

附件

中国环境保护产业协会标准

CAEPI 1-2015

污染场地修复技术筛选指南

Guideline on technology screening in contaminated site remediation

2015-03-02 发布

2015-06-01 实施

中国环境保护产业协会 发布

目 次

前 言.....	ii
1 适用范围.....	1
2 术语和定义.....	1
3 污染场地土壤修复技术.....	2
4 污染场地地下水修复技术.....	12
5 污染场地修复技术的筛查与选择.....	16
附录 A（资料性附录）污染场地土壤修复技术筛查矩阵	20
附录 B（资料性附录） 污染场地地下水修复技术筛查矩阵	21
附录 C（资料性附录） 污染场地修复技术选择评估表	21
附录 D（资料性附录） 污染场地土壤和地下水修复技术名称中英文对照	25

前 言

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》，满足环保产业市场和创新需要，推动环保产业标准化工作，制定本标准。

本标准汇集了污染场地常用修复技术的原理、特点、适用性及局限性，规定了修复技术的筛查与选择的原则和方法。

本标准为首次发布。

本标准起草单位：中国环境科学研究院。

本标准主要起草人：谷庆宝、李发生、张倩、马福俊、颜增光。

本标准中国环境保护产业协会 2015 年 3 月 2 日批准。

本标准自 2015 年 6 月 1 日起实施。

本标准由中国环境保护产业协会负责管理和解释，中国环境科学研究院负责具体技术内容的解释。在应用过程中如有需要修改与补充的建议，请将相关资料寄送中国环境保护产业协会标准管理部门（北京市西城区扣钟北里甲 4 楼，邮编 100037）。

污染场地修复技术筛选指南

1 适用范围

本标准汇集了污染场地常用修复技术的原理、特点、适用性及局限性，规定了修复技术的筛查与选择的原则和方法。

本标准适用于污染场地中土壤和地下水（包括场地内构筑物 and 设施）修复技术的筛查与选择。

本标准不适用于放射性污染场地。

2 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

2.1 污染场地 contaminated site

指对从事生产、经营、处理、贮存有毒有害物质，堆放或处理处置潜在废物，以及从事矿山开采等活动的场地进行调查和风险评估后，确认污染危害超过人体健康或生态环境可接受风险水平的场地。

2.2 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的疏松层。

2.3 地下水 groundwater

以各种形式埋藏在地壳空隙中的水，含包气带和饱和带中的水。

2.4 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 的非水相液体称为重非水相液体（DNAPL），比重小于 1.0 的非水相液体称为轻非水相液体（LNAPL）。

2.5 燃料类污染物 fuel pollutants

是指土壤或地下水中含有的闪点不低于 37.8℃ 的可燃烧的液态或可液化的石油产品，包括残渣燃料油和馏分燃料油。

3 污染场地土壤修复技术

污染场地土壤修复技术是指可用于消除、降低、稳定或转化场地中目标污染物的各种处理、处置技术,包括可改变污染物结构、降低污染物毒性、迁移性或数量与体积的各种物理、化学或生物技术。本标准基本按照物理、化学和生物类修复技术的顺序,分别对目前较为成熟或已在国内外有所应用的土壤修复技术进行介绍,主要涵盖修复技术的原理、技术特点、适用性及局限性等。

3.1 挖掘—填埋

技术原理:挖掘—填埋是将污染土壤挖掘,运输至填埋场进行掩埋覆盖,采用防渗、封顶等配套措施防止土壤中污染物扩散的处理方法。挖掘—填埋不能降低土壤中污染物本身的毒性和体积,但可以减少污染物的暴露及迁移。

技术特点:挖掘—填埋通常为异位修复技术,是土壤修复常用的技术之一。采用异位填埋时,污染土壤的挖掘和运输过程需要采取必要的防护措施,防止污染土壤的遗撒和泄漏。通常干旱气候条件要求填埋系统简单一些,湿润气候条件需要设计比较复杂的填埋系统。填埋的污染土壤上方需布设阻隔层和排水层。阻隔层应针对不同污染土壤类型设置符合相关标准的低渗透性黏土层或者合成黏土层,在阻隔层的上方通常设有柔性阻隔膜,其材料可以是高密度聚乙烯等。排水层的设置可以避免降水入渗造成污染物的扩散。由于填埋的顶盖只能阻挡垂向水流入渗,因此通常还需要采取垂向防渗措施以避免水水平入渗导致的污染扩散,填埋场的底部需要设置防渗层。填埋场周边通常设置监测井,以便对地下水水质进行监控。填埋场需要定期进行检查和维护,确保防渗系统不被破坏。一般情况下,挖掘—填埋的费用小于其它技术,工程实施时间较短。

适用性:挖掘—填埋可以用来临时存放或者最终处置各类污染土壤,通常适用于低含水率的污染土壤,有时也被用于处理规模过大而其他修复技术难以实施的污染区域。该技术一般不用来处理埋深较大的污染土壤或高挥发性的有机污染土壤。

局限性:挖掘—填埋技术无法减少污染物的毒性、活性和数量,只能降低其迁移性;挖掘—填埋需要有合适的填埋场所,占地面积较大;阻隔材料需要进行长期观测与维护以保证其长期有效性;需确保填埋场的再利用不会对覆盖、防渗阻隔层产生破坏作用,深根植物不能在填埋区种植;污染土壤的外运过程需要进行严格监管,防止二次污染。

3.2 固化/稳定化

技术原理：固化/稳定化技术是指将污染土壤与黏结剂或稳定剂混合，使污染物实现物理封存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生物有效性的目的。固化/稳定化技术包括固化和稳定化两个概念，固化是指将污染物包裹起来，使之呈颗粒状或者板块状形态，进而使污染物处于相对稳定的状态；稳定化是指利用氧化、还原、吸附、脱附、溶解、沉淀、生成络合物中的一种或多种机理改变污染物存在的形态，从而降低其迁移性和生物有效性。

技术特点：固化/稳定化技术可以用作原位或异位修复技术，是一种常用的修复技术。多种物质可作为黏结剂或稳定剂，常用的黏结剂有硅酸盐水泥、火山灰、硅酸酯、沥青以及各种多聚物等，常用的稳定剂有硫化物、磷酸盐、铁盐、石灰等单一化学品或复合配方产品。技术实施过程中，可根据场地特性选用单一或混合的黏结剂或稳定剂。固化/稳定化技术在水位应用时必须控制好黏结剂和稳定剂的注射和混合过程，防止污染物扩散进入清洁土壤区域。在处理前需要对污染土壤的颗粒分布、水分含量、渗透性和 pH 值等物理化学性质和污染物的浓度进行详细的分析。固化/稳定化的效果一般采用浸出试验来评估，固化/稳定化后的污染土壤可以进行填埋或合理综合利用。固化/稳定化技术可单独使用，也可与其它处理和处置方法结合使用。该技术的成本和运行费用较低，适用性较强，修复时间一般为中短期。

