**《建设用地土壤污染修复方案编制导则》**

编制说明

**（征求意见稿）**

**二零二零年九月**

目 次

[1 项目背景 1](#_Toc51248478)

[1.1 任务来源 1](#_Toc51248479)

[1.2 编制单位 1](#_Toc51248480)

[2 编制意义 1](#_Toc51248481)

[3 编制依据 3](#_Toc51248482)

[4 国内外相关工作基础 4](#_Toc51248483)

[4.1 美国 4](#_Toc51248484)

[4.2 欧洲 6](#_Toc51248485)

[4.3 日本 9](#_Toc51248486)

[4.4 澳大利亚 10](#_Toc51248487)

[4.5 加拿大 11](#_Toc51248488)

[4.6 中国 11](#_Toc51248489)

[5 地块修复技术 13](#_Toc51248490)

[5.1 污染地块主要修复技术分析 13](#_Toc51248491)

[5.2 土壤常规修复技术 15](#_Toc51248492)

[5.3 地下水常规修复技术 24](#_Toc51248495)

[5.4 地块修复技术确定 30](#_Toc51248501)

[6 修复工程施工组织 40](#_Toc51248507)

[6.1 工程概况 41](#_Toc51248508)

[6.2 施工组织部署 41](#_Toc51248509)

[6.3 施工平面规划 41](#_Toc51248510)

[6.4 施工计划 42](#_Toc51248511)

[6.5 修复工程运行维护 44](#_Toc51248517)

[6.6 修复过程监测计划 47](#_Toc51248520)

[7 修复过程污染防治 47](#_Toc51248521)

[7.1 污染问题识别 47](#_Toc51248523)

[7.2 污染防治目标确定 48](#_Toc51248524)

[7.3 污染防治措施 49](#_Toc51248525)

[7.4 环境应急预案编制 51](#_Toc51248526)

[7.5 环境监测计划 52](#_Toc51248527)

[8 修复工程环境监理 53](#_Toc51248528)

[9 修复工程后期管理 54](#_Toc51248529)

[10 本标准的实施建议 54](#_Toc51248530)

[11 主要参考资料 55](#_Toc51248531)

《建设用地土壤污染修复方案编制导则》编制说明

1. 项目背景
   1. 任务来源

《建设用地土壤污染修复方案编制导则》是2020年北京市地方标准制修订项目之一，项目类别为一类，是对DB11/T 1280-2015的修订，标准性质为推荐性。

* 1. 编制单位

《建设用地土壤污染修复方案编制导则》行业主管部门为北京市生态环境局，主要起草单位为北京市环境保护科学研究院。

1. 编制意义

**国家及生态环境主管部门的相关要求。**近些年来，国家相继发布了污染地块修复相关文件，例如，2014年发布的《污染场地修复技术导则》，2016年发布的《土壤污染防治行动计划》，2017年发布的《污染地块土壤环境管理办法》，2018年颁布《中华人民共和国土壤污染防治法》和发布《污染地块风险管控和土壤修复效果评估技术导则》，2019年发布《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》和修订发布《建设用地土壤污染风险管控和修复术语 》、《建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则》、《建设用地土壤污染风险评估技术导则》、《建设用地土壤修复技术导则 》。《中华人民共和国土壤污染防治法》第四十条规定：“实施风险管控、修复活动中产生的废水、废气和固体废物，应当按照规定进行处理、处置，并达到相关环境保护标准。实施风险管控、修复活动中产生的固体废物以及拆除的设施、设备或者建筑物、构筑物属于危险废物的，应当依照法律法规和相关标准的要求进行处置。修复施工期间，应当设立公告牌，公开相关情况和环境保护措施。”第三十五条规定了土壤污染风险管控和修复，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、后期管理等活动。污染地块修复工程是以消除或降低地块风险为目的，其实质是有毒有害污染物的转化或介质转移过程。修复工程实施过程同样具有不容忽视的环境风险。第四十一条规定：“修复施工单位转运污染土壤的，应当制定转运计划，将运输时间、方式、线路和污染土壤数量、去向、最终处置措施等，提前报所在地和接收地生态环境主管部门。转运的污染土壤属于危险废物的，修复施工单位应当依照法律法规和相关标准的要求进行处置。” 第四十二条规定：“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。”第六十四条中规定：“对建设用地土壤污染风险管控和修复名录中需要实施修复的地块，土壤污染责任人应当结合土地利用总体规划和城乡规划编制修复方案，报地方人民政府生态环境主管部门备案并实施。修复方案应当包括地下水污染防治的内容。”《污染地块土壤环境管理办法（试行）》（中华人民共和国环境保护部令（第42号））第五章治理与修复中提到：“对需要开展治理与修复的污染地块，土地使用权人应当根据土壤环境详细调查报告、风险评估报告等，按照国家有关环境标准和技术规范，编制污染地块治理与修复工程方案，并及时上传污染地块信息系统。土地使用权人应当在工程实施期间，将治理与修复工程方案的主要内容通过其网站等便于公众知晓的方式向社会公开。工程方案应当包括治理与修复范围和目标、技术路线和工艺参数、二次污染防范措施等内容。”为落实上述要求，顺利开展污染地块修复项目，需要明确修复工程项目参与方的责任，防范修复过程中的风险，确保环境和人员安全，并对其实施过程进行有效的监督和管理。因此，建设用地土壤污染修复方案框架应包括地块修复技术、修复工程施工组织、修复过程污染防治、修复工程环境监理和修复工程后期管理五个部分。

**现有标准的不足。**国内还没有形成专门针对建设用地修复方案编制相关工作的技术指导性文件，随着污染地块修复工作的相继开展，以及相关研究的逐步深入，在实际修复工程实施过程中出现了诸多问题，亟待开展污染地块修复方案的编制和实施等相关工作。国家和北京分别于2019年和2015年发布了《建设用地土壤修复技术导则》（HJ 25.4）和《污染场地修复技术方案编制导则》（DB11/T 1280）。这些导则在修复技术筛选和评估方面有效地确保了污染地块修复工作的顺利开展。然而，满足国家和生态技术部门要求的修复方案编制这一部分缺乏相应的导则支撑。

**国外相关标准情况。**国外发达国家在长期的污染土壤修复过程中，形成了较为完备的污染土壤修复相关法律体系和管理机制，制定了完善的土壤污染修复技术规范，可为建设用地污染土壤修复方案编制工作的开展和相关技术标准的制定提供借鉴。

建设用地土壤污染修复方案的编制，在提出污染地块修复的基本要求的同时，也为修复工程监管提供技术支撑。这不仅使修复方案的编制更加规范化，有助于提升治理修复与风险管控水平，还将使政府管理更加规范化、科学化和系统化，保证地块修复效果，保护环境安全和人体健康。

1. 编制依据

GB 12523 建筑施工场界环境噪声排放标准

GB 36600 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）

GB/T 14554 恶臭污染物排放标准

GB/T 14848 地下水质量标准

GB/T 50502 建筑施工组织设计规范

HJ 25.1 建设用地土壤污染状况调查技术导则

HJ 25.2 建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则

HJ 25.3 建设用地土壤污染风险评估技术导则

HJ 25.5 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则

HJ 25.6 污染地块地下水修复和风险管控技术导则

HJ 610 环境影响评价技术导则 地下水环境

HJ/T 55 大气污染物无组织排放监测技术导则

HJ/T 91 地表水和污水监测技术规范

HJ/T 164 地下水环境监测技术规范

HJ/T 169 建设项目环境风险评价技术导则

HJ/T 397 固定源废气监测技术规范

DB11/ 307 水污染物综合排放标准

DB11/ 501 大气污染物综合排放标准

DB11/T 656 建设用地土壤污染状况调查与风险评估技术导则

DB11/T 1279 污染场地修复工程环境监理技术导则

1. 国内外相关工作基础
   1. 美国

美国政府于1976年颁布《资源保护与回收法》（Resource Conservation and Recovery Act, RCRA），其中对地块污染预防作了法律规定。1980年颁布的《综合环境反应、赔偿与责任法》（又名《超级基金法》）是美国最主要的土壤污染防治立法。该法是受到拉夫运河填埋场污染事件的直接推动而出台的。该法实施后，被列入《国家优先名录》中67%的污染地块得到了治理修复，130万英亩的土地恢复了生产功能，多数污染地块在修复后达到了商业交易之目的。此后，美国国会为缓解该法严厉的责任制度带来的影响，通过以下法案进行4次修订完善：1986年的《超级基金修正及再授权法》，1996年的《财产保存、贷方责任及抵押保险保护法》，2000年的《超级基金回收平衡法》和2002年的《小规模企业责任减免和综合地块振兴法》。虽然《超级基金法》也存在一些不足，但该法对于快速有效地解决美国污染地块的治理与修复问题起到了非常明显的作用，也为其他国家土壤污染防治提供了借鉴。

2011年制定的《小型企业责任免除和棕色地块振兴法案》以及美国的《固体废物处置法》、《清洁水法》、《安全饮用水法》、《有毒物质控制法》等法律也涉及污染地块的土壤和地下水保护，形成了较为完备的土壤和地下水保护以及污染土壤和地下水治理法规体系。《超级基金法》授权美国环境保护署(United States Environmental Protection Agency, USEPA)对全国污染地块进行管理，并责令责任者对污染特别严重的地块进行修复；对找不到责任者或责任者没有修复能力的，由“超级基金”来支付污染地块修复费用；对不愿支付修复费用或当时尚未找到责任者的地块，可由“超级基金”先支付污染地块修复费用，再由USEPA向责任者追讨。在上述法律框架下，美国已制定了一系列的地块修复技术标准和污染物“国家优先清单(NPL)”，启动了大量地块的调查和修复工作。此外，美国环保局针对不同的修复技术类型还制定了一系列的技术指南，如《在超级基金框架下实施处理可能性研究指南：需氧生物降解修复筛查》，《在超级基金法框架下实施处理可能性研究指南：生物降解修复选择》，《在超级基金法框架下实施处理可能性研究指南：化学脱卤》，《在超级基金法框架下实施处理可能性研究指南：土壤蒸汽抽提》，《在超级基金法框架下实施处理可能性研究指南：土壤淋洗》，《在超级基金法框架下实施处理可能性研究指南：溶剂提取》，《在超级基金法框架下实施处理可能性研究指南：热解吸修复选择》等。

超级基金污染地块修复整个过程包括地块发现、初步调查/地块调查、危害评估系统/国家优先名单、修复调查与可行性研究、地块清理、地块结束、地块关闭/NPL名单删除、五年回顾等过程。

美国在超级基金-地块清理版块指出地块清理包括修复设计/修复行动这一环节，该环节包括修复设计/修复行动手册、工程评估和健康安全管理三个方面。修复设计（RD, Remedial Design）是超级基金地块清理的一个阶段，即修复清理和修复技术的技术规范。修复行动（RA, Remedial Action）遵循修复设计的内容。它涉及超级基金地块清理的实施阶段。所有新的基金资助的修复措施都由环保署的国家风险优先小组审查。1990年美国发布了《加快修复设计/修复行动指南》（Guidance on Expediting Remedial Design and Remedial Action, EPA）和1995年发布的《修复设计范围界定指南》（Guidance for Scoping the Remedial Design）,对修复设计/修复行动中涉及的因素及措施进行了描述和完善。1992年发布了《CERCLA现场响应行动的许可证和许可证“等效”程序》（Permits and Permit "Equivalency" Processes for CERCLA On-site Response Actions，EPA），根据CERCLA OSWER第106条规定于1990年制定的关于修复设计/修复行动的单方面行政命令范本以及发布的《环境保护局对进行修复设计和修复行动的潜在责任方的监督》，分别对修复设计/修复行动潜在责任方的监督职责进行了说明。

目前尚未检索到美国的污染地块修复过程污染防治编制的相关文件，但通过研究发现，美国的污染地块修复的污染防治主要靠“许可证制度”。自20世纪70年代起，排污许可证制度作为一种污染物减排的有效措施，在一些发达国家率先运用，并逐渐被各国所接受。美国的排污许可证制度因其框架完善、规范细致、措施创新和成效显著而著称。1970年美国制定了《废物排放许可证计划》，1977年和1990年国会通过了《清洁水法》和《清洁空气法》，这是美国实施水和空气污染物排放许可制度的法律基础。美国的排放许可制度，不论是水污染物许可，还是空气质量许可，都属于前置审批性质，而非事后承认性质。

发放许可证只是美国许可证管理体系的一个步骤，后期管理还包括排放监测、检测结果报告、许可证的更新管理等一系列监督管理和实施机制。其中，对排污许可证持有者的法律义务规定非常详尽：在许可证有效期满后必须重新申请许可证；为确保许可证的正确运行，必须保证为遵守许可证而安装使用的处理和控制系统或设备；建立排污监测和监测结果报告制度；在排放污染物的方式、数量、性质等发生变化并达到一定幅度时应予以报告等制度。排污许可证持有者并不会因此而一劳永逸，仍然需要采取一系列措施来达到法律的规定，否则将构成吊销、修改、更新或拒绝更新许可证的理由。从其内容来看，许可证包括了修复过程污染防治的基本要素：（1）环境问题识别；（2）环境问题应对措施；（3）环境监测；（4）结果报告。

美国于1990年制订《国家应急计划》，该计划对员工健康安全作出了明确的规定。2009年美国环保局出台了首个“超级基金绿色修复战略”，并于2010年进行更新。该战略作为超级基金的管理工具，明确地提出了要进行地块评估和修复，或采取紧急清除行动，如何最大限度使用可再生能源、减少温室气体的排放和其他负面环境影响。

美国纽约州的修复规范规定对地块修复需要制定详细的运行、监测及维护手册及正式的监测计划，修复设计与施工须依据联邦和州政府法规，方案通过审批后，具备地块准入及施工许可后进行施工，同时需要制定保障施工人员与周围居民的健康和安全计划。在施工过程中要有详细的记录，应尽量防止污染物在环境介质中的转移。美国 EPA《EPA oversight of remedial designs and remedial actions performed by PRPs》中对修复过程中环境监理各责任方的关系与主要职责也作了明确规定。

* 1. 欧洲

2006年9月，根据《第六环境行动规划》（Sixth Environment Action Programme）的决定，欧盟委员会发布了欧洲土壤保护主题战略（Soil Thematic Strategy, COM2006-231）。该战略包括一份欧盟委员会向其他欧洲相关机构发布的通讯、一个土壤框架指令建议（COM2006-232）和一份影响评价。土壤保护主题战略确定了土壤保护的战略框架，提出了战略的总目标，阐述了必须采取哪些类型的措施，并确立了一个欧盟委员会十年的工作计划。土壤框架指令建议确定欧盟保护土壤的共同原则，在这一共同框架之下，欧盟成员国将决定如何最好地保护土壤，如何在本国内以可持续的方式应用这一指令。战略要求欧盟各成员国应基于污染地块的定义及潜在污染行为识别其领土内的污染地块，评估其当前和未来土地使用的风险，编制一份污染地块国家清单，清单应至少每5年公开接受一次审查，以及建立国家污染地块修复战略，合理、透明地确定其对污染地块修复的优先次序。另外，还要求建立污染地块修复的资金机制。在研究方面，土壤保护主题战略指出需要在土壤保护和修复的实施程序与技术方面开展研究。

