

加油站场地绿色修复技术指南

Technical guidelines for green remediation on soil
contamination of land for fuel filling station

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，可作为石油烃污染场地绿色修复治理时修复技术选择与应用的参考技术资料。

本指南主要起草单位：江苏省环境科学研究院，生态环境部南京环境科学研究所，中科院南京土壤研究所，南京大学，东南大学，南京尚土生态环境有限公司，江苏大地益源环境修复有限公司、江苏艾斯蔻环境工程科技有限公司、上海永浚环保科技有限公司。

本指南主要起草人：王水、辜建强、王海鑫、李嘉明、吕正勇、邓邵波、周东美、郭红岩、杜延军、刘志阳、余冉、詹志凯。

一、总则

1. 内容

本指南提出了加油站污染场地常用绿色修复技术的评价体系、技术原理、特点和应用范围，供污染场地绿色修复时参考。

2. 适用范围

本标准适用于在营或废弃加油站地块污染绿色修复，包括土壤污染及地下水污染。其他石油烃污染的地块绿色修复可参照执行。

3. 引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

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 14848 地下水质量标准

HJ 25.1 场地环境调查技术导则

HJ 25.2 场地环境监测技术导则

HJ 25.3 污染场地风险评估技术导则

HJ 25.4 污染场地土壤修复技术导则

HJ 25.5 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则（试行）

HJ 25.6 污染地块地下水修复和风险管控技术导则

加油站地块土壤污染状况调查技术指南

污染场地修复技术应用指南

污染地块绿色可持续修复通则

4. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

加油站（fuel filling station）：具有储油设施，使用加油机为机动车加注汽油、柴油等车用燃油并可提供其他便利性服务的场所。

绿色修复 (Green Remediation): 在场地绿色修复框架内, 一切能够满足修复要求, 同时最小化环境修复足迹和最大化环境、社会和经济效益的修复技术。

土壤修复 (Soil remediation): 采用物理、化学或生物的方法固定、转移、吸收、降解或转化场地土壤中的污染物, 使其含量降低到可接受水平, 或将有毒有害的污染物转化为无害物质的过程。

生命周期 (Life cycle): 产品或服务系统中前后衔接的一系列阶段, 从自然界或自然资源中获取原材料, 直至最终处置。

5. 基本原则

安全性原则: 加油站涉及汽、柴油等易燃易爆和毒害物质时, 无论修复对象加油站处于在营或废弃等状态, 在加油站地块土壤修复施工现场作业过程中, 均应严格遵守加油站现场作业相关安全要求。

针对性原则: 区别于一般工业地块, 应针对加油站行业特征、污染特征等, 进行加油站地块土壤修复施工, 基于地块状态、污染特征及其再开发需求, 综合评价修复技术的绿色可持续性。

规范性原则: 应采用程序化、系统化、规范化的工作程序和施工工艺工法开展加油站地块绿色修复工作, 保证修复过程的科学性和修复效果的客观性。

可操作性原则: 选择的污染场地修复技术要合理可行, 针对加油站场地的污染性质、程度、范围以及对人体健康或生态环境造成的危害, 结合绿色可持续修复框架, 合理选择土壤及地下水修复技术。

二、绿色可持续修复理念

传统的污染场地修复理念主要基于人群健康保护、费用、效果、技术可行性和适用性等选择修复技术, 在去除场地污染的同时, 往往忽略了修复过程对场地及周边环境造成不利影响。针对传统修复理念的不足, 众多学者及业内工作者先后提出绿色修复、可持续修复等概念, 旨在综合平衡修复过程对环境、社会和经济的影响, 实现污染场地绿色可持续修复。

在场地绿色修复框架内, 绿色修复技术广义上是一种修复理念, 而非某类特殊的修复技术, 一切能够满足修复要求, 同时最小化环境修复足迹和最大化环境、社会和经济效益的修复技术均可被视为绿色修复技术。绿色修复技术主要为常规场地修复技术在满足绿色修复评

价指标上的提升和改良。在所有的常规修复技术中，微生物修复技术和植物修复技术以其环境友好性、生态恢复性以及经济性，成为绿色修复的标志性技术，同时也是使用量最大、最频繁的绿色修复技术。

三、加油站场地污染适用性绿色修复技术

加油站场地污染特征与其销售的石油商品密切相关，主要包括总石油烃（TPHs）、苯系物（BTEX）、多环芳烃类（PAHs）、甲基叔丁基醚（MTBE）、二溴化乙烯（EDB）和 1,2-二氯乙烷（DCA）等有机污染物为主。因此，综合绿色修复技术的成熟度和适用性，本指南整理筛选了 10 种有机污染绿色修复技术，主要按照技术的主导作用原理、适用性分析、绿色修复要求、常用工艺工法等进行概括介绍。此外，在本指南附录 A 中提供了各技术案例以供参考。

1. 生物堆技术（Biopiles）

1.1 技术适用性

适用介质：土壤、油泥。

可处理污染物类型：适用于大多数非卤代烃类有机物、部分低环的多环芳烃等有机污染物。其对石油烃类、低分子烷烃类化合物的降解修复效果最佳。

加油站污染适用性：1) 普遍适用于关停搬迁地块加油站污染土壤的修复；2) 对于在产加油站，需要协调好修复场地的占用以及土壤扰动问题。

应用限制条件：1) 不适用于易挥发性有机物的降解，对于易挥发性的石油烃（如汽油），大部分通常在通气过程中即被挥发去除，而不是被微生物分解；2) 不适用于有毒重金属污染、难降解有机污染物污染土壤的修复；3) 对于粘土等低渗透性污染土壤，需要加以物理化学等辅助手段提高降解效果；4) 不适用于过酸或过碱土壤。

1.2 技术介绍

技术原理：是将污染土壤开挖并堆积后通入空气，利用土壤中好氧微生物呼吸作用去除有机污染物的生物处理方法。一般除通入空气外，另需补充养分及水份，以及投加土著或外源的降解菌，以增强微生物活性从而达到分解去除有机污染物的效果。

绿色修复要求：1) 生物堆技术一般选用和强化培育本土菌种，可降低外来生物入侵风

险；2) 修复过程添加的营养剂可以是市政污泥、农作物茎秆、发酵残渣或者厩肥等，多数属于废弃物的二次利用，绿色、无害、可降解，对环境影响小，不产生二次污染，且有效降低了修复成本；3) 改善土壤生态环境质量，保障修复后土壤及场地生态安全。

修复周期及成本：生物堆技术的处理周期与污染物的生物可降解性相关，一般处理周期为3至18个月；其处理成本（包括通风系统、营养水分调配系统、在线监测系统）不仅与工程规模等因素相关，还与其所添加的营养药剂成分相关。根据国外相关场地的处理经验，处理成本约为130~260美元/m³；国内的工程应用成本约为180~630元/m³。

技术应用情况：国外生物堆技术作为应用广泛的生物修复方法之一，已纳入EPA绿色修复技术导则中，技术应用成熟。由于生物堆技术周期一般较长，降解结果很难达到修复目标值，国内大陆地区应用多处于示范研究阶段，实际市场应用不足，但美国及国内台湾地区已有多例用于处理石油烃污染土壤及油泥的工程案例。

1.3 常规工艺工法

系统构成和主要设备：生物堆包括地基、通风系统、水分添加系统、营养素添加系统、渗滤液收集系统、监测系统、覆盖物几大部分。地基具备承载污染土壤和机械设备的功能；同时应具备防渗功能，可以防止污染物向下扩散，兼具避雨保温的功能；还应具备一定坡度，以防止渗滤液汇集在地基表面。通风系统主要包括鼓风机和开孔的管路，一般分为空气注入和空气抽提两种形式，如果以抽提的形式进行强制通风，则还需要设计尾气处理系统以净化外排气体。水分添加系统和营养素添加系统主要包括泵和管路，主要功能为pH值调控、水分及营养物补充。渗滤液收集系统主要包括堆体周围的导沟、排水管道、排水泵和收集罐等，主要用于堆体下部汇集的渗滤液的排出。修复过程监测系统则用于堆体内部相关指标的数据采集。覆盖物为覆盖于堆体表面的膜材，主要功能是防止雨水冲刷、污染物随空气扩散、保温、保水等。

关键技术参数：影响生物堆技术修复效果的关键技术参数包括：有机物降解功能菌、pH、土壤含水率、土壤温度、土壤营养物质含量、土壤通气性、运行过程中堆体内氧气含量、污染物的挥发性和生物可降解性、污染物的初始浓度。

主要实施过程：1) 土壤预处理，对挖掘后的污染土壤进行相应的预处理，调节pH、含水率、添加相应营养元素等；2) 建堆，堆场依次铺设防渗材料、砾石导气层、抽气管网(与抽气动力机械连接)，形成生物堆堆体基础，将污染土壤堆置其上形成堆体；4) 在堆体顶部铺设水分、营养调配管网(与堆外的调配系统连接)以及进气口，采用防雨膜进行覆盖；5) 运行

维护和监测，并调整相应参数，提高降解率。

运行维护和监测：在生物堆运行期间应对生物堆体内土壤的 pH，水分含量，氧气浓度，降解细菌含量，营养物含量和目标污染物浓度进行监测。对于使用抽气法的生物堆或使用空气注入和尾气收集的生物堆，可以通过测量从生物堆中抽提的气体中浓度来了解生物降解条件。监测结果，对保证生物堆的最佳运行条件至关重要，可用于指导空气注入或抽提等参数调节，从而保证最近运行条件，以实现最快降解速率。

2. 原位注入生物强化技术 (In-situ Bioremediation)

2.1 技术适用性

适用介质：饱和带土壤及地下水。

可处理污染物类型：适用于石油烃类污染的场地，对于低分子量（小于 9 个 C）、高挥发性、高溶解度的脂肪烃和单环芳香烃效果最佳。

加油站污染适用性：1) 适用于 TPH < 50000 mg/kg，其他溶剂 < 7000 mg/kg，重金属 < 2500 mg/kg 的污染场地；2) 污染土层渗透系数 > 10^{-4} cm/s；3) 水温常年 (10~45 °C)、pH (6~8)、总菌数 > 1000CFU/g。

