

附件 2

环 境 保 护 技 术 文 件

污 染 场 地 修 复 技 术 应 用 指 南

(征求意见稿)

**Guideline on Technology Application in Contaminated Sites
Remediation**

环 境 保 护 部 发 布

前言

为贯彻执行《中华人民共和国环境保护法》，防治环境污染，完善环保技术工作体系，制定本指南。

本指南以当前技术发展和应用状况为依据，可作为污染场地治理时修复技术选择与应用的参考技术资料。

本指南由环境保护部科技标准司提出并组织制订。

本指南起草单位：中国环境科学研究院，国家环境保护城市土壤污染控制与修复工程技术中心（筹），国家环境保护工业污染场地及地下水修复工程技术中心

本指南由环境保护部解释。

目 录

前言.....	1
一、总则.....	1
二、修复技术分类.....	3
三、污染场地土壤修复技术.....	4
四、污染场地地下水修复技术.....	14
五、污染场地环境修复技术筛选及应用.....	18
1. 修复技术选择的原则	18
2. 修复技术选择的方法	18
3. 常用技术组合	22
六、污染场地修复过程次生污染预防.....	24

一、总则

1. 内容

本指南提出了污染场地常用修复技术的分类体系、技术原理、特点和应用范围，以及各类污染物所对应的可选修复技术，供污染场地修复时参考。

2. 适用范围

本指南适用于污染物风险超过了场地利用类型的承受范围，需要采用相关技术进行修复的情形。本指南的技术主要适用于工业污染场地的修复，包括污染的土壤和地下水。农业污染土壤可参照采用。本指南的内容不适用于放射性污染场地。

3. 术语及定义

土壤 (soil): 指由矿物质、有机质、水、空气及生物有机体组成的地球陆地表面上能生长植物的疏松层。

地下水 (groundwater): 埋藏于地表以下的各种形式的重力水。

污染场地 (contaminated site): 因堆积、储存、处理、处置或其他方式 (如迁移) 承载了有害物质的, 对人体健康和环境产生危害或具有潜在风险的空间区域。包括土壤和地下水。

土壤污染 (soil pollution): 人类活动或自然过程产生的有害物质进入土壤, 致使某种有害成分的含量明显高于土壤原有含量, 从而对生物、水体、空气和人体健康产生危害的现象。

地下水污染 (groundwater pollution): 人为或自然原因导致地下水化学、物理、生物性质改变从而使水质恶化的现象。

修复技术 (remediation technology): 可改变待处理污染物的结构, 或减轻污染物毒性、迁移性或数量的单一或系列的化学、物理或生物治理措施。

物理修复技术 (physical remediation technique): 利用土壤和污染物的物理性质差异 (如挥发性、在电场中的行为) 或污染和未污染土壤颗粒的物理性质差异 (如密度), 采用物理的、机械的方法将污染物与土壤基质进行分离的方法。

化学修复技术 (chemical remediation technique): 通过一种或多种化学反应来分解或稳定有毒化学物质的方法。

生物修复技术 (biological remediation technique): 利用生物过程或通过生物

体的活动来实现土壤或地下水修复的方法。

非水相液体（non-aqueous phase liquid, NAPL）：不能与水互相混溶的液态物质，可以是一种也可以是几种不同化学物质的混合物。比重大于 1.0 的非水相液体称为高密度非水相液体（DNAPL），比重小于 1.0 的非水相液体称为低密度非水相液体（LNAPL）。

二、修复技术分类

污染场地修复技术按照处置场所、原理、修复方式、污染物存在介质等方面的不同，可以有多种的分类方法。

按照处置场所，可分为原位修复（in-situ）技术和异位修复（ex-situ）技术。

按照修复技术原理，可分为生物、物理、化学和物理化学修复技术等。

按照污染物存在介质，可分为土壤修复技术和地下水修复技术。

按照“源-途径-受体”控制方式，可分为污染介质治理技术、污染途径阻断技术和受体保护技术，具体包括的技术种类如下表所示：

表 1 按“源-途径-受体”划分的修复技术类型

类别		修复技术种类
污染介质治理技术	物理修复技术	土壤混合/稀释技术、土壤淋洗（土壤清洗）、土壤气相抽提、机械通风（挥发）、溶剂萃取
	化学修复技术	化学萃取、焚烧、氧化还原、电动力学修复
	生物修复技术	微生物降解、生物通风、生物堆、泥浆相生物处理、植物修复、空气注入、监控式自然衰减
	物理化学修复技术	固化稳定化、热解吸、玻璃化、抽出处理，渗透性反应墙
污染途径阻断技术		封顶、填埋、垂直/水平阻断
受体保护技术		制度控制措施、人口迁移

三、污染场地土壤修复技术

土壤修复技术的种类较多，原理较为复杂，有些技术的应用是多种反应原理联合作用的结果。因此，本指南主要按照技术的主导作用原理进行概括介绍，基本囊括了目前发展较为成熟的或已在国内外有所应用的技术方法。

1. 土壤混合/稀释技术(Soil Blending, Mixing or Dilution)

技术原理：土壤混合/稀释技术是指用清洁土壤取代或者部分取代污染土壤，覆盖在土壤表层或者混匀，使污染物浓度降低到临界危害浓度以下的一种修复技术。通过混合和稀释，减少污染物与植物根系的接触，并减少污染物进入食物链。

技术特点：土壤混合/稀释修复技术可以是单一的修复技术，也可以作为其它修复技术的一部分，如固定化稳定化、氧化还原等。土壤混合/稀释修复技术作为其它修复技术的一部分，其主要目的是增加添加剂（如固化/稳定化剂、氧化剂、还原剂）的传输速度，使添加剂尽量和反应剂接触。使用此技术时需根据土壤污染物浓度、范围和土壤修复目标值，计算需要混合的干净土壤的量。混合时尽量垂直方向混合，少水平方向混合，以免扩大污染面积。混合/稀释可以是原位混合，也可以是异位混合。