英国在历经经济高速发展之后，遗留下大量的受污染地块。据估计，英国大约有30万公顷的土地受到不同程度的污染。英国在污染地块方面设置了全面的法律框架，最重要的法律是1990年颁布的《环境保护法》（Environmental Protection Act 1990）。1995年在《环境保护法》（1990）的基础上增加了一部分，形成了《环境法》，该部分针对英国的地块污染设置了法律规范体系，其主要目标是提供一种方法来发现和处理历史遗留的污染地块，《环境法》要求地方授权机构识别出污染地块并确保污染地块的风险得到控制。另外，法案还制定了污染土壤修复的付费规则。此外，英国还发布了《英国指导潜在污染土地恢复手册》，将化工、煤焦化、木材加工等企业和机构的所在地列为潜在污染地块。英国环境、食品和农业事务部（Department for Environment, Food and Rural Affairs, DEFRA）也发行了一系列（共15册）涉及污染土地调查、评估和修复技术选择等内容的技术报告：《污染土地报告》（Contaminated Land Report, CLR）。

2019年，英国环境局在《土壤污染：风险管理》（Land contamination: risk management, Environment Agency）中规定污染土壤修复包括修复策略的制定、修复实施核查和长期运行维护（需要的话）。制定的修复策略应考虑以下因素：

（1）明确规定所选修复方案将如何减轻相关污染物带来的风险；

（2）能够满足方案评估目标，以满足监管要求；

（3）说明人类健康状况，环境和生态将如何得到保护；

（4）策略是可行、有效和持久的；

（5）与其他方面的工作相兼容，如地块的未来规划；

（6）该策略是可实现的、可持续的和能够处理不确定性情况的；

（7）可通过测试、测量、监测或其他记录方法进行验证；

（8）考虑对当地居民的潜在危害和干扰。

修复策略中必须包括：

（1）监测目标和标准；

（2）要采取的修复行动；

（3）如何实施修复；

（4）有关如何验证修复有效的详细信息；

（5）监测和维护细节；

（6）需要实施的任何监管控制的细节，如许可证和部署。

还必须规定以下内容：

（1）修复技术的选择及其科学依据；

（2）任何修复技术组合方案的有效性；

（3）所选修复选项的约束和限制；

（4）修复办法全面生效的时间表；

（5）修复措施的预期持久性；

（6）如何防止由修复活动造成的污染；

（7）如何处理不确定因素和应急情况；

（8）对备选修复技术战略的描述；

（9）描述将如何达到修复目标。

另外，修复期间需及时提交修复进度报告。开展长期监测和维护之前：

（1）确定需要什么；

（2）决定由谁来执行这项工作；

（3）报告修复结果；

（4）决定何时可以停止监视或维护并完成修复工作。

确定详细信息后，需要：

（1）符合相关资质的人员进行监控和维护；

（2）确保按照协议开展和报告工作；

（3）确保完成相应的维护措施；

（4）如果监测标准不符合或出现意外结果，应定期审查和修订；

（5）向利益攸关方提供所有报告的副本。

如果无法满足监测标准，则应该：

（1）检查设备和计算是否正确，以验证监测数据；

（2）考虑季节变化的影响；

（3）考虑监测数据中的空间变化情况；

（4）增加地块的监测频率；

（5）考虑引入连续监测或警报系统；

（6）优化修复措施以提高效率。

2016年食品、农村事务部及环境署联合发布的《环境许可控制和监测排放》指南中指出在获得相应排放许可证的前提下还要制定管理计划和采取适当的措施，及时审查和更新控制排放的计划和程序，监测排放确保没有造成污染。做好监测记录，内容包括：

（1）检查方法；

（2）检查所用设备以及它是如何校准的；

（3）检查频率。

* 1. 日本

日本是世界上土壤污染防治立法较早的国家。20世纪60年代，日本的“痛痛病”等公害事件诉讼的胜利推动了日本政府在环境治理方面的立法。为应对1968年发生的“痛痛病”事件所反映的农用地土壤污染问题，日本政府于1970年颁布了针对农用地保护的《农用地土壤污染防治法》，并分别于1971年、1978年、1993年、1999年、2005年和2011年进行了修订。《农用地土壤污染防治法》中规定了污染地块修复流程为地块调查、修复区域划分、修复计划制定、修复措施实施和污染地块删除。

1975年在东京部分地区发现了大量被六价铬污染的土壤，成为严重的社会问题。从那时起，日本各地发现的所谓“城市型”(非农业)土壤污染案例数量迅速增加。增加的主要原因是老工厂旧址的城市重建加快，以及执行水污染控制法所要求的地下水质量监测活动。目前，土壤污染的主要污染源是化学工业和电镀工业，主要污染物是铅、六价铬和三氯乙烯。为了解决这些问题，1991年8月颁布了《土壤污染环境质量标准》(EQSs)。1994年2月《土壤污染环境质量标准》监管污染物增至25种。1994年11月制定了《土壤和地下水污染调查和对策准则》，以确保根据与土壤和地下水有关的环境质量监测和评价标准进行调查和对策的顺利执行。向污染者发布行政指导，敦促他们自愿使用这些指导方针清理受污染的土壤。

为进一步满足社会对城市型土壤污染的防治要求，日本于2002年颁布了《土壤污染对策法》，弥补了城市用地土壤污染防治法律方面的空白，成为日本土壤污染防治的主要法律依据。借鉴美国的《超级基金法》，日本的《土壤污染对策法》也采用了严格责任、连带责任和追溯责任制度。为贯彻其实施和执行，日本政府又先后公布了《土壤污染对策法施行令》（平成14年第336号令）和《土壤污染对策法施行规则》（平成14年环境省第29号令），作为《土壤污染对策法》的具体实施法规，对其中许多地方进行了详细的规定，如规定了污染土壤范围的划定，污染整治措施的内容及期限，土壤污染调查方法，污染整治之相关技术基准等。《土壤污染对策法》也分别于2005年、2006年、2009年、2011年和2014年进行了修订，进一步完善了相关制度。

* 1. 澳大利亚

1999年澳大利亚发布的《国家环境保护(地块污染评估)指南》是为了建立一套全国统一的方法来评估地块污染，以确保包括监管机构、地块评估人员、环境审计人员、土地所有者、开发商等社会各界采取合理的环境管理措施。指南中指出污染土壤现场清理和管理的优先顺序是：(i)对土壤进行现场处理，采取措施去除污染物，或者将关注污染物的危害降低到可接受的水平；(ii)在工地外处理挖掘出的泥土，根据污染物的残余程度，将处理后的泥土送回工地，移至认可的废物处置地点或设施，或用作堆填区。另外指南进一步指出，如果这两种方法都不可能实施，则应考虑其他方法：将受污染的土壤移至批准的地点或设施，必要时用干净的填充物替代；用适当设计的屏障把泥土隔离开；选择较不敏感的土地用途，以尽量减少需要进行的修复工程，包括部分修复；把受污染的物料留在原地，但须确保相关污染物不会对环境或社区构成即时威胁，而有关地点亦有适当的管制措施；如评估显示整治不会对环境产生净效益或对环境产生净不良影响，便须实施适当的地块管理策略。

南澳环保署（EPA in South Australian）于2005年发布了环保局导则：《土壤生物修复技术（异位）》(EPA guidelines: soil bioremediation (ex-situ))。详细介绍了异位生物修复技术的原理、特点、局限性及使用条件，为污染土壤修复方法的选择提供指导。

澳大利亚环保局于2008年发布《现场修复环境管理导则》（EPA Guidelines for Environmental management of on-site remediation)，该导则提出了污染地块修复过程中的大气、噪声、地表水、土壤、地下水等介质的污染防范方法，并描述了施工过程的安全健康保护措施。

* 1. 加拿大

加拿大联邦层面设立了加拿大环境部长理事会，制定统一的技术指南，各省和地区负责制定各自的通用标准和基于地块的修复指南；1989 年，建立了“国家污染地块修复计划”，包含土壤和水体环境质量标准指南。2005 年，建立了“联邦污染地块行动计划”。联邦污染地块管理包括十部分，分别为地块识别、历史回顾、初步调查、初步地块分类、详细调查、地块重新分类、制定修复/风险管控策略、实施修复/风险管控策略、验证性抽样和长期监测（若有需要）。

可参考的标准导则有：国家能源局，加拿大新斯科舍省海上石油董事会，加拿大纽芬兰与拉布拉多省海上石油董事会发布的《Environmental Protection Plan Guidelines》、技术标准及安全局发布的《Environmental Management Protocol for Fule Handling Sites in Ontario》、计划发展科《Redeveloping Brownfields in Saskatoon》、《Guideline for Contaminated Site Remediation》、可持续发展环保服务部《Environmental Guidences for Site Remediation》、努纳武特地区矿业研讨会，原住民事务和北方发展部《Overview of contaminated site Program Nunavut Region》、努纳武特地区环境部《Environmental Guideline for Contaminated Site Remediation》。加拿大国家明确提出所有的污染地块修复工程必须制定相应的环境管理计划，并出台了相关的编制指南或导则。

* 1. 中国

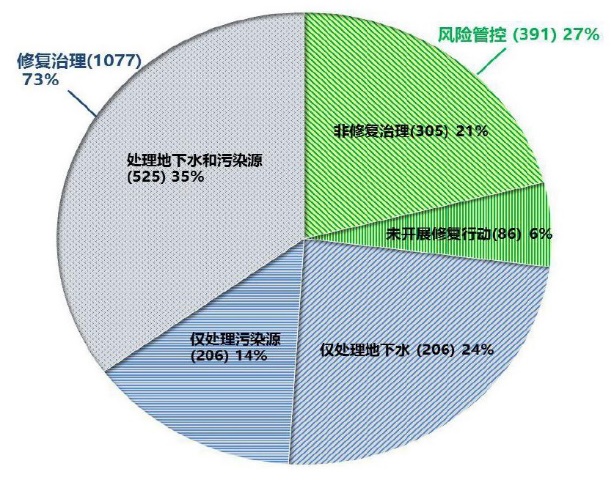
自2006年以来，我国已逐渐认识到了土壤污染的严重性，相关政府部门逐渐出台一系列政策措施，加大力度进行土壤污染治理与修复工作，但未形成系统性的指导方案，直到2016年5月，国务院出台《土壤污染防治行动计划》（即“土十条”），开启了“以立法促使监管趋严，带动强制性市场以及专项资金支持土地市场”的局面。2016年12月，为支持“土十条”的有序实施，原环保部等5部门联合印发了《全国土壤污染状况详查总体方案》。为配合国家全国土壤修复政策的实施以及完成国家下达的受污染耕地的安全利用面积、治理与修复面积，全国各省市纷纷积极推进土壤污染防治工作，如2016年10月福建发布的《福建省土壤污染防治行动计划实施方案》，2017年1月山东省发布的《山东省土壤污染防治工作方案》。截至目前，全国几乎所有的省市，均已出台土壤污染防治相关政策及技术、资金支持方案，为我国全面实施土壤修复和防治提供有利的支撑。近年来，北京、上海、重庆、江苏、浙江、湖南、武汉、沈阳等地进行了化工、农药、焦化厂等地块的调查评估和修复工作，污染物主要包括挥发性有机污染物、石油烃、多环芳烃、农药以及重金属等，目前采用的修复技术主要有焚烧、填埋、固化/稳定化等，在某些地块试点的技术还有生物堆、热处理、生物通风、气相抽提、化学氧化、化学还原、地下水空气注射、地下水可渗透反应墙等技术。

目前我国大陆地区的污染地块修复相关标准体系还不够完善。已有的国家级相关污染防治的法律规范主要包括《环境保护法》、《水污染防治法》、《土壤污染防治法》、《土壤环境质量标准》、《土壤环境监测技术规范》、《地下水质量标准》、《地下水环境监测技术规范》和原国家环保部正式实施的《建设用地土壤污染状况调查技术导则》(HJ 25.1-2019)、《建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则》(HJ 25.2-2019)、《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3-2019)、《建设用地土壤修复技术导则》(HJ 25.4-2019)、《建设用地土壤污染风险管控和修复术语》(HJ 682-2019)、《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）、《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》（HJ 25.6-2019）等标准和技术规范。地方标准主要包括北京市的《建设用地土壤污染状况调查与风险评估技术导则》(DB11/T 656-2019)、《污染土壤环境风险评价筛选值》(DB11/T 811-2011)、《污染场地修复验收技术规范》(DB11/T 783-2011)、《重金属污染土壤填埋场建设与运行技术规范》(DB11/T 810-2011)、《污染场地修复后土壤再利用环境评估导则》（DB11/T 1281-2015）、《污染场地挥发性有机物调查与风险评估技术导则》（DB11/T 1278-2015）、《重金属污染土壤填埋场建设与运行技术规范》（DB11/T 810-2011）、《污染场地修复工程环境监理技术导则》（DB11/T 1279-2015）等。

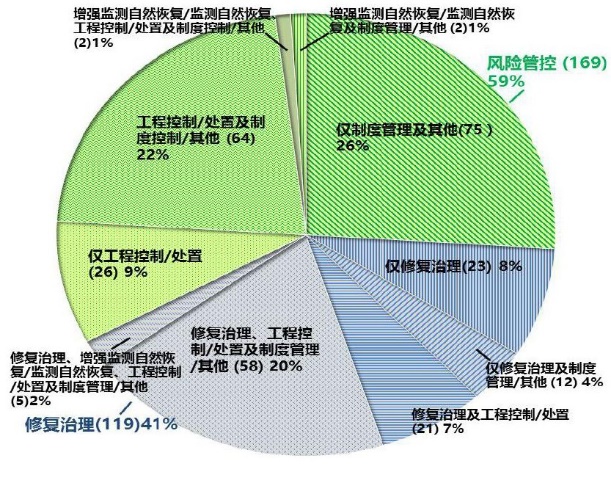
我国台湾地区发布实施了《土壤及地下水污染整治法》并配套有《工厂土壤及地下水污染整治技术手册》，但基本上是对美国相关标准和指南的直接转换。我国香港特别行政区政府根据香港自身经济发展和地域特点，颁布了《受污染土地的评估和整治指引》，总体上就污染土地的监管范围、污染评估和土地整治等具体要求进行了明确，并就样品采集与分析、整治措施和采用标准等进行了说明。2011年颁布实施的《受污染土地勘察及整治实物指南》，主要适用于曾用作加油站、船厂及车辆维修/拆卸工厂地块的调查和修复。