应用限制条件：1) 污染土层渗透系数 < 10^{-4} cm/s；2) 污染浓度 TPH > 5000 mg/kg、低溶解性物质；3) 土壤 NP 等营养元素严重缺乏的污染场地。

2.2 技术介绍

技术原理：包括原位生物强化技术 (In-situ Bioaugmentation) 与原位生物刺激技术 (In-situ Biostimulation)，原位生物刺激技术是将足够的电子受体（如氧气、硝酸盐等）、营养元素 (N、P 等)、碳源等外源生长因子投加至污染区域，以刺激具有降解功能的土著功能菌群的生长繁殖，必要条件下还可以使用原位生物强化技术进一步提升修复效率，即经注入并将人工驯化的土著微生物或外源微生物（考虑生物安全性，慎重添加经基因改造工程的强化微生物菌种）等注入地下饱和带，同时修复土壤和地下水的技术。

绿色修复特征：1) 通过投加限制性营养素和电子受体，刺激增强土著细菌的活性以降解污染物，以土著菌修复为主，安全环保；2) 尽量采用天然材料或工农业废弃物作为营养底物，绿色、无害，不产生二次污染，并可降低成本；3) 尽量采用绿色环保材料作为载体材料；4) 可定期监测修复微生物土壤定殖和扩散情况，保障修复效率，降低生态风险；5) 可以以好氧、厌氧、兼性以及共代谢等多种作用机理实施，对石油烃类污染物效果显著。

修复周期及成本：原位注入生物强化技术的处理周期与污染物的生物可降解性、修复区功能微生物赋存情况、修复区地下条件等多种因素相关，一般处理周期较长，数年乃至数十年；其处理成本相对其他修复治理技术较低。

技术应用情况：原位注入生物强化技术作为应用广泛的生物修复方法之一，已纳入 EPA 绿色修复技术导则中，技术应用成熟。由于该技术周期一般较长，国内大陆地区应用多处于示范研究阶段，实际市场应用不足，但国内台湾地区已有多例用于处理石油烃污染土壤及地下水的工程案例。

2.3 常规工艺工法

系统构成和主要设备：系统主要由药剂制备/储存系统、注射井/输气管道、注入系统、监测系统等组成。溶液型药剂采用注射井注入，气态药剂（如氧气）采用输气管路注入。可通过额外布设抽提井形成抽-注循环系统提升药剂扩散效率。

关键技术参数：影响修复效果的因素包括：土壤渗透性、土壤微生物群落状态及生存环境质量等。1) 土壤渗透性：土壤渗透性会影响药剂的扩散效果，渗透性越低，药剂扩散效果越差；2) 土壤生物群落状态：场地土壤中关键污染降解微生物群的存在及活性直接决定了生物技术药剂的选择和应用效果；3) 土壤微生物生存环境质量：土壤质地、土壤温度、pH、营养成分、盐度、含水量、氧气和土壤中的电子受体等均会影响微生物降解污染物的效率。

主要实施过程：1) 注射井布设：根据现场中试试验确定的注入井位置和数量，以及明确抽出井的布设需求；2) 药剂注入：基于小试研究选择适用的药剂，根据中试试验确定注入浓度、注入量和注入速率，实时监测药剂注入过程中的压力变化；3) 模型预测：根据小试及中试实验确定的工艺参数，结合具体场地的现场水文地质情况针对性的进行技术的应用的效果预测；4) 过程监测：药剂注射完成后修复养护过程中，需定期监测土壤及地下水中污染物浓度变化趋势和微生物活性，在必要的情况下，如微生物活性过低或污染物浓度反弹，可通过喷洒或注射的方式补加药剂，以保障修复效果；4) 修复后验收监测：修复达标后定期监测土壤及地下水中污染物浓度变化和微生物活性，当污染物浓度未出现反弹且微生物活性回落至修复前水平后可停止监测。

运行维护和监测：运行过程中需对注入泵、抽提泵、空压机、混合罐和管道阀门等进行相应的运行维护。运行过程中需定期对地下水水位、pH、导电系数、温度等；抽出及注入速率、电子受体（如氧气、硝酸盐等）含量、营养物质含量、污染物浓度及微生物数量等指标

进行监测。

3. 监控自然衰减技术（Monitored Natural Attenuation）

3.1 技术适用性

适用介质：土壤及地下水。

可处理污染物类型：适用于处理土壤和地下水中的碳氢化合物（如 BTEX（苯、甲苯、乙苯、二甲苯）、石油烃、多环芳烃、MTBE（甲基叔丁基醚）、氯代烃、硝基芳香烃、重金属类、非金属类（砷、硒）、含氧阴离子（如硝酸盐、过氯酸）、放射性核素等。

加油站污染适用性：1) 适用于污染源得到去除或控制后的长期扩散地下水污染羽自然去除；2) 适用于饱和带和包气带低浓度石油类污染修复；3) 可在不影响正常作业的条件下对在产加油站场地污染进行监控削减。4) 适用于作为主动修复技术的后续措施以防止修复后污染物反弹。

应用限制条件：1) 不适用于复杂的、污染程度较高的场地；2) 不适用于污染羽迁移扩散可能性较高且对下游敏感受体具有潜在风险的场地；3) 不适用于急于开发的污染土壤。4) 受到污染特征、水文地质条件、人为干扰因素、受体位置等多种因素影响，需要预先开展场地特征调查与技术可行性评估。

3.2 技术介绍

技术原理：监控自然衰减是通过实施有计划的监控策略，依据场地自然发生的物理、化学及生物作用，包含生物降解、扩散、吸附、稀释、挥发、放射性衰减以及化学性或生物性稳定等，使得地下水和土壤中污染物的数量、毒性、移动性降低到风险可接受水平。

绿色修复特征：1) 根据污染物的特征和扩散趋势,采用相应的技术措施评价、减缓或控制目标敏感点的风险的监控自然衰减技术是国际较为认同的最环保、最经济、最合理的解决土壤和地下水污染问题的途径之一；2) 监控自然衰减可以单独或与其他主动修复方式联用。

修复周期及成本：处理周期为 12-48 个月。监控自然衰减技术可以利用较低的成本实现污染物的净化，在我国场地污染形势严峻并缺乏大规模修复资金的背景下，比工程修复技术具有明显的成本优势，国外场地修复成本 14~44 万美元；国内成本 9~127 万美元。

技术应用情况：1999 年，EPA 发布有关于有机物和无机物的自然衰减技术文档，有机物以石油烃和氯化溶剂为主，无机物主要研究金属和放射性物质。从 2007 年开始 EPA 主

要关注无机污染物的监控自然衰减。2000年起国内逐渐开始进行污染场地调查与治理方面的研究工作，相对于发达国家起步较晚。2015年，由环境保护部发布的《污染场地修复技术目录（第一批）》将自然衰减纳入污染场地修复技术名录。2018年，由生态环境部发布的《污染场地地下水修复技术导则》中的污染场地修复技术初步筛选明确地提出了监控自然衰减。监控自然衰减在污染场地的应用和研究在我国处于起步阶段，研究与工程案例应用较少，自然衰减过程、衰减机制、可行性评估以及监控体系仍在发展当中。

3.3 常规工艺工法

系统构成和主要设备：监控自然衰减系统由监测井网系统、监测计划、自然衰减性能评估系统和紧急备用方案四部分组成。监测井网系统能够确定地下水中污染物在纵向和垂向的分布范围，确定污染羽是否呈现稳定、缩小或扩大状态，确定自然衰减速率等。监测计划主要包括监测指标与监测频率。监控自然衰减效果评估系统评估监测分析数据结果，判定自然衰减过程是否如预期方向进行，并评估自然衰减对污染改善的成效。紧急备用方案是当监控自然衰减修复法无法达到预期目标，或是当场地内污染有恶化情形，污染羽有持续扩散的趋势时，采用其它土壤或地下水污染修复工程，而不是仅以原有的自然衰减机制来进行场地的修复工作。

关键技术参数：1) 自然衰减的机制有生物性和非生物性作用，需要根据污染物的特性评估自然衰减是否存在；不同污染物的自然衰减机制和评估所需参数不同；2) 开展监控自然衰减修复技术时，需确认场地内的污染源、高污染核心区域、污染羽范围及邻近可能的受体所在位置，包含平行及垂直地下水流向上任何可能的受体暴露点，并确认这些潜在受体与污染羽之间的距离；3) 在确认场地有足够的条件发生自然衰减后，须利用水力坡度、渗透系数、土壤质地和孔隙率等参数，模拟地下水的水流及溶质运移模型，估计污染羽的变化与移动趋势；4) 多数常见的污染物的生物衰减是依据一阶反应进行，在此条件下最佳的方式是沿着污染羽中心线（沿着平行地下水流方向），在距离污染源不同的点位进行采样分析，以获取不同时间及不同距离的污染物浓度来计算一阶反应常数。若无法获取当前数据也可以参考文献报告数据获取污染物衰减速率。

主要实施过程：1) 初步评价监控自然衰减的可行性；2) 构建地下水监测系统；3) 制定监测计划；4) 详细评价监控自然衰减的效果；进一步评估监控自然衰减是否有效；5) 制定应急方案。在监控过程中，在合理时间框架下，若发现监控自然衰减无效时，则需要执行应急方案。

运行维护和监测：为了解土壤和地下水中污染物的去除速率及微生物的生长环境，运行过程中需定期对电子受体含量、含水率、营养物质含量、污染物浓度、微生物数量与群落结构等指标进行监测；需要对运行的监控设备，如含水率测定仪、氧含量测量仪等，进行定期校准维护。

4. 生物通风技术（Bioventing）

4.1 技术适用性

适用介质：包气带污染土壤。

可处理污染物类型：适用于易生物降解石油烃。

加油站污染适用性：加油站场地包气带污染修复。

应用限制条件：不适合难降解有机物污染土壤的修复，不宜用于粘土等渗透系数较小的污染土壤修复。

4.2 技术介绍

技术原理：生物通风法是在土壤气相抽提法（SVE）基础上发展起来的，实际上是一种生物增强式 SVE，其主要目标是增强氧气的传送和使用效率来促进生物降解；同时利用土壤中的压力梯度促使挥发性有机物及降解产物流向抽气井，被抽提去除。