适用范围：土壤中的污染物不具危险特性，且含量不高（一般不超过修复目标值的 2 倍）。该技术适合于土壤渗流区，即土壤含水量较低的土壤，当土壤含水量较高时，混合不均匀会影响混合效果。

2. 填埋法 (Landfill Cap)

技术原理：填埋法是将污染土壤进行掩埋覆盖，采用防渗、封顶等配套设施防止污染物扩散的处理方法。填埋法不能降低土壤中污染物本身的毒性和体积，但可以降低污染物在地表的暴露及其迁移性。

技术特点：填埋法是修复技术中最常用的技术之一。在填埋的污染土壤的上方需布设阻隔层和排水层。阻隔层应是低渗透性的粘土层或者土工合成粘土层，排水层的设置可以避免地表降水入渗造成污染物的进一步扩散。通常干旱气候条件要求填埋系统简单一些，湿润气候条件可以设计比较复杂的填埋系统。填埋法的费用通常小于其它技术。

适用范围：在填埋场合适的情况下，可以用来临时存放或者最终处置各类污染土壤。该技术通常适用于地下水位之上的污染土壤。由于填埋的顶盖只能阻挡垂向水流入渗，因此需要建设垂向阻隔墙以避免水平流动导致的污染扩散。填埋场需要定期进行检查和维护，确保顶盖不被破坏。

3. 固化稳定化技术（Solidification/Stabilization）

技术原理：固化稳定化技术是指将污染土壤与黏结剂混合形成凝固体而达到物理封锁（如降低孔隙率等）或发生化学反应形成固体沉淀物（如形成氢氧化物或硫化物沉淀等），从而达到降低污染物迁移性和活性的目的。主要包括两个概念，固化是指将污染物包裹起来，使之呈颗粒状或者大板块存在，进而使污染物处于相对稳定的状态；稳定化是指将污染物转化为不易溶解、迁移能力或毒性变小的状态和形式，即通过降低污染物的生物有效性，实现其无害化或降低其对生态系统危害性的风险。按处置位置的不同，分为原位和异位固化稳定化。

技术特点：在异位固化/稳定化过程中，许多物质都可以作为黏结剂，如硅酸盐水泥（Portland cement）、火山灰（Pozzolana）、硅酸酯（Silicate）和沥青（Bitumen）以及各种多聚物（Polymer）等。硅酸盐水泥以及相关的铝硅酸盐（如高炉溶渣、飞灰和火山灰等）是最常用的黏结剂。有许多因素可能影响异位固定化稳定化技术的实际应用和效果，如最终处理时的环境条件可能会影响污染物的长期稳定性；一些工艺可能会导致污染土壤或固化后体积显著增大；有机物质的存在可能会影响黏结剂作用的发挥等。固定化/稳定化方法可单独使用，也可与其它处理和处置方法结合使用。污染物的埋藏深度可能会影响、限制一些具体的应用过程。原位修复时必须控制好黏结剂的注射和混合过程，防止污染物扩散进入清洁土壤区域。

适用范围：固化稳定化技术的成本和运行费用较低，适用性较强，原位异位均可使用。该技术主要应用于处理无机物污染的土壤，不适合含挥发性污染物土壤的处理。对于半挥发性有机物和农药杀虫剂等污染物的处理效果有限。不过目前正在研究能有效处理有机污染物的黏结剂，可望在不久的将来有所应用。

4. 土壤淋洗技术（Soil Flushing）

技术原理：土壤淋洗是指借助能够促进土壤环境中污染物溶解或迁移作用的

溶剂，通过将溶剂与污染土壤混合，然后再把包含有污染物的液体从土壤中抽提出来，进行分离处理的技术。此技术分原位和异位土壤淋洗。原位土壤淋洗一般是指将冲洗液由注射井注入或渗透至土壤污染区域，携带污染物质到达地下水后用泵抽取污染的地下水，并于地面上去除污染物的过程。异位化学淋洗技术需要将污染土壤挖掘出来，用水或淋洗剂溶液清洗土壤、去除污染物，再对含有污染物的清洗废水或废液进行处理，洁净土可以回填或运到其他地点回用。

技术特点：异位土壤淋洗在使用时，一般需要先根据处理土壤的物理状况对土壤进行分类，再基于二次利用的用途和最终处理需求将其清洁到不同的程度。清洗液可以是清水，也可以是包含冲洗助剂的溶液。冲洗剂主要有无机冲洗剂、人工螯合剂、阳离子表面活性剂、天然有机酸、生物表面活性剂等。无机冲洗剂具有成本低、效果好、速度快等优点，但用酸冲洗污染土壤时，可能会破坏了土壤的理化性质，使大量土壤养分淋失，并破坏土壤微团聚体结构。人工螯合剂价格昂贵，生物降解性差，且冲洗过程易造成二次污染。在处理质地较细的土壤时，需多次清洗才能达到较好效果。低渗透性的土壤处理困难，表面活性剂可粘附于土壤中降低土壤孔隙度，冲洗液与土壤的反应可降低污染物的移动性。较高的土壤湿度、复杂的污染混合物以及较高的污染物浓度会使处理过程更加困难。冲洗废液如控制不当会产生二次污染，因此需回收处理。淋洗过程通常采用可移动处理单元在现场进行，因此该技术所需的实施周期主要取决于处理单元的处理速率及待处理的土壤体积。该技术要求较大的处理场地。

适用范围：该技术可用来处理重金属和有机污染物，对于大粒径级别污染土壤的修复更为有效，砂砾、沙、细沙以及类似土壤中的污染物更容易被清洗出来，而粘土中的污染物则较难清洗。一般来说，当土壤中粘土含量达到 25%~30%时，不考虑采用该技术。

5. 化学萃取技术 (Chemical Extraction)

技术原理：化学萃取技术是一种利用溶剂将污染物从被污染的土壤中萃取后去除的技术。该溶剂需要进行再生处理后回用。

技术特点：在采用溶剂萃取之前，先将污染土壤挖掘出来，并将大块杂质如石块和垃圾等分离，然后将土壤放入一个具有良好密封性的萃取容器内，土壤中的污染物与化学溶剂充分接触，从而将有机污染物从土壤中萃取出来，浓缩后进