适用性：固化/稳定化技术主要用于处理重金属等无机物污染的土壤，对于半挥发性有机物（SVOCs）和农药杀虫剂等污染物的处理也有一定的效果。

局限性：修复后的环境条件变化可能会影响固化体的长期稳定性；污染物所处深度的增加可能增大原位固化/稳定化的操作难度；有机物质的存在可能会影响黏结剂的固化作用；原位处理时，黏结剂和固化剂等药剂的传输和有效混合可能存在一定难度；处理过程可能导致污染物体积的大幅增加；某些污染物的处理需要进行可行性实验。

3.3 土壤气相抽提

技术原理：土壤气相抽提（简称SVE）是通过在非饱和土壤层中布置抽气井，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，利用废气处理设施对抽气井抽出的废气进行处理，从而使污染土壤得到净化的方法。

技术特点：土壤气相抽提可以用作原位或异位修复技术，是一种常用的修复技术。原位土壤气相抽提主要用于土壤包气带，多数情况下需要安装若干空气注入井，采用真空泵通过抽气井进行抽气，气量的大小通过真空泵进行调节。有时为了避免产生短路现象，需要在地

表上覆盖一层不透水布，以增加抽气井的影响半径及处理效率。异位土壤气相抽提则是在堆放的污染土壤中铺设抽气管道来实现污染物的去除。污染物的特性（如是否易挥发）及土壤理化特性（有机质、含水率和渗透性等）对土壤气相抽提修复技术的处理效果有较大影响。土壤气相抽提技术释放的尾气需要进行处理后达标排放，防止对公众和环境造成危害，尾气处理过程中产生的残留液体和失效的活性炭也需要进行处理。场地的大小、水文地质条件、污染物的性质和浓度会影响处理的时间、效果和成本。该技术对土壤本身的破坏程度较小，成本相对较低，修复时间适中。为了达到更好的修复效果，SVE 常与其他技术联合使用。如在使用 SVE 技术处理污染土壤后，未达到修复目标，也可在此基础上采用生物降解等其它修复技术进行后续处理，使处理效果达标。

适用性：土壤气相抽提技术可用来处理挥发性有机污染物（VOCs）、部分半挥发性有机污染物以及燃料类污染的土壤，不宜用来处理重油、重金属、多氯联苯（PCBs）和二噁英污染土壤。可处理的污染土壤应具有质地均一、渗透性好、孔隙度大、含水率低的特点。

局限性：黏土或水分含量高（>50%）的土壤，由于渗透性较差，影响 SVE 的处理效果；由于有机物含量高或特别干燥的土壤对 VOCs 的吸附性较强，污染物的去除效率会较低；土壤气相抽提技术实施时可能会发生污染物“拖尾”和反弹现象；抽提后的尾气和尾气处理过程产生的废物需要进行处理。

3.4 土壤淋洗

技术原理：土壤淋洗技术是指将能够促进土壤中污染物溶解或迁移作用的溶剂注入或渗透到污染土层中，使其穿过污染土壤并与污染物发生解吸、螯合、溶解或络合等物理化学反应，最终形成迁移态的化合物，再利用抽提井或其他手段把包含有污染物的液体从土层中抽提出来，进行处理的技术。

技术特点：土壤淋洗技术可用作原位或异位修复技术。土壤淋洗主要包括三个阶段：向土壤中施加淋洗液、下层淋出液收集以及淋出液处理。淋洗液可以是水或具有增溶、乳化或改变污染物化学性质的物质，主要有无机淋洗剂、人工螯合剂、表面活性剂、天然有机酸等。无机淋洗剂具有成本低、效果好、速度快等优点；人工螯合剂价格昂贵，生物降解性差，且淋洗过程易造成二次污染。该技术在应用中一般都对使用的淋洗剂进行回收再利用。土壤的理化性质和场地的水文地质参数是决定处理效果、可行性和费用的关键因素，因此在实施土壤淋洗技术并安装处理设施前，需要对此进行详细的勘察与分析。原位土壤淋洗对操作要求很高，一般需要在污染土层周边设置屏障系统，并设置监测点。原位土壤淋洗主要用于

处理地下水位线以上包气带以及饱和带的吸附态污染物。该技术是一项短、中期技术，费用随所用化学淋洗液的种类不同差别较大。

适用性：土壤淋洗技术能够处理地下水位以上较深层次的重金属污染，也可用于处理有机物污染的土壤。土壤淋洗技术最适用于多孔隙、易渗透的土壤，最好用于沙地或砂砾土壤和沉积土等，一般来说渗透系数大于 10^{-3}cm/s 的土壤处理效果较好。质地较细的土壤需要多次淋洗才能达到处理要求。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。

局限性：淋洗技术可能会破坏土壤理化性质，使大量土壤养分流失，并破坏土壤微团聚体结构；低渗透性、高土壤含水率、复杂的污染混合物以及较高的污染物浓度会使处理过程较为困难；淋洗技术容易造成污染范围扩散并产生二次污染。

3.5 土壤洗脱

技术原理：土壤洗脱是指将污染土壤挖掘出来后，与水或化学试剂混合，通过物理化学作用将土壤中的污染物转移到液相中，并对含污染物的液相介质进行处理处置，从而获得洁净土壤的技术。

技术特点：土壤洗脱通常为异位修复技术。污染土壤在洗脱之前，通常根据土壤的物理状况将其分类，并基于再利用的用途和需求分别清洁到不同程度。按照土壤颗粒不同分开洗脱，可提高处理效率。洗脱操作的核心是通过水力学的方式，机械悬浮或扰动土壤颗粒。洗脱液可以是水或其他试剂（把酸、碱洗洁剂、络合剂或其他化合物溶到水中）。不同土壤粒级或洗脱过程的不同阶段可能用到不同的洗脱液。土壤洗脱系统可以是固定式或移动式的，包括筛分、机械破碎、淘洗、沉淀、离心、过滤等单元。洗脱完成后，需要对洗脱废液进行回收处理。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，通常要求较大的处理场地。