绿色修复特征：1) 选用绿色能源供给通风系统；2) 对于渗透性低的土壤，可先通过土层压裂的方式，辅助通风效率，降低能耗。

修复周期及成本：生物通风技术的处理周期与污染物的生物可降解性相关，一般处理周期为 6-24 月。其处理成本（包括通风系统、营养水分调配系统、在线监测系统）与工程规模等因素相关，根据国外相关场地的处理经验，处理成本约为 13-27 美元/m³。

技术应用情况：生物通风技术可以修复的污染物范围广泛，修复成本相对低廉，尤其对修复成品油污染土壤非常有效，包括汽油、喷气式燃料油、煤油和柴油等的修复。该技术在国内外实际修复或工程示范极少，尚处于中试阶段，缺乏工程应用经验和范例。

4.3 常规工艺工法

系统构成和主要设备：生物通风系统主要由抽气系统、抽提井、输气系统、营养水分调配系统、注射井、尾气处理系统、在线监测系统及配套控制系统等组成。主要设备包括输气系统（鼓风机、输气管网等）、抽气系统（真空泵、抽气管网、气水分离罐、压力表、流量

计、抽气风机)、营养水分调配系统(包括营养水分添加管网、添加泵、营养水分存储罐等)、在线监测系统及配套控制系统、尾气处理系统(除尘器、活性炭吸附塔)等。

关键技术参数: 1)土壤理化性质因素,土壤透气率 ≥ 0.1 达西,15-20%的土壤含水率,土壤中C:N:P的比例应维持在100:5-10:1;2)土壤中污染物浓度水平应适中,且分子结构应较为简单,分子量较小;3)土著微生物的数量应不低于 10^5 数量级。

主要实施过程: 1)需要修复的污染土壤中设置注射井及抽提井,安装鼓风机/真空泵,将空气从注射井注入土壤中,从抽提井抽出;2)在抽提过程中注入的空气及营养物质有助于提高微生物活性,降解不易挥发的有机污染物(如原油中沸点高、分子量大的组分);3)定期采集土壤样品对目标污染物的浓度进行分析,掌握污染物的去除速率。

运行维护和监测: 1)运行过程中需对鼓风机、真空泵、管道阀门进行相应的运行维护;2)为了解土壤中污染物的去除速率及微生物的生长环境,运行过程中需定期对土壤氧气含量、含水率、营养物质含量、土壤中污染物浓度、土壤中微生物数量等指标进行监测;3)为避免二次污染,应对尾气处理设施的效果进行定期监测,以便及时采取相应的应对措施。

5. 化学氧化技术 (Chemical Oxidation Technology)

5.1 技术适用性

适用介质: 适用于污染土壤或地下水

可处理污染物类型: 化学氧化可处理石油烃、BTEX(苯、甲苯、乙苯、二甲苯)、酚类、MTBE(甲基叔丁基醚)、含氯有机溶剂、多环芳烃、农药等大部分有机物。

加油站污染适用性: 1)化学反应速度快,修复时间短(几周或几个月);2)反应强度大,对污染物性质和浓度不敏感,可用于去除地下泄露高浓度石油烃污染物;3)可与其它方法如微生物修复或植物修复联合使用,降低污染二次反弹风险,提升修复后场地生态环境质量。

应用限制条件: 1)石油污染土壤中存在腐殖酸和还原性金属等物质,会消耗大量氧化剂;2)在渗透性较差的石油污染场地(如粘土),药剂传输速率可能较慢,修复存在污染反弹风险;3)石油烃污染物水溶性差,应考虑必要的增溶、脱附方式。

5.2 技术介绍

技术原理: 化学氧化技术是向污染土壤添加氧化剂,通过氧化作用,使土壤中的污染物转化为无毒或相对毒性较小的物质。常见的氧化剂包括高锰酸盐、过氧化氢、芬顿试剂、过

硫酸盐和臭氧。

绿色修复特征：1) 选用低毒、反应无副产物或少副产物的氧化剂，降低氧化剂本身带来的二次污染风险和对土壤环境的破坏；2) 选用能耗低或绿色能源的设备和机械，提升能源利用效率；3) 根据场地污染程度，精细化控制氧化剂用量，提高药剂使用效率，降低药剂对土壤环境产生的不利影响。

修复周期及成本：异位化学氧化技术的处理周期与污染物初始浓度、修复药剂与目标污染物反应机理有关。一般化学氧化修复的周期较短，可以在数周到数月完成。处理成本，国外修复成本约为 200~660 美元/m³；国内一般介于 500~1500 元/m³ 之间。原位化学氧化技术处理周期与污染物特性、污染土壤及地下水的埋深和分布范围极为相关。该技术清理污染源区的速度相对较快，通常需要 3-6 月。修复地下水污染羽流区域通常需要更长时间。处理成本主要包括注入井/监测井的建造费用、药剂费用、样品检测费用以及其他配套费用。美国使用该技术修复地下水处理成本约为 123 美元/m³。

技术应用情况：化学氧化技术反应周期短、修复效果可靠，在国外已经形成了较完善的技术体系，应用广泛。该技术在国内外发展迅速，已成为有机污染场地修复的主要修复技术之一，且异位修复多于原位修复，部分化学氧化技术应用案例如表 1 所示。

5.3 常规工艺工法（异位修复）

系统构成和主要设备：1) 预处理系统设备包括破碎筛分铲斗、挖掘机和推土机等，对挖掘的污染土壤破碎、筛分或添加土壤改良剂等；2) 药剂混合系统设备包括行走式土壤改良机、浅层土壤搅拌机等，将污染土壤与药剂进行充分混合搅拌，污染土壤和药剂在反应池或反应场内通过搅拌设备混合均匀；3) 防渗系统为反应池或是具有抗渗能力的反应场，能防止外渗和防止搅拌设备对其损坏，通常采用抗渗混凝土结构或防渗膜结构加保护层。

关键技术参数：1) 药剂投加量和投加比，氧化反应中向污染土壤投加氧化药剂，需要考虑土壤中还原性污染物浓度和土壤活性还原性物质总量本底值。根据药剂与污染物反应的化学方程式计算理论上的药剂投加比，并通过实验结果予以校正；2) 氧化还原条件，氧化还原电位一般在 -100 mV 以下，可通过补充投加药剂、改变土壤含水率、改变土壤与空气接触面积等进行调节；3) 理化性质，土壤含水率宜控制在土壤饱和持水能力的 90% 以上，pH 范围一般介于 4.0~9.0 之间，根据土壤初始 pH 值和药剂特性加入硫酸亚铁、硫磺粉、熟石灰、草木灰及缓冲盐类等调节土壤 pH 值。

主要实施过程：1) 污染土壤挖掘、破碎、筛分；2) 药剂喷洒；3) 将修复药剂与污染

土壤充分混合；4) 监测和调节污染土壤反应条件，直至目标污染物浓度满足修复目标要求；
5) 按设计要求处置通过验收的修复土壤。

运行维护和监测：异位化学氧化过程中，应监测目标污染物浓度变化，判断反应效果。通过监测残余药剂含量、中间产物、氧化还原电位、pH 及含水率等判断反应条件并及时调节，保证反应效果。工程维护工作较少，如采用碱激活过硫酸盐氧化时需要维持一定的 pH 值。根据氧化剂的性质，按照规定进行存储和使用，避免出现危险。

5.3 常规工艺工法（原位修复）

系统构成和主要设备：包括药剂制备/储存系统、药剂注入井（孔）、药剂注入系统（注入和搅拌）和监测系统等。药剂通过注入井注入到污染区，注入井的数量和深度根据污染区的大小和污染程度进行设计。在注入井的周边及污染区的外围设计监测井，在修复过程中对污染区的污染物和药剂的分布、运移及修复效果进行监测。通过设置抽水井促进地下水循环，有助于快速处理污染范围较大的区域。

关键技术参数：1) 药剂投加量：由污染物药剂消耗量、土壤药剂消耗量、还原性金属的药剂消耗量等因素决定，投加过程需要控制药剂注入速率，避免发生过热现象；2) 污染物类型不同所选用药剂不同，非水相液(NAPL)反应会限制在氧化剂溶液/非水相液体(NAPL)界面处，轻质非水相液体(LNAPL)层过厚，建议选用其它技术清除；3) 土壤性质，均质土壤和高渗透性土壤有利于药剂均匀分布，使注入的药剂更易接触到全部处理区域，由于药剂难以穿透低渗透性土壤，导致污染物浓度反弹，因此可采用长效药剂（如高锰酸盐、过硫酸盐）来减轻反弹；4) 地下环境条件，若存在地下基础设施（如电缆、管道等），则需谨慎使用该技术，若地下水位过低，则系统很难达到注入所需的压力，但当地面有封盖时，地下水位较低也可以进行药剂投加；5) pH 值和缓冲条件，pH 和缓冲条件会影响药剂的活性，在适宜 pH 条件下药剂才能发挥最佳反应效果。

主要实施过程：1) 根据现场中试试验确定的注入井位置和数量，建立原位化学氧化处理系统；2) 选择合适的药剂，确定注入浓度、注入量和注入速率，实时监测药剂注入过程中的温度和压力的变化；3) 对污染土壤和地下水原位化学氧化修复过程和修复后的结果进行监测，如果污染物浓度出现反弹，可能需要进行药剂补充注入。

运行维护和监测：运行过程中需对药剂注入系统以及注入井和监测井进行相应的运行维护。修复过程监测通常在药剂注射前、注射中和注射后很短时间内进行，监测参数包括药剂浓度、温度和压力等。效果监测的主要目的是确认污染物的去除、释放和迁移情况，监测

参数包括污染物浓度、副产物浓度、金属浓度、pH、氧化还原电位和溶解氧。

6. 植物修复技术（Phytoremediation Technology）

6.1 技术适用性

适用介质：污染土壤：适用于修复周期较长，生态环境脆弱的污染地块，不适用于复杂污染或深层污染地块。

可处理污染物类型：重金属（如砷、镉、铅、镍、铜、锌、钴、锰、铬、汞等）以及特定的有机污染物（如石油烃、五氯酚、多环芳烃等）。

加油站污染适用性：1) 修复成本低，二次污染易于控制，适用于富集和降解加油站场地浅层低浓度面源石油污染；2) 适用于废弃加油站污染场地修复和生态恢复；3) 常与其他原位修复技术（例如可渗透反应墙技术）组合应用，以实现加油站场地石油污染土壤-地下水一体化修复。