行最终处置（焚烧或填埋）。该技术能取得成功的关键之一是要要求浸提溶剂能够很好地溶解污染物，但其本身在土壤环境中的溶解较少。常用的化学溶剂有各种醇类或液态烷烃，以及超临界状态下的水体。化学溶剂易造成二次污染。如果土壤中粘粒的含量较高，循环提取次数要相应增加，同时也要采用合理的物理手段降低粘粒聚集度。

适用范围：该法能从土壤、沉积物、污泥中有效地去除有机污染物，萃取过程也易操作，溶剂可根据目标污染物选择。土壤湿度及粘土含量高会影响处理效率，因此一般来说该技术要求土壤的粘土含量低于 15%、湿度低于 20%。

6. 土壤气相抽提技术 (Soil Vapor Extraction, SVE)

技术原理：土壤气体抽提技术是通过在不饱和土壤层中布置提取井，利用真空泵产生负压驱使空气流通过污染土壤的孔隙，解吸并夹带有机污染物流向抽取井，最终在地上进行污染尾气处理，从而使污染土壤得到净化的方法。

技术特点：多数情况下，污染土壤中需要安装若干空气注射井，通过真空泵引入可调节气流。此技术可操作性强，处理污染物范围宽，可由标准设备操作，不破坏土壤结构以及对回收利用废物有潜在价值。土壤理化特性（有机质、湿度和土壤空气渗透性等）对土壤气体抽提修复技术的处理效果有较大影响。地下水位太高（地下 1~2m）会降低土壤气体抽提的效果。排出的气体需要进行进一步的处理。黏土、腐殖质含量较高或本身极其干燥的土壤，由于其本身对挥发性有机物的吸附性很强，采用原位土壤气体抽提技术时，污染物的去除效率很低。

适用范围：可用来处理挥发性有机污染物和某些燃料。可处理的污染土壤应具有质地均一、渗透能力强、孔隙度大、湿度小和地下水位较深的特点。低渗透性的土壤难以采用该技术进行修复处理。

7. 热解吸修复技术(Thermal Desorption)

技术原理：热解吸修复技术是指通过直接或间接热交换，将污染介质及其所含的污染物加热到足够的温度，以使污染物从污染介质上得以挥发或分离的过程。

技术特点：热解吸技术中加热的方式有多种，如高频电流、微波、过热空气、燃烧气等。加热温度控制在 200-800℃，热解吸过程中发生蒸发、蒸馏、沸腾、

氧化和热解等作用，通过调节温度可以选择性的移除不同的污染物。土壤中的部分有机物在高温下分解，其余未能分解的污染物在负压条件下从土壤中分离出来，最终在地面处理设施（后燃烧器、浓缩器或活性炭吸附装置等）中彻底消除。热解吸修复技术具有工艺简单、技术成熟等优点，但该方法能耗大、操作费用高。该技术对处理土壤的粒径和含水量有一定要求，一般需要对土壤进行预处理；有产生二噁英风险。热解吸修复过程通常在现场由移动单元完成，由于解吸过程并对污染物破坏小，所以随后要对解吸出的产物进行处理。

适用范围：能高效地去除污染场地内的各种挥发或半挥发性有机污染物，污染物去除率可达 99.98%以上。透气性差或粘性土壤由于会在处理过程中结块而影响处理效果。该技术应用时，高粘土含量或湿度会增加处理费用，且高腐蚀性的进料会损坏处理单元。

8. 焚烧（Incineration）

技术原理：焚烧技术是使用 870~1200℃（1400~2200°F）的高温，挥发和燃烧（有氧条件下）污染土壤中的卤代和其他难降解的有机成分。高温焚烧技术是一个热氧化过程，在这个过程中，有机污染物分子被裂解成气体或不可燃的固体物质。

技术特点：焚烧方式主要是采用多室空气控制型焚烧炉和回转窑焚烧炉，与水泥窑联合进行污染土壤的修复是目前国内应用较为广泛的方式。焚烧过程需要对废物焚烧后的飞灰和烟道气进行检测，防止二噁英等毒性更大的物质的产生，并需满足相关标准。焚烧技术通常需要辅助燃料来引发和维持燃烧，并对尾气和燃烧后的残余物进行处理。

适用范围：焚烧技术可用来处理大量高浓度的 POPs 污染物以及半挥发性有机污染物等。对污染物处理彻底，清除率可达 99.99%。如果与水泥窑协同处置，需要对污染土壤进行分选，并对其中的重金属等成分进行检测，保证出产的水泥的质量符合相关标准。

9. 微生物降解（Bioremediation）

技术原理：微生物降解是利用原有或接种微生物（即真菌、细菌其它微生物）降解（代谢）土壤中污染物，并将污染物质转化为无害的末端产品的过程。可通

过添加营养物、氧气和其它添加物增强生物降解的效果。

技术特点：微生物降解技术一般不破坏植物生长所需要的土壤环境，污染物的降解较为完全，具有操作简便、费用低、效果好、易于就地处理等优点。但生物修复的修复效率受污染物性质、土壤微生物生态结构、土壤性质等多种因素的影响，且对土壤中的营养等条件要求较高。如果土壤介质抑制污染物微生物，则可能无法清除目标。需要控制场地的温度、pH值、营养元素量等使之符合微生物的生存环境条件。生物降解在低温下进程缓慢，修复时间长，通常需要几年。

适用范围：对能量的消耗较低，可以修复面积较大的污染场地。高浓度重金属、高氯化有机物、长链碳氢化合物，可能对微生物有毒。不能降解所有进入环境的污染物，特定微生物只降解特定污染物，受各种环境因素的影响较大，污染物浓度太低不适用。低渗透土壤可能不适用。

10. 生物通风 (Bioventing)