1. 地块修复技术
   1. 污染地块主要修复技术分析

土壤和地下水修复技术的选择是地块污染治理成败的关键因素之一，目前，我国地块污染治理尚处于起步阶段，因此地块修复技术的选择更多依赖于国外先进经验。美国于20世纪80年代之后进行了大量土壤修复工程。美国超级基金计划所实施的土壤修复技术已成为世界各国了解最新土壤修复技术变化的重要窗口。地块修复技术多样，按修复处理工程的位置可将土壤污染修复技术分为原位修复技术和异位修复技术。采用治理修复技术时，可进一步划分为具体的处理类型（原位生物、原位物理、原位化学、异位生物、异位物理、异位化学），各技术类型下又可细分为具体的技术种类，如原位生物通风、原位土壤气相抽提、原位空气注射技术、原位化学氧化、异位生物堆、异位热脱附、异位固化/稳定化等；修复技术虽然能清除污染物，但由于污染地块条件和污染物环境行为的复杂性，导致某些地块条件下实施污染物清除的成本很高，且清除效果不理想。从发达国家的污染地块管理经验来讲，污染地块修复技术除了治理修复技术外，还包括土壤污染风险管控技术。风险管控技术主要包括工程控制技术和制度控制技术。工程控制技术主要是利用工程措施将污染物封存在原地，限制污染物迁移，切断暴露途径，降低污染物的暴露风险，保护受体安全。常见的工程控制技术包括固化/稳定化、帽封、垂直/水平阻控系统等。制度控制是一系列非工程的治理方法，如行政或法律管控等措施，以实现控制人类潜在暴露风险以及保护治理完整性。常见的降低受体风险制度控制技术包括增加室内通风强度、引入清洁空气、减少室内外扬尘、减少人体与粉尘的接触、对裸土进行覆盖、减少人体与土壤/地下水的接触、改变土地或建筑物的使用类型、设立物障、减少污染土壤的摄入等。如图1所示，1982-2011年间，美国进入“国家优先清单（NPL）”的1468个污染地块中，有1077个地块采用了治理修复技术，占73%；风险管控技术等占27%。对比2009-2011年的统计数据（总计288个地块），修复治理的地块数量仅占41%（119个），而风险管控类的地块数量占到了59%（169个），且在修复治理类的地块中也开始联合开展风险管控，如处理配合制度管理占4%（12个），处理配合工程控制和处置占7%（21个）。由此表明，美国的污染地块治理方法中，风险管控所占的应用比例越来越高。污染地块修复技术选择治理修复技术还是风险管控技术需要综合考虑修复目标、修复成本、修复时间、未来土地利用规划以及技术可行性等。



|  |
| --- |
| 美国NPL地块治理措施统计图 (1982-2011) |



美国NPL地块治理措施统计图 (2009-2011)

图1 美国NPL地块治理措施统计图

参考美国“超级基金”项目污染地块修复约30年的工程案例，结合近些年国内外和北京污染地块修复案例，对常规修复技术分别做以介绍。

* 1. 土壤常规修复技术

### 5.2.1 治理修复技术

#### 5.2.1.1 异位固化/稳定化(Ex situ Solidification/Stabilization)

技术描述

异位固化/稳定化技术是指通过物理方式固定或封存（固化）性质相对稳定的污染物，以及利用化学稳定剂的化学作用减少污染物的迁移能力（稳定化）。然而，该技术需要对固化/稳定化产物进行处置，在美国“超级基金”方案中这些产物可以存放于原地块。

目前有多种固化/稳定化技术，但大多数都是在已经成功应用技术上的进一步改进，一般都通过直接封存或减少有害成分的迁移来实现固化/稳定化。大体上可以将固化/稳定化技术分为 9 种方式：（1）沥青处理；（2）乳化沥青；（3）改进的硫化水泥；（4）聚乙烯；（5）火山灰或硅酸盐水泥；（6）放射性废物固化；（7）淤泥稳定化；（8）可溶磷酸盐；（9）玻璃化。

适用性

可以处理包括放射性物质在内的无机污染物；大部分固化/稳定化技术处理有机污染物以及杀虫剂的效率较低，但玻璃化方式仍然效果较好。

局限性

* 环境条件对长期稳定化效果可能存在较大影响。
* 一些处理过程容易导致污染物体积大幅度增加（能够达到原体积的两倍）。
* 一些污染物与不同处理过程的兼容性存在较大差异，需进行可行性试验。
* 通常，有机污染物难以进行稳定化。
* 目前，该技术的长期效率还需要进一步确认。

#### 5.2.1.2 异位焚烧（Ex situ Incineration）

技术描述

异位焚烧技术是使用 871-1204℃的高温，在有氧情况下焚烧有害废物中的有机成分。

适用性

焚烧用于处理受爆炸污染物和有害废物污染的土壤，特别是氯化碳氢化合物、多氯联苯和二噁英污染土壤。

局限性

* 焚烧多氯联苯和二噁英污染土壤，只允许使用一台场外焚化炉。
* 特殊的进料规模和材料处理要求，可能影响具体地块的适用性或费用。
* 重金属焚烧产生的残灰，需进行稳定化处理。
* 挥发性金属，包括铅、镉、汞和砷，需安装尾气处理系统以进行清除。
* 可与进料气流中的其他元素，如氯或硫、活性金属等，形成比原污染物挥发性和毒性更强的化合物。
* 钠和钾形成较低熔点的灰，可侵袭砖内层，并形成粘性微粒，淤塞气体管道。

#### 5.2.1.3 异位热脱附（Ex situ Thermal Desorption）

技术描述

异位热脱附技术是将污染废物加热到 315-538℃，使水和有机污染物挥发，用载气或真空系统将挥发的水和有机物传送至气体处理系统。

适用性

低温热脱附的目标污染物群是非卤化的 VOCs 和燃料，也可处理 SVOCs，但效率不高。高温热脱附的目标污染物群是 SVOCs、PAHs、PCBs 和杀虫剂；尽管也能处理 VOCs 和燃料，但技术经济性不佳。挥发性金属也可通过高温热脱附去除。氯的存在可影响某些金属的挥发，如铅。该处理方法适用于将有机物从炼油厂废物、煤焦油废物、木材处理废物、杂酚油污染的土壤、碳氢化合物污染的土壤、混合（放射性和有害）废物、合成橡胶处理废物以及涂料废物中分离。

局限性

* 具体地块中土壤粒度及物料搬运要求会影响该技术的适用性及费用。
* 可能需要进行脱水，以减少加热土壤所需的能量。
* 磨蚀性高的进料可能破坏处理机。
* 进料中的重金属会产生固体残渣，需进行稳定化处理。

#### 5.2.1.4 异位生物修复（Ex situ Bioremediation）

异位生物修复技术主要包括：生物堆、堆肥、土耕法、泥浆生物反应器，本标准仅以生物堆技术为例。

技术描述

生物堆技术是将受污染的土壤挖出，与土壤添加剂混合后放置在有渗滤液收集系统和通风系统的处理区域。该技术利用生物降解作用，通常被用来处理石油类污染土壤，通过控制水分、温度、养分、氧气和 pH 等参数来提高生物降解效率。

处理区域一般需要设置防渗垫层以尽量减少污染物渗漏对非污染土壤的影响，渗漏液在循环使用前一般可采用生物反应器进行前处理。土壤堆体和单元内通常埋有气体分布系统，通过抽真空或正压进行空气流动。一般情况下，堆体最 高能够达到 20 英尺，一般推荐为 2-3 米。堆体覆盖塑料膜以防止雨水径流、蒸发、挥发以及保持温度。如果污染土壤中存在 VOCs，必须在污染物挥发进行大气前，进行处理。生物堆修复周期短，运行时间一般在数周至数月，可选择主要静态工艺包括预制床、生物处理单元、土壤堆等。

适用性

生物堆已被用于处理非卤化 VOCs、燃料和碳氢化合物。卤化的 VOCs、SVOCs 和杀虫剂同样能被处理，但是处理效果不同，并且只适用于这类污染物群的某些化合物。

局限性

* 需要将污染土壤挖掘出来。
* 通过可行性试验确定污染物的生物可降解性、需氧量及营养物负荷率。
* 对卤化物、爆炸性物质的处理不是很有效。
* 与泥浆态过程相比，相似规模的处理量需要更多的时间。
* 与定期混合过程相比，静态处理过程可能更易导致非均一性。

#### 5.2.1.5 原位土壤气相抽提（In situ Soil Vapor Extraction）

技术描述

土壤气相抽提（SVE）技术是一种原位非饱和区土壤修复技术，通过施加真空，以产生压力/浓度梯度，使气相挥发物从土壤扩散至提取井中，在地面进行废气处理。

适用性

SVE 的目标污染物群是 VOCs 和一些燃料。该技术一般适用于亨利常数大于 0.01 或蒸汽压力大于 0.5 mmH 的化合物。其他因素，比如土壤的水分含量、有机物含量以及空气渗透性，也有影响。SVE 无法清除重油、金属、PCBs 或二噁英。由于该过程能够提高在土壤中的流通，因此在低挥发性有机化合物存在时，通常能够促进原位生物降解。

局限性

* 紧实或水分含量高（>50%）的土壤，空气渗透性降低，抑制 SVE 运行。
* 变异性高的土壤，提取井需较大筛孔，否则可能导致气流的不均匀传送。
* 有机物含量高或特别干燥的土壤对 VOCs 有较高的吸附性，降低了清除速度。
* 排放的气体一般需要处理，以消除对公众和环境的潜在危害。
* 废气处理过程中产生的残留液体和用过的活性炭需要进行处理。
* SVE在饱和区无效，但降低地下水位可将其暴露（可用于 LNAPLs 修复）。

#### 5.2.1.6 原位生物修复（In situ Bioremediation）

原位生物修复技术主要包括：生物通风、加强型生物修复、植物修复。本标准仅以生物通风技术为例。

技术描述

通过强制空气移动（抽取或注入空气），将氧气送入受污染的不饱和层土壤中，以增加氧气浓度，促进微生物降解。

适用性

生物通风技术已成功用于受石油烃、非氯化溶剂、某些杀虫剂、木材防腐剂和有机化学品污染的土壤修复。

生物修复无法降解无机污染物，但可改变无机物的价态，并产生生物吸附、吸收、积聚和浓缩作用。虽然这些技术主要为实验性质的，但仍显示出稳定或去除土壤无机物的巨大发展前景。

局限性

* 通过抽提核心部位的空气可缓解空气注射井影响半径内基岩中产生的蒸气。
* 较低的土壤水分含量，可能限制生物降解和生物通风的有效性。
* 可能需要监控土壤表面的废气。
* 除非有厌氧循环存在，许多氯化化合物的需氧生物降解可能无效。
* 低温将减缓修复。

### 5.2.2 风险管控技术

#### 5.2.2.1 原位填埋帽封（In situ landfill Cap）

技术描述

原位填埋帽封技术可用来：（1）最大程度地减少污染物的暴露途径；（2）防止雨水渗透进入污染区域，从而产生泄漏；（3）在修复过程中，对污染物起阻隔作用；（4）控制地面以下气体挥发；（5）为植物种植提供用地，或供给其他用途。

原位填埋帽封技术是最为常见的修复技术，原因在于该技术成本低、效率高，能够有效控制污染地块的人体健康与生态安全风险。

原位填埋帽封技术根据具体地块情况以及使用功能进行设计，可以采用单层土壤系统，也可以采用多层的土壤和其他材料复合系统。通常，干旱气候区域可采用简单的系统，而湿润气候区域则应采用更为复杂的系统。该技术所采用的材料包括各种渗透性的土壤，以及低渗透的合成材料。低渗透材料能够有效防止雨水进入污染区，高渗透性材料能够有效将雨水过滤排出。其他材料常被用来增加坡面的稳定性。

填埋帽封系统中最关键的工艺是阻隔层以及渗透层的设计，阻隔层可以采用低渗透性的土壤（黏土）以及合成黏土层，柔性阻隔膜通常被放置于阻隔层顶部，阻隔膜通常宽度 15-100 英尺，长度为 180-840 英尺。可以选择的膜材料较多，包括 PVC、各种密度的聚乙烯、CSPE-R、聚丙烯、EIA等。被用作阻隔层的土壤一般是黏土，需要通过压实后使水分渗透速率低于10 -6 cm/sec，厚度最低为 6 英尺，可以达到 2 英尺或以上。使用土壤和阻隔膜的复合材料能够利用两者的优点，阻隔膜是非渗透性的，但是一旦膜发生破损，土壤层将能够有效防止污染物的渗漏。

如果在易腐烂废物上方采用阻隔封盖技术，就必须在系统设计时，加入甲烷和二氧化碳收集和控制设施。

多种填埋帽封工艺可以选择包括：沥青/混凝土帽封；RCRA 地块使用的帽封等，但是不管选择哪种工艺，都必须尽量避免单一地将高渗透层放置于低渗透性的底面之上，以免发生所谓的“浴缸效应”。

适应性

填埋帽封技术可以是临时的，也可以是永久性的。临时帽封通常在地块关闭或采取更为有效的修复措施之前，尽量减少污染物的渗漏，一般用以对地下污染的处理。永久性帽封更为稳定，也能够减少地块关闭后期的维护成本。填埋帽封技术有时也被用于处理规模过大而导致其他修复技术难以实施的污染区域，例如矿区污染地块，帽封能够防止矿渣堆中污染物的渗漏，同时能够提供可供植物生长所需的土壤层，通过分流以及汇集系统，该技术工艺能够最大程度的减少雨水的侵蚀作用。

局限性

* 该技术能够减少污染物的迁移，但不减少污染物的毒性、活性和数量。
* 该技术对污染区域位于地下水水位以上的污染区域非常有效，该技术只能防止雨水垂直方式进入污染区域，而对于水平方向上的水流不起作用。
* 许多情况下，该技术常与垂直阻隔墙联合使用，以控制水平方向上的水流。
* 能够保持长期有效性的阻隔材料一般需要长期观测与维护。
* 深根植物不能在帽封区域种植或存在。
* 必须确保地块开发不对帽封层产生破坏作用。

#### 5.2.2.2 被动蒸气缓解法（Passive Vapor Mitigation Methods）

被动蒸气缓解方法是通过阻断建筑物地基的入口来防止蒸气入侵。防止土壤蒸气进入通常比使用主动方法去除土壤蒸气更简单，成本效益更高，尽管主动缓解方法通常更有效地满足蒸气侵入途径的管制标准。方法的选择将取决于现场环境，包括所需蒸气中污染物的减少量。主要的被动方法是密封裂缝、安装被动屏障和安装被动通风系统。

密封裂缝:建筑物上的裂缝和开口是水汽进入的主要途径。因此，密封地板和墙壁上的裂缝以及管道周围的缝隙是防止蒸气侵入的重要第一步。同样，公用设施、水池和电梯井周围的缝隙也应该正确密封。在与其他缓解策略(如底板减压)一起使用时，密封裂缝和缝隙也可能是必要的，以确保效率。

被动屏障:被动屏障是安装在建筑物下面以阻挡蒸气进入的材料或结构。障碍物通常是在施工过程中安装的，但如果需要，它们可以安装在现有的有爬行空间的建筑物中。通常，被动屏障包括一块聚乙烯塑料或类似的土工膜，安装在平板基础下面，并密封在基础墙或基础底座上。重叠的薄片所造成的接缝也必须完全密封。被动屏障只有在没有孔洞、裂缝或地基周围密封良好的情况下才有效，所以它们的完整性必须在安装后进行测试。除非地下条件有利于自然通风，否则没有底层通风层的被动屏障有效性难以保证。