应用限制条件：1) 植物修复受到污染场地气候和地质条件的限制，例如温度、海拔高度、土壤类型等，不适用于加油站场地地下深层污染或高浓度污染修复；2) 如果使用富集类植物通过吸收去除加油站污染场地的石油污染物，则对收割后的植物需谨慎处理，以防止二次污染；3) 植物修复耗时长，不适用于加油站场地的突发应急污染修复。

6.2 技术介绍

技术原理：利用植物本身进行提取、根际滤除、挥发和固定等方式移除、转变和破坏土壤中的污染物质，或通过植物根际效应刺激土壤污染自净过程，最终使污染土壤恢复其正常功能。目前国内外对植物修复技术的研究和推广应用多数侧重于重金属元素，因此狭义的植物修复技术主要指利用植物清除污染土壤中的重金属。

绿色修复特征：1) 植物修复可吸收温室气体，固定储存空气中的碳；2) 植物修复有助于土壤生态系统的改善和恢复，具有长期效应。

修复周期及成本：该技术处理周期较长，一般需 3-8 年。其处理成本与工程规模等因素相关。在美国应用的成本约为 25-100 美元/吨，国内的工程应用成本约为 100-400 元/吨。

技术应用情况：植物修复技术修复成本相对低廉，相关配套设施已能够成套化生产制造，在国外已广泛应用于重金属、放射性核素、卤代烃、汽油、石油烃等污染土壤的修复，技术相对比较成熟。我国对植物修复技术实验研究起步较早，尤其是开展了大量植物富集重金属相关研究，在污染超富集植物筛选和根际降解效应等方面拥有丰富的技术储备。本技术在国

内发展已比较成熟，已广泛用于农用地和矿山的重金属污染土壤修复。

6.3 常规工艺工法

系统构成和主要设备：主要由植物育苗、植物种植、管理与刈割系统、处理处置系统与再利用系统组成。富集植物育苗设施、种植所需的农业机具（翻耕设备、灌溉设备、施肥器械）、焚烧并回收重金属所需的焚烧炉、尾气处理设备、重金属回收设备等。

关键技术参数：关键技术参数包括：污染物类型、污染物初始浓度、修复植物选择、土壤 pH 值、土壤通气性、土壤养分含量、土壤含水率、气温条件、植物对重金属的年富集率及生物量、尾气处理系统污染物排放浓度、重金属提取效率等。1) 污染物初始浓度：采用该技术修复时，土壤中污染物的初始浓度不能过高，必要时采用清洁土或低浓度污染土对其进行稀释，否则修复植物难以生存，处理效果受到影响。2) 土壤理化性质：土壤自身的理化性质，如 pH、养分含量、含水率、通气性等，会影响修复植物生长状态和修复效果，可通过土壤改良或筛选合适的植物种类以消除不利影响。3) 自然环境条件：污染场地所在地的环境条件，如降雨、气温、海拔等，同样会影响修复植物生长状态和修复效果，可通过选用本地植物种类或后期管理等方式降低环境带来的不利影响。4) 修复植物选择：根据修复目的的不同选用合适的植物种类，对于富集型修复模式，可针对修复污染因子选用相应的高生物量的超富集植物；对于刺激降解或稳定化修复模式，可选用根际发达且耐受污染的植物种类；对于较深层的土壤污染修复，多选用木本类植物。

主要实施过程：1) 对污染土壤进行调查与评价（包括污染土壤中重金属的含量与分布、土壤 pH 值、土壤有机质及养分含量、土壤含水率、土壤孔隙度、土壤颗粒均匀性等），综合评价植物修复的可行性；2) 提出修复目标，制定修复计划，明确修复植物选择；3) 修复植物育苗；4) 污染场地田间整理、植物栽种、管理与刈割，管理时需根据土壤具体情况进行灌溉、施肥和添加金属释放剂；5) 对场地污染修复效果及植物富集情况进行长期跟踪监测；6) 如植物富集的污染物存在环境风险，需对刈割的植物进行安全焚烧。

运行维护和监测：该技术田间管理相对简单，仅需对植物生长过程进行相应的灌溉和施肥等农业措施。为掌握污染土壤中污染物的年去除率，运行过程中需定期对污染土壤和植物中污染物浓度等相关指标进行监测。

7. 热脱附技术 (Thermal Desorption)

7.1 技术适用性

适用介质：污染土壤和地下水。

可处理污染物类型：挥发及半挥发性有机污染物（如石油烃、农药、多环芳烃、多氯联苯）和汞。

加油站污染适用性：1) 热脱附技术可以有效去除石油污染中挥发性或半挥发性有机污染物，适宜用于石油烃污染场地修复；2) 热脱附过程涉及加热升温，在加油站污染场地修复中，尤其是在产加油站场地，要注意高温引起安全风险。

应用限制条件：1) 热脱附技术对污染场地本身环境有一定的要求，在异质性和低渗透率石油污染场地会影响原位热脱附修复效果；2) 不适用于无机物污染土壤（汞除外），也不适用于腐蚀性有机物、活性氧化剂和还原剂含量较高的土壤。

7.2 技术介绍

技术原理：热脱附技术是指通过直接或间接热交换，将土壤中的有机污染物加热到足够的温度，以使有机污染物从污染介质上得以挥发或分离，进入气体处理系统的过程。热脱附在修复过程中主要通过控制热脱附系统的温度和污染土壤停留时间有选择的使污染物得以挥发，通常不发生氧化、分解等化学反应。

绿色修复特征：1) 使用清洁可再生能源如太阳能、风能代替化石燃料提供热脱附过程所需能耗，使得修复过程可持续化，减少能源消耗；2) 热脱附过程增强水资源循环利用，减少水资源消耗；3) 进行热脱附前会建立隔绝密闭空间收集脱附过程中的有害气体，并进行高效废气处理达标排放，不会影响空气质量。

修复周期及成本：异位热脱附处理周期可能为 1-6 个月。通常直接热脱附设备处理能力较大，一般 20-160 吨/小时，间接热脱附的处理能力相对较小，一般 3-20 吨/小时。国外对于中小型场地处理成本约为 100-300 美元/m³，对于大型场地处理成本约为 50 美元/m³。国内污染土壤热脱附处置费用约为 600-2000 元/吨。原位热脱附技术主要依靠温度来去除有机污染物，修复费用大约为 1000-2000 元/m³，如果土壤含水率较低，修复价格大约为 1000 元/m³，如果土壤含水率高达 30%-40%，修复价格会达到 2000 元/m³。

技术应用情况：热脱附技术在国外已广泛应用于工程实践，技术发展较为成熟。该技术在我国虽然起步较晚，但近年来国内相关的研究工作与工程应用发展迅速。原位热脱附技术

在国外较多应用于修复小规模污染场地。国内原位热脱附技术起步较晚，近几年才开始运用到污染地块的治理中。

7.3 常规工艺工法（异位修复）

系统构成和主要设备：异位热脱附系统包括进料系统、脱附系统和尾气处理系统。进料系统设备包括筛分机、破碎机、振动筛、链板输送机、传送带、除铁器等；脱附系统包括回转干燥设备或是热螺旋推进设备；尾气处理系统包括旋风除尘器、二燃室、冷却塔、冷凝器、布袋除尘器、淋洗塔、超滤设备等。

关键技术参数：1) 土壤含水率宜低于 25%；最大土壤粒径不应超过 5 cm；2) 排气中有机物浓度要低于爆炸下限 25%，土壤有机物含量高于 1%-3%不适用直接热脱附，可采用间接热脱附处理；3) 一般情况下，直接热脱附处理土壤的温度范围为 150-650℃，间接热脱附处理土壤温度为 120-530℃；4) 废气燃烧破坏时需要特别的急冷装置，使高温气体的温度迅速降低至 200℃，防止二噁英的生成。

主要实施过程：1) 场地土壤挖掘，需注意地下水位较高场地要进行降水使土壤湿度符合处理要求；2) 对挖掘的土壤进行筛分、调节土壤含水率和磁选；3) 根据目标污染物的特性，调节合适的运行参数使污染物与土壤分离；4) 通过尾气处理系统对收集的脱附气体进行处理后达标排放。

运行维护和监测：重点维护炉体、燃烧腔体、烟气管道、急冷和中和装置、布袋除尘器及引风机等主要设备。1) 大修周期应按系统设备的实际运行时间确定，一般大修周期不应超过 1 年；2) 一般采用 PLC 系统（程序逻辑控制系统）对污染土壤进出料和热脱附过程等进行控制，如进料速率、供油速度、加热温度、氧气含量、CO₂ 浓度及停留时间等。

7.4 常规工艺工法（原位修复）

系统构成和主要设备：包括主体工程、辅助工程和配套设施。主体工程包括加热单元、抽提单元、废水废气处理单元、监测单元及控制单元等。辅助工程包括供能单元、阻隔、给排水和消防等。配套设施包括办公室、值班室、厂区围挡、道路等。

关键技术参数：1) 土壤含水率宜低于 25%；2) 排气中有机物浓度要低于爆炸下限 25%，土壤有机物含量高于 1%-3%不适用直接热脱附，可采用间接热脱附处理；3) 一般情况下，直接热脱附处理土壤的温度范围为 150-650℃，间接热脱附处理土壤温度为 120-530℃；4) 废气燃烧破坏时需要特别的急冷装置，使高温气体的温度迅速降低至 200℃，防止二噁英的生成。

主要实施过程：1) 在污染场地设置加热井或电极井，对土壤和地下水加热，促进污染物挥发或溶解；2) 利用真空抽提井对气相/液相的污染物进行抽提；3) 通过冷凝分离对提取出的气体和液体进行无害化处理后达标排放。