技术原理：生物通风法是一种强迫氧化的生物降解方法，即在受污染土壤中强制通入空气，强化微生物对土壤中有机污染物进行生物降解，同时将易挥发的有机物一起抽出，然后对排出气体进行后续处理或直接排入大气中。

技术特点：一般在用通气法处理土壤前，首先应在受污染的土壤上打两口以上的井，当通入空气时先加入一定量的氮气作为降解细菌生长的氮源，以提高处理效果。与土壤气相抽提相反，生物通风使用较低的气流速度，只提供足够的氧气维持微生物的活动。氧气通过直接空气注入供给土壤中的残留污染。除了降解土壤中吸附的污染物以外，在气流缓慢的通过生物活动土壤时，挥发性化合物也得到了降解。生物通风是一项中期到长期的技术，时间从几个月到几年。

适用范围：此技术对于被石油烃、非氯化溶剂、某些杀虫剂防腐剂和其他一些有机化学品污染的土壤处理效果良好。此法常用于地下水层上部透气性较好而被挥发性有机物污染土壤的修复，也适用于结构疏松多孔的土壤，以利于微生物的生长繁殖。本技术适用处理渗透率、高含水量和高粘性的土壤。

11. 生物堆 (Biopiles)

技术描述：生物堆是指将污染土壤挖掘后，在具有防渗层的处置区域堆积，经过曝气，利用微生物对污染物的降解作用处理污染土壤的技术。

技术特点：该技术的特点是在堆起的土层中铺有管道，提供降解用水或营养液，并在污染土层以下设有多孔集水管，收集渗滤液。生物堆底部设有进气系统，利用真空或正压进行空气的补给。系统可以是完全封闭的，内部的气体、渗滤液和降解产物，都经过诸如活性炭吸附、特定酶的氧化或加热氧化等措施处理后才向大气排放，而且封闭系统的温度、湿度、营养物、氧气和pH均可调节用以增强生物的降解作用。在生物堆的顶部需覆盖薄膜，控制气体和挥发性污染物的挥发和溢出，并能加强太阳能热力作用，从而提高处理效率。生物堆是一项短期技术，一般持续几周到几个月。

适用范围：本技术适用于非卤化挥发性有机物和石油烃类污染物，也可用来处理卤化挥发和半挥发性有机物、农药等，但处理效果不一，可能对其中特定污染物更有效。

12. 泥浆相生物处理（Slurry Phase Biological Treatment）

技术原理：泥浆相生物处理是在生物反应器中处理挖掘的土壤，通过污染土壤和水的混合，利用微生物在合适条件下对混合泥浆进行清洁的技术。

技术特点：挖掘的土壤先进行物理分离石头和碎石。然后将土壤与水在反应器中混合，混合比例根据污染物的浓度、生物降解的速度以及土壤的物理特性而确定。有些处理方法需对土壤进行预冲洗，以浓缩污染物，将其中的清洁砂子排出，剩余的受污染颗粒和洗涤水进行生物处理。泥浆中的固体含量在10%至30%之间。土壤颗粒在生物反应容器处于悬浮状态，并与营养物和氧气混合。反应器的大小可根据试验的规模来确定。处理过程中通过加入酸或碱来控制pH，必要时需要添加适当的微生物。生物降解完成后，将土壤泥浆脱水。土壤的筛分和处理后的脱水价格较为昂贵。泥浆相生物处理可为微生物提供较好的环境条件，从而可以大大提高降解反应速率。

适用范围：泥浆相生物处理法可用来处理石油烃、石化产品、溶剂类和农药类的污染物。对于均质土壤、低渗透土壤的处理效果较好。连续厌氧反应器可也用来处理PCBs，卤代挥发性有机物、农药等。

13. 植物修复技术（Phytoremediation）

技术原理：植物修复主要是利用特定植物的吸收、转化、清除或降解土壤中的污染物，从而实现土壤净化、生态效应恢复的治理技术。植物修复主要通过三种方式进行污染土壤的修复，包括：植物对污染物的直接吸收及对污染物的超累积作用；植物根部分泌的酶来降解有机污染物；根际与微生物的联合代谢作用，从而吸收、转化和降解污染物。

技术特点：植物修复技术与物理和化学修复技术相比具有成本低、效率高、无二次污染、不破坏植物生长所需的土壤环境等特点，非常易于就地处理污染物，操作方便。植物修复技术的中间代谢产物复杂，代谢产物的转化难以观测，有些污染物在降解的过程中会转化成有毒的代谢产物。修复植物对环境的选择性强，很难在特定的环境中利用特定的植物种；气候或是季节条件会影响植物生长，减缓修复效果，延长修复期；修复技术的应用需要大的表面区域；一些有毒物质对植物生长有抑制作用，因此植物修复多只用于低污染水平的区域。有毒或有害化合物可能会通过植物进入食物链，所以要控制修复后植物的利用。污染深度不能超过植物根之所及。较之其他修复技术，具有良好的美学效果和较低的操作成本，比较适合与其他技术结合使用。

适用范围：植物修复对于特定重金属具有较好的效果和应用，对于 PAHs、DDT 和 POPs 等污染物也有过先例，但尚不能达到完全修复有机污染土壤的目的。目前植物修复大多只能针对一种或两种重金属进行累积，对于几种重金属的复合污染的处理效果一般。某些重金属，如铅和镉，尚未发现自然中的超累积植物。本技术一般仅适用于浅层污染的土壤。

14. 氧化还原技术（Oxidation/Reduction）

技术原理：氧化还原技术是通过氧化/还原反应将有害污染物转化为更稳定、活性较低和/或惰性的无害或毒性较低的化合物。氧化还原包括将电子从一种化合物转移到另一种化合物。

技术特点：该技术所需的工程周期一般在几天至几个月不等，具体因待处理污染区域的面积、氧化还原剂的输送速率、修复目标值及地下含水层的特性等因素而定。可能限制本方法适用性和有效性的因素包括：可能出现不完全氧化，或中间体形式的污染物，取决于污染物和所使用的氧化剂。处理时，应减少介质中的油和油脂，以优化处理效率。