被动通风系统:当蒸气可能入侵新建建筑物时，可以使用被动通风系统来防止蒸气入侵。这些系统通常与被动屏障相结合。通常，穿孔的收集管道安装在可渗透的砂或砾石层中，以将蒸气引导到地基的边缘。通常，这样的收集管道通过或沿着建筑的内或外墙进行排气。如果可渗透层直接排放到大气中，则不需要排气管。因为被动系统依靠风力来诱导蒸气通过管道，所以在没有风的日子里，它们在去除蒸气方面是无效的。如果风吹向车顶线的排气管，它可能会把蒸气吹回亚板区域。因此，利用电扇诱导蒸气流动的主动系统在减缓蒸气入侵方面更加有效。在需要时，被动排气系统可以转换为主动减压系统。

#### 5.2.2.3 主动蒸气缓解法（Active Vapor Mitigation Methods）

缓解蒸气侵入的主动方法可消除蒸气迁移背后的驱动力，即在相对于室内的亚板区域存在较高的压力。通过降低子板或被动屏障下的压力，或在建筑物内诱导产生更高的压力，蒸气流被中和或逆转。

减压:减压系统有几种类型，包括分板减压、亚膜减压、砌块墙吸力和排瓦吸力。在大多数情况下，住宅结构的缓解需要一个亚板减压系统，该系统可以安装在有地下室或板式建筑的房屋中。在实际操作中，这些系统通常是通过清扫亚板区域的污染土壤蒸气来运行的。如果安装得当，这些风扇应该能够安静地运行，而不会影响建筑物的使用者。减压系统还能降低氡浓度、湿度和减少霉菌的产生。

膜下减压系统与平板减压系统类似，只是它们在施工时安装在被动屏障下方，或者可以安装在有爬行空间的建筑中。穿透被动屏障的垂直管道应该密封好。砌墙吸力系统包括去除积聚在地下室空心砌墙上的蒸气。排水瓦吸力系统对现有的环绕建筑物的排水系统施加吸力，以去除蒸气。

板下土壤加压:板下土壤加压系统类似于降压系统，只是风扇是反过来对板进行加压，使水流移开。这种方法只适用于高渗透土壤和其他选择失败时。一般不推荐使用它，因为它在某些情况下会加剧蒸气侵入。

建筑物增压:建筑物增压包括调整建筑物的供暖、通风和空调系统，或安装一个新系统，以保持室内相对于楼板区域的正压力。这种方法在大型商业建筑中更为常见，而且如果现有的HVAC系统已经保持正压力，则是最经济有效的。必须增加压力将导致更大的能源成本，特别是如果需要大量的加热和冷却时。更换暖通空调系统的费用将大大增加。

#### 5.2.2.4 地下水屏障（Groundwater Barriers）

地下屏障的设计是为了防止或控制地下水流入、通过或从某个位置流出。屏障可以防止新鲜地下水与受污染的含水层区接触，也可以防止现有污染地区的地下水进入地下水洁净区。通常有必要将其他技术与地下水屏障结合起来，例如泵处理系统。

泥浆沟壁：浆状沟壁从废物处理场向上倾斜，以防止地下水流入地块；向下倾斜，以防止污染水从地块外流动，或在污染源周围放置，以容纳被污染的地下水。泥浆墙可以延伸穿过所关注的含水区，或者它可以仅延伸到地下水位以下几英尺，以作为对漂浮污染物的屏障。在前一种情况下，应位于或最好位于一个低渗透性的基础单元上，这样污染物就不会从墙下流过。泥浆墙是通过在适当的位置和所需的深度挖掘壕沟来建造的，同时保持壕沟中填满由5%到7%按重量悬浮的膨润土组成的粘土泥浆。浆液保持沟壁垂直稳定，在沟壁上形成低渗透滤饼。当浆沟槽被挖掘时，它同时被一种材料填充，形成最终的墙。三种主要类型的砂浆回填混合物是土壤膨润土，水泥膨润土和混凝土。在适当的条件下，泥浆墙可以建造到大约100英尺的深度。据报道，浆状沟墙使用寿命长，施工时间短，施工过程中对环境的影响最小，在一定条件下是一种经济有效的大面积围护方法。当受污染的材料与墙体直接接触时，使用泥浆墙的一个问题是墙体的长期完整性。在这种情况下，需要通过地下水监测来验证墙体的情况。

泥浆阻水墙：灌浆是将稳定材料压力注入地下以填充，从而密封空隙、裂缝或其他开口的过程。灌浆帷幕是通过管道注入灌浆形成的地下物理屏障。所需灌浆量是可用空隙空间、灌浆密度和灌浆所用压力的函数。通常需要两排或更多排灌浆来提供良好的密封。根据土壤类型和存在的污染物，使用的灌浆可以是颗粒（即硅酸盐水泥）或化学（即硅酸钠）。尽管灌浆帷幕的完整程度很难确定，但灌浆对地下水运动形成了有效的屏障。

振动桩阻水墙：灌浆帷幕的一个变体是用于放置薄（约4英寸）帷幕或墙的振动梁技术。尽管这种类型的屏障有时被称为泥浆墙，但它与灌浆帷幕的关系更为密切，因为泥浆通过管道以类似于灌浆的方式注入。一个悬挂的工字梁连接到一个振动驱动器提取器通过地面振动到所需的深度。当梁以可控速率升起时，泥浆通过梁底部的一组喷嘴注入，填充梁退出时留下的空隙。振动梁技术在松散松散沉积物（如砂和砾石）中最有效。

封底：另一种使用灌浆的方法是底部密封，灌浆通过钻孔注入，在地块下方形成水平或弯曲的屏障，以防止污染物向下运移。

块状置换：块体置换是一种相对较新的羽流管理方法，通过注入泥浆，使其在特定质量或“块状”材料周围和下方形成地下屏障。泥浆的持续压力注入在块体底部产生上举力，导致垂直位移与泵送的泥浆体积成比例。

板桩防渗墙：板桩防渗墙已用于开挖支护和排水多年。在条件有利的地方，可以达到100英尺或更高的深度。板桩防渗墙可由木材、钢筋混凝土或钢制成，钢是建造地下水屏障最有效的材料。板桩防渗墙的施工包括通过松散材料将联锁板桩打入低渗透单元。单个板桩通过各种类型的联锁接头沿边缘连接。板桩很少是水密性的，单个板桩在被打入时可以横向移动几到几十英尺。酸性或碱性溶液以及一些有机化合物会缩短系统的预期寿命。

#### 5.2.2.5 其他工程控制措施

安全屏障和围栏：采用物理方法阻止污染物与潜在污染受体的接触。

固化/稳定化：通过向受污染的土壤中注入或混合水泥，将污染物固定在结构完好的固体材料中以便处置。

土工织物护栏：采用物理方法阻止污染物与潜在污染受体的接触。

渗滤液收集系统：直接收集受污染的渗滤液，然后将其运送到外地处理。

渗透反应墙：在地下建造含有特殊材料的反应墙，当地下水通过渗透屏障时去除污染物。

#### 5.2.2.6 制度控制

制度控制即通过制定和实施各项条例、准则、规章或制度，防止或减少人群对地块污染物的暴露，从制度上杜绝和防范地块污染可能带来的风险和危害，从而达到利用管理手段对地块的潜在风险进行控制的目的。

制度控制适用于建设用地土壤污染风险管控和修复全生命周期内的不同阶段，包括土壤污染状况调查、风险管控和修复过程（方案编制阶段、实施阶段、后期环境监管）等。

参考国外的经验并结合我国的实际情况，可采取的制度控制措施主要包括：

1、限制地块用途或使用方式

如禁止地块开发建设、合理规划地块用途、明确用途规划的限制性条款等

2、限制土壤及地下水利用

包括禁止使用土壤种植农作物、禁止地块内土壤外运、限制地块内土壤外运去向、禁止地下水开采、限制地下水开采量、限制地下水用途等。

3、制定限制进入或活动条例

如禁止人员进入地块或污染区域、限制地块内人员活动等。

* 1. 地下水常规修复技术

### 5.3.1 异位抽提-处理（Ex situ Pump and Treat, P&T）

技术描述

地下水抽提-处理技术包括抽提与处理两部分，抽提是指将可溶性污染物从地下水抽提至地面，或者为防止帷幕工程实施时地下水移动，而将污染的地下水直接抽提至地面。

通常，在地块将要采用阻隔措施时，地下水抽提技术会被用来作为水力阻隔屏障，防止污染物向地块外部扩散。

抽提系统的设计主要依据地块具体条件、数据评估结果以及地块修复目标，井、抽提系统、处理系统的设计标准依据污染物的理化性质以及污染物的类型。 一般的处理过程包括连续的重力分离、空气吹脱、活性炭吸附等。 地下水抽提技术还必须考虑地下水的监测计划，以确保技术的有效性，根据监测情况运行者可以不断调整抽提系统的运行。

最后，该技术必须考虑技术实施终止条件，该条件一般依据修复目标，终止条件的制定标准同样依赖于具体地块情况。

抽提本身并不处理污染物质，一般情况下，采用其他处理技术与之联用，从而达到修复效果。这些处理技术包括：生物反应器、人工湿地、吸附/解吸、空气吹脱、碳吸附、离子交换、絮凝沉淀、分离、滴流降解。

此外，表面活性剂常被用于增加该系统的处理效率，而对于水体中的NAPLs，也经常采用该技术通过降低水位，进行 NAPLs 的收集。

适用性

地块调查是是否选择抽提技术的前提条件，水力传导率等地块特征将直接决定该技术是否合理，污染物的化学性质则决定了污染物的迁移以及地下水抽提的可行性。决定是否采用该技术的条件还包括对地块污染历史、水文地质条件，污染物的生物、物理化学性质的熟悉程度。同时，地块性质、污染羽的空间位置、土壤和地下水特征等对地块地下水抽提策略的设计至关重要。

表面活性剂应用技术对于污染地块中的 DNAPLs 尤其有效；而水位降低对于水力传导率较高地块中低粘滞较厚 NAPLs 的修复较为有效，该技术目前已经商业化，利用传统方式的抽取方式就能够操作，同时系统安装成本较低，但NAPLs 收集成本较高。

局限性

* 运行时间较长。
* 系统难以应对未预测污染物，导致污染范围扩散以及抽提系统无效。
* 残留在土壤孔隙中的污染物难以通过抽提方式去除。
* 对于水力传导率小于 10 -5 的地块同样效果不明显。
* 成本往往较高，且还可能包括活性炭等物品的消耗以及残留物的处置。
* 须在安装之前考虑抽提井及相关处理设备中的残留污垢处理。

表面活性剂应用技术局限性如下：

* 地下的不均质性是目前该技术应用的主要问题。
* 地下残留的表面活性剂可能具有潜在毒性。
* 该技术需要得到管理部门的许可。

水位降低技术局限性如下：

* 在自由相回收过程中将产生大量的抽提地下水。
* 当地下水水面恢复后，移动过来的自由相将在水面扩散，或进入饱和层。

### 5.3.2 原位生物修复 （On-site bioremediation）

原位生物修复技术主要包括：加强型生物修复、自然衰减、植物修复。本标准以加强型生物修复和自然衰减为例。

（1）加强型生物修复（Enhanced Bioremediation）

技术描述

生物修复技术是指利用土著或接种微生物降解土壤或地下水中有机污染物的过程。生物修复技术通过提供营养，电子受体和有降解功能的微生物，促进生物自然衰减过程，另一方面，这些条件也可能限制污染物想无害物质与副产物的转化。

通过向地下水面以下注射空气或在地下水污染区域循环流动过氧化氢的方式可以增强氧气的含量。在厌氧状态下，硝酸盐从地下水污染区域流向生物修复强化区。另外，固相的过氧化氢产物（如氧释放化合物）也可以增强氧气含量，加速生物降解。

适用性

原位强化生物修复技术的目标污染物为 VOCs、SVOCs 和燃料。土壤或地下水中杀虫剂的存在会对限制污染物的可处理性。BTEX 污染的地下水主要通过增加硝酸盐含量的方式进行修复。

局限性

* + 地下结构不均匀性会限制营养或过氧化氢溶液向污染区域的传递与扩散，高渗透性区域由于地下水流速快，一般修复较快。
  + 采用过氧化氢时，必须做好安全防范措施。
  + 地下水中过氧化氢浓度高于 100-200 ppm 时会对微生物产生抑制作用。
  + 地下水中微生物酶和高浓度铁会快速的减少过氧化氢。
  + 微生物酶类及含铁量高的表面材料能迅速减少过氧化氢的浓度及影响范围。
  + 为了使污染物留在生物降解带，必须建立地下水循环系统。
  + 由于曝气增加了包气带的压力，气体会使原来压力低的基底压力增强。
  + 原位修复后，仍可能需要继续采用抽提-处理技术进行后续处理。

（2）自然衰减（Natural Attenuation）

技术描述

自然衰减技术是利用地面以下物质的稀释、挥发、生物降解、吸附和化学反应等自然过程将污染物浓度减少到可接受水平。但是自然衰减能否作为存在风险

的废弃地块的处理技术仍存在争议，因此，在应用自然衰减之前，需要通过模型来模拟预测污染物降解速率与降解途径，并对其降解效果进行评估，特别是在污染羽还继续扩散的情况下，要对处理完后其下游接收点的浓度进行预测与评估。

通过模型模拟来预测自然衰减过程中污染物浓度能否减小到标准值以下或低于可接受风险水平，并且需要长期监测来确保降解过程中自然衰减保持一定的衰减速率，以保证在预定时间内达到预期效果。

与其他处理技术相比，自然衰减有以下优点：不会引起污染物大量迁移；对地下结构干扰性小；根据地块情况与修复目标，自然衰减可以用作全地块修复也可用作地块部分修复；自然衰减可以与其他修复技术结合使用或作为其他修复技术的后续处理；修复费用比主动修复费用低。

适用性

自然衰减的目标污染物是 VOCs、SVOCs、燃料。在处理燃料与卤代烃时，

该技术需要先进行评估。杀虫剂一般可用自然衰减方式降解，但是降解有效性不好或者只能降解混合物中的某几种物质。如果自然衰减过程能使金属物质原子价发生改变，使金属固定化（例如铬），那么金属物质也可用该技术处理修复。

限制性

* + 需要搜集模型模拟参数。
  + 降解的中间产物可能会比原有机污染物更具有不稳定性与毒性。
  + 自然衰减不适用与存在危急风险的地块。
  + 污染物在降解之前可能会迁移。
  + 需要建立制度监控，在污染物降解到标准水平以前，污染地块不能再用。
  + 如果有自由相存在，则在处理前需要将自由相清除。
  + 某些无机物可能会被固定化而不会降解，例如水银。
  + 需要长期监测，并且会因此而增加费用。
  + 与主动修复相比，自然衰减达到修复目标所需的时间更长。
  + 修复过程中，原来水文地质与岩土性质条件可能会发生改变，而使已经稳定了的污染物又活跃起来，从来对修复效果产生负作用。
  + 为了使自然衰减得到公众认可，还需要进一步工作。