运行维护和监测：1) 监测加热区地下地上温度、压力、目标污染物浓度和废水废气排放口污染物浓度等；2) 可通过热电偶、光纤分布式温度传感器以及电阻层析成像技术等方式对地下温度连续监测；3) 日常监测排放的废气，监测频次不低于每日 2 次；4) 定期对尾气排放口监测，监测频次不低于每月 1 次；5) 监测现场运行状况，监测指标包括目标污染物及可能产生的中间产物；6) 采用钻孔方式对修复区域的土壤进行热采样；7) 从出水管出口直接采集水样，不锈钢换热盘管长度以出水温度不超过环境温度为宜。

8. 阻隔技术 (Barrier Technology)

8.1 技术适用性

适用介质：污染土壤或地下水。

可处理污染物类型：碳氢化合物（如 BTEX（苯、甲苯、乙苯、二甲苯）、石油烃）、氯代脂肪烃、氯代芳香烃、金属、非金属、硝酸盐、硫酸盐、放射性物质等。

加油站污染适用性：1) 物理阻隔在实际工程中会直接切断与人体的接触，因此在突发事件或污染物较重的场地中，应用较为广泛，适宜处理场地石油突发应急污染以及隔离地下高浓度的石油污染；2) 通常与污染削减型修复方式并行使用。

应用限制条件：1) 不宜用于污染物水溶性强、高渗透性、隔水层顶板过深的地下水污染区；2) 不适用于地质活动频繁的场地。

8.2 技术介绍

技术原理：阻隔技术是利用不同的材料在污染边界处设置地下垂直或水平的墙体，利用墙体本身的低渗透特性或刺激墙体周边微生物降解效应，从而达到隔绝污染区域和非污染区域，以防止污染物扩散和对人体健康造成影响的技术手段。阻隔技术包括水平阻隔和垂直阻隔两大类。

绿色修复特征：1) 严选绿色、环保、低碳型材料；2) 利用微生物阻隔污染对环境影响小，同时可改善土壤和地下水生态系统，具有长期效应。

修复周期及成本：水平阻隔技术处理周期与工程规模、污染物类别、污染程度密切相关，相比其他修复技术，其处理周期较短。通常水平阻隔技术成本为 500~800 元/m²。垂直阻隔

技术中墙体材料尤为重要，墙体材料的寿命与材料的类型、工程规模、污染物类型和浓度等密切相关，垂直阻隔墙体材料的成本为 500~4000 元/吨。

技术应用情况：国外污染土壤阻隔技术已成功用于近千个工程，技术发展已经相对比较成熟。我国对阻隔技术的应用最早是在 2007 年，以阻隔方式处理重金属污染土壤；2010 年，某工程采用 HDPE 膜作为主要阻隔材料，阻挡污染物随地下水的水平迁移，保护周围土壤和地下水。我国在污染阻隔技术方面取得了一定的技术成果，但未得到广泛应用。

8.3 常规工艺工法（水平阻隔）

系统构成和主要设备：阻隔技术系统包括设计、施工和监测维护等内容。主要设备包括高压旋喷桩机、双轮铣槽机、HDPE 土工膜、土壤改良机、土壤压实机、挖掘机、装载机、推土机等。

关键技术参数：1) 阻隔材料要具有极高的抗腐蚀性和抗老化性，能够抵抗强紫外线，无毒无害，渗透系数小于 10^{-7} cm/s，确保阻隔系统连续、均匀、无渗漏；2) 阻隔系统深度：为避免减弱阻隔效果，通常要阻隔到不透水层或弱透水层。

主要实施过程：1) 确定污染阻隔区域的边界范围；2) 在污染阻隔区域四周设置由阻隔材料构成的阻隔系统；3) 对污染区域表层进行覆盖；4) 定期对污染阻隔区域进行监测，防止渗漏污染。

运行维护和监测：定期维护阻隔体的完整性，包括：检查 HDPE 膜是否破损、确认覆盖粘土层是否有大型植物生长、监测上下游地下水水质情况等。垂直阻隔技术主要是确保墙体材料的有效性，包括监测上下游地下水污染物浓度变化、墙体材料的消耗量等。

8.3 常规工艺工法（垂直阻隔）

系统构成和主要设备：阻隔技术系统包括设计、施工和监测维护等内容。主要设备包括 HDPE 土工膜、土壤改良机、土壤压实机、挖掘机、装载机、推土机等。

关键技术参数：1) 施工所需的深度；2) 可接受的完整性程度；3) 阻隔系统与当地环境的兼容性；4) 污染物迁移的动力和趋势；5) 阻隔技术阻止污染物迁移扩散的能力；6) 阻隔系统的设计寿命。

主要实施过程：1) 对安装阻隔系统区域进行清理；2) 确定施工所需的深度和范围；3) 确定阻隔墙体材料的种类和用量；4) 开挖和回填阻隔墙体材料；5) 定期进行监测。

运行维护和监测：监测主要是沿着阻隔区域地下水水流方向分别在阻隔区域的上游、下游和阻隔区域内部设置监测井，通过比较阻隔区域内地下水中目标污染物的含量变化，及时

了解阻隔系统对周围环境的影响。

9. 可渗透反应墙技术 (Permeable Reactive Barrier)

9.1 技术适用性

适用介质: 污染地下水

可处理污染物类型: 重金属 (如铅、铬、锰、镉、砷、锌、铜、镍和钴等)、无机阴离子 (如硝酸根、磷酸根、硫酸根、溴酸根和氯酸根等)、有机污染物 (如石油烃、氯代硝基苯、氯代烃、多环芳烃、苯、甲苯、乙苯、二甲苯)、放射性物质等。

加油站污染适用性: 1) 工程设施简单, 不需添加任何外加动力, 适宜在产加油站场地的修复; 2) 可与其他修复技术 (例如植物修复技术) 组合应用, 实现加油站场地石油污染土壤-地下水一体化修复; 3) 活性反应介质消耗速率很慢, 能长期有效发挥修复作用, 适宜修复长期扩散的地下石油烃污染羽。

应用限制条件: 1) 不适用于石油烃污染的地下承压含水层; 2) 不宜用于加油站场地含水层深度超过 10 m 的非承压含水层; 3) 对可渗透反应墙中沉淀和反应介质的维护、更换、监测要求较高; 4) 设施安装在地下更换很麻烦, 且更换过程可能会导致二次污染。

9.2 技术介绍

技术原理: 在地下水流方向上填充活性材料, 利用天然地下水力梯度使污染地下水优先通过渗透系数大于周围岩土体的透水格栅并与填充在内的活性反应介质相接触, 通过沉淀、吸附、氧化还原、生物降解等反应过程去除地下水中的污染物, 以达到阻隔和修复污染羽的目的, 从而实现地下水的净化。

绿色修复特征: 1) 绿色、环保、无二次污染活性介质材料; 2) 利用化学和生物复合作用去除地下水中目标污染物, 可改善地下水生态系统, 且具有长期效应; 3) 经济成本低, 不需添加任何外加动力, 节约能耗。

修复周期及成本: PRB 的使用寿命较长, 一般需要数年。PRB 的处理成本与其类型和工程规模等因素相关, 处理地下水的成本介于 1.5-37.0 美元/m³。

技术应用情况: PRB 技术在欧美等发达国家已广泛应用, 并进行了大量的试验研究和工程实践, 然而我国 PRB 技术研究还处于初步阶段, 主要集中于室内试验研究, 而且研究多为参考国外案例经验为主。

9.3 常规工艺工法

系统构成和主要设备：可渗透反应墙技术分为单处理系统和多单元处理系统。单处理系统 PRB 适用于污染物较单一、污染浓度较低、羽状体规模较小的场地，主要类型包括连续墙式 PRB、漏斗-导门式 PRB、注入式 PRB、虹吸式 PRB 等；多单元处理系统适用于污染物种类较多、情况复杂的场地，可分为串联（沟箱式 PRB、多个连续沟壕平行式 PRB）和并联（漏斗-多通道构型、多漏斗-多导门构型、多漏斗-通道构型）两种类型。PRB 主要设备包括沟槽开挖和反应墙构建设备和监测设备等。

关键技术参数：1) PRB 安装位置：圈定污染区域，建立污染物浓度分布图；勘探水文地质，明确地下水流向；确定污染物迁移扩散范围；2) PRB 结构和规模：较深的承压层采用灌注处理式 PRB，浅层潜水采用 PRB 多样，例如连续墙式 PRB、漏斗-导门式 PRB；PRB 底端嵌入不透水层至少 0.60 m，PRB 顶端需高于地下水最高水位，PRB 的宽度一般是污染物羽流宽度的 1.2~1.5 倍；3) 水力停留时间和渗透系数：污染物在反应墙的停留时间主要由污染物的半衰期和流入反应墙时的初始浓度所决定；反应墙的渗透系数宜为含水层渗透系数的 2 倍以上；4) 活性介质材料：主要考虑稳定性、环境友好性、水力性能、反应速率、经济性等因素，常见的介质材料包括零价铁、活性炭、沸石、石灰石、离子交换树脂、铁的氧化物和氢氧化物、磷酸盐、堆肥物料、木屑等。

主要实施过程：1) 深度不超过 10 m 的浅层 PRB：在污染羽流向的垂直位置，利用挖沟机挖掘并回填介质材料，同时设置监测井、水位控制孔等，最后在 PRB 墙体上覆盖土层。2) 深度大于 10 m 的 PRB，由于深度较大，回填时常采用生物泥浆运送反应材料，开挖和回填方式包括深层土壤混合法、旋喷注入法、垂直水力压裂法。

运行维护和监测：PRB 运行维护相对简单，需要长期监测和定期更换反应介质。需在 PRB 上下游及内部布置监测井，并周期性监测水文地质化学参数、流速等。应在浓度较高或接近反应墙的位置集中布置监测井以准确捕获污染羽的运动方向。常用的监测指标包括目标污染物及降解产物、氧化还原电位、pH 值、溶解氧等。

10. 多相抽提技术 (Multi-Phase Extraction)

10.1 技术适用性

适用介质：污染土壤和地下水。

可处理污染物类型：可处理易挥发、易流动的 NAPL（非水相液体），如汽油、柴油、

有机溶剂等。

加油站污染适用性: 1) 易于和其他修复技术联合使用(例如地下水曝气和生物曝气等), 可实现石油污染土壤-地下水高效一体化修复; 2) 对现场环境破坏小, 可在建筑物等下面操作, 而不破坏地上建筑物, 不影响加油站设施使用, 适用于在产加油站场地修复。