适用性：土壤洗脱技术可用来处理重金属和有机污染物，包括石油类碳氢化合物、PCBs 以及多环芳烃（PAHs）。该技术对于大粒径级别污染土壤的修复更为有效，砂砾、沙、细沙等土壤中的污染物更容易被清洗出来。一般来说，当土壤中黏土含量达到 25%~30% 时，不宜采用该技术。

局限性：一般在洗脱前需要对土壤进行预处理和分级；同淋洗技术一样，洗脱技术会破坏土壤的微团聚体结构和理化性质，并丧失大量养分；污染物较为复杂时会增加洗脱液选择的难度；难以去除粘粒中吸附的污染物；洗脱废液如控制不当会产生二次污染。

3.6 热脱附

技术原理：热脱附技术是指通过直接或间接热交换，将污染土壤及其所含的污染物加热到足够的温度，使污染物从污染土壤中得以挥发或分离，然后对挥发出来的污染物进行处理，从而获得干净的土壤。与土壤焚烧技术相比，热脱附通常是物理分离过程，通过控制热脱附系统的温度和物料停留时间有选择地使污染物挥发，而不是氧化、降解这些有机污染物。

技术特点：热脱附技术可用作原位或异位修复技术，异位修复的加热方式有直接加热和间接加热两种，热源有高频电流、微波、过热空气、天然气、重油等。热脱附温度一般在150~540℃，在不同温度下通过蒸发、沸腾、解吸和热解等作用选择性的移除不同的污染物。土壤中污染物从土壤中分离出来后，需在后续处理设施（后燃烧器或活性炭吸附等装置）中进行处理后排放。该技术对处理土壤的粒径和含水率有一定要求，通常需要对土壤进行预处理，处理含氯有机物时可能产生二噁英。热脱附修复技术具有修复效率高、技术成熟等优点，处理温度越高，能耗越大、操作费用相应提高。异位热脱附技术在国内相对成熟，一般加工成可移动的设备单元，但设备一次性处理能力有限。该技术处理污染土壤的时间属于中短期。

适用性：热脱附技术通常能高效地去除污染场地内的各种 VOCs 和 SVOCs、农药、PCBs 和汞等污染物，主要适用于处理高浓度污染土壤以及采用其它修复技术效果较差的污染土壤。该技术应用时，高黏土含量或含水率会增加处理费用（原位电阻加热修复技术除外，该技术需要水份来导电）。

局限性：土壤需要控制粒径和水份含量等，预处理可能会影响该技术的应用效果和费用；含腐蚀性污染物的土壤可能会损害处理设备；粘土、淤泥或含有大量有机物的土壤对污染物的吸附能力强，会导致物料停留时间的延长，降低修复效率。热脱附技术比其它常用修复技术费用略高。

3.7 焚烧

技术原理：在高温和有氧条件下，依靠污染土壤自身的热值或辅助燃料，使其焚化燃烧并将其中的污染物分解转化为灰烬、二氧化碳和水，对焚烧产生的烟气进行处理，从而达到土壤中污染物减量化和无害化的目的。

技术特点：焚烧通常为异位处理技术，多用来处理污染较为严重的土壤。焚烧技术主要包括焚烧工艺技术（即焚烧炉技术）、烟气净化工艺技术、生产过程自动化控制技术、残渣综合利用技术等。焚烧炉炉型主要有炉排型焚烧炉、流化床焚烧炉和回转窑式焚烧炉。炉排型焚烧炉技术成熟，运行稳定、可靠，适应性广，污染土壤一般可不经预处理直接进炉焚烧，

处理规模较大，但不适用于处理含水率特别高的污染土壤。流化床焚烧炉对污染物的燃烧彻底，但处理规模较小，且对预处理的要求较为严格。回转窑焚烧炉的技术成熟，能够处理难燃烧的物质，对含水率要求相对宽松，通过改变污染土壤停留时间可提高土壤中污染物的处理率。污染土壤的焚烧一般需要借助辅助燃料来引燃和维持燃烧，燃烧形成的烟气和残余物需要进行处理，对含氯有机污染土壤进行焚烧时存在产生二噁英的风险。焚烧技术总体对污染土壤的处理效果较好，处理时间较短。

适用性：焚烧技术可用来处理大量高浓度的持久性有机污染物（POPs）、石油类以及SVOCs等。不同工艺对污染土壤的含水率有一定的要求，高含水率和黏性土壤的处理效率相对较低，且处理费用相应提高。

局限性：重金属焚烧产生的残灰，需进行安全处置，挥发性重金属的焚烧，需要安装尾气处理系统；对含氯有机污染土壤进行焚烧存在产生二噁英的风险；处理过程中可能形成比原污染物的挥发性和毒性更强的化合物；能耗和成本较高。

3.8 水泥窑协同处置

技术原理：将满足或经过预处理后满足入窑要求的土壤投入水泥窑，在进行水泥熟料生产的同时实现对污染土壤无害化处置的技术。

技术特点：水泥窑协同处置技术通常是异位修复技术，是目前国内应用较广的一类土壤修复技术。污染土壤入窑前一般需暂存在贮存设施中，贮存场需要采取防渗措施。根据污染物的特性对贮存设施有不同的要求，污染土壤中含易挥发污染物的，贮存设施应采取封闭措施，并设立抽气装置，抽出的气体需处理后达标排放。水泥窑协同处置的预处理工艺及设施与污染土壤的特性和入窑位置相关。污染土壤在入窑前需分析其化学组成和物理特性，其组分不应影响水泥生产过程和水泥产品质量产生不利影响。该技术在处理污染土壤过程中需对飞灰和烟道气体进行检测，防止二噁英等毒性更大物质的排放。水泥窑协同处置技术具有焚烧温度高、可资源综合利用、经济效益好等优点，但对处理污染土壤的理化性质、投加比例和投加点等需要深入分析。该技术的实施时间属于中短期技术。

适用性：水泥窑协同处置技术对污染物的处理范围较广，大多数有机类污染物都可以采用该技术处理，但该技术不适用于处理含爆炸物、未经拆解的废电子产品、汞、铬等污染物的土壤。重金属的含量对水泥质量影响较大，因此处理前应对土壤中的重金属等成分进行检测，保证出产的水泥质量符合相关标准。