### 5.3.3 原位空气注射（In situ Air Sparging, AS）

技术描述

空气注射技术是将空气注入受污染的饱和层，注入的空气通过土壤中的微小通道在横向和竖向上扩散，通过挥发作用将污染物从地下水中吹脱出来。一般空气注射与土壤气相抽提技术连用，空气注射使地下水中污染物挥发到非饱和区，在非饱和区中利用土壤气相抽提技术将产生的气体抽提出地面进行处理。该技术的操作流速较大，以此增大地下水与土壤的接触，吹托起更多的地下水。

注射空气同时提高了污染地下水中和非饱和区域中氧气的含量，从而能够促进地下水位上下污染物的生物降解。

空气注射一般会持续几年的时间。

适用性

空气注射处理的目标污染物是 VOCs 与燃料。在注射空气中加入甲烷可加强氯代有机物的共代谢作用。

局限性

* + 通过饱和层的气流如果不均匀，就可能导致危险性气体发生不可控制运动。
  + 要充分考虑污染物的深度与特殊地块地质性质。
  + 空气注射井要根据地块特性设计。
  + 土壤异质性可能会导致某些区域不受影响。

### 5.3.4 原位化学氧化（In situ Chemical Oxidation）

技术描述

地下水原位化学氧化技术使用的氧化剂主要包括过氧化物、臭氧和高锰酸盐，这些氧化剂能够快速彻底的破坏许多有毒有机物，其他有机物能够被微生物部分降解。通常，这些氧化剂对于非饱和脂肪烃（例如 TCE）以及芳香烃（例如苯），具有非常高的去除率（高于 90%），速度快（几分钟内降低 90%）。实际应用案例表明，地块环境条件是影响该技术修复效果的最关键因素。

适用性

目标污染物的化学氧化效果主要受污染物的理化性质、易还原性以及地块条件影响，尤其是 pH、温度、氧化剂浓度，以及易消耗氧化剂的其他物质。为尽量避免氧化非目标物质，氧化剂的传输方式以及分布将非常重要，传输系统通常采用垂直或水平井群，以水平对流方式通过注入孔将氧化剂快速送入地下。

高锰酸盐在地下非常稳定和持久，因此，能够通过扩散方式迁移。氧化剂对于系统本身的影响必须考虑，所有的氧化剂均会导致 pH 下降，除非系统本身具有较好的缓冲设计。其他影响物质包括：胶状物（往往能够降低渗透性）、离子交换作用、可能的毒害副产物，加热气体，生物扰动等。

局限性

* 需要消耗大量的氧化剂，包括对非目标污染物的氧化。
* 部分关注污染物难以被氧化。
* 可能因氧化而导致潜在的不良反应。

### 5.3.5 物理阻隔墙（Physical Barrier Walls）

技术描述

物理阻隔墙技术通常用来处理污染地下水、转移饮用水入口污染地下水、转移未被污染的地下水，以及为处理系统提供阻隔墙。

地表阻隔墙由一个垂直的充满悬浮液的沟槽构成。悬浮液的水压避免沟槽的塌陷，同时形成的滤饼可减少地下水流量。阻隔墙常用于较大数量废物的处理，以及可溶性和流动性成分对饮用水源造成严重威胁的地方。

阻隔墙是一项比较成熟的技术，数十年来它一直被长期应用于渗滤液的处理，常与封顶一起使用。该技术已证明可有效处理未污染部分超过 95%的地下水，但处理污染地下水及特殊污染类型的地下水可能会使阻隔墙老化并削减其长期使用效果。

大多数阻隔墙是由土、膨润土和水混合而成。膨润土泥浆主要用于沟槽挖掘过程中阻隔墙的稳定化。土-膨润土填充料代替泥浆被置于沟槽中形成隔水墙。墙体的这种构成就形成了一个低透水性且廉价的耐化学性屏障。当需要更大的结构力或者在膨润土与污染物之间化学不相容时，其他材料，如水泥/膨润土、火山灰/膨润土、硅镁土、有机改良土或泥浆土工膜复合材料也可能被使用。

阻隔墙一般安置于 30 米深处，通常厚度为 0.6-1.2 米。安装深度超过 30 米需要使用盖式盘状活塞泵挖掘，但是这些因素会使墙体单位价格增加。

影响土-膨润土泥浆墙费用的最重要因素包括：污染物的类型、活性及分布；墙的深度长度和宽度；地质和水文特征；设备与原料源之间的距离；其他的特殊地块要求像是最初地块评估的鉴定；规划，准许，管理及地块修复。

适用性

阻隔墙能够控制地下水流动，因此可处理无特殊污染物的地下水。它被用于处理地下水，将污染水从饮用水入口转移，转移未污染的水，并为地下水处理系统提供屏障。

局限性

* 该技术应用过程中，大多涉及大量的重型基建。
* 该技术只能控制一定范围内的污染物质。
* 土-膨润土填充物不抗强酸、强碱、盐的缓冲液及某些有机化学物质，其他的泥浆混合物可用来抵抗某些化学物质。
  1. 地块修复技术确定
     1. 确认地块条件

土壤污染修复工作需要对地块前期的土壤和地下水环境调查、模拟预测评估和健康风险评估等资料进行核实，因此本标准结合实际修复和风险管控工作经验、以及《建设用地土壤污染状况调查 技术导则》（HJ 25.1）和《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ 25.3）的要求，对修复工作开展前需要核实的资料类别进行了说明，包括污染地块基本情况、地块环境特性、地下水污染特征等。当修复方案编制距地块环境调查时间较长时，需要重新确认地下水污染羽的范围和污染程度。

污染地块土壤修复方案编制前，需要踏勘现场情况，通过现场走访调查、与场地管理方的沟通、简单的水文地质测绘、异常气味的辨识、摄影和照相等现场踏勘方式，关注场地及周边环境是否发生变化，如周边地下水型饮用水源地等环境保护敏感目标的变化情况，是否影响前期场地调查和风险评估的结果。还可以通过现场踏勘，考察场地施工条件，为修复工程施工区布局提供基础信息。

通过核查场地已有水文地质条件和地下水污染情况等相关资料和现场踏勘情况，如发现已有资料不能满足土壤修复方案的编制要求，应适当补充相关资料。必要时应补充开展水文地质勘查和场地环境调查，进行风险评估与模拟预测，相关技术要求按照 HJ25.1、HJ 25.2 、HJ 25.3和HJ 610执行。

* + 1. 更新地块概念模型

本标准参考美国 EPA《环境清理最佳管理实践：基于生命周期评价的场地概念模型的有效性》(Environmental cleanup Best Management Practices: effective use of the project life cycle conceptual site model)规定了修复技术方案编制阶段地块概念模型的特点，比风险评估阶段初步建立的地块概念模型更加细化、更加定量。修复技术方案编制阶段的地块概念模型，应进一步结合地块水文地质条件、污染物的理化参数、空间分布及其潜在运移途径、风险评估结果等因素，以文字、图、表等方式概化地块地层分布、地下水埋深、流向、描述污染物的空间分布特征、污染物的迁移过程、迁移途径、污染介质与受体的相对位置关系、受体的关键暴露途径以及未来建筑物结构特征等，用以指导修复策略制定、筛选合适的修复技术并提出潜在可行的修复技术备选方案。同时，在修复技术方案制定的过程中，应根据所制定的修复技术方案，动态更新地块概念模型，以评估不同修复技术方案的实施效果。

* + 1. 确认地块修复目标

本标准参考美国 EPA《CERCLA 修复调查和可行性研究导则》(Guidance for conducting remedial investigations and feasibility studies under CERCLA)和美国ASTM《基于风险和非风险情景下所考虑的修复措施选择标准》(Standard guide for remedy selection integrating risk-based corrective action and non-risk considerations)中有关修复目标的含义，对地块修复目标做了如下定义：是使地块土壤和地下水质量满足某种使用功能的目标。本标准对涉及地下水修复和土壤 VOCs呼吸暴露风险控制 2 类场地进行了特别说明：一是由于涉及地下水等修复周期较长的场地，本标准规定了可将目标划分为近期、中期和长期不同阶段的修复目标，并明确实施各个时期目标的时间要求。地下水污染修复的近、中和长期目标可按下列方式划分：①近期目标：切断和控制污染地下水的污染源，防止对地下水的进一步污染。如通过挖掘去除地下水上部存在自由相的污染土壤；通过水力控制防止地下水污染扩散等。②中期目标：通过降低地下水污染物浓度或工程控制技术消除场地直接的健康风险，使其达到特定用途的可接受风险水平。具体操作如下：不具有饮用功能的地下水污染修复（防控）区域，且无适用或相关适合标准的情况下，可采用《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ 25.3-2019）中的风险评估模型，利用风险评估的方法，确定基于风险的修复（防控）目标。③长期目标：恢复地下水的使用功能。如为饮用水，将地下水恢复到饮用水功能。具体操作如下：a.地下水饮用水水源地集中开采区域，选择适用标准作为修复（防控）目标。适用标准选择按照以下优先顺序：a-1）适用标准：《地下水质量标准》（GB/T 14848）。a-2）相关适合标准：如果地下水修复（防控）后用作饮用水使用，且《地下水质量标准》（GB/T 14848）中缺乏目标污染物标准时，可参考《生活饮用水卫生标准》（GB 5749），以及美国 EPA 或世界卫生组织（WTO）发布的相关饮用水质量标准。b.若位于地下水饮用水源地补给区域，可能或潜在影响到周边水源时，按照饮用水的暴露途径进行风险评估，确定修复（防控）目标。二是本标准还规定了对于土壤 VOCs 呼吸暴露风险的控制，应结合地块污染程度、受体风险高低、未来建筑结构特性等因素，可将其修复目标确定为消除风险、削减风险或控制风险 3 种不同情景。

* + 1. 修复策略的确定

结合美国EPA《CERCLA修复调查和可行性研究导则》(Guidance for conducting remedial investigations and feasibility studies under CERCLA)、美国EPA的大量修复案例报告、美国ASTM《基于风险和非风险情景下所考虑的修复措施选择标准》(Standard guide for remedy selection integrating risk-based corrective action and non-risk considerations)以及我国污染地块修复的实际情况，在确定修复策略过程中应遵守以下准则：

1. 与地块相关利益方进行充分交流和沟通，确认地块未来的用地发展规划、地块开发方式、时间进度、是否允许原位修复、修复后土壤的再利用或处置方式等。
2. 充分考虑地块修复过程中土壤和地下水的整体协调性，并综合考虑近期、中期和长期目标的要求，以及修复技术的可行性、成本、周期、民众可接受程度等因素。
3. 污染地块风险评估可作为评估采取不同修复策略是否可以达到修复目标的评估工具。
4. 应选择绿色的、可持续的修复策略，使修复行为的净环境效益最大化。

有关修复目标值确认方面，分为原位修复和异位修复两方面。对于采取原位修复的地块，土壤和地下水的修复目标值应采用风险评估报告确定的修复目标值。

对于异位修复的地块，修复后土壤和地下水的去向有可能发生变化，因此，修复目标值应做进一步细化：

a) 若修复后土壤回填到原基坑，采用风险评估报告提出的修复目标值；若污染地下水修复后回灌到原地块，则采用风险评估报告提出的地下水修复目标值；

b) 若修复后土壤外运至其他地块，采用根据接收地土壤暴露情景进行风险评估确定的修复目标值，或采用接收地土壤背景浓度与 GB 36600 中接收地用地性质对应筛选值的较高者；若污染地下水修复后排放，采用相应的地表水排放标准或根据最终去向确定的标准值。

化学氧化/还原修复、微生物修复涉及的潜在二次污染物的修复目标值可参照 GB 36600 中同类用地类型对应的筛选值和 GB/T 14848 中地下水使用功能对应标准值执行，或根据暴露情景进行风险评估确定，风险评估可参照 HJ 25.3 和DB 11/T 656 执行。

土壤法第三十五条规定“土壤污染风险管控和修复，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、后期管理等活动。”，土壤法已把风险管控和修复区别开。在风险管控目标方面，根据用地功能，结合关注污染物的关键暴露途径、暴露方式、迁移转化规律、水文地质条件及修复治理的难度及其成本，采用止水帷幕、覆盖等阻隔方式阻止污染物进一步迁移扩散、切断污染物与暴露人群的接触或限制地块用地功能以控制人群暴露频率与周期，控制污染物的暴露风险。

风险管控目标应结合风险管控工程特点来制定，主要包括污染物浓度目标和风险管控工程设计指标：

a) 风险管控污染物浓度目标应为暴露点浓度低于可接受风险水平。如对于VOCs污染地块，其覆盖阻隔层上方大气环境质量或其上建筑物室内空气质量应稳定持续低于风险控制值；对于采用阻隔措施控制地下水污染扩散，则其下游地下水中污染物浓度应持续下降；对于固化/稳定化后土壤中污染物的浸出浓度应达到接收地地下水用途对应标准值或不会对地下水造成危害；

b) 依据风险管控污染物浓度目标，进行工程设计并确定可达到风险管控浓度目标的工程设计指标。

### 5.4.2 修复技术的筛选与评估

筛选与评估修复技术阶段是指以地块修复目标与修复策略为核心，通过技术筛选，找出适用于目标地块的潜在可行技术，并根据需要进行相应的技术可行性试验与评估，确定目标地块的可行修复技术。筛选与评估修复技术阶段应包括修复技术初步筛选、技术可行性试验、修复技术综合评估3个过程。其中，技术可行性试验根据试验目的和手段的不同，又分为筛选性试验和选择性试验。

#### 5.4.2.1 修复技术初步筛选

美国EPA《CERCLA修复调查和可行性研究导则》(Guidance for conducting remedial investigations and feasibility studies under CERCLA)和美国EPA经典案例《“超级基金”地块之一的化肥污染地块的最终可行性研究报告》(Final feasibility study-Frontier Fertilizer Superfund Site)中根据筛选目的和选取指标的不同，将修复技术筛选分成了预筛选(pre-screening)和筛选阶段(screening)。为了使其更利于操作和更符合我市修复技术筛选的实际工作过程，将其统一为修复技术初步筛选一个过程。

《污染地块土壤环境管理办法（试行）》（中华人民共和国环境保护部令（第42号））第四章中第十八条规定“污染地块土地使用权人应当根据风险评估结果，并结合污染地块相关开发利用计划，有针对性地实施风险管控。对暂不开发利用的污染地块，实施以防止污染扩散为目的的风险管控。对拟开发利用为居住用地和商业、学校、医疗、养老机构等公共设施用地的污染地块，实施以安全利用为目的的风险管控。”第五章中第二十三条要求“对拟开发利用为居住用地和商业、学校、医疗、养老机构等公共设施用地的污染地块，经风险评估确认需要治理与修复的，土地使用权人应当开展治理与修复。”。为了落实42号令中相关要求，在该部分对风险管控和治理修复也提出了相应的要求。

