳定达标。针对地下水修复后场地,建议可在长期监测初期阶段根据地下水丰水期与枯水期规律,每年开展 2 次地下水监测,经评估地下水浓度反弹风险较小后,可调整监测频次至每 1 ~ 2 年 1 次,直至达到 GB/T 14848—2017 中规定的地下水使用功能对应标准值为止。风险管控场地的效果评估采用一次性采样,因此,建议在长期监测初期阶段,频次可设为每季度开展 1 次,根据污染物浓度趋势,逐渐减小监测频次。但考虑到风险管控场地风险一直存在,且随着时间的推移,管控措施面临老化损坏风险,因此整体上风险管控场地的监测频次要大于修复后场地,建议长期监测实施直至风险管控设施不再需要。

5 运行维护

超级基金场地中被动修复的运行维护通常包括:
①检查抽样记录、场地和修复设备完整性;②抽样、

监测和分析;③场地维护;④编制报告。与被动修复不同,主动修复的运行维护还应增加设备的日常操作与维护。一般情况下,运行维护可以在场地内长期进行,以获得可靠监测数据,对于地下水和地表水修复场地,达到修复目标值后仍需开展运行维护,直至美国环保署批准终止^[35]。美国拉夫运河(Love Canal)场地要求每季度对排入市政管道的污水进行取样分析、定期清洗泵房与储罐、清除净化器中的污泥、维修与维护泵房与流量计、维护景观(树木、花坛、草坪等)、维护与清理围栏、维护冷暖系统、更换开关浮球、更换防回流阀、更换出入灯等^[43]。位于美国明尼苏达州德卢斯市的某钢铁工程基地焦油污染土壤采用水泥固化处理并进行表层覆盖,要求定期检查覆盖层的完整性^[44]。

我国后期管理中的运行维护主要针对风险管控设施与长期监测系统,在执行过程中根据风险管控与修复后场地特点确定运行维护的具体内容,典型运行维护活动示例见表 2,运行维护过程中应及时整理相关记录,定期编制运行维护报告。

表 2 运行维护内容
Table 2 Details of operation and maintenance

对象	运行维护内容
地面、排水系统等	定期检查排水系统、地面硬化完整情况等
具有阻隔作用的绿化带、标识牌、监控设施等	定期检查围栏、绿化带的完整性、标识牌的清晰度、监控设备是否正常使用
水平阻隔层	定期检查阻隔层的完整性,是否出现地面沉降、阻隔层破损
垂直阻隔层	定期监测阻隔墙两侧的水位等,初步判断垂直阻隔层的完整性
作为风险管控设施的空气注射、气相抽提、抽出处理等主动手段	依据实施方案启停相关设施;定期检查注气空压机、抽气泵、抽水泵、管道等;定期对出水/尾气取样分析;定期维护设施更换耗材
地下水监测井	定期检查井管及井外保护设施完整性;定期检查地下水监测井的井深,井内出现淤积时及时进行洗井
土壤气监测井	定期检查监测井及井外保护设施完整性;定期检查监测井气密性
取样设备	定期维护抽气泵、潜水泵、气囊泵、蠕动泵、苏玛罐等采样设备
取样记录、现场影像记录、监测报告等	定期检查记录资料,核实其规范性

6 制度控制

制度控制通过限制地块用途、限制人类行为、限制土壤和地下水使用以及信息公开等非工程手段,有效切断污染物暴露途径,降低人体暴露风险^[45-49]。美国制度控制主要分为 4 种类型:①所有权控制:最常见的手段是地役权和合同,在土地转让时,转让双方需明确土地责任和利益相关事宜;②政府控制:利用政府权力对土地进行限制,包括限制土地使用权限、建立建筑规范和地下水标准、设立国家危险废物地块

清单等,如伊利诺伊州、特拉华州和得克萨斯州均设有地下水管理区^[33];③许可和强制控制:依托法律法规,包括命令、许可和法规,限制某些场地的使用,并确保责任人履行相关义务;④信息控制:提供修复计划相关的信息和通知,并开展国家登记、管理部门上报和公众公开,如美国拉夫运河场地划定了管制区域,要求仅能用作商用或工业用地,若要改变用途,必须通知美国环保署和纽约州环境保护管理部门,并将表层土壤换掉^[43]。