适用范围：对 PCBs、农药类、多环芳烃（PAH）等有较好的处理效果。对于高浓度的污染物，本处理方法不够经济有效，因为需要大量氧化剂。该技术也可用于非卤代挥发性有机物、半挥发性有机物及燃油类碳氢化合物的处理，但其处理效率相对较低。

15. 电动力学修复技术（Electrokinetic Separation）

技术原理：电动力学修复技术利用插入土壤中的两个电极在污染土壤两端加上低压直流电场，在电化学和电动力学的复合作用下，水溶的或吸附在土壤颗粒表层的污染物根据所带电荷的不同向正负电极移动，使污染在电极附近富集或被回收利用，从而达到清洁土壤的目的。

技术特点：污染物的去除过程主要涉及 4 种电动力学现象，电迁移、电渗析、电泳和酸性迁移带。电动力学修复技术进行土壤修复主要有 2 种应用方法：原位修复，直接将电极插入受污染土壤，污染修复过程对现场的影响最小；序批修复，污染土壤被输送至修复设备分批处理。电极需要采用惰性物质，如碳、石墨、铂等，避免金属电极电解过程中溶解和腐蚀作用。电动力学修复技术具有较多优点，对现有景观和建筑的影响较小，污染土壤本身的结构不会遭到破坏，处理过程不需要引入新的物质，原位异位均可使用。土壤含水量、污染物的溶解性和脱附能力对处理效果有较大影响，因此使用过程中需要导电性的孔隙流体来活化污染物。

适用范围：可高效处理重金属污染（包括铬、汞、镉、铅、锌、锰、铜、镍等）及有机物污染（苯酚、六氯苯、三氯乙烯以及一些石油类污染物），去除率可达 90%。目标污染物与背景值相差较大时处理效率较高。可用于水力传导性较低或黏土含量较高的土壤。土壤中含水量 $<10\%$ 时，处理效果大大降低。埋藏的金属或绝缘物质、地质的均一性、地下水位均会影响土壤中电流的变化，从而影响处理效率。

16. 玻璃化（Vitrification）

技术原理：玻璃化是指利用等离子体、电流或其他热源在 $1600\sim 2000^{\circ}\text{C}$ 的高温下熔化土壤及其污染物，使污染物在此高温下被热解或蒸发而去除，产生的水汽和热解产物收集后由尾气处理系统进行进一步处理后排放。熔化的污染土壤冷

却后形成化学惰性的、非扩散的整块坚硬玻璃体，有害无机离子得到固定化。

技术特点：玻璃化是一种较为实用的短期技术，加热过程土壤和淤泥中的有机物含量要超过 5-10%（质量比）。该技术可用于破坏、去除受污染土壤、污泥、其他土质物质、废物和残骸，以实现永久破坏、去除和固定化有害和放射性污染的目的。但实施时，需要控制尾气中的有机污染物以及一些挥发性的气态污染物，且需进一步处理玻璃化后的残渣，湿度太高会影响成本。固化的物质可能会妨碍到未来土地的使用。

适用范围：可处理大部分 VOC、SVOC、PCB、二噁英等，以及大部分重金属和放射性元素。砾石含量大于 20%会对处理效率产生影响。低于地下水位的污染修复需要采取措施防止地下水反灌。

17. 制度控制措施（Institutional Controls）

技术原理：制度控制措施是指地方政府或环保部门通过法律或者行政手段来限制人体和生态要素在污染场地中的暴露，必要时对场地内的土壤进行定期监测，以保证修复工程的顺利完成和实现潜在污染暴露最小化的方法。

技术特点：制度控制措施在国外应用较多，且大都有相关法律条文进行规定，在执行过程中作为强制性措施由政府部门进行监控。考虑到我国国情，建议应在政府或环保部门的监督下，采用通知、颁布条例、宣传等方法，对民众进行告知，保护受体远离污染场地。同时，在场地土壤存在风险时，宜由政府或环保部门委托相关部门对污染土壤进行监测，控制风险，降低人群和生态环境在污染物中的暴露。适度采取制度控制措施，既可以保护人体健康和生态要素，又可以降低成本。

适用范围：一般适用于污染物超过修复标准，但可以通过控制人类活动降低污染物暴露风险的场地。通常，污染物迁移性较差，场地暂时不会被开发利用，且有一定的自净能力。采用制度控制措施的场地在再次利用前需要进行风险评估。

四、污染场地地下水修复技术

1. 抽出处理技术（Pump and Treat）

技术原理：抽出处理技术是通过抽取已污染的地下水至地表，然后用地表污水处理技术进行处理的方法。通过不断地抽取污染地下水,使污染晕的范围和污染程度逐渐减小,并使含水层介质中的污染物通过向水中转化而得到清除。水处理方法可以是物理法（包括吸附法、重力分离法、过滤法、反渗透法、气吹法等），化学法（混凝沉淀法、氧化还原法、离子交换法、中和法），也可以是生物法（包括：活性污泥法、生物膜法、厌氧消化法和土壤处置法）等。

技术特点：此技术在应用时需要构筑一定数量的抽水井（必要时还需构筑注水井）和相应的地表污水处理系统。抽水井一般位于污染羽状体中（水力坡度小时）或羽状体下游（水力坡度大时），利用抽水井经污染地下水抽出地表，采用地表处理系统将抽出的污水进行深度处理，因此，抽出-处理技术既可以是物化-生物修复技术的联合，也可以是不同物化技术的联合，主要取决于后续处理技术的选择，而后续处理技术的选择应用则受到污染物特征、修复目标、资金投入等多方面的制约。此技术工程费用较高，且由于地下水的抽提或回灌，影响治理区及周边地区的地下水动态；若不封闭污染源，当工程停止运行时，将出现严重的拖尾和污染物浓度升高的现象；需要持续的能量供给，确保地下水的抽出和水处理系统的运行，还要求对系统进行定期的维护与监测。此技术可使地下水的污染水平迅速降低，但由于水文地质条件的复杂性以及有机污染物与含水层物质的吸附/解吸反应的影响，在短时间内很难使地下水有机物含量达到环境风险可接受水平。另外，由于水位下降，在一定程度上可加强包气带中所吸附有机污染物的好氧生物降解。