风险管控技术的初步筛选主要从技术原理、适用目标污染物、技术成熟度、时间、环境风险、建设成本及运行维护成本等方面考虑。风险管控技术筛选可参见附录A。治理修复技术相关筛选工具可参考美国FRTR(Federal Remediation Technologies Roundtable)筛选矩阵和根据我国和北京实际工作经验所修订整理的“土壤和地下水修复技术筛选矩阵”（参见导则附录B），主要是从技术的修复效果、可实施性（包括技术上的可实施性及管理部门的接受性）、成本等角度进行考虑，筛选出潜在可行的修复技术。

##### 5.4.2.1.1 修复技术可行性试验

通过修复技术筛选过程后，应进一步开展可行性试验，确定各潜在可行技术是否适用于特定的目标地块。在技术可行性试验方面，参考美国EPA《CERCLA可处理性研究导则》(Guidance for conducting treatability studies under CERCLA)中根据目的和手段的不同，将可行性试验分成了修复筛选性试验(remedy screening testing)和选择性试验(remedy selection testing)。

当效率、时间、成本等数据量充足，大量研究和案例证明该技术对某种污染物处理有效，可跳过可行性试验过程直接进入技术综合评估阶段；但是当数据量不够证明各潜在可行技术能够用于特定的目标地块或缺少前期基础、文献或应用案例时，则首先需要开展可行性试验。

（1）筛选性试验

筛选性试验的目的是通过实验室小试规模的试验，判断技术是否适用于特定目标地块，即评估技术是否有效，能否达到修复目标。

有关筛选性试验的规模与类型、数据要求、重现性、试验周期等具体技术要求如下：

* 规模与类型：多为批次的实验室规模的小试。通常采集实际地块的污染介质，利用实验室常规的仪器设备开展试验。
* 数据要求：试验结果或数据应达到足以定性评判该技术对于污染物处理的能力。筛选性试验的数据表明该技术若能达到修复目标的要求，则认为该技术潜在可行。
* 重现性：至少应重复1次或2次，试验过程应有质量保证和质量控制措施。
* 试验周期：取决于该技术的类型和需考察的参数数量。如果不考虑试验计划制定、数据处理及报告编写，仅考虑实验室的试验过程，一般仅数天时间。

如果所有进行筛选性试验的技术均难以达到试验目标（均不符合目标），应考虑回到制定修复策略阶段对其进行适当调整。

对于已经有大量应用案例证明可以处理某种污染物的技术，可跳过筛选性试验。在参考美国EPA《常用修复技术：CERCLA针对土壤中VOCs的地块特征与技术选择》(Presumptive remedies: site characterization and technology selection for CERCLA sites with VOCs in Soils)、《重金属污染地块土壤的常用修复技术》(Presumptive remedy for metals-in-soil sites)以及纽约州《纽约州修复程序中的常用修复技术》(Presumptive/proven remedial technologies for New York State’s remedial programs)的前提下，这里提供了“地块常用修复技术”列表（参见标准文本附录C）。当目标地块的污染物、污染介质特性与附录C列表所列出的某项技术相符时，该技术可跳过筛选性试验。

（2）选择性试验

选择性试验的目的是确定工艺参数、成本、周期等。通过选择性试验的技术，可进入修复技术综合评估过程。

有关选择性试验的规模与类型、数据要求、重现性、试验周期等具体技术要求如下：

* 规模与类型：在实验室或现场完成，可为小试或中试。小试应采集实际地块的污染介质，采用不同的工艺组合来试验效果，从而确定最佳工艺参数，并以此估算成本和周期等；中试应根据修复技术类型的特点，在现场选择具有代表性的区域（尽量兼顾不同区域、不同浓度、不同介质类型）进行试验，来验证修复技术的实际效果，确定合理的工艺参数、成本和周期；所利用的设备宜基于现场实际应用而按比例加工制造的。
* 数据要求：应满足可定量确定技术能否满足操作单元的修复目标以及确定操作工艺参数、成本、周期。
* 重现性：至少应重复2次或3次，试验过程应有严格的质量保证和质量控制措施。
* 试验周期：取决于该技术的类型、污染物的监测种类以及质量保证和质量控制所需达到的水平。仅试验过程，小试或中试试验需要数天、数周至数月时间。
* 随着地下水污染模拟技术的发展，地下水污染模拟预测评估成为地下水修复和风险管控方案制定的一种重要技术手段。地下水模型可以用来帮助了解地下水系统的特性，评估地下水修复和风险管控技术的有效性、工程修复效果和修复周期等。

当选择性试验过程难于选择出合适技术时（均不符合要求），应考虑回到制定修复策略阶段对其进行适当调整。

##### 5.4.2.1.2 修复技术综合评估

对通过选择性试验的修复技术，可进一步采用列举法定性描述各技术的原理、适用性、限制性、成本等方面来综合评估，或利用修复技术评估工具表（参见导则文本附录E）以可接受性、操作性、效率、时间、成本为指标来定量评估得到目标地块实际工程切实可行的修复技术。规定的具体评分方法为：每个修复技术都分5个指标分别进行述评后评分，每个指标可评分赋值1-4分；分数越高，表明该技术越有利于在地块修复中被应用。总分区间为5-20分。

#### 5.4.2.2 提出修复技术备选方案与方案比选

修复技术备选方案与方案比选阶段是指进一步综合考虑地块修复目标、修复策略、环境管理要求、污染现状、地块特征条件、水文地质条件、修复技术筛选、可行性试验与评估结果，对各种可行技术进行合理组合，提出若干能够实现修复总体目标的潜在可行的修复技术备选方案；并选择经济效益、环境效益、社会效益综合表现最佳的修复技术备选方案，作为地块最终推荐的修复技术方案，为环境管理决策提供依据。提出修复技术备选方案与方案比选阶段主要包括提出修复技术备选方案和方案比选2个过程。

##### 5.4.2.2.1 提出修复技术备选方案

修复技术备选方案应包括：详细的修复目标/指标、修复技术方案设计、总费用估算、周期估算等内容。其中，详细的修复目标/指标需根据不同的污染介质，按未来使用功能的差异，分区域、分层次制定。

修复技术方案设计包括制定修复技术方案的技术路线、确定各修复技术的应用规模、确定涵盖工艺流程与相关工艺参数和周期成本在内的具体的土壤修复技术方案和地下水修复技术方案。修复技术方案的总体技术路线应反映污染地块修复总体思路、修复工艺流程；各修复技术的应用规模应涵盖污染土壤需要修复的面积、深度、土方量，污染地下水需修复的面积、深度、出水量，同时应考虑修复过程中开挖、围堵等工程辅助措施的工程量；工艺参数应包括设备处理能力、或每批次处理所需时间、处理条件、能耗、设备占地面积或作业区面积等。

总费用估算包括直接费用和间接费用，其中直接费用包括所选择的各种修复技术的修复工程主体设备、地块准备、污染土壤和地下水处理等费用总和；间接费用包括修复工程环境监理、二次污染监测、修复验收、人员安全防护费用，以及不可预见费用等。周期估算包括各种技术的修复工期及所需的其他时间估算。

此外，大型污染地块修复技术方案中的可行技术一般不止一种，可能是多种技术的组合。修复技术方案可以是多个可行技术的“串联”，也可以是多个可行技术的“并行”；可行技术的“串联”中，每个可行技术的应用具有先后顺序，而可行技术的“并行”则没有先后顺序，可行技术可同时在污染地块上开展修复工程。可行技术的组合集成有多种方式，相应的可形成多个修复技术备选方案。

##### 5.4.2.2.2 方案比选

方案比选应建立修复技术方案比选指标体系，须充分考虑技术、经济、环境、社会等层面的诸多因素。考虑因素是基于美国EPA的9条选择标准以及北京市初步建立的地方性修复技术方案评估体系。总体而言，两套标准体系主要内容基本一致，北京市标准体系是在美国EPA的9条标准的基础上，结合北京市实际情况所制定的，针对性、合理性更强，更加符合我国和北京市地块的管理需求。修复技术方案比选指标体系见表1.

表1 修复技术方案比选评估标准体系

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ①技术指标 | 可操作性 | 修复技术的可靠性；管理人员经验的丰富程度；必要的设备和资源的可获得性；异位修复过程中污染介质的贮存、运输、安全处置方面的可操作性；以及与地块再利用方式或后续建设工程匹配性相关的可操作性指标，包括修复后地块的建设方案及其时间要求、土方平衡方面的可操作性等。 |
| 污染物去除效率 | 目标污染物的有效去除数量与总数量的比值。 |
| 修复周期 | 达到修复目标/指标所需要的时间。 |
| ②经济指标 | 基本建设费用 | 包括直接费用和间接费用。其中直接费用包括原材料、设备、设施费用等；间接费用包括工程设计、许可、启动、意外事故费用等。 |
| 运行费用 | 人员工资、培训、防护等费用；水电费；采样、检测费用；剩余物处置费用；维修和应急等费用；以及保险、税务、执照等费用。 |
| 后期费用 | 日常管理、周期性监测等后期费用。 |
| ③环境指标 | 残余风险 | 剩余污染物或二次产物的类型、数量、特征、风险，以及风险处理处置的难度和不确定性。 |
| 长期效果 | 修复工程达到修复目标后的污染物毒性、迁移性或数量的减少程度；预期环境影响（占地、气味、外观等）是否达到了长期环境保护环境健康的目标；是否存在潜在的其他污染问题；需要修复后长期管理的类型和程度；长期操作和维护可能面临的困难；技术更新的潜在需要性。 |
| 健康影响 | 修复期间和修复工程达到修复目标后需要应对的健康风险（如异位修复期间的清挖工程中污染物可能对工作人员的健康造成危害）以及减少风险的措施。 |
|
| ④社会指标 | 管理可接受程度 | 区域适宜性；与现行法律法规、相关标准和规范的符合性等。 |
|
| 公众可接受程度 | 施工期对周围居民可能造成的影响（气味、噪声等）。 |

对于修复技术方案的最终选择，可以采用2种方式：一是利用详细分析结果，通过不同指标的对比、综合判断后，选择更为合适的修复技术方案作为地块修复技术方案；二是利用专家评分的方式，在备选技术方案中选择得分最高的方案作为地块修复技术方案。

专家评分方式应首先建立各指标权重，由专家对各修复技术备选方案分别进行评分，根据专家评分值，以及部分定量数据（如已经获取的方案费用等数据），进行标准化处理，加权求和，得出每个潜在可行修复技术备选方案的分值。具体过程如下：

（1）评估方法

* 专家打分；其中经济指标为实际值，其他指标为专家打分值；
* 将每个指标实际值或打分值进行归一化处理，得到[0，1]区间内的一个数；
* 乘以各自的权重，并加和，得到各备选方案的总得分；
* 根据每个方案总得分，进行各备选方案排序和优选。

（2）对于经济指标，值越小越优：归一化值=各备选方案本指标的最小值/原值

*B1i=y1min/y1i*

*B1i*表示本指标方案i归一化后的值；

*y1min*表示本指标各备选方案的最小值；

*y1i*表示本指标方案i的值；

对于其他指标，值越大越优：归一化值=原值/各备选方案本指标的最大值

*B1i= y1i /y1max*

（3）方案总排序

对各备选方案评分指标的标准化分值进行加权求和，公式如下：



*Ci*表示方案分数最终计算结果；

*Ai*表示指标i的权重；

*Bi*表示方案指标i的归一化值。

分值越高，表示该修复技术备选方案越可行。根据上述程序，最终确定针对该目标污染地块修复的一种修复技术或多种技术的组合方案。最终完成建设用地土壤污染修复技术确定。

1. 修复工程施工组织

参考美国《修复设计/修复行动手册》（Remedial design/Remedial action Handbook）、《加快修复设计/修复行动指南》（Guidance on Expediting Remedial Design and Remedial Actions）、《EPA对实施修复设计和修复行动潜在责任方的监督指南》（Guidance on EPA Oversight of Remedial Designs and Remedial Actions Performed by Potential Responsible Parties）、《有关在超级基金地块对污染地下水采取修复行动的指南》（Guidance on Remedial Actions for Contaminated Ground Water at Superfund Sites）、《危险废物场所活动职业安全与健康指导手册》（Occupational Safety and Health Guidance Manual for Hazardous Waste Site Activities）、《标准操作安全指南》（Standard Operating Safety Guides）中有关项目组织等方面的内容要求，将修复工程施工组织方案部分分为工程概况、施工组织部署、施工平面规划、施工计划、运行维护计划及修复过程监测优化等。

* 1. 工程概况

结合污染地块原始调查资料、工程建设政策法规和规范资料、修复技术方案等资料，编写工程概况。工程概况的内容包括但不限于（1）工程构成情况：主要说明项目工程名称、性质和特点，工程规模，修复和风险管控面积等；（2）项目设计及承包单位情况；（3）项目所在地自然条件状况：包括气象及变化状态，地形及地质情况，周边道路及交通情况，污染地块厂区及周边地下管道情况等；（4）工程特点及项目实施条件分析：主要对工程施工合同条件、现场条件、现行法规条件进行分析等。

* 1. 施工组织部署

搜集整理地块概况资料，根据施工图纸和所筛选的修复技术方案要求，对项目管理组织、工程工期目标、工程质量目标、工程安全目标、工程环境目标等方面提出要求。分析工程施工的重点和难点，根据工程工期和工程预算合理安排施工程序。

《中华人民共和国土壤污染防治法》第四十条规定“修复施工期间，应当设立公示牌，公开相关情况和环境保护措施”。《污染地块土壤环境管理办法（试行）》（中华人民共和国环境保护部令第42号）第二十五条“治理与修复期间，土地使用权人或者其委托的专业机构应当设立公告牌和警示标识，公开工程基本情况、环境影响及其防范措施等。”因此，本导则明确规定“修复工程施工期间应设立公告牌和警示标识，公开工程基本情况、环境影响及其防范措施等。”结合修复项目实际情况，工程基本情况包括但不限于工程名称，施工现场建设单位、设计单位、监理单位等名称，各单位现场负责人、施工单位项目经理以及专职安全员的基本情况，施工许可证，工程工期等。

* 1. 施工平面规划

施工平面布置应符合下列原则：

1. 平面布置科学合理，施工地块占用面积少；
2. 合理组织运输，减少二次搬运；
3. 施工区域划分和地块的临时占用应符合总体施工部署和施工流程的要求，减少相互干扰；
4. 充分利用既有建（构）筑物和既有设施为项目施工服务降低临时设施的建造费用；
5. 临时设施应方便生产和生活，办公区、生活区和生产区宜分离设置；
6. 符合节能、环保、安全和消防等要求；
7. 遵守当地主管部门和建设单位关于施工现场安全文明施工的相关规定。