应用限制条件: 1) 对加油站场地低渗透性土壤和非均质介质的修复效果不确定, 只能对非饱和区域土壤进行处理; 2) 对挥发性较差的有机污染物效果欠佳。

10.2 技术介绍

技术原理: 多相抽提技术是通过真空提取手段, 抽取地下污染区域的土壤气体污染物、地下水和浮油等到地面进行相分离及处理的修复技术, 主要针对具有挥发性的有机污染物及油性污染物。

绿色修复特征: 利用可再生能源对设备进行能源供应, 体现可持续性修复理念, 减少能源消耗和大气二氧化碳的排放。

修复周期及成本: 多相抽提技术的处理周期与场地水文地质条件和污染物性质密切相关, 污染源区的清理速度相对较快, 一般需要 1~24 个月。处理成本包括建设施工投资、设备投资和运行管理费用等。国外处理成本约为 35 美元/m³ 水。根据国内中试工程案例, 处理低密度非水相液体 (LNAPL) 的成本约为 385 元/kg。

技术应用情况: 多相抽提技术在国外已被广泛应用, 技术相对比较成熟。国内对多相抽提技术处理污染土壤和地下水的工程应用起步较晚, 尚无大规模的工程应用示范和自主研发的多相抽提技术设备。

10.3 常规工艺工法

系统构成和主要设备: 多相抽提技术主要设备包括真空泵或水泵、输送管道、气液分离器、NAPL/水分离器、传动泵、控制设备、气/水处理设备等。通常包括多相抽提、多相分离和污染物处理 3 个主要部分。系统的核心部分是多相抽提设备, 能同时抽取污染区域的气体和液体 (包括土壤气体、地下水和 NAPL), 把污染物从地下抽吸到地面上进行处理。多相分离指对抽出物进行气-液及液-液分离过程。污染物处理是指经过多相分离后, 含污染物的流体被分为气相、液相和有机相等形态, 结合常规的环境工程处理方法进行相应的处理。气相中污染物的处理方法目前主要有热氧化法、催化氧化法、吸附法、浓缩法、生物过滤及膜法过滤等。水相中的污染物处理目前主要采用膜法 (反渗透和超滤)、生化法 (活性污泥) 和物化法等技术。

关键技术参数：评估多相抽提技术适用性的关键技术参数主要分为水文地质条件和污染物条件 2 个方面。场地参数中包括渗透系数（ $10^{-3}\sim 10^{-5}$ cm/s）、渗透率（ $10^{-8}\sim 10^{-10}$ cm²）、导水系数（0.72 cm²/s）、空气渗透性（ $<10^{-8}$ cm²），土壤均质，地质环境砂土到粘土，包气带含水率较低，地下水埋深大于 3 英寸，土壤含水率 40~60%，好氧降解时，氧气含量 $>2\%$ 。污染物性质中包括饱和蒸气压（ $>0.5\sim 1$ mm Hg）、沸点（ $<250\sim 300$ ），土-水分配系数适中，LNAPL 厚度 >15 cm，NAPL 粘度 <10 cp。

主要实施过程：1) 建立地下水抽提井。需要注意的是井间距应在水力影响半径范围之内。高密度非水相液体（DNAPL）场地，抽提井深度达到隔水层顶部；2) 调节抽提管路。抽提管路包括井口、管路、接口等，应保持良好的密闭性。开始抽提后，通过观测流量调节真空度和抽提管位置；3) 监测尾气排放。监测尾气排放口的挥发性有机物，如浓度明显增大应停止抽提，更换活性炭；4) 监测油水分离器。观察和维护油水分离器，对水和油分别进行收集和处理。

运行维护和监测：1) 运行维护包括 NAPL 收集、抽提井真空度调节、活性炭更换、沉积物清理、仪表和电路及管路检修和校正等；2) 监测物理及机械参数包括抽提井和监测井内的真空度、抽提井内的地下水降深、抽提地下水体积、单井流量和抽提井附近地下水位等；3) 监测化学指标包括气相污染物浓度、气/水排放口污染物浓度、抽提地下水污染物浓度和 NAPL 组成变化等；4) 监测生物指标包括溶解性气体、氮和磷浓度、pH 值、氧化还原电位和微生物数量等；5) 应对废水/尾气处理设施的效果进行定期监测。

四、修复生命周期绿色可持续性评价

修复生命周期评价从修复方案制定阶段开始，贯穿修复施工过程评价，直至修复效果评估等全流程。

1. 修复方案阶段评价

修复方案绿色可持续性评估可根据场地条件、修复目标、技术路线、工艺参数、二次污染防治、工程量、费用和周期等，从社会、经济、环境等三方面进行技术方案绿色可持续性评价，针对加油站场地修复绿色可持续评价的核心要素包括：

1) 修复工程对环境产生的不良影响小于不开展修复工程对环境的影响，鼓励采用环境扰动低的生物修复技术；

-
- 2) 方案应设计完善的场地安全管理措施，充分考虑加油站地块修复过程的燃爆风险；
 - 3) 减少能源消耗，降低碳排放，鼓励使用可再生能源；
 - 4) 减少材料消耗及废弃物产生，鼓励使用再利用材料；
 - 5) 减少二次污染物生成与排放，保障现场工作人员的安全与健康；
 - 6) 鼓励建立修复工程全生命周期指标监测和评价机制。

修复技术绿色可持续评价方式采用专家判断评分，评价指标可参考附录 B，从确定的单一修复技术及多种修复技术组合方案中确定最佳修复方案。

2. 修复工程过程评价

根据修复方案明确的技术路线、工艺参数、二次污染防治、工期安排，修复工程过程评价主要对修复施工过程中的过程监测、施工变更、管理情况进行跟踪评价绿色可持续性修复的工作落实质量。

过程监测评价：修复过程中应针对过程监测结果，开展趋势预测，判断技术方案的有效性和目标可达性。可依据趋势预测结果对技术方案进行调整和优化。获取过程监测数据后及时进行趋势预测，可对全部或部分参数开展趋势预测，如对目标污染物浓度进行趋势预测。可利用图表方式、数值模拟和统计学等方法进行趋势预测。

施工变更评价：当实际施工产生重大变更时，应针对对变更后的施工方案更新绿色可持续性评价，鼓励通过工程调整和技术创新，提升修复过程的绿色可持续性。鼓励通过材料创新、工艺创新等，提升修复的绿色可持续水平；鼓励根据现场施工情况，通过优化人员管理、调整材料使用等，降低施工消耗，提高施工效率，提升修复的绿色可持续水平。

施工管理评价：根据国家和地方环境管理法律法规，结合工程施工工艺特点以及工程周边环境，对修复施工过程中工程管理、环境管理与二次污染防治等工作开展质量进行评估，根据评估结果，及时更新修复工程绿色可持续性评价结果。工程管理评价内容包括工程进度、施工技术路线、施工调整情况、施工过程监测、周边人群感官接受度等。环境管理与二次污染防治评价内容包括识别施工中的大气、水、噪声、固体废物等环境要素排放，明确实施环境管理计划运行实施质量。

3. 修复效果评估

根据修复目标、修复过程监测结果、修复过程评价结果等，对修复工程完成后的修复效果及后期管理质量进行评价，更新修复绿色可持续性评价。评价内容包括修复污染去除效果、

环境影响、社会影响、经济影响等进行评价，

污染去除效果评估包括污染物去除评价和去除终点评价。包括：

1) 污染物去除评价应参考 HJ 25.5、HJ 25.6 相关规定对地块污染去除效果进行，判断是否达到修复目标；

2) 去除终点评价根据过程监测结果，对污染物去除最终产物和去除效率进行评价；

3) 对于存在修复后期管理的，含长期监测和制度管控，应对后期管理开展的落实情况和管理质量进行评价。

环境影响评估根据修复方案要求、地块规划、修复过程评价结果等，评价修复工程对地块及周边环境的不利影响。评价内容包括地块环境质量影响评价、周边环境质量影响评价、资源与能源消耗评价等，评价可以通过采样调查形式进行或利用过程监测终点数据及样品，评价方式采用专家判断评分。

1) 地块环境影响评价内容应包括但不限于修复后地块土壤及地下水理化性质及功能变化、生态环境质量变化等。

2) 周边环境影响评价内容应包括但不限于污染及药剂扩散情况、对周边生态系统扰动及毒性等。

3) 资源与能源消耗评价内容应包括但不限于工程实际药剂使用量、能耗、水资源消耗、碳排放、废物产生与再利用等。

社会影响评估应包含社会公众对修复工程参与度、满意度以及建议反馈情况等，可以通过人员访谈、问卷调查等形式开展。

经济影响评估应包含实际施工修复成本、修复后土壤及地下水功能与地块规划的匹配性、后期管理成本等。当修复场地为在产状态时，应参考利益相关方的意见，评估修复工程对生产生活的扰动程度及其对经济生产导致的不利影响。

附录

附录 A 石油烃类污染绿色修复案例集

1. 生物堆技术案例

工程背景：我国辽河油田某采油厂附近农田，土壤受到石油烃污染，总石油烃含量为 2400 mg/kg。

污染特征：场地污染物为总石油烃；只涉及土壤污染；土壤内总石油烃含量高达 2400 mg/kg，超过农田标准 1.9 倍。

绿色修复特点：该修复地块属于农田，一般的物理化学技术不具备可行性，需要在经济合理条件下进行绿色修复，主要优点在于：1) 以生物修复作为主体工艺，控制修复成本当；2) 采取简单易行的现场设备，使修复工程具备可操作性。

工艺流程及参数：在石油污染土壤的原地进行处理，加入驯化的高效降解菌株、生物表面活性剂和生物营养液，借助翻耕实现菌株和油泥的充分混合，并加入一些助剂，确保油泥的疏松。由于处理地 11 月份的温度较低，需在生物修复地的上方加盖塑料大棚以实现保温。处理过程中，每 3-7 天翻耕一次以确保充足的氧。