适用范围：抽出处理技术主要用于去除地下水中溶解的有机污染物和浮于潜水面上的油类污染物。抽出处理技术对于低渗透性的黏性土层和低溶解度、高吸附性的污染物效果不理想，通常需借助表面活性剂增强含水介质吸附的污染物的溶解性能，强化抽出处理的速度。污染地下水中存在 NAPL 类物质时，由于毛细作用使其滞留在含水介质中，明显降低抽出-处理技术的修复效率。

2. 空气注入修复技术（Air/Bio Sparging）

技术原理：空气注入技术是在气相抽提（SVE）的基础上发展而来的，通过在含水层注入空气使地下水中的污染物汽化，同时增加地下氧气浓度，加速饱和带、非饱和带中的微生物降解作用。汽化后的污染物进入包气带，可利用抽气装置抽取后处理，因此也称生物曝气技术（Bio Sparging）。

技术特点：空气注入技术中的物质转移机制依靠复杂的物理、化学和微生物之间的相互作用，由此派生出原位空气清洗、直接挥发和生物降解等不同的具体技术与修复方式，常与真空抽出系统结合使用，成本较低。通过向地下注入空气，在污染羽下方形成气流屏障，防止污染羽进一步向下扩散和迁移，在气压梯度作用下，收集地下可挥发性污染物，并以供氧作为主要手段，促进地下污染物的生物降解。可以修复溶解在地下水中、吸附在饱和区土壤上和停留在包气带土壤孔隙中的挥发性有机污染物。为使其更有效，可挥发性化合物必须从地下水转移到所注入的空气中，且注入空气中的氧气必须能转移到地下水中以促进生物降解。该技术的修复效率高，治理时间短。

适用范围：该技术可用来处理地下水中大量的挥发性和半挥发性有机污染物，如汽油、苯系物成分有关的其他燃料，石油碳氢化合物等。受地质条件限制，不适合在低渗透率或高黏土含量的地区使用，不能应用于承压含水层及土壤分层情况下的污染物治理，适用于具有较大饱和厚度和埋深的含水层。如果饱和厚度和地下水埋深较小，那么治理时需要很多扰动井才能达到目的。

3. 渗透性反应墙技术（Permeable Reactive Barrier, PRB）

技术原理：渗透性反应墙技术是一种原位修复技术，是指在污染源的下游开挖沟槽，安置连续或非连续的渗透性反应墙，在其中充填反应介质，与流经的地下水发生物理、化学和生物化学反应，使地下水中的污染物得以阻截、固定或降解。

技术特点：从污染源释放出来的污染物质在向下游渗流过程中，溶解于水中形成一个污染地下水羽流，经反应墙，通过物理、化学及生物过程得到处理与净化。在原位反应墙修复技术中，最重要的功能单元为原位反应器。根据特定地质和水文条件、污染物的空间分布来选择反应墙（PRB）的类型。PRB 按照结构，分为漏斗-门式 PRB 和连续透水的 PRB。漏斗-门式 PRB：由不透水的隔墙、导水门和 PRB 组成，适用于埋深浅、污染面积大的潜水含水层；连续透水的 PRB

构成的 PRB 适用于埋深浅、污染羽流规模较小的潜水含水层。其特点表现为 PRB 垂直于污染羽流运移途径，在横向和垂向上，横切整个污染羽流。PRB 按照反应性质，可分为化学沉淀反应墙，吸附反应墙，氧化-还原反应墙，生物降解反应墙等。PRB 中填充的介质包括零价铁、螯合剂、吸附剂和微生物等，可用来处理多种多样的地下水污染物，如含氯溶剂、有机物、重金属、无机物等。污染物通常会在反应墙材料中发生浓缩、降解或残留等反应，所以墙体中的材料需要定期更换，更换可能产生二次污染。该技术较成熟，成本较低，已有较多应用。

适用范围：该技术可通过填充零价铁等去除地下水中的氯代烃；可采用活性炭作为填充介质处理六价铬等重金属；厌氧反应墙可去除地下水中的硝酸盐等。此外还可有效去除砷、氟化物、垃圾渗滤液等。

4. 化学氧化还原技术（Chemical Oxidation/Reduction）

技术原理：化学氧化还原修复技术主要是利用氧化还原试剂引入地下，与地下水中污染物发生反应从而达到净化效果的一种地下水原位修复技术。

技术特点：化学氧化还原技术通过采用渗透格栅控制氧化剂或还原剂的释放形式，可以使这些地球化学变化或其它感观指标的变化对直接处理区以外的地方的影响减至最小。由于注入井数量有限和水力传导系数分布的问题，通过水相注入系统控制氧化剂或还原剂的用量非常困难。无论是采用渗透格栅还是水相注入，都要对含水层的性质、地球化学变化的可逆性（如溶解作用、解吸作用、pH 值变化）、污染物的分布和通量进行详细的评价，以设计出有效的原位处理系统。

适用范围：污染物不同可采用不同的氧化还原剂。二氧化氯可以气体形式注入污染区氧化其中的有机污染物，在反应过程中几乎不生成致癌的三氯甲烷和挥发性有机氯。可以水溶液的形式在地下水添加高锰酸钾，可去除三氯乙烯、四氯乙烯等含氯溶剂，对烯烃、酚类、硫化物和 MTBE 等污染物也较为有效。臭氧以气体形式通过注射井进入污染区，可氧化大分子及多环类有机污染物，也可氧化分解柴油、汽油、含氯溶剂等。

5. 电动修复技术（Electrokinetic Separation）

技术原理：电动修复技术是利用电动效应将污染物从地下水去除的原位修

复技术。电动效应包括电渗析、电迁移和电泳。电渗析是在外加电场作用下土壤孔隙水的运动，主要去除非离子态污染物；电迁移是离子或络合离子向相反电极的移动，主要去除地下水中的带电离子；电泳是带电粒子或胶体在直流电场作用下的迁移，主要去除吸附在可移动颗粒上的污染物。