现场所有设施、用房应由总平面布置图表述，避免采用文字叙述的方式。

* 1. 施工计划

根据修复技术方案、工程概况、施工组织部署等内容编制施工计划。

### 6.4.1 施工进度计划

施工项目进度控制与质量控制、成本控制一样，是项目施工中的主要内容之一，是实现项目管理目标的主要有效途径。

施工进度计划制定的依据主要有：（1）工程项目总工期（2）各项工作的时间估计（3）各种制约因素等。

施工进度计划制定的原则：（1）确保总工期和阶段节点工期完成（2）及时安排综合调试、动态检测要求，科学安排均衡施工（3）确保质量与安全的原则等。

施工进度计划的内容应包括：编制说明，施工进度计划表（图），分期（分批）实施工程的开、竣工日期，工期一览表等。

### 6.4.2 施工准备计划

应根据施工开展顺序和主要工程项目施工方法，编制施工准备工作计划。技术准备计划包括施工过程所需技术资料的准备计划、施工方案编制计划、试验检验及设备调试工作计划等；现场准备计划包括现场生产、生活等临时设施，如临时生产、生活用房，临时道路，材料堆放场，临时用水、用电和供热、供气等的计划；资金准备计划应根据施工总进度计划编制。

### 6.4.3 施工材料计划

施工材料计划编制应遵循国家的法律、法规和各项规定，遵循国家各项物资管理政策和要求。包括但不限于劳动力需要量计划、施工工具需要量计划、主要原材料需要量计划、成品/半成品需要量计划、工艺设备需要量计划、主要施工机械/设备需要量计划等。劳动力需要量计划必须反映出各施工队在各个施工阶段的劳动力需求情况，具有动态性和指导性。即根据施工方案、施工进度和施工预算，依次确定专业工种、进场时间、劳动量和工人数，然后汇集成表格形式，作为现场劳动力调配的依据。施工工具需要量计划的制定应考虑机械设备费和工程量的关系，各种机械设备的合理组合以及固定资产损耗费与运行费是否经济等因素。主要原材料需要量计划应根据年度、季度、月施工进度计划进行编制，在考虑施工进度计划的同时还应该考虑季节性材料的储备，保证缺料季节工程施工的正常进行。

### 6.4.4 主要施工方法

施工组织要制定一些单位（子单位）工程和主要分部（分项）工程所采用的的施工方法，这些工程通常是工程中工程量大、施工难度大、工期长，对整个项目的完成起关键作用的主要分部（分项）工程。

制定主要工程项目施工方法的目的是为了技术和资源的准备工作，同时也为了施工进程的顺利开展和现场的合理布置，对施工方法的确定要兼顾技术工艺的先进性和可操作性以及经济上的合理性。

### 6.4.5 污染土壤转运计划

《中华人民共和国土壤污染防治法》第四十一条规定“修复施工单位转运污染土壤的，应当制定转运计划，将运输时间、方式、线路和污染土壤数量、去向、最终处置措施等，提前报所在地和接收地生态环境主管部门。转运的污染土壤属于危险废物的，修复施工单位应当依照法律法规和相关标准的要求进行处置。”2016年发布的《污染地块土壤环境管理办法（试行）》（原中华人民共和国环境保护部42令）第二十五条规定“治理与修复工程原则上应当在原址进行；确需转运污染土壤的，土地使用权人或者其委托的专业机构应当将运输时间、方式、线路和污染土壤数量、去向、最终处置措施等，提前 5 个工作日向所在地和接收地设区的市级环境保护主管部门报告。制定的污染土壤转运计划表见附录F。

* 1. 修复工程运行维护

美国EPA发布的《Operation and Maintenance in the Superfund Program》文章中提到在超级基金修复措施的整个实施周期中，充分处理运行与维护问题对超级基金计划的成功实施至关重要。运行维护措施是指对现场修复措施进行运行维护，以确保修复措施仍起到保护人类健康和环境的作用。典型的运行维护措施包括检查，取样、监测与分析，日常运行与维护，报告。

### 6.5.1 运行维护的目标

美国2017年发布的《Guidance for Management of Superfund Remedies in Post Construction》指南中把地块修复分为源修复、源和地下水围堵、地下水和地表水恢复三种类型。不同类型的修复其修复行为结束的标志不一样，如表2所示。根据运行维护与监测的定义及不同修复类型的修复行为结束标志可推测运行维护的目标分别为（1）一些修复系统的修复设施建设完毕，应继续运行维护以达到修复目标；（2）若地块上有风险管控设施存在，应确保风险管控设施的有效性。常见的需进行运行维护的系统可包括地下水抽提、土壤气抽提、蒸气入侵缓解、固化稳定化、渗透反应墙、阻隔、监测自然衰减等。

表2 修复类型及结束标志

|  |  |
| --- | --- |
| 修复类型及其举例 | 修复行为结束标志 |
| 源修复 | |
| 源修复（例如SVE,原位污染源处理） | 达到修复目标 |
| 清挖并异位处置污染物 | 所有修复涉及的污染物全被清挖，运走到既定的地块，修复目标达到 |
| NAPL修复（目的是减小源的体积，而不是地下水的恢复） | 必要的污染物被移除或体积减小 |
| 源和地下水围堵 | |
| 源控制、填埋覆盖、地下水修复技术不可实施的情况下，围堵作为联合实施的技术 | 指定的修复措施建设完毕，达到操作与功能阶段（O&F），随后进入运行与维护阶段 |
| 地下水抽提处理（目的是为了防止污染羽扩散） | 污水处理设施建设完毕，监测系统建设完毕，围堵设施有效发挥作用，达到运行与功能阶段（O&F），随后进入运行与维护阶段 |
| 地下水和地表水恢复 | |
| 异位修复 | 污水处理设施建设完毕，监测系统建设完毕，达到运行与功能阶段（O&F），随后进入运行与维护阶段 |
| 原位修复 | 污水处理设施建设完毕，监测系统建设完毕，药剂投加正在进行中，达到O&F，随后进入运行与维护阶段 |
| 监测自然衰减 | 监测井网络建设完毕，达到运行与功能阶段（O&F），随后进入运行与维护阶段 |

### 6.5.2 运行维护内容与方式

2017年美国EPA发布的《Guidance for Management of Superfund Remedies in Post Construction》指南中运行维护章节对运行维护计划和运行维护手册都进行了描述。其中运行维护计划内容主要是从技术层面、资金层面和管理层面进行了规定。

根据运行维护计划和手册内容，本节规定运行维护的方式主要包括日常巡视检查、文件检查、日常操作与维护、记录与报告四部分，结合污染地块实际修复案例，运行维护的具体内容如下所示：

#### 6.5.2.1 日常巡视检查

通过日常巡视检查，能及时发现物理设施存在的问题或潜在风险。外观检查的内容包括外观完好性、物理系统运行状况、防火设施、警报系统、监测系统、其他相关检查。

#### 6.5.2.2 文件检查

检查操作手册、设备说明书、记录文件等是否齐全、标记完整、放置在规定的位置；

系统是否严格按照操作手册进行运行，有无记录的缺失；

运行参数是否在预期范围内，有无异常参数出现；

对异常参数采取了什么措施，效果如何。

#### 6.5.2.3 日常操作与维护

严格按照操作规程使用相关设施、设备，包括启动与停止、调整参数等，当设施、设备在运行中发生异常情况不能排除时，应立即停止运行。

根据不同机电设备要求，应定期添加或更换润滑剂，更换出的润滑剂应按规定妥善处置。

定期维护建筑物、构筑物的结构及各种闸阀、护栏、爬梯、管道、井盖、盖板、支架、走道桥、照明设施、防雷设施等，保持其完好性。

定期校验各类仪器、仪表等，定期保养各类设施、设备。

定期修复阻隔层的裂缝或腐蚀凹槽，更换密封剂或水泥浆；定期维护固化/稳定化上方保护层（覆土或沥青层），防治固化/稳定化产物受到风化影响；定期修复围栏缺损处。

#### 6.5.2.4 记录与报告

运行与维护记录应如实反映设备、设施、工艺及运行情况，应包含但不限于下列内容：

a) 各类设备、仪器、仪表运行记录；

b) 运行工艺控制参数记录；

c) 运行剂量及材料消耗记录；

d) 维护、维修的时间及内容；

e) 库存材料、备品、备件等库存记录。

应每年就运行与维护情况编制报告，报告中应包含运行与维护的对象、目的、计划、实际运行与维护情况、运行与维护效果，运行与维护年度报告可根据地块需求与制度控制、长期监测年度报告合并编制。

发生意外状况时，还应编制专题报告，对意外状况进行描述、原因分析、记录应对措施、分析应对效果、提出优化意见。

* 1. 修复过程监测计划

根据修复技术方案、施工组织、运行维护计划等内容制定修复工程监测方案。监测方案内容及相关要求可参考HJ 25.2进行。2014年10月发布的《地下水污染修复（防控）工作指南（试行）》中对修复（防控）工程运行维护与监测的内容、方案及实施进行了规定和要求。本导则中监测评估内容及评估方法的制定主要参考此指南。

污染地块修复工作完成后，在审阅分析污染地块修复工程相关资料和现场踏勘结果的基础上，可选择自主开展项目修复效果评估工作。修复项目效果自主评估工作内容及要求可参见HJ 25.5的相关要求。

1. 修复过程污染防治
   1. 污染问题识别

环境问题识别主要指污染识别和影响分析。污染识别与影响分析过程中首先根据前期收集的资料，绘制修复过程中污染产生环节的产污图，分析关键环节中水、气、声、渣等污染的产生及排放特征等，识别重大污染源和关键污染产生环节。再根据污染排放环节和排放强度，分析其环境影响范围和程度。

（1）原位修复工程的环境影响及污染防治要点

原位土壤和地下水修复工程往往通过向地下（包气带土壤或地下水）输入药剂/氧气以促进土壤和地下水中污染物的氧化、降解、固定，或通过抽提、热解析或其组合方式将污染物从污染介质（土壤或地下水）中解析出来，以此达到修复目标。总的来看，与异位修复工程相比，原位修复工程不存在土壤挖掘、运输等环节，但需要向地下（包气带土壤或地下水）输入药剂或氧气。本标准在文献和案例调研基础上，研究了修复工程实施中污染物可能的排放环节，分析了修复工程实施中可能造成的污染风险。

（2）异位修复工程的环境影响及污染防治要点

异位土壤修复工程往往包括污染土壤开挖、土壤运输、土壤在暂存地块的存储、污染土壤的处置（如热脱附、化学氧化、固化稳定化、水泥窑处置、安全填埋等）、修复后土壤的回填或外运等阶段。异位地下水修复往往包括土壤挖掘、地下水抽提、地下水地面处理等环节。每一个修复阶段的污染风险并不相同。如土壤挖掘阶段的污染物主要是地块特征污染物，而在土壤治理阶段还要考虑污染物的中间转化产物。

本标准在国内多个污染地块修复工程案例调研基础上，分析了异位土壤修复工程的不同阶段（挖掘、运输、土壤暂存、土壤修复、修复后土壤回填/外运等）和异位地下水修复工程的不同阶段（土壤挖掘、地下水抽提、地下水地面处理等）可能存在的污染和人员健康风险，提出了污染地块修复工程的不同阶段的污染风险。

* 1. 污染防治目标确定

污染防治目标制定主要基于国家和地方法律法规、政策文件、标准、环境保护主管部门的要求，结合修复地块及周边敏感区环境现状和地块修复工程污染风险识别结果。

根据法律法规、政策、标准等相关规定，提出修复工程实施过程中的废水、废气、噪声排放限值和固体废物管理要求。污染排放限值可按国家和地方的污染排放标准选取。

由于目前国家和行业有关废水、废气的标准中的相关指标较少，而污染地块中地块特征污染物数量非常多。因此，许多污染指标在现有的国家和地方中并没有体现。鉴于此，对于标准中没有的特征污染物指标，可参考国外的相关标准，或进行风险计算来确定。

可参照的环境质量标准：

《环境空气质量标准》(GB3095-1996)

《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)

《地下水质量标准》(GB/T14848-93)

《土壤环境质量标准》(GB15618-95)

《声环境质量标准》(GB3096-2008)

可参照污染物排放标准：

《大气污染物综合排放标准》(GB16927-1996)

《恶臭污染物排放标准》（GB14554-93)

《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB12348-2008)

《污水排放标准》（GB8798-1996)

《危险废物燃烧/贮存/填埋控制标准》（GB18484/18597/18598）

《一般工业固体废物贮存、处置地块污染控制标准》(GB18599-2001)

《大气污染物综合排放标准》（DB11/ 501）

《水污染综合排放标准》（DB11/T 307）

* 1. 污染防治措施

经对原位修复工程和异位修复工程的环境影响及污染防治要点的分析总结，可知：

原位修复工程技术及污染防治要点分别为：

a) 处理系统建设环节：系统安装过程产生的含污染物的粉尘及扬尘，钻井过程产生的固体废物、废气等；

b) 修复环节：该环节污染防治要点主要与采取的修复技术有关，如修复药剂的遗撒、原位化学氧化/还原过程中有机污染气体和气味的产生、化学淋洗过程中淋洗废水的排放、热脱附过程中循环液的排放、热脱附过程收集的除尘灰、尾气处理装置更换下来的活性炭等；

c) 处理系统拆除环节：拆除过程中产生的粉尘及扬尘、处理设施清洗过程中产生的废水、带有污染土壤的拆除设施的暂存等。

可采取的防治措施参考附录G。

异位修复工程需关注的关键环节及污染防治要点分别为：

a) 土壤挖掘环节：挖掘过程中产生的有机污染气体和气味，含污染物的粉尘及扬尘污染，以及固废尤其是危险废物，酸碱等废液，含污染物的废弃土壤等；

b) 土壤运输环节：运输过程中污染土壤的遗撒以及含污染物的粉尘及扬尘的产生、设备在使用或清洗过程中的交叉污染、含污染物的土壤渗滤液的排放等；

c) 土壤暂存环节：因大风等天气原因产生含污染物的粉尘及扬尘、因下雨等原因产生含污染物的渗滤液、因接触暂存地块的土壤造成的交叉污染等；

d) 土壤修复环节：药剂和污染土壤混合过程中产生含污染物的粉尘及扬尘、化学药剂的遗撒、洗土过程产生的含污染物的废水、在使用或清洗设备过程产生的交叉污染等；

e) 土壤回填/外运环节：运输过程中产生的粉尘及扬尘等；

f) 地下水抽出环节：钻井过程产生的污水、因操作不当影响其他含水层、钻井过程产生的固体废物、废气等；

g) 地下水处理环节：水处理中产生的废水、含污污泥、有机污染气体及气味等；

h) 地下水排放环节：废水等。

可采取的防治措施参考附录G。

对于不同类型的施工环节和污染防治要点可采取的措施有：

挥发性有机物：减少暴露面、封闭作业、不存储有异味的材料。鉴于此，针对存在气味和挥发性污染物的地块可最大限度地减少恶臭/有害物质的暴露表面积，如使用分步修复战略，而不是大范围开挖，这样可以保证有相对较少的污染物挥发到达空气中。此外，如果可能，可以考虑在较低气温和风速等有利天气条件下开展修复工作。对于在不挖掘活动期间覆盖暴露的地块（或开挖面）表面，以减少污染物的挥发；对于开挖区域，可以采用建设封闭工棚并配备相应的挥发性气体收集和处置措施以减少污染物的扩散。