局限性：在进入水泥窑前，污染土壤一般需要进行预处理；对污染土壤中的各组分和污

染物等进行详细检测，以保证水泥产品的质量；污染土壤在水泥生料中的配比通常较低；涉及污染土壤的挖掘或远距离运输，可能会产生二次污染。

3.9 化学氧化/还原

技术原理：化学氧化/还原技术是通过氧化还原反应将有害污染物彻底无害化或转化为毒性较低的、更易自然生物降解的中间体或终产物，从而达到环境修复的目的。

技术特点：化学氧化/还原可用作原位或异位修复技术。常用的氧化剂有臭氧、过氧化氢、高锰酸盐、过硫酸盐等，常用的还原剂有纳米零价铁等。该技术在应用时如氧化还原不完全，可能出现中间污染物，会影响处理效果。介质中的油和油脂会影响该技术的处理效率。土层的渗透系数、粒径分布、孔隙率等场地水文地质条件以及 pH 值、氧化还原电位等土壤的理化性质等，会影响化学氧化/还原方法的处理效果。该技术所需的处理周期一般在几天至几个月不等，处理时间属中短期，具体取决于目标修复区域的污染物性质及污染程度、氧化还原剂是否能和污染物充分接触发生反应及地下含水层的特性等因素。

适用性：化学氧化还原对大多数有机污染物有效，包括有机氯代溶剂、苯系物、石油烃、PCBs、PAHs 等。但对水溶性差、土壤吸附性强的污染物，比如高环的 PAHs、一些农药等，处理效率较差，可采用促进此类污染物溶解或解吸的产品与化学氧化/还原技术联用以提高其修复效率。

局限性：处理过程可能产生不完全氧化产物或中间污染物；处理高浓度的污染物需要大量的氧化还原剂，可能导致此技术不再经济可行。

3.10 生物通风

技术原理：生物通风是一种强化好氧生物修复方法，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处理后排放。

技术特点：生物通风可用作原位或异位修复技术。生物通风的效果取决于两个因素：首先土壤中必须有足够的空气，维持好氧条件；其次可降解目标污染物的微生物自然存在，且其活性能满足降解速率的需求。在污染土壤中通入空气时，加入适量营养元素，可提高微生物降解污染物的速率。与土壤气相抽提相比，生物通风使用较低的气流速度，主要目标是提供足够的氧气从而强化好氧生物修复过程，而不是旨在将污染物挥发。土壤结构、含水率、渗透性和温度对生物通风的处理效果影响较大。生物通风技术可很容易与土壤气相抽提技术联合运用，从而弥补土壤气相抽提对低挥发性有机污染物处理能力的不足。生物通风技术需

要建设尾气处理装置，并对处理后排放的尾气进行定期监测。生物通风是一项中长期技术，实施时间从几个月到几年不等，主要取决于土壤和污染物的特性。

适用性：生物通风技术对于被石油烃、低氯代或非氯代溶剂、某些杀虫剂、木材防腐剂等有机物污染的土壤处理效果良好，适用处理高渗透性、低含水量和低黏性的土壤。原位生物通风常用于地下水层上部透气性较好的土壤的修复，也适用于结构疏松多孔的土壤。

局限性：邻近地下水、饱和层土壤或低渗透性的土壤使用该技术效果较差；土壤中水分含量太低也会限制生物有效性；可能会导致污染物进入临近地下空间；需要监控土壤表面可能排放废气；温度过低会减缓修复速率。

3.11 生物堆

技术原理：生物堆通常是将污染土壤从污染地点挖出，堆积在具有防渗层的处理区域，利用微生物对污染物的降解作用来处理污染土壤的技术。

技术特点：生物堆通常为异位修复技术。该技术的特点是借助生物堆中的土著生物或接种微生物降解挖掘土壤中的污染物，在污染土堆中铺设管道，提供生物降解所需水份，在污染土堆以下设置多孔集水管，收集渗滤液。生物堆系统还可设有送气管和空气泵，以稳定氧气的补给。各种均匀布水或滴灌技术均可应用于这种处理系统中，而且系统可以是完全封闭的。可以通过调控封闭系统中温度、含水率、营养物、氧气和pH值，来增强生物降解。生物堆系统还可以借助太阳能的热力作用提高处理效率。当土壤中存在挥发性污染物时，通常在生物堆外部或内部设有气体收集系统，生物堆内部的气体，包括降解产物，都经过诸如活性炭吸附、加热氧化、化学氧化或生物法等措施处理后才向大气排放。生物堆技术的处理时间较适中，一般为数周或数月。

适用性：生物堆技术适用于处理易于好氧或厌氧生物降解的有机污染物，比如卤代有机污染物、石油烃，苯系物等。该技术也可用来处理SVOCs、农药等，但处理效果较差。

局限性：生物堆技术需要对污染土壤实施挖掘；需通过可行性实验确定污染物的生物可降解性、需氧量及营养物负荷率；因为没有搅拌作用可能会导致处理效果的非均一性和相对较长的处理时间。

3.12 强化生物修复

技术原理：强化生物修复是利用土著或接种微生物（如真菌、细菌或其它微生物）降解（代谢）土壤中污染物，通过调节碳源、营养物、氧气或水份等强化手段，将污染物无害化

的过程。

技术特点：强化生物修复技术可用作原位或异位修复技术。有氧条件下，微生物最终将大部分有机污染物转化为二氧化碳和水等；厌氧条件下，有机污染物可能最终被降解为甲烷、少量二氧化碳和微量氢气，或毒性高低不同的非彻底生物降解的中间产物，以及其它环境友好的终产物（比如四氯乙烯完全脱氯生成乙烯）。生物修复的效率受污染物特性、土壤微生物种类、土壤性质、地质化学条件等因素的影响较大，且对土壤中的营养条件等要求较高。此外，生物修复技术实施过程中需要控制场地的温度、pH值、水份等使之符合微生物的生存环境条件。生物修复相对更适用于中、低浓度污染场地或区域，具有操作简便、费用低、绿色环保、对场地扰动小等优点。生物修复技术一般比物理化学技术的修复时间长，污染物的大幅去除通常至少需要数月以上。

适用性：强化生物修复技术对能量的消耗较低，可以用来修复面积较大的污染场地。该技术主要适用于修复受到石油烃、有机卤代溶剂、农药等有机化学品污染的土壤，某些特定污染物需要特定微生物来降解。该技术无法降解重金属，但可用于改变重金属的价态，使其被吸附、固定在土壤颗粒中，达到稳定化目的。高浓度毒性污染物，比如重金属、高氯化有机物等污染物可能对微生物有毒。