技术特点：电动修复技术在应用过程中常出现活化极化、电阻极化和浓差极化等现象使处理效率降低，因此可通过化学增强剂提高修复体的导电性。此种技术不对当地土壤结构和地下生态环境产生影响，投资少，效率高，操作容易，不受水文地质条件的限制。

适用范围：可处理砷、镉、铬、汞和铅等重金属污染物。适用于污染范围小的区域，对吸附性不强的有机污染物修复效果不太理想。

6. 监控式自然衰减（Monitored Natural Attenuation, MNA）

技术原理：监控式自然衰减是一种利用天然过程来分解和改变地下水中的污染物的技术，通过对地下水的监测，以确认在合理的时间框架内，污染物自然衰减的程度足以达到保护敏感受体和修复目标的方法。

技术特点：自然衰减包括土壤颗粒的吸附、污染物的生物降解、污染物在地下水中的稀释和弥散等过程。土壤颗粒的吸附使污染物不会迁移到场地之外；微生物降解是污染物分解的重要作用；稀释和弥散虽不能分解污染物，但可有效降低场地的污染风险。该技术需要对污染物的降解速率和迁移途径进行模拟，同时对下降梯度观测点的污染物浓度进行预测，特别是在污染羽仍在扩散时。模拟的首要目的是为了确定，自然衰减的过程会使污染物的浓度降至标准以下或在可接受风险范围内。如果是长期监测，需要通过管理保证降解速率与修复目标一致。此技术应用过程中废物的产生和迁移少，且对地表构筑物的影响较小。监控式自然衰减可与其他治理方法联合使用，使治理时间缩短。

适用范围：适用于处理挥发和半挥发性有机污染物和石油烃类污染物。农药类污染物也可使用，但有处理效率较差，且只对其中的某些组分有效。该技术可适用于某些重金属，通过改变其价态来使其无害化。本技术适用于污染程度低的场地，如严重污染场地的外围或污染源很小的情景。

五、污染场地环境修复技术筛选及应用

1. 修复技术选择的原则

土壤和地下水修复技术的筛选需要考虑多种因素，鉴于污染场地的情况不尽相同，因此只对各项技术进行定性评价，为相关人员在具体操作上提供参考。在修复技术的选择上需要确保污染场地的修复效果满足土地利用方式的要求，在技术可行、时间充足、经济允许等条件下，选择可以降低污染物毒性、迁移性和含量的较为成熟的修复技术，避免二次污染，全面保护人体健康与环境。具体选择原则如下：

(1) 场地修复技术的目标是保障人的健康，使得场地土壤和地下水中污染物的环境风险降低到可以接受的水平。

(2) 将具有不同类型污染物和不同风险值的土壤和地下水区别对待，分别处置。

(3) 在技术上，场地修复技术选择可以达到目标的最简化的途径或方法，而不单纯追求技术的先进性。

(4) 在经济上，场地修复技术兼顾考虑目前在修复费用方面的实际承受能力和今后的经济发展，使得不仅在目前，而且从较长远来看，修复技术方案都是合适的。

(5) 在可行性上，修复技术的选择从我国目前的现状水平出发，充分考虑我国现有场地修复队伍的能力以及现有固体废弃物和污染水处置设施的可操作性。

(6) 修复技术应被大多数公众接受，在修复过程中产生的噪音，造成的不便以及对景观的影响在公众的可接受范围内。

2. 修复技术选择的方法

结合国际通用方法和国内发展现状，建议采用指标评价-决策矩阵法对修复技术进行筛选。本技术指南针对污染介质和不同污染物类型的修复技术进行矩阵列表，方便技术人员结合污染场地具体情况进行修复技术的选择。适用于土壤和地下水中不同污染物的修复技术各项指标的定性评价结果分别列于表2和表3，各项指标的评价标准见表4。

表 2 土壤污染修复技术筛选矩阵

编号	技术	成熟性	可操作性	适用土壤渗透性	处理效率	修复时间	费用	二次污染	公众认可度
1	土壤混合/稀释技术	★	★	☒	☒	♀	★	★	☒
2	填埋法	★	★	♀	★	♀	★	★	♀
3	固化稳定化技术	★	☒	☒	★	★	☒	★	☒
4	土壤淋洗技术	♀	☒	★	☒	★	♀	♀	★
5	化学萃取	♀	☒	★	★	☒	♀	♀	☒
6	土壤气相抽提	★	★	★	☒	☒	★	♀	★
7	热解吸修复技术	★	★	♀	★	☒	☒	♀	☒
8	焚烧	★	★	☒	★	★	☒	★	★
9	生物降解	★	☒	★	☒	★	★	★	★
10	生物通风	★	☒	★	☒	★	★	★	★
11	生物堆	★	☒	★	★	☒	★	☒	★
12	泥浆相生物处理	☒	☒	♀	★	★	☒	★	☒
13	植物修复技术	★	★	☒	☒	☒	★	★	★
14	氧化还原技术	★	☒	☒	★	★	☒	♀	☒
15	电动力学修复技术	♀	♀	♀	★	★	★	♀	☒
16	玻璃化	♀	♀	♀	★	☒	☒	♀	♀

表 2 土壤污染修复技术筛选矩阵（续前表）

编号	技术	挥发性非卤化有机物	挥发性卤化有机物	半挥发性非卤化有机物	半挥发性卤化有机物	燃料类	无机物（含重金属）
1	土壤混合/稀释技术	☑	☑	★	☑	★	♀
2	填埋法	☑	☑	☑	☑	☑	☑
3	固化稳定化技术	♀	♀	☑	☑	♀	★
4	土壤淋洗技术	★	★	☑	☑	☑	★
5	化学萃取	☑	☑	★	★	☑	★
6	土壤气相抽提	★	★	♀	♀	★	♀
7	热解吸修复技术	★	★	★	★	★	♀
8	焚烧	★	★	★	★	★	♀
9	微生物降解	★	★	★	△	★	△
10	生物通风	★	△	★	♀	★	♀
11	生物堆	★	★	☑	△	★	△
12	泥浆相生物处理	☑	★	★	△	★	△
13	植物修复技术	☑	☑	☑	△	☑	☑
14	氧化还原技术	☑	☑	☑	☑	☑	★
15	电动力学修复技术	☑	☑	☑	☑	♀	★
16	玻璃化	☑	☑	★	★	★	★