我国开展后期管理的地块均建议开展制度控制,

制度控制可包含限制土地用途、限制地下水使用、禁止破坏风险管控设施的完整性、信息公开、公众参与、联动监管。

7 回顾性评估

超级基金规定修复后地块上残留任何污染物或有害物质时需开展 5 年回顾^[50]。5 年回顾贯穿于整个修复过程中,从修复开始直到地块不再有任何使用和暴露途径的限制^[51]。

我国开展后期管理的地块,建议每年编制后期管理年度报告,报告中应包含监测数据统计、趋势分析、成因分析、制度控制实施情况、运行维护实施情况、结论与建议,每 3~5 年开展一次回顾性评估。回顾性评估工作过程包括资料回顾、现场踏勘、人员访谈、评估报告编制,主要从修复与风险管控措施的功能性是否仍满足设计要求,修复方案阶段设定的修复目标值是否仍然有效及是否存在其他可能预示地块失去保护性的信息 3 个方面来评估地块的健康风险(表 3)。

表 3 回顾性评估内容
Table 3 Details of retrospective review

问题	具体内容
问题 A: 修复或风险管控措施的功能性是否仍满足设计要求	原位修复地块上污染物浓度是否出现反弹;风险管控设施运行状况和功能是否仍符合设计要求;制度控制是否按照计划执行并达到了预期效果
问题 B: 修复方案阶段设定的修复目标值是否仍然有效?	是否颁布新的污染土壤或地下水相关管理文件;是否颁布新的土壤筛选值/管控制或地下水质量标准;是否颁布新的大气/地表水排放标准或室内空气质量标准;是否颁布新的风险计算方法;是否颁布新的污染物性质参数或毒性参数;是否识别出新的污染物或污染源;是否出现了不可预期的副产物;水文地质条件是否出现了新的变化(例如,地下水流速、流向);土地利用方式是否发生了变化;受体是否发生了变化,是否出现了新的受体或新的暴露途径;其他可能影响修复目标值的因素
问题 C: 其他可能预示地块失去保护性的信息	是否出现重大灾害,如洪水、地震、泥石流等;是否出现用地规划调整

总之,应综合考虑地块水文地质条件、污染物迁移特性、地块周边敏感受体分布以及管理部门要求等制定回顾性评估计划。后期管理过程中若突发不利状况,例如洪水、火灾、地震等,则应立即启动回顾性评估。

8 后期管理的终止

由于风险管控地块内污染物一直存在,建议持续开展运行维护,确保风险管控措施的完整性与功能性;持续开展长期监测,预警风险管控设施失效、污染物泄露;持续开展制度控制,利用非工程手段确保场地上的人类活动安全;定期开展回顾性评估,直至风险管控措施不再需要。

修复后地块,经过一定时间的长期监测,确认污染物浓度不会发生反弹即可终止以“预警修复后污染物浓度是否反弹”的监测,转入“评估地下水污染状态是否发生变化”的监测,直至地下水达到 GB/T 14848—2017 中规定的地下水使用功能对应标准值。建议持续开展制度控制和回顾性评估,直至土壤中污染物浓度满足 GB 36600—2018 中第一类用地筛选值且地下水达到 GB/T 14848—2017 中规定的使用功能对应标准值。

9 结语

本文借鉴国外管理经验,结合我国污染地块管理现状,针对修复与风险管控后地块的污染残留风险,明确了后期管理对象及相关管理措施,初步构建了我国污染地块修复与风险管控后期管理体系,为后期管理工作的开展提供了有益探索。随着我国污染地块修复与风险管控工作的不断推进,需开展后期管理的地块数量日益增多,但现阶段实际案例较少,技术规范不明确、实施机制不健全是妨碍后期管理工作开展的主要问题。因此,应进一步加强后期管理相关研究,尽快出台相关技术规范和标准,明确实施机制,开展后期管理工作试点。

参考文献:

- [1] US EPA. Risk assessment guidance for superfund: Volume I: Human health evaluation manual (Part E, Supplemental guidance for dermal risk assessment) [R]. Washington D C: Office of Emergency and Remedial Response Toxics Integration Branch, the United States Environmental Protection Agency, 2004.
- [2] UK EA. Compilation of data for priority organic pollutants for derivation of soil guideline values[R]. Bristol: Environment Agency, 2008.
- [3] 陈梦舫, 韩璐, 罗飞. 污染场地土壤与地下水风险评估