局限性：如果土壤介质中含有抑制微生物活性或限制微生物与污染物接触的物质，则会降低修复效果，粘土、非均质土层也会影响修复效果；强化生物修复技术在低温条件下（比如北方地区，寒冬时节）不宜采用；该技术原位应用时，优先流的存在可能会减少添加剂和污染物的接触机会。

3.13 植物修复

技术原理：植物修复主要是利用植物对污染物的吸收、转化、稳定或降解作用，实现土壤的净化、生态效应恢复的治理技术。植物修复的过程较为复杂，可能是多个过程的协同作用，如植物对污染物的直接吸收及累积作用，植物根部分泌的酶降解有机污染物，或将高毒的有机物变为低毒或无毒的有机物，或实现污染物的稳定化，或根际与微生物的联合代谢作用，从而吸收、转化和降解污染物等。

技术特点：植物修复通常为原位修复技术。影响植物修复技术的因素较多，如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，延长修复周期；一些有毒物质或高浓度污染物对植物生长有抑制作用；此外，植物吸收难以修复埋藏深度大于植物根际到达范围的污染物。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。采用植物修复时，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途径。然而，较之其他修复技术，植物修复具有良好的美学效果和较低的操作成本，适合与其他技术结合使用。植物修复技术与物理和化学修复技术相比具有成本低、操作方便、二次污染少、不破坏土壤结构等特点，非常易于就地处理污染物，但处理时间较长。

适用性：植物修复对于特定重金属具有较好的效果，对于 PAHs 以及滴滴涕（DDT）等 POPs 污染物也有过修复先例。目前植物修复大多只能富集一种或两种重金属，对多种重金属的复合污染修复效果一般。

局限性：植物修复的深度取决于采用的植物，但基本只能处理浅层污染；浓度较高的污染物可能对植物有毒；植物修复的季节性和地域性较强；可能会产生污染物从土壤中转移到空气中的情况；植物修复产物的毒性和生物有效性较难确定；修复周期较长；需对植物修复时收割的植物妥善处置。

3.14 泥浆相生物处理

技术原理：泥浆相生物处理是在生物反应器内处理挖掘的土壤，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处理，处理后的泥浆脱水即获得干净的土壤。

技术特点：泥浆相生物处理通常为异位修复技术。挖掘的土壤先进行物理分离石块和碎石，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。一般情况下，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中处于悬浮状态。处理过程中可通过加入酸或碱来控制pH值、调控泥浆中的营养物和氧气含量，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，获得干净的土壤。工程实施时，可能需要对土壤进行预冲洗，以浓缩污染物，将其中的清洁砂子排出。泥浆相生物反应器的大小可根据试验的规模来确定。由于泥浆相生物处理可为微生物提供较好的环境条件，因而可以大大提高降解反应速率。该技术处理时间适中，土壤的筛分和处理后的脱水价格较为昂贵。

适用性：泥浆相生物处理技术已被成功地用于修复炸药、石油碳氢化合物、石化产品、溶剂、杀虫剂、木材防腐剂和其它有机化学品污染的土壤，采用连续厌氧反应器可也可处理 PCBs、卤代挥发性有机物等。

局限性：需要对污染土壤实施挖掘；土壤进入反应器前的预处理较为困难，且成本较高；该技术对非均质土壤和粘土的处理可能存在困难；处理后的土壤脱水和废水处理需要较多费

用；不适用于无机污染物的处理。

4 污染场地地下水修复技术

本标准基本按照物理、化学和生物类修复技术的顺序，分别对目前较为成熟或已在国内外有所应用的地下水修复技术进行介绍，主要涵盖修复技术的原理、技术特点、适用性及局限性等。

4.1 监控式自然衰减

技术原理：监控式自然衰减（简称MNA）是一种利用自然过程来分解地下水中污染物的技术，通过对地下水的监测，以确认在合理的时间范围内，污染物自然衰减的程度足以达到保护受体和修复目标。

技术特点：监控式自然衰减为原位修复技术，是一种常用的地下水修复技术。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。微生物降解在污染物分解中起到重要作用；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，同时对观测点的污染物浓度进行预测，特别是污染羽仍在扩散时。模拟的首要目的是为了确认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，且地下水污染羽的范围足以稳定或逐渐缩减。该技术在使用过程中需要对地下水中污染物进行长期监测，其目的是保证污染物的降解速率与修复目标一致。监测频率需考虑到季节变化等对污染物扩散的影响，并根据监测数据分析结果评估该技术的修复性能，适当调整修复方案。该技术应用过程中产生的二次污染小，且对地表构筑物 and 生态环境的影响较小，工程设施简单，修复费用远远低于其他修复技术。监控式自然衰减可与其他修复方法联合使用。

适用性：监控式自然衰减技术一般适用于处理VOCs/SVOCs和石油烃类污染物，只对农药类污染物的部分种类有效，该技术也可通过改变某些重金属的价态使其无害化。通常在控源的基础上采用该技术，且其适用范围较窄，对区域环境和污染物自然衰减能力要求较高，一般仅适用污染程度较低、污染物自然衰减能力较强的区域。

局限性：该技术在使用时，需对污染物浓度、分布、降解产物及地球化学参数等条件进行详细了解。该技术需要获取污染物迁移和降解过程模型的模拟参数；污染物可能会在降解前发生迁移；降解的中间产物可能比原有污染物毒性更大，稳定性更差；不能用于存在紧急风险或对修复时间要求较短的场地；需要进行长期监控，增加成本；与主动修复相比，该技术的修复时间更长；如果该技术未达到预期目标或污染羽持续扩散时，需要增加强化工程措

施或采用其他主动修复技术进行处理。

4.2 抽出一处理

技术原理：抽出一处理技术是通过抽取已污染的地下水至地表，然后对抽出污水进行处理的地下水修复方法。通过不断地抽取污染地下水，使污染羽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移而得到清除。

技术特点：抽出一处理技术是一种常用且应用较早的地下水异位修复技术，随着其他更先进技术的逐渐成熟，该技术的应用数量呈现减少的趋势。抽出一处理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，抽水井一般位于地下水污染羽状体中部（水力坡度小时）或下游（水力坡度大时）。抽出后污水处理技术的选择则受到污染物特征、修复目标、资金投入等多方面的制约。该技术可使地下水的污染水平迅速降低，且水位的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。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/解吸的可逆性，抽出一处理技术在短时间内很难使地下水中污染物含量达到环境风险可接受水平。此外，该技术由于地下水的抽提或回灌，可能扰动修复区域及周边地区的地下水。抽出一处理工程运行后期会出现拖尾现象，地下水中污染物浓度可能会反弹，需要对系统进行定期的维护与监测，以确保修复效果。该技术在处理高浓度污染地下水时初期效果较好，工程费用较低，但长期维护费用较高，运行时间可达数年。