成本分析：综合考虑添加的营养物质、装置、运行维护成本，本次修复处理成本约为 500 元/m³。

修复效果：经过 50 天修复，土壤中总石油烃含量降低至 500mg/kg 以下。

案例提供者及联系方式：南京尚土生态环境有限公司，吕正勇，njsoil@163.com

2. 原位注入生物强化技术案例

工程背景：江苏南京某加油站地表渗漏污染，造成土壤和地下水污染。

污染特征：场地土壤污染包括总石油烃（7590 mg/kg）；地下水污染包括苯（13.1 mg/L）以及 1,2-二氯丙烷（36.5 mg/L）；污染深度 0-5 m。

绿色修复特点：1) 实现土壤和地下水污染协同修复；2) 通过生物炭负载的微生物药剂实现污染 6 个月快速去除，仅相当于普通生物修复周期的 50%。

工艺流程及参数：1) 表层污染土壤修复采用机械混合；2) 深层污染土壤及地下水采用进行直压注射；3) 通过污染物取样监测，监控修复进行的程度。

成本分析：本次修复处理成本约为 400 元/m³。

修复效果：180 天后，TPHs 含量平均去除率 79.7%，点位最高去除率 95.6%，TPH 浓度低于国家一类用地筛选值；地下水中苯和 1,2-二氯丙烷含量修复后未检出。

案例提供者及联系方式：江苏省环境科学研究院，王水，ws@vip.sina.com。

3. 监控自然衰减技术案例

工程背景：北京地区某加油站发生油类污染，污染涉及 1000m²，污染场地土壤类型主要为粘土。

污染特征：场地污染特征为包气带土壤总石油烃污染；土壤气中 VOCs 的浓度最高为 78.84 mg/m³。

绿色修复特点：1) 结合场地污染水平和生产状态，在不影响加油站正常作业的情况下，合理布设监控点位，控制修复成本；2) 依据场地自然发生的物理、化学及生物作用，最大程度减少修复对环境的侵害程度。

工艺流程及参数：该试验对加油站非饱和土层中油污染物浓度随时间的变化以及土层中 O₂、CO₂ 含量的垂向分布实施了监测，分为 2 个阶段完成。第一阶段根据污染状况调查方案，在该加油站多个点位采集了地下 1 m 深处的土壤气样本，并对其中的挥发性有机物（VOCs）进行检测分析，分析结果表明该加油站发生了一定程度的石油污染，G3 点土壤气中 VOCs 的浓度最高，为 78.84 mg/m³；第二阶段于 381 d 后在 G3 点再次进行了土壤气的采集，并对其中的 VOCs 和 O₂、CO₂ 的含量进行了检测分析。

成本分析：结合该场地污染面积、污染深度、监控点位的布设、监控系统的运行维护等成本，本项目成本约为 15 美元/m³。

修复效果：经过 381 d 的自然衰减，场地 BTEX 的衰减率达 99.67%，总污染物的衰减率为 99.54%。绝大部分污染物都在自然衰减的作用下得以有效清除。土壤中 O₂、CO₂ 含量沿土层深度方向也呈现出明显的规律，土层中 O₂ 的含量显著降低，CO₂ 的含量有明显的增加。

4. 生物通风技术案例

工程背景：意大利北部某加油站的地下储油罐泄漏，导致气态苯蒸汽和挥发性总石油烃扩散至周边住宅区地下室内，造成影响较为大的污染。

污染特征：污染为气态苯蒸汽和挥发性总石油烃；涉及土壤。

绿色修复特点：该地块修复的主要优点在于：1) 环境扰动小、能源消耗低、修复周期短；2) 污染物修复更为彻底。

工艺流程及参数：1) 修复公司首先对泄漏部分进行清理，挖出较为严重的土壤地块，同时用混凝土浇筑，形成物理性阻隔层，防止污染物的进一步扩酸；2) 设置注射井及抽提井，安装鼓风机/真空泵，将空气从注射井注入土壤中，从抽提井抽出；3) 使用尾气收集装置吸附挥发性污染物及其分解产物；4) 定期添加营养物质，监测微生物活性浓度；5) 定期监测残余污染物浓度。

成本分析：根据国外相关场地的处理经验，处理成本约为 13-27 美元/ m³。

修复效果：采用生物通风修复质量分数为 4% 的柴油燃料污染的土壤，经过 60 d 的处理，降解效率最高达 85%，相较于自然衰减的效率提升 40%，修复后土壤中气态苯蒸汽和挥发性总石油烃浓度分别为 0.6 mg/m³、0.8 mg/m³，低于人体健康风险计算值。

5. 异位化学氧化案例

工程背景：我国江苏某工业地块中，土壤中发现了中高浓度的石油烃污染，场地污染面积约为 15000 平方米，修复深度 1-6 米，总污染量约为 50000 立方米，全场地散状分布。污染土层主要以素填土和粉质粘土组成，渗透性差。

污染特征：场地污染主要为土壤污染，污染因子以石油烃为主，最高浓度为 19200 mg/kg。

绿色修复特点：提升清挖土壤破碎程度，降低过筛粒径，从而提升药剂扩散和使用效率，降低药剂用量，降低药剂带来的二次污染风险。

工艺流程及参数：1) 污染区边界测绘与防线，明确清挖范围和深度；2) 根据测绘和调查结果，利用挖机对污染土壤进行精确清挖和初步破碎；3) 利用筛分设备对污染土壤进行初筛，撇去石块、建筑垃圾等；4) 利用 ALLU 筛分机进行进一步破碎，使其粒径小于 30 mm，期间通过喷洒的方式将土壤和土块水分调节至 20% 左右，筛分后土壤按不同污染程度打堆；5) 通过小试和中试研究，明确场地内不同污染程度土壤氧化药剂用量；6) 根据小试和中试结果按量投加药剂，并通过挖机和 ALLU 筛分机进行搅拌混匀；7) 氧化反应 7-9 天，期间对堆体开展 pH、温度等常规监测；8) 修复验收。

成本分析：该场地异位化学氧化处置的投资、运行和管理费用约合 500 元/m³，其运行过程中相较于一般化学氧化药剂用量降低 30%。

修复效果：修复后土壤石油烃含量降低 74.6-95%，修复后土壤石油烃含量低于国家相关标准（GB36600-2018）第一类用地筛选值。

6. 原位化学氧化案例

工程背景：上海某大型机器厂，土壤中石油烃污染物检出率最高，污染面积达 5447 m²，

土壤污染深度 2 m，总污染量约为 10900 m³，石油烃污染土壤主要分布在热处理车间、重工车间、零部件车间保留性建筑内，考虑场地现状、开发计划、处置成本等客观因素，工程设计采用高压旋喷注射—原位化学氧化技术。

污染特征：场地污染主要为土壤污染，污染物以石油烃为主，最高浓度为 9580 mg/kg。

绿色修复特点：1) 选用少副产物的氧化剂氧化去除土壤中的石油烃，降低氧化剂本身带来的二次污染风险和对土壤环境的破坏；2) 根据机器厂污染状况，精细控制氧化剂的添加百分比，提高氧化剂的使用效率，降低氧化剂对土壤环境产生的不利影响。

工艺流程及参数：1) 根据污染场地状况确定注入孔的数量和位置，现场施工采用 1 m 的孔间距进行布设；2) 小试确定施工药剂添加量为 1.5% 的活化剂 Ca(OH)₂ 和 2% 的氧化剂 Na₂S₂O₄，中试实时监测和调节空气压力、喷浆管提升速度和旋转速度等参数；3) 修复过程对污染土壤中石油烃浓度进行监测，确保修复达到修复目标值。

成本分析：该场地原位化学氧化处置的投资、运行和管理费用约合 110~150 元/m³。

修复效果：修复后石油烃的去除率大约在 47%，所有修复后的土壤样品石油烃浓度均满足修复目标值，达到了预期的效果。

7. 植物修复技术案例

工程背景：陕北黄土高原中部丘陵沟壑区的废弃油井区，在先前石油开采、运输等过程中造成了土壤浅层污染，修复面积约 9000 m²。污染场地土层深厚、疏松、多孔隙，透水性较强，黄绵土，地下水埋深在 30 m 以下，年降水在 500-550 mm 左右，降雨稀少，水土流失严重，自然条件不佳。

污染特征：场地污染因子为石油烃，最高浓度达 19324 mg/kg。

绿色修复特点：1) 修复过程中，植物通过光合作用消耗温室气体，固定储存空气中的碳；2) 植物修复在去除石油污染的同时，可改善和恢复土壤生态系统，具有保护表土、减少侵蚀和水土流失的功效。

工艺流程及参数：主要包括场地调查、育种、播种、田间管理和刈割。为应对当地的不良自然条件和高浓度污染情况，多选用本土优势、生存能力强、污染耐受性强的草本植株，如铁杆蒿、猪毛蒿、虎尾草、冰草、白羊草、狗尾草、早熟禾、黄蒿、黎和稗草等，将植物的饱满种子浸泡 24 h 后待用。对污染场地进行翻耕，保证土壤石油含量均匀，同时稀释局部超高浓度污染，植株种植密度约 12 株/m²。植物生长期间，对妨碍植物生长的杂草和害虫等进行清理。修复周期为 120 天，期间对部分植物和场地土壤进行取样检测其中石油烃含

量。

成本分析：包含施工投资、设备投资、运行管理费用。处理成本约 45 元/m²。运行过程中的主要能耗为灌溉、焚烧和尾气处理的电耗，另外有田间管理的人工成本。

修复效果：石油烃降解率随着植物生长时间逐渐增大。120 d 植物生长的总生物量为 451-941g/m²，土壤石油烃降解率分别为 39.11-61.17%。与天然降解对照相比，石油烃降解率提升了 45.75%。场地中土壤石油烃总降解率是随着其上生长野生植物的生物量增大而增大，石油烃降解率和样区总生物量成线性相关。