- 方法学[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [4] 焦文涛, 方引青, 李绍华, 等. 美国污染地块风险管控的发展历程、演变特征及启示[J]. 环境工程学报, 2021, 15(5): 1821–1830.
- [5] 李笑诺, 陈卫平, 吕斯丹. 国内外污染场地风险管控技术体系与模式研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 38–53.
- [6] 全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国土壤污染防治法(中华人民共和国主席令第八号)[EB/OL]. 北京: 全国人民代表大会常务委员会. (2018-08-31). [2022-03-31]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/fl/201809/t20180907_549845.shtml.
- [7] 李培中, 吴乃瑾, 王海见, 等. 基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例[J]. 环境科学, 2021, 42(3): 1123–1130.
- [8] 马杰. 我国挥发性有机污染地块调查评估中存在的问题及对策建议[J]. 环境工程学报, 2021, 15(1): 3–7.
- [9] 姜林, 梁竞, 钟茂生, 等. 复杂污染场地的风险管理挑战及应对[J]. 环境科学研究, 2021, 34(2): 458–467.
- [10] 谢云峰, 曹云者, 张大定, 等. 污染场地环境风险的工程控制技术及其应用[J]. 环境工程技术学报, 2012, 2(1): 51–59.
- [11] 谷庆宝, 马福俊, 张倩, 等. 污染场地固化/稳定化修复的评价方法与标准[J]. 环境科学研究, 2017, 30(5): 755–764.
- [12] 侯德义. 工业地块污染治理重在解决哪些问题[J]. 中国环境监察, 2021(6): 44–46.
- [13] 中华人民共和国生态环境部. 建设用地土壤污染状况调查 技术导则: HJ 25.1—2019[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2019.
- [14] 吴鹏, 马露瑶, 余海波, 等. 污染物空间变异对场地调查影响的初步探讨[J]. 环境与发展, 2019, 31(10): 119–120, 122.
- [15] Jenkins T F, Grant C L, Brar G S, et al. Sampling error associated with collection and analysis of soil samples at TNT-contaminated sites[J]. Field Analytical Chemistry & Technology, 1997, 1(3): 151–163.
- [16] Stephen D. Using high resolution site characterization to improve remedy design and implementation[R]. Washington DC: Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, 2015.
- [17] Yao Y J, Shen R, Pennell K G, et al. Examination of the influence of environmental factors on contaminant vapor concentration attenuation factors using the U.S. EPA's vapor intrusion database[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(2): 906–913.
- [18] Pennell K G, Scammell M K, McClean M D, et al. Field data and numerical modeling: A multiple lines of evidence approach for assessing vapor intrusion exposure risks[J]. Science of the Total Environment, 2016, 556: 291–301.
- [19] 生态环境部. 污染地块地下水修复和风险管控技术导则: HJ 25.6—2019[S]. 北京: 中国环境出版社, 2019.
- [20] ACT EPA. Guideline on implementing long-term monitoring [S]. Canberra: Cooperative Research Centre for Contamination Assessment and Remediation of the Environment, Australian Capital Territory Environment Protection Authority, 2018.
- [21] 呼红霞, 丁贞玉, 徐怒潮, 等. 污染场地风险管控与修复效果评估实践中的挑战和监督管理[J]. 环境保护, 2021, 49(20): 16–20.
- [22] You X J, Liu S G, Dai C M, et al. Contaminant occurrence and migration between high- and low-permeability zones in groundwater systems: A review[J]. Science of the Total Environment, 2020, 743: 140703.
- [23] McGuire T M, McDade J M, Newell C J. Performance of DNAPL source depletion technologies at 59 chlorinated solvent-impacted sites[J]. Groundwater Monitoring & Remediation, 2006, 26(1): 73–84.
- [24] US EPA. Close Out Procedures for National Priorities List Sites[S]. Washington D C: Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, the United States Environmental Protection Agency, 2011.
- [25] ACT EPA. Guideline on implementing institutional controls[S]. Canberra: Cooperative Research Centre for Contamination Assessment and Remediation of the Environment, Australian Capital Territory Environment Protection Authority, 2018.
- [26] Environment Canada. FCSAP Long-Term Monitoring Planning Guidance[S]. Government of Canada, 2013.
- [27] Environment Canada. Decision-Making Framework [S]. Government of Canada, 2018.
- [28] 环境保护部. 工业企业场地环境调查评估与修复工作指南(试行)[EB/OL]. [2022-03-31]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201412/W020141211350421596700.pdf>, 2004.
- [29] 生态环境部. 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则: HJ 25.5—2018[S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [30] 广州市生态环境局. 广州市生态环境局办公室关于印发广州市污染地修复后环境监管工作要点(试行)的通知[EB/OL]. [2022-03-31]. http://sthjj.gz.gov.cn/tzggwj/content/post_7011877.html, 2020.
- [31] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准: GB 36600—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [32] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地下水质量标准: GB/T 14848—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [33] US EPA. Ensuring Effective and Reliable Institutional Controls at RCRA Facilities[S]. Washington DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, the United States Environmental Protection Agency, 2007.
- [34] UK EA. Model Procedures for the Management of Land Contamination[R]. Bristol: Environment Agency, 2004.
- [35] US EPA. Operation and Maintenance in the Superfund Program[R]. Washington D C: Office of Solid Waste and Emergency Response, the United States Environmental Protection Agency, 2001.
- [36] US EPA. Guidance for Monitoring at Hazardous Waste Sites: Framework for Monitoring Plan Development and Implementation[S] Washington DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, the United States Environmental Protection Agency, 2004