适用性：抽出一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。抽出一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污染物的溶解性，强化抽出处理的速度。当地下水中存在 NAPL 类污染物时，由于毛细作用会使其滞留在含水介质中，将明显降低抽出一处理技术的修复效率。

局限性：该技术的运行时间较长，长期成本较高，处理后期会出现拖尾现象；残留在土壤孔隙中的污染物难以去除；地质的不均一性对处理效果影响很大，水力传导系数小于 10^{-5} cm/s 的场地，处理效果不明显；抽出水处理过程中产生的残留物和促使污染物被抽出注入地下的药剂（如表面活性剂等）可能会产生二次污染。

4.3 渗透性反应墙

技术原理：渗透性反应墙（简称 PRB）是指在地下水污染源的下游开挖沟槽，安置充

填着反应介质的墙体，流经的地下水与墙中的介质发生物理、化学和生物反应，使地下水中的污染物得以阻截、固定、吸附或降解。

技术特点：渗透性反应墙技术通常为原位修复技术，是一种常用的地下水修复技术，其最重要的功能单元为原位反应墙。该技术需根据特定地质和水文条件、污染物的空间分布来选择反应渗透墙（PRB）的类型。PRB 按照结构，分为连续透水式 PRB 和漏斗一门式 PRB。连续透水式 PRB 适用于地下水污染羽规模较小和埋深浅的含水层。漏斗一门式 PRB 由不透水的隔墙、导水门和 PRB 组成，适用于潜水埋藏浅、污染面积大的含水层。PRB 按照反应性质，可分为化学沉淀反应墙、吸附反应墙、氧化—还原反应墙和生物降解反应墙等。渗透性反应墙的特点表现为 PRB 垂直于污染羽迁移途径，在横向和垂向上，横切整个或部分污染羽。PRB 中填充的介质包括零价铁、螯合剂、吸附剂、长效碳源等，可用来处理地下水多种多样的有机或无机污染物，如氯代溶剂、重金属等。污染物通常会在反应墙材料中发生浓缩、降解或吸附等反应，所以墙体中的材料需要定期更换。该技术较成熟，成本相对较低，但通常实施的时间较长。

适用性：渗透性反应墙技术可适用的污染物包括：重金属、氯代有机溶剂、含氯农药、石油烃、苯系物、PAHs、卤代烷烃、铵、硫酸盐等。

局限性：该技术修复过程中使用的活性材料需要定期更换以保持处理效果；对深层污染的实施难度较大，应用性降低；反应墙的渗透性可能随污染物或反应产物的沉积而降低；需要设置长期观测井并监控处理效果；对反应墙更新出来的材料需要妥善处置。

4.4 化学氧化/还原

技术原理：化学氧化/还原修复技术主要是将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地下水的一种修复技术。

技术特点：化学氧化/还原通常为原位修复技术，是一种常用的地下水修复技术。化学氧化/还原技术通过把强氧化剂（如过硫酸盐，芬顿试剂）或强还原剂（如零价铁）通过注射、搅拌等形式加入到目标修复区域，把污染物降解成无毒或低毒性的最终产物或中间体。该技术需根据具体场地的污染物类型采用适合的氧化还原剂，常用的氧化剂包括高锰酸钾、臭氧、芬顿试剂和过硫酸盐，其中高锰酸钾的氧化性相对较弱，仅适用于较易氧化的氯代烯烃类等有限的污染物，其还原产物二氧化锰可能会堵塞含水层，造成不利的水文地质变化。臭氧的氧化能力高于高锰酸钾，但地下寿命短，其气相的性质导致的传质阻力致使其在饱和层的应用受限。芬顿试剂氧化能力最强，对常见有机污染物都有效，但易分解，反应迅猛，

易产生大量气体和热，导致部分 VOCs 和 SVOCs 发生污染转移，且不宜在黏土地应用（因为黏土的氧化剂耗量大、影响半径小等）。过硫酸盐是较新的氧化剂，具备和芬顿相仿的氧化效力，但其自由基的产生过程缓和，正确操作可使热和气体的释放不明显，通常有效性可持续数月，且具有土壤氧化剂耗量低等优势。常用的还原剂包括微米级、纳米级零价铁，还可选用国内外已成熟应用的商业化配方产品等。修复药剂在目标修复区域的均匀分布，与污染物充分接触是保证修复效果的关键因素。尽可能细化的场地概念模型，尤其是对污染物的分布和通量进行详细的评价，是设计和优化原位化学氧化/还原技术的关键。

适用性：化学氧化/修复技术适用范围广泛，选择正确的氧化剂和使用方法可以处理大多数常见的有机污染物，如燃料类、氯代溶剂、石油烃、多环芳烃、氯苯、酚类、氟利昂、苯胺类等。化学还原则主要适用于挥发性氯代污染物、有机氯农药、有机炸药等。

局限性：该技术对于水溶性差、易于吸附在土壤上的污染物，比如高环 PAHs、一些农药等效果欠佳，可能需要辅以其它技术促进污染物的脱附以改善修复效果；一部分投加的氧化还原剂可能会被非目标污染物消耗；反应过程的副产物可能会对环境产生不良影响。

4.5 空气注入/生物曝气

技术原理：空气注入技术是通过向含水层注入空气使地下水中的污染物汽化，汽化后的污染物进入土壤包气带，再利用抽气装置将土壤包气带中的污染物抽出后处理的技术。因此空气注入技术一般与土壤修复的气相抽提技术联合使用。生物曝气则是通过向地下水中通入空气，利用好氧微生物的降解作用，分解污染物，净化地下水的过程。

技术特点：空气注入/生物曝气通常为原位修复技术。空气注入技术通过向地下水中注入空气将挥发性污染物转移至包气带再收集处理，此技术若实施在污染羽前沿可以形成气流屏障，阻止污染羽进一步向下扩散和迁移。在气压梯度作用下，空气注入技术可以修复溶解在地下水中、吸附在饱和带土壤上和停留在包气带土壤孔隙中的挥发性有机污染物。对于地下水修复来说，空气注入和生物曝气没有明确的界线，一般取决于在不同条件和操作阶段下各控制因素的主导地位。一般情况下，在修复初期以物理挥发为主，称为空气注入技术，而在修复后期则以生物降解为主，称为生物曝气技术，空气注入阶段的空气量一般大于生物曝气阶段的空气量。空气注入/生物曝气技术具有设备简单，安装方便，操作容易，修复效率高，对土壤扰动小等特点。