8. 异位热脱附技术案例

工程背景：北京某钢厂厂区部分污染地块受到多环芳烃和石油烃类有机污染物污染。修复地块超过 1×10⁴ m³ 污染土壤。

污染特征：钢厂厂区内主要为土壤污染，污染物包括多环芳烃和石油烃，石油烃平均污染浓度为 2048 mg/kg。

绿色修复特点：通过设置合理温度，控制加热时间，保证修复达标条件下，尽可能节约资源，减少能源消耗和温室气体排放。

工艺流程及参数：1) 污染土壤进行筛分、除铁、调节含水率 (<15%) 等预处理后，由螺旋给料机送入热脱附系统；2) 利用预干燥窑、逆烧式回转窑对污染土进行加热，出土温度 500 °C，停留时间 15 min，洁净土壤由水冷螺旋出料待检；3) 热脱附烟气经沉降、旋风除尘、二燃室高温燃烧 (温度不低于 850 °C，停留时间不小于 2 s)、烟气余热回收、冷却、石灰粉干式脱酸、布袋除尘器过滤后达标排放。

成本分析：场地污染土壤热脱附处置费用约为 1000 元/吨。

修复效果：热脱附修复后，场地污染土壤中的多环芳烃和总石油烃去除率均大于 98.17%。排放的尾气中各项指标浓度均满足《大气污染物综合排放标准》(DB 11/501-2007) 要求。

9. 原位热脱附技术案例

工程背景：我国北方某废弃焦化厂区曾生产苯、萘、酚、沥青等 20 余种化工产品，现已停产搬迁。地块主要污染物为有机物污染，包括萘、苯并(a)芘和总石油烃等污染，修复地块面积 913.2 m²，污染深度 8.0 m，修复土方量 7305.9 m³。地质勘察结果显示，地块分为人工填土层、轻亚粘土层、卵石层、砂岩层 4 个土层。该地块未来用途规划为公共设施用地。

污染特征：废弃焦化厂内主要为土壤污染，污染物包括萘、苯并(a)芘和总石油烃等，

最高浓度为 12470 mg/kg。

绿色修复特点：根据目标污染物状况，设置合理目标温度，控制各阶段的加热时间，保证修复效果的同时尽可能节约资源，减少能源消耗。

工艺流程及参数：1) 燃气燃烧产生的高温气体从燃烧器进入加热内管，在离心风机的作用下在内外管循环流动，通过热传导使土壤温度不断升高，挥发性污染物和水分受热成气态被蒸发出来；2) 经抽提系统将气相污染物抽到地面收集；3) 抽出的气体和液体经过冷凝和气流分离系统分开，分别经过处理后达标排放。

成本分析：本项目实际工程中热脱附费用包括人工费、挖运费、设备运输、安装和拆除费、燃料费、动力费、检修及维护费等约为 1000 元/m³。

修复效果：热脱附法对有机污染土壤有良好的去除效果，修复后萘、苯并(a)芘的检出质量分数≤0.8 mg/kg，总石油烃检出质量分数≤96 mg/kg，远小于污染物修复目标值，修复效果较好。

10. 垂直阻隔技术案例

工程背景：美国 Altus 空军基地场地发现羽状流氯化脂肪族烃土壤和地下水污染，污染面积约 1000 英亩，污染深度 8 米左右，主要污染来源为垃圾填埋和化学泄漏。

污染特征：场地污染为土壤和地下水复合污染，污染因子以氯化脂肪族烃类为主。

绿色修复特点：1) 项目采用原位生物墙处理地下水氯化脂肪族烃污染物，墙体材料绿色环保，不产生二次污染，可同步实现污染物去除；2) 现场设备用电均采用太阳能发电，避免了连接电网所需的材料和其他资源（包括项目资金）的大量消耗，节约能源，降低碳排放。

工艺流程及参数：1) 根据现场情况确定污染阻隔区域的范围，使用挖沟机进行生物墙沟渠的施工建设，生物墙延伸至地下 35 英尺的深度；2) 2002-2005 年利用 455 英尺长的生物墙去除氯化脂肪族烃；2006 年，将 270 加仑植物油、211 磅乳酸盐、3 磅生物强化产品混合后注入到生物墙中；2008 年，通过添加乳化的生物基产品（大豆油）来维持生物墙的去除效率；2010 年，注入 139 加仑植物油和 3600 磅可溶性硫酸亚铁；3) 利用离网 200 瓦光伏（PV）阵列为潜水泵提供动力，使水通过生物墙进行再循环。选用的潜水泵可充分利用太阳能，系统以大约 600 至 1,650 加仑/天的速度对地下水进行再循环。利用太阳能避免了连接电网所需的材料和其他资源的消耗；4) 定期对生物墙阻隔区域进行监测。

成本分析：该项目包含建设施工投资、设备投资、运行管理费用等的处理成本约 800 元

/m³。

修复效果: 在 2002-2005 年间, 通过最初的 455 英尺生物墙段, 实现了三氯乙烯 (TCE) 去除率达 88-99%, 地下水中总氯乙烯去除率达 18-96%。在 2009-2011 年, 大多数生物墙的 TCE 减少了 97-99%, 总氯乙烯减少了 94-97%。

11. 可渗透反应墙技术案例

工程背景: 澳大利亚东南部一家工厂发生石油烃泄漏, 导致地下水污染。修复地块面积 2250 m², 地下水污染深度 5 m。挖掘出约 1600 m³ 的石油烃污染土壤作为建立漏斗和导水门系统的一部分。

污染特征: 厂区石油烃泄漏导致地下水污染, 地下水中石油烃污染物浓度平均为 26 mg/L。

绿色修复特点: 1) 选用泥炭和矿渣作为介质材料, 环保无二次污染; 2) 应用漏斗导水门系统节省了大量资金, 有效防止了附近河流的持续污染, 经济可持续; 3) 建设漏斗导水门系统对公共区域的干扰小, 不会造成二次污染; 4) 通过化学和生物复合作用去除地下水中的石油烃, 改善地下水水质, 具有长期效应。

工艺流程及参数: 1) 建立漏斗和导水门系统将地下水导入处理区, 漏斗和导水门由 0.75 毫米厚的高密度聚乙烯 (HDPE) 不透水屏障膜组成, 垂直放置在截断沟渠中。漏斗长 27 m, 宽 0.6 m, 深 5 m, 挖掘至天然粉砂岩界面下方 0.5 m 处; 2) 开挖 PRB 沟渠, 长 12 m, 宽 0.6 m, 深 5 m; 3) 将泥炭和矿渣混合反应介质进行回填; 4) 在 PRB 墙体上覆盖土壤; 5) 设置 14 口监测井进行长期监测。

成本分析: 该项目包含建设施工投资、设备投资、运行管理总费用约为 71500 美元, 平均费用约为 31.8 美元/m²。

修复效果: 石油烃污染地下水经 PRB 反应墙修复后, 地下水中石油烃的去除率可达到 79.5%, 满足相关水质标准要求。

12. 多相抽提技术案例

工程背景: 亚利桑那州彩虹谷某维修厂, 占地 2 英亩, 位于亚利桑那州凤凰城西南约 40 英里处, 维修厂中的油气储藏装置泄漏。拆除 2 个储罐之后, 对污染源区域及其周围进行了修复。修复过程中安装了 8 个监控井, 进行原位空气气提, 同时对具有高碳氢化合物浓度的井中实施蒸汽萃取。在修复过程中, 利用可再生能源发电。通过 1 辆每天部署 8 小时的真空抽取车, 从 2 个目标监测井内清除了 500 加仑游离相汽油 (与地下水混合)。

污染特征：亚利桑那州彩虹谷某维修厂油气储藏装置泄漏，导致石油烃污染了场地土壤和地下水。拆除 2 个油气储罐后，对污染源区域及其周围进行修复。

绿色修复特点：使用可再生能源驱动废气设备，在 10 个月的空气喷射过程中减少了 20,000 kWh 的电力消耗。与使用电网供电相比，通过使用可再生能源减少了大约 13.8 公吨二氧化碳（当量）的排放。

工艺流程及参数：1) 根据场地情况建立地下抽提井系统；2) 将抽提井中的石油烃和受污染的地下水通过真空泵抽出地面；3) 运行 8 口井的空气喷射系统，注气速度平均为 25 立方英尺/每分钟[cfm]。在 2 个 VE 井中用于收集废气的平均有效气流速率分别为 1 cfm 和 4 cfm。4) 将真空泵抽出的土壤气体、地下水以及石油烃在气水分离器内进行气水分离，分离的气相部分和地下水处理达标后排放；5) 空气喷射停止约 5 个月后注入化学氧化剂（催化过硫酸钠）原位处理污染地下水；6) 空气喷射关闭后约 11 个月，完成场地清理。

成本分析：与废气收集系统相关清理费用相比，10 个月内估计节省了 12,750 美元，其中包括 500 美元的资本成本（每个太阳能风扇组件 250 美元）、最小安装和维护成本。使用标准 5 hp 电动鼓风机的成本预计为 13,000 美元，其中包括 10,000 美元的租赁费（1,000 美元/月）和 3,000 美元的电费（估计 300 美元/月）。去除石油碳氢化合物的费用约为 385 元/kg。

修复效果：每天运行 8 小时的真空抽取车，从 2 个目标监测井内清除了 500 加仑游离相汽油（与地下水混合）。空气喷射关闭后约 11 个月，完成场地清理。

附录 B 环境、经济、社会绿色可持续性评价指标

评价类型	影响类型	评价指标
环境	人群健康	材料绿色安全性
		对污染物永久去除能力
		周边人群的感官接受度
		二次污染无害化处置
		温室气体排放
	生态环境	土壤及地下水功能劣化
		修复材料迁移风险
		对周边生态系统扰动及毒性
		二次污染风险
	能源与资源	碳排放
		水资源消耗
		金属和矿物资源消耗
废物产生与再利用		

社会	公众参与及满意度	公众参与度
		公众满意度
	施工人员健康与安全	工程事故风险
		污染物暴露风险
		环境应急管理计划
	创造就业	修复项目本身创造的岗位
		修复地块再利用新增的岗位
	修复质量保障	修复有效性/长期有效性评价
		修复后监测
后期管理制度		
经济	修复成本	项目设计及建设总费用
		运行及维护费用
	对社会经济的影响	对生产生活的扰动
		修复后地块/土壤与土地规划功能的匹配性
		修复周期与土地利用规划的匹配项