表 3 地下水污染修复技术筛选矩阵

编号	技术	成熟性	可操作性	修复时间	处理成本	挥发性非卤化有机物	挥发性卤化有机物	半挥发性非卤化有机物	半挥发性卤化有机物	燃料类	无机物(含重金属)
1	抽出处理技术	★	☑	♀	♀	☑	☑	☑	△	☑	☑
2	空气注入修复技术	★	★	★	★	★	☑	☑	☑	★	♀
3	渗透性反应墙技术	★	★	♀	☑	★	★	★	★	☑	△
4	化学氧化还原技术	★	★	★	☑	☑	☑	♀	☑	♀	△
5	电动修复技术	♀	☑	☑	☑	△	△	△	△	★	★
6	监控式自然衰减技术	★	★	△	★	★	☑	☑	☑	★	♀

表 4 修复技术筛选指标与评价标准

项目	★ 好	☉ 中	☹ 差	其他	
成熟性	已成功应用且资料齐全	已有应用但需要改进	处于实验研究阶段	Δ 表示修复效率或者指标性能取决于特定场地条件和技术设计参数。	
可操作性	掌握相关原理及技术参数	技术参数需要调整	技术参数需要较大改进		
适用土壤渗透性	渗透性差	渗透性一般	渗透性良好		
污染物去除率/无害化率	>90%	70-90%	<70%		
时间	土壤原位	<1 年	1-3 年		>3 年
	土壤异位	<6 个月	6 个月~1 年		>1 年
	地下水	<3 年	3~10 年		>10 年
费用(元/t)	<500	500~1000	>1000		
二次污染	小	中等	大		
公众认可度	>60%	30%~60%	<30%		
各类污染物	非常适用	不完全适用	不适用		

3. 常用技术组合

在已有应用的修复技术组合中，选取其中具有代表性的组合技术，分别介绍如下。

电动力学修复+植物修复： 可用来处理无机物污染的土壤，先采用电动力学修复技术对土壤中的污染物进行富集和提取，对富集的部分单独进行回收或者处理。然后利用植物对土壤中残留的无机物进行处理，可将高毒的无机污染物变为低毒的无机污染物，或者利用超累积植物对土壤中污染物进行累积后集中处置。

气相抽提+氧化还原： 可用来处理挥发性卤代和非卤化合物污染的土壤，先采用气相抽提的方法将土壤中易挥发的组分抽取至地面，对富集的污染物可利用氧化还原的方法进行处理，或采用活性炭或液相炭进行吸附，对于吸收过污染物的活性炭和液相炭采用催化氧化等方法进行回收利用。

气相抽提+生物降解： 适用于半挥发卤代化合物的处理，可采用气相抽提的方法将污染物进行富集，富集后的污染物可集中处理。由于半挥发性卤代化合物的特性，使其可能在土壤中残留，从而影响气相抽提的处理效率。因此，在剩余

的污染土壤中通入空气和营养物质，利用微生物对污染物的降解作用处理其中残留的污染物，从而达到修复的目的。

土壤淋洗+生物降解：适用于燃料类污染土壤的处理，一般先采用原位土壤淋洗技术进行处理，待污染物降解到一定程度后，将淋洗液抽出处理后排放。由于燃料类污染物遇水易形成 NAPL，易在土壤孔隙中残留，无法通过抽取的方法从土壤中去除。因此在形成 NAPL 的位置通入空气和营养物，采用生物降解的方法对其中残留的污染物进行处理，进而达到清除的目的。

氧化还原+固化稳定化：适用于无机物污染土壤的处理。无机污染物，特别是重金属类污染物的毒性与价态相关，在自然界的各种工作作用下其价态可发生变化。此联合方式是先采用氧化还原的方法将高毒的无机物氧化还原成低毒或者无毒的无机物，为避免逆反应的发生，需在处理后加入固化剂等物质降低污染物的迁移性，从而保证污染土壤的处理效果。

空气注入+土壤气相抽提：适用于土壤和地下水中挥发性有机物的处理。在土壤和地下水污染处设置曝气装置，一方面通过增加氧气含量促进微生物降解，一方面利用空气将其中的挥发性污染物汽化进入包气带。利用土壤气相抽提系统将汽化的污染物抽出到地面集中处理。这是一种较好的修复技术组合方法。

六、污染场地修复过程次生污染防治

1. 污染场地修复技术实施过程中，对现场施工人员宜采取适当的保护措施，必要时佩戴防护面具和穿戴防护服。进出现场的人员和车辆需要进行严格管理，防止污染土壤被带出场外，避免污染物的扩散。
2. 污染场地中挖掘出的污染土壤和抽取的地下水需运到场外处理的，其挖掘、运输、储存和处置应符合国家、场地所在地和处理场所所在地的环境保护法律法规要求。
3. 在污染现场采用原位或异位处理技术时，需采取措施避免挖掘及修复过程中扬尘和挥发性物质的无组织排放，妥善处理挖掘及修复过程中产生的废渣和废水，并应尽量减少噪声污染。
4. 对修复设施进行定期维护并更换相关材料，防止填充材料失效影响修复效果，导致污染扩散。被替换的材料应进行集中处置，严禁乱堆乱放。
5. 对于污染物富集的植物、水溶液或土壤，应进行回收处理，或统一管理。
6. 需要定期监测修复技术的处理效果，并检测是否有毒性更大的污染物产生，在充分论证的条件下合理调整方案。