适用性：空气注入/生物曝气技术可用来处理地下水中大量的 VOCs 和 SVOCs，如汽油燃料、石油碳氢化合物、苯系物、氯代溶剂等，适用于具有较大饱和带厚度和埋深的含水层。

该技术不适合在低渗透性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复杂情况下的污染物修复。

局限性：该技术需充分考虑污染物的深度和场地水文地质条件进行空气注射井的设计；通过饱和层的气流若不均匀，可能导致污染气体发生不可控制的扩散；该技术不可用于水平水力传导系数小于 10^{-5}cm/s 的场地，土层的非均一性也会影响修复效果。

4.6 强化生物修复

技术原理：强化生物修复是指利用土著微生物或接种微生物（如真菌、细菌或其它微生物）降解地下水中有有机污染物的过程。该方法可通过向地下水中添加碳源（促进厌氧生物修复）、氧气（促进好氧生物修复）、营养物质等方法加速污染物降解。

技术特点：强化生物修复通常为原位修复技术，是一种常用的地下水修复技术。采用好氧时，可以通过向污染地下水中通入空气、缓释氧产品或循环注入过氧化氢等以增强水体中的氧化降解作用。厌氧条件下，可通过向污染地下水中注入碳源（缓释碳源或溶解性碳源）以增强生物的降解作用。地下水的生物修复可以与 SVE 系统联合使用去除地下水中的挥发性有机物。生物修复可匹配地下水循环系统来强化修复效果。向地下水中注入药剂或空气时，需要采取措施防止污染羽扩散或对周边建筑物造成蒸汽侵入。一般来说，该技术的处理成本相对较低，但污染物的性质、污染深度、微生物的状况、添加物的种类和地下水的抽出率均会影响处理费用，处理时间通常需要数月至几年。

适用性：强化生物修复技术可用来处理很多易生物降解的 VOCs 和 SVOCs、燃料类和炸药类污染物。对高环 PAHs、农药类污染物的处理能力较弱。

局限性：该技术在渗透性较差的地层处理速率较慢，污染地层的非均一性会影响药剂的注入及扩散；采用过氧化氢为好氧生物供氧时，需做好安全防范措施；原位生物修复后，可能仍需继续采用监控式自然衰减（MNA）等技术进行后续处理。

5 污染场地修复技术的筛查与选择

在污染场地修复技术方案等文件编制过程中，需要对土壤和地下水的修复技术进行筛选和评估，从而为污染场地修复相关技术文件的编制提供技术支持。修复技术筛选可采用专家评估法、类比法、定性矩阵法、评分矩阵法等多种方法，一般分为两步：第一步为修复技术筛查阶段，第二步为修复技术选择阶段。

5.1 修复技术筛查与选择的原则

土壤和地下水修复技术筛选需要考虑的因素众多,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和风险控制的要求,优先选择可以降低污染物毒性、迁移性和含量的成熟修复技术。修复技术具体筛选原则如下:

- (1) 修复技术的筛查与选择要优先考虑充分保护人体健康和生态环境;
- (2) 在技术上,修复技术筛查与选择需结合场地再开发利用规划和开发方式,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;
- (3) 在经济上,修复技术筛查与选择兼顾当前修复费用的实际承受能力和未来经济的发展,使得不仅在当前,而且从较长远来看,修复技术的选择都是合适的;
- (4) 在可行性上,修复技术的筛查与选择从我国的整体现状出发,充分考虑我国场地修复队伍的能力以及现有污染物处置设施的水平;
- (5) 在各种条件允许的情况下,尽量选择环境友好的修复技术或原位修复技术。对污染场地中不同类型的污染物和不同风险的土壤和地下水,提倡采用区别化的技术分别对待和处理。

5.2 修复技术筛查与选择的方法

修复技术筛查阶段的目的是遴选可行的场地修复技术,这些技术可称为“备选修复技术”(Remedial Alternatives)。修复技术筛查主要是通过针对具体场地的关注污染物的适用性、修复效果、可操作性和相对成本四方面来初步确定可能的修复技术,附录 A 和附录 B 分别提供了部分土壤和地下水中不同污染物对应的可能修复技术及其修复效果、可操作性和相对成本。

修复技术选择的目的是通过对各种备选修复技术进行详尽科学评估,选择出最优修复技术。结合国际通用方法和国内发展现状,对备选修复技术进行选择时需评估的指标包括:(1) 人体健康和生态环境的充分保护;(2) 满足相关法律法规的程度,(3) 长期有效性;(4) 污染物毒性、迁移性和总量的减少程度;(5) 短期有效性;(6) 可实施性;(7) 修复成本;(8) 有关部门接受程度;(9) 周边社区接受程度。附录 C 给出了依据以上指标对污染场地修复技术进行选择的评分表。评分表采用 10 分制,按照分值越高指标效果越好的原则对备选修复技术进行评分,从而为修复技术文件的编制提供依据。对修复技术选择进行评估的各项指标解释如下。

5.2.1 人体健康和生态环境的保护程度

这项指标是每个备选修复技术必须满足的条件。该项评估指标涵盖了部分其他评估指标，尤其是长期有效性和短期有效性。评估的重点在于各备选修复技术是否能为人体健康和生态环境提供足够充分的保护。同时，该评估指标也需要考虑这些修复技术是否会造成不可接受的短期影响和污染转移。

5.2.2 满足相关法律法规的程度

这项指标是为了评估所采用的备选修复技术在实施时，是否能够满足国家或当地政府部门的各项法律法规，如污染物排放、敏感区域施工、职业安全卫生或其他方面的管理规定。

5.2.3 长期有效性

这项指标是为了评估在修复工程达到修复目标后，场地内残留风险（未处理的废物或修复过程产生的残渣）的大小，以及控制残余风险措施的可行性。

5.2.4 污染物毒性、迁移性和总量的减少程度

这项指标主要用来评估修复技术是否能够永久和显著地降低污染物的毒性、迁移性和总量，从而降低场地的危害。评估要素主要有以下几项：使用的修复工艺和材料；有害物质去除或处理的量；污染物毒性、迁移性或体积减少的程度；修复方法的不可逆性；修复后剩余污染物的种类和数量。