- [37] Vroblesky D, Petkewich M, Conlon K J. Contamination movement around a permeable reactive barrier at Solid Waste Management Unit 12, Naval Weapons Station Charleston, North Charleston, South Carolina, 2009[R]. Virginia: U.S. Geological Survey, Reston, 2010.
- [38] US EPA. Development of Performance Specifications for Solidification/Stabilization[R]. Washington D C: The Interstate Technology & Regulatory Council Solidification/Stabilization Team, the United States Environmental Protection Agency, 2011.
- [39] Interstate Technology and Regulatory Cooperation (ITRC). Regulatory Guidance for Permeable Reactive Barriers Designed to Remediate Chlorinated Solvents[R]. 1999.
- [40] Interstate Technology and Regulatory Cooperation (ITRC). Regulatory Guidance for Permeable Reactive Barriers Designed to Remediate Inorganic and Radionuclide Contamination[R]. 1999.
- [41] Carl D P, Robert W P. Natural Attenuation of Hexavalent Chromium in Groundwater and Soils[R]. Washington DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, United States Environmental Protection Agency, 1994.
- [42] US EPA. In Situ Remediation: Design Considerations and Performance Monitoring Technical Guidance Document [R]. Washington D C: Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, the United States Environmental Protection Agency, 2017.
- [43] US EPA. Fourth Five-year Review Report LOVE CANAL Superfund Site City of Niagara Falls Niagara Country, NEW YORK[R]. Washington D C: Emergency and Remedial Response Division, the United States Environmental Protection Agency, 2019.
- [44] US EPA. FIVE-YEAR REVIEW REPORT First Review St. Louis River Superfund Site Duluth St. Louis County, Minnesota [R]. Washington D C: U.S. Army Corps of Engineers Omaha District, the United States Environmental Protection Agency, 2003.
- [45] US EPA. A Guide to Implementing, Monitoring, and Enforcing Institutional Controls at Superfund, Brownfields, Federal Facility, UST and RCRA Corrective Action Cleanups[S]. Washington D C: Office of Solid Waste and Emergency Response, the United States Environmental Protection Agency, 2003.
- [46] US EPA. A Site Manager's Guide to Identifying, Evaluating and Selecting Institutional Controls at Superfund and RCRA Corrective Action Cleanups[S]. Washington D C: Office of Solid Waste and Emergency Response, the United States Environmental Protection Agency, 1980.
- [47] US EPA. A Guide to Planning, Implementing, Maintaining, and Enforcing Institutional Controls at Contaminated Sites [S]. Washington D C: Office of Solid Waste and Emergency Response, the United States Environmental Protection Agency, 1980.
- [48] US EPA. Recommended Evaluation of Institutional Controls: Supplement to the "Comprehensive Five-Year Review Guidance" [S]. Washington D C: Office of Solid Waste and Emergency Response, the United States Environmental Protection Agency, 2011.
- [49] US EPA. A Guide to Preparing Institutional Control Implementation and Assurance Plans at Contaminated Sites[S]. Washington D C: Office of Solid Waste and Emergency Response, the United States Environmental Protection Agency, 2012.
- [50] US EPA. Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act[S]. Washington D C, the United States Environmental Protection Agency, 1980.
- [51] US EPA. Comprehensive Five-Year Review Guidance[R]. Washington D C, the United States Environmental Protection Agency, 2001.