粉尘/颗粒物：修复过程中最大限度地减少工作区域暴露；减少交通量和限制运输车辆在暴露土壤上的速度；喷水潮湿土壤但并不浸透土壤，以避免饱和土壤中污染径流进入相邻地块、雨水系统或当地排水沟；喷洒粘合剂；用地膜/粗砂/白云石连续覆盖地面；滚压地块；建造围墙/挡板。

含有污染物的地表水和地下水：土壤堆场周围设置临时围堰，或将土壤堆放在具有防水功能的材料上；将修复区域面积最小化，减少地表径流；开挖排水或径流引水沟渠，收集处理产生的径流；回收地表径流的措施可与其他管理措施配合展开；将污水泼洒至土壤堆场表面防止粉尘的产生；利用收集到的地表水润湿干燥的土壤；将雨水引流至景观区；将收集到的地表水送到附近污水处理厂或现场处理；使用污染物的迁移转化模型，了解地下水污染可能的运动和潜在的变化趋势等。

暂存或遗撒的污染土壤：严格管理受污染的土壤，防止其扩散；清洗运输车辆的车轮，并处理和处置车轮清洗废水；覆盖土壤，防止风或水的侵蚀；设计有效的地表水控制措施；确保已验收的区域不被污染；防范暂存/处理区域的土壤受到污染。

* 1. 环境应急预案编制

环境风险指修复工程实施过程中的突发事故对人体健康及环境的危害程度。国家和各级政府已制定并颁布了一系列的环境应急和劳动保护法规、标准。

（1）劳动保护相关法规、标准：

《中华人民共和国职业病防治法》(2002)

《使用有毒物品作业场所劳动保护条例》(2002)

《作业场所职业危害申报管理办法》(2009)

《职业病危害因素分类目录》(2002)

《个体防护装备选用规范》(GB11651-2008)

《以噪声污染为主的工业企业卫生防护距离标准》(GB18083-2000)

《职业安全卫生术语》(GB/T15236-2008)

《呼吸防护用品的选择、使用与维护》(GB/T18664-2002)

《工作场所职业病危害警示标示》(GBZ158-2003)

《工作场所空气中有毒物质监测的采样规范》(GBZ159-2004)

《工作场所空气中有毒物质测定》(GBZ/T160.1-8)

《职业健康监护技术规范》(GBZ188-2007)

《工作场所空气中粉尘测定》(GBZ192.1-5)

《高毒物品作业岗位职业病告知规范》(GBZ/T203-2007)

《工业企业设计卫生标准》(GB/T1-2010)

（2）环境应急相关法规、标准：

《国家突发环境事件应急预案》（国办函〔2014〕119号）

《突发环境事件应急监测技术规范》（HJ589）

《建设项目环境风险评价技术导则》（HJ/T169）等。

在搜集相关法律法规和周边环境资料等资料前提下，应首先依据《建设项目环境风险评价技术导则》（HJ/T169）进行环境风险评价，评价内容包括但不限于（1）污染地块修复工程施工过程中存在的危险因素；（2）修复工程可能发生的事故类型及后果，并指出可能产生的次生、衍生事故；（3）评估事故的危害程度和影响范围等。其次，在全面调查和客观分析污染地块修复工程现有应急资源基础上，结合环境风险评价结果，对修复工程应急能力进行评估并提出要求，评估内容包括但不限于（1）事故应急措施：包括事故应急池、消防水收集系统、备用调节水池等配置情况，预警系统设置情况，环境应急监测设备与物资等；（2）应急救援设备：包括医疗救护仪器药品、个人防护装备器材、堵漏器材和应急交通工具等；（3）应急救援物资：包括处理泄漏物、消解和吸收污染物的各种吸附剂、中和剂、解毒剂等化学品物资等。根据环境风险评价和应急能力评估结果，编制环境应急预案。应急预案应该包括应急组织机构设置、应急人员的责任、应急响应等内容。环境风险应急预案应明确应急组织形式及负责人员，可用结构图的形式表示，明确构成部门的职责。应急组织机构根据事故类型和应急工作需要，可设置相应的应急工作小组，并明确各小组的工作任务及职责。应急响应包括现场污染处置方案、转移安置人员方案、医学救援方案、应急监测计划等。

还应根据施工组织设计主要内容编制公众投诉应急预案，通过对施工过程中可能造成的影响进行预判以及及时入户调查统计居民关心的问题，制定工作目标。建立应对处置工作机构，明确工作方式和工作人员主要责任。提出工作要求，如提高认识，加强人员培训，及时总结等。主动、及时、准确、客观向社会发布突发环境事件和应对工作信息，回应公众关切，澄清不实信息。发布方式包括新闻稿、记者采访、新闻发布会、专家解读等。途径包括电视、广播、报纸、互联网等。信息发布内容包括事件原因、污染程度、影响范围、应对措施、需要公众配合采取的措施和事件调查处理进展情况等。

* 1. 环境监测计划

在修复过程的污染和环境风险识别结果基础上，对大气、水体、土壤、噪声等进行监测，以判定能否达到国家或地方相关标准的要求。环境监测计划应包括施工过程的环境监测和修复设施的污染源监测。布点和监测方法可以执行国家或地方相关标准。

（1）施工过程的环境监测的其他要求

大气监测应在污染源的上风向（对照点）、下风向（污染扩散点）环境空气敏感区布设监测点；有异味污染源的修复工程应对居民区等敏感点布设异味监测点。具体应根据《大气污染物综合排放标准》（DB11/501）的相关规定和要求进行监测。涉及恶臭气体的按照GB/T 14554执行。

如果地块内有流经的或汇集的地表水，则在受影响的地表水区域布点，同时应在地表水上游一定距离布设对照监测点位。地表水的采样应避免搅动水底沉积物。地块内如有地下水，应在受影响或可能受影响的区域设置地下水监测井，同时考虑在地块内地下水径流的上游和下游布点。地下水采样前应先进行洗井，采样应在水质参数和水位稳定后进行。具体参照HJ/T 91和HJ/T 164的相关规定和要求。废水排放标准参考DB 11/307的相关规定和要求。

应在受影响或可能受影响的区域（如污染土壤暂存场,运输车辆临时道路，土壤待检区）设置土壤监测点。可根据工程进度进行分批次采样。土壤原则上根据修复设施设置、潜在污染来源等资料判断布点，也可采用系统布点法设置采样点。样品以去除杂质后的土壤表层样为主（0~20 cm）,不排除深层采样。具体参照HJ 25.2和HJ 25.5的相关规定和要求。噪声监测应在施工场界和噪声敏感区布设监测点。具体参照《建筑施工场界噪声排放标准》（GB12523）。

（2）修复设施污染源监测的其他要求

修复设施污染源的污染物排放属于有组织排放。在了解修复设施工艺过程、生产设施性能、主要技术指标、排放的主要污染物种类及排放浓度大致范围的基础上，确定修复设施污染源监测方法、监测内容和采样位置，如对有组织排放修复设施应在排放口设置监测点，施工和堆放储存等面源污染应在污染产生区布设监测点，异位热解析、焚烧等土壤修复设施大气有组织排放口应安装在线监测系统。采样频次和采样时间应结合设施的运行工况、污染物的排放方式和排放规律来确定。具体参照HJ/T 397的相关规定和要求。

1. 修复工程环境监理

目前土壤法和42号令均未明确该工作内容。实际工作中往往存在环境监理这一环节，污染修复工程中环境监理能够监督污染地块更好的开展土壤修复工作。最为主要的目的：进一步防止修复过程中的二次污染。

依据环境保护相关法律法规和技术规范、修复工程相关技术资料、相关的批复文件，结合修复工程实际情况，编制污染地块修复工程环境监理工作方案，明确环境监理工作目标、范围、程序、内容、方法、制度、组织机构及职责、成果提交方式等内容。具体可参见DB11/T 1279的相关要求。

1. 修复工程后期管理

该部分内容的制定首先是为了落实土壤法中相关要求：

土壤法第三十五条：“土壤污染风险管控和修复，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、后期管理等活动。”

土壤法第四十二条：“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。”

其次，与《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）中8节提出后期环境监管意见及《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》（HJ 25.6-2019）中11节后期环境监管相关内容相衔接。

后期管理常采用长期环境监测与制度控制措施。当需通过工程措施阻断风险途径，需进行长期环境监测。制度控制属于非工程类的措施，包括行政和法律控制等，可减少污染物对人类和环境的暴露风险，保护修复和风险管控措施的完整性。制度控制可以通过限制公众对土地或资源的使用，引导公众远离污染地块，减少污染物对人类和环境的暴露风险。

当污染地块刚被发现或者修复正在实施时，地块上的残留污染无法达到任意使用和任意暴露的标准时，需要使用制度控制。美国联邦应急计划强调，制度控制是风险管控的补充, 很少作为唯一的污染地块修复措施。美国出台了一系列指南来指导制度控制的实施与使用等。

1. 本标准的实施建议

本地方标准的发布实施应与有效可行的污染地块管理框架体系相配套，建议加快北京市污染地块相关法律规章和管理制度的建设与完善。

本地方标准的实施应与生态环境部颁布的《建设用地土壤污染状况调查技术导则》(HJ 25.1-2019)、《建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则》(HJ 25.2-2019)、《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3-2019)、《建设用地土壤修复技术导则》(HJ 25.4-2019)、《建设用地土壤污染风险管控和修复术语》(HJ 682-2019)、《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）、《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》（HJ 25.6-2019）和北京市颁布的《建设用地土壤污染状况调查与风险评估技术导则》(DB11/T 656-2019)、《污染土壤环境风险评价筛选值》(DB11/T 811-2011)、《污染场地修复验收技术规范》(DB11/T 783-2011)、《重金属污染土壤填埋场建设与运行技术规范》(DB11/T 810-2011)等污染场地相关标准相配套。

本地方标准建议在实际应用中不断修订完善。

1. 主要参考资料

[1] ASTM E2616-09. Standard guide for remedy selection integrating risk-based corrective action and non-risk considerations. 2009

[2] ASTM E1689-95(Reapproved 2008). Standard guide for developing conceptual site models for contaminated sites. 2008

[3] Engineering Controls Focus Group. Florida contaminated soils forum (final report). 1999

[4] Federal Remediation Technologies Roundtable(FRTR). The remediation technologies screening matrix. 2007

[5] USDOE. Remedial investigation/feasibility study(RI/FS) process, elements and techniques. 1993

[6] USEPA. Superfund remedy report (fifteenth edition). 2017

[7] USEPA. Remedial design/remedial action (RD/RA) handbook. 1995

[8] USEPA. Guidance on Expediting Remedial Design and Remedial Action. 1990

[9] USEPA. Guidance for Scoping the Remedial Design. 1995

[10] USEPA. Institutional controls: a site manager's guide to identifying, evaluating and selecting institutional controls at superfund and RCRA corrective action cleanups. 2000

[11] USEPA. Guide to documenting and managing cost and performance information for remediation projects (revised version). 1998

[12] USEPA. Environmental cleanup Best Management Practices: effective use of the project life cycle conceptual site model. 2011

[13] USEPA. Guidance for conducting treatability studies under CERCLA (final). 1992

[14] USEPA. Guidance for conducting remedial investigations and feasibility studies under CERCLA (interim final). 1988

[15] USEPA. Office of Solid Waste and Emergency Response. Treatment technologies for site cleanup: annual status report (ASR). 1999-2007

[16] New York State Department of Environmental Conservation DEC Program Policy. Presumptive/proven remedial technologies for New York State’s remedial programs. 2007

[17] USEPA. Presumptive remedies: site characterization and technology selection for CERCLA sites with VOCs in Soils. 1993

[18] USEPA. Rules of thumb for superfund remedy selection. 1997

[19] USEPA. Guide for conducting treatability studies under CERCLA: biodegradation remedy selection (interim guidance). 1993

[20] USEPA. Final feasibility study-Frontier Fertilizer Superfund Site. 2006

[21] CCME(Canadian Council of Ministers of the Environment) The National Contaminated Sites Remediation Program. Guidance Manual for Developing Site-Specific Soil Quality Remediation Objectives for Contaminated Sites in Canada. 1996

[22] European Environment Agency. Management of contaminated sites in Western Europe. Copenhagen. 2000

[23] DEPA (Danish Environmental Protection Agency). Guidelines on remediation of contaminated sites. Danish. 2002

[24] USEPA. Guidance on Remedial Actions for Contaminated Ground Water at Superfund Sites.1988

[25] USEPA. Demonstration of Two Long-Term Groundwater Monitoring Optimization Approaches. 2004

[26] USEPA.2019 Remedial Design/Remedial Action: Process for Expediting Negotiations and PRP Cleanup Starts.2019

[27] USEPA. A Citizen’s Guide to Soil Vapor Extraction and Air Sparging.2001

[28] USEPA. A Citizen’s Guide to In Situ Chemical Oxidation.2012

[29] USEPA. A Citizen’s Guide to In Situ Chemical Reduction.2012

[30] USEPA. A Citizen’s Guide to Permerable Reactive Barriers.2012

[31] OSWER. Recommended Evaluation of Institutional Controls: Supplement to the “Comprehensive Five-Year Review Guidance”.2011

[32] USEPA. Emergency Responders Agreements For Fund-Lead Remedial Actions.1994

[33] USEPA. A Guide on Remedial Actions at Superfund Sites With PCB Contamination.1990

[34] USEPA. The role of cost in the superfund remedy selection process.1996

[35] OSWER. Recommended Process for Restoring Contaminated Groundwater at Superfund Sites.2011

[36] USEPA. CERCLA/SUPERFUND Orientation Manual.1992

[37]USEPA. General Methods for Remedial Operation Performance Evaluations.1992

[38] OSWER. Operation and Maintenance in the Superfund Program.2001

[39] USEPA. Superfund Optimization Progress Report (2011-2015).2017

[40] Scottish Environment Protection Agency. Land remediation and waste management guidelines. 2009

[41] New Zealand Ministry for the Environment. Contaminated Land Management Guidelines No 1: Reporting on Contaminated Sites in New Zealand (revised version), New Zealand. 2011

[42] New Zealand Ministry for the Environment. Contaminated Land Management Guidelines No 2: Hierarchy and Application in New Zealand of Environmental Guideline Values (revised version), New Zealand. 2011

[43] 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)

[44] 生态环境部. 建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则(HJ 25.2-2019)

[45] 生态环境部. 建设用地土壤污染风险评估技术导则(HJ 25.3-2019)

[46] 生态环境部. 建设用地土壤修复技术导则(HJ 25.4-2019)

[47] 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)

[48] 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)

[49] 北京市质量技术监督局.北京市地方标准-污染场地修复验收技术规范(DB 11/T 783-2011)

[50] 北京市质量技术监督局.北京市地方标准-建设用地土壤污染状况调查与风险评估技术导则(DB 11/T 656-2019)

[51] 香港特别行政区政府环境保护署. 受污染土地勘察及整治指引. 中国香港. 2006

[52] 香港特别行政区政府环境保护署. 受污染土地勘察及整治实务指南. 中国香港. 2011

[53] 台湾行政院环保署. 土壤及地下水污染整治法（修订版）. 中国台湾. 2003

[54] 台湾经济部工业局. 工厂土壤及地下水污染整治技术手册-石化业. 中国台湾. 2003