5.2.5 短期有效性

这项指标是用于评估备选修复技术在建筑 and 施工过程中对人体健康和周边环境的影响。此项指标主要从修复技术实施过程中对各项保护措施的需求程度和达到修复时间上进行考量，针对以下几项评估要素进行分析：修复施工时是否对社区无影响；修复施工时是否对工人无影响；是否不需要采取二次污染控制措施；达到修复目标值的快速性。

5.2.6 可实施性

这项指标评估的是每个备选修复技术实施的可行性，也包括实施修复工程所需的服务和材料是否容易获得。此项指标的评估要素主要有以下几项：技术的可获得性；建设和运行能力；技术可靠程度；是否容易追加额外的修复工艺；是否具备修复有效性的监测能力；是否具备异地处理、贮存和处置服务（如填埋场的容量）；是否具备必要的设备和专家。

5.2.7 修复成本

这项指标评估的是备选修复技术在达到修复目标时，所需要的投资和运行维护成本。

5.2.8 有关部门接受程度

这项指标评估的是备选修复技术是否容易得到当地有关监管部门的认可和支持。

5.2.9 周边社区接受程度

这项指标评估各个备选修复技术的实施是否符合项目当地的相关管理标准，是否有效控制噪音、异味、废水、废气排放，是否容易被周边居民、社区业主和居委会接受等。

修复技术的筛查与选择需要借助可行性试验来完成。当某种修复技术的修复效果、修复时间、成本等数据足够，或有大量应用案例能够证明其对某具体场地的目标污染物有效时，可跳过可行性试验。

CAEPI

附录 A

(资料性附录)

污染场地土壤修复技术筛查矩阵

编号	技术	挥发性非卤代有机物	挥发性卤代有机物	半挥发性非卤代有机物	半挥发性卤代有机物	燃料类	重金属	可操作性	污染物去除率	费用
1	挖掘—填埋	◎	◎	●	●	●	●	●	●	●
2	固化/稳定化	○	○	●	●	●	●	●	●	◎
3	土壤气相抽提	●	●	◎	◎	◎	○	●	◎	●
4	土壤淋洗	○	○	●	●	●	●	◎	◎	◎
5	土壤洗脱	○	○	●	●	●	●	◎	◎	○
6	热脱附	●	●	●	●	●	○*	●	●	◎
7	焚烧	●	●	●	●	●	○	●	●	○
8	水泥窑协同处置	●	●	●	●	●	○	●	●	◎
9	化学氧化/还原	◎	◎	●	●	●	●	●	●	◎
10	生物通风	●	◎	△	△	●	○	●	◎	●
11	生物堆	●	●	△	△	●	○	●	●	●
12	强化生物修复	●	●	△	△	●	○	◎	◎	◎
13	植物修复	○	○	◎	◎	◎	●	●	◎	●
14	泥浆相生物处理	●	●	△	△	●	○	◎	●	◎

注：●表示非常适用或性能较好；◎表示较为适用或性能适中；○表示不适用或效果较差；△表示待定，其效果取决于具体参数。* 汞除外

附录 B

(资料性附录)

污染场地地下水修复技术筛查矩阵

编号	技术	挥发性非卤代有机物	挥发性卤代有机物	半挥发性非卤代有机物	半挥发性卤代有机物	燃料类	重金属	可操作性	污染物去除率	费用
1	监控式自然衰减	●	●	●	●	●	○	●	○	●
2	抽出一处理	◎	◎	◎	◎	△	◎	◎	◎	○
3	渗透性反应墙	●	●	●	●	●	●	●	◎	◎
4	化学氧化/还原	◎	◎	●	●	●	●	●	●	◎
5	空气注入/生物曝气	●	●	●	●	●	○	●	●	●
6	强化生物修复	●	●	●	△	●	○	●	◎	●
注：●表示评估性能较好或非常适用；◎表示评估性能适中或较为适用；○表示评估性能较差或不适用；△表示待定，其效果取决于具体参数。										

附录 C

（资料性附录）

污染场地修复技术选择评估表

评估指标	备选技术 1	备选技术 2	备选技术 3	
人体健康和生态环境的保护程度				
满足相关法律法规的程度				
满足污染物排放管理规定				
满足敏感区域的施工管理规定				
满足职业安全卫生管理规定				
其他方面管理规定的符合度				
长期有效性				
残留风险是否小				
残余风险控制措施的可获得性				
污染物毒性、移动性和总量的减少程度				
修复工艺和材料是否可永久降低污染物毒性、迁移性或总量				
有害物质去除或处理的量				
污染物毒性、迁移性或体积的减少程度				

修复方法的不可逆性				
修复后剩余污染物的种类和数量是否少				
短期有效性				
修复施工时对社区影响是否小				
修复施工时对工人影响是否小				
对二次污染控制措施的要求是否低				
达到修复目标值的时间是否短				
可实施性				
技术可获得性				
建设和运行能力				
技术可靠程度				
是否容易追加额外的修复工艺				
是否具备修复有效性的监测能力				
是否具备异地处理、贮存和处置服务（如填埋场的容量）				
是否具备必要的设备和专家				
修复成本				
投资是否小				

运行维护成本是否经济				
是否容易被有关部门接受				
是否容易被周边社区接受				
注 1：打分表采用 10 分制，最高分为 10 分，最低分为 1 分。分值越高表明指标趋于肯定、程度高或效果好；反之表明指标趋于否定、程度低或效果差。 注 2：对于有子指标的指标，该指标的得分是每个子指标得分和的平均值。				

附录 D

(资料性附录)

污染场地土壤和地下水修复技术名称中英文对照

挖掘—填埋	excavation and landfill
固化/稳定化	solidification/stabilization
土壤气相抽提	soil vapor extraction
土壤淋洗	soil flushing
土壤洗脱	soil washing
热脱附	thermal desorption
焚烧	incineration
水泥窑协同处置	co-processing in cement kiln
化学氧化/还原	chemical oxidation/reduction
生物通风	bioventing
生物堆	biopiles
强化生物修复	enhanced bioremediation
植物修复	phytoremediation
泥浆相生物处理	slurry phase biological treatment
监控式自然衰减	monitored natural attenuation
抽出一处理	pump and treat
渗透性反应墙	permeable reactive barrier
化学氧化/还原	chemical oxidation/reduction
空气注入/生物曝气	air sparging/biosparging
强化生物修复	enhanced bioremediation
