



地下水污染防治与修复产业联盟团体标准

T/GIA 001—2017

绿色可持续性修复指南

Guide for green sustainable remediation

（征求意见稿）

2017- ×× - ××发布

2017- ×× - ××实施

地下水污染防治与修复产业联盟

发 布

目 次

引 言 2

前 言 3

绿色可持续性修复指南 4

1 范围 4

2 规范性引用文件 4

3 术语和定义 4

4 绿色修复策略 5

5 策略实施 8

6 绿色修复评价工具 14

7 典型技术 19

附录 A（资料性附录）净环境效益分析典型案例 28

附录 B（资料性附录）生物堆技术典型案例 31

附录 C（资料性附录）植物稳定技术典型案例 35

附录 D（资料性附录）原位生物通风技术典型案例 38

引 言

绿色可持续修复为针对场地条件，适用特定的产品、方法、技术和规程，在平衡社会目标、经济影响和纯环境效应的同时减轻受体的环境风险，认为绿色可持续修复是用于优化场地修复，从场地调查到项目竣工各环节的一种有效方法。

随着国际上逐渐重视绿色可持续修复对资源和能源的意义，我国也在环境修复中引入了绿色可持续的理念，并在一些修复工程中取得了良好效果。经过近年来污染场地修复的实践，我国污染场地管理者和科学工作者认识到必须对修复行为加以控制，污染场地的修复急需更新风险评估标准、监测方法和框架，在关注成本和技术的可行性的同时，应关注整个系统的可持续性。绿色可持续修复并非是一种新兴的修复技术，而是多年来逐渐发展的修复理念，它强调在修复各个阶段融入可持续的理念，尽可能地减少修复过程中的能耗和二次污染等，受到了行业内工作者的重视。

随着英美等发达国家大力开展绿色可持续修复实践行动，我国也在逐步完善绿色可持续的修复理念，即在修复过程中不仅考虑工程自身的时间与经济成本，也考虑修复行为对环境、社会和经济的综合影响。同时，行业内从业者推行清洁可再生能源驱动部分或全部修复技术和设备，全方位考虑并控制修复过程中的二次污染，积极寻求传统修复技术与绿色可持续修复技术的结合等。

随着我国环境修复工作的深入开展和人们对环境修复工作认识水平的提高，绿色修复的思路、理念和实践将会越来越多。

本指南的制定旨在为行业内从业者提供相关的评估框架和技术指导等。

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2009 给出的规则起草。

本文件由地下水污染防治与修复产业联盟提出及归口。

本文件起草单位：中国环境科学研究院、中国科学院生态环境研究中心、轻工业环境保护研究所、中国地质科学院水文地质环境地质研究所、上田环境修复股份有限公司

绿色可持续性修复指南

1 范围

本文件规定了绿色可持续性修复的术语和定义、修复策略、策略实施、修复评价工具、典型修复技术和典型修复案例。

本文件适用于绿色可持续性修复从业者进行相关的评估和技术指导。

2 规范性引用文件

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 5085.3-2007 危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 绿色可持续修复 green sustainable Remediation (GSR)

针对场地条件，适用特定的产品、方法、技术和规程，在平衡社会目标、经济影响和纯环境效应的同时减轻受体环境风险的修复理念。

3.2 环境足迹 environmental footprint

衡量人类行为活动和对地球生态系统产生影响的一种指标。

3.3 最佳管理实践 best management practice

环境修复过程中的修复要求、修复流程、施工步骤、废物处理等一系列最佳方法的集合。

3.4 生态修复 ecological restoration

通过环境修复使遭到破坏的生态系统逐步恢复或生态系统向良性循环方向进行演化。

3.5 可再生能源 renewable energy

在自然界可循环利用的清洁能源，包括太阳能、风能、地热能等。

3.6 废物能源 waste to energy (WTE)

固体废物转化为电能或将液体废物转化为可替换燃料。

3.7 二次污染 secondary pollution

在对环境修复的过程中产生新的污染物。

3.8 碳足迹评价 carbon footprint assessment

统计在修复周期中直接或间接排放的温室气体总量。

3.9 净环境效益分析 net environmental benefits analysis (NEBA)

对环境修复过程中环境和生态系统的增益及损耗进行分析，并比较和评价多种修复方案的净环境效益。

3.10 生命周期评价 life circle assessment (LFA)

是一种评价产品、工艺或活动的方法。包括：从原料采集，到产品生产、运输、销售、使用、回用、维护和最终处置整个生命周期阶段有关的环境负荷的过程。

4 绿色修复策略

4.1 管理

绿色修复的场地最佳管理办法能保证在完成修复目标的前提下，在所有修复步骤中最大程度上保护自然资源。

每个场地管理规划都可以结合绿色修复的核心理念：

- 减少温室气体排放和能量消耗；
- 保护水资源；
- 短期内改善生态系统并有益于进一步生态恢复；
- 减少材料损耗和废物产生。

4.1.1 空气质量保护

许多场地修复过程中会涉及到反应气体的排放和重型柴油机械的使用。绿色修复在管理层面上关注温室气体的排放和关键空气污染物的排放，并推行以下具体措施：

- 如若使用化学氧化还原的方法进行修复，选择产生副产品少的化学药剂；
- 改造柴油机械的尾气排放和处理技术，如使用微粒过滤器和氧化催化剂等；
- 定期维护机械和车辆，包括更换空气过滤器，燃料泵等；

- 使用更为清洁的燃料，如超低硫柴油等；

- 管理上高效使用设备，减少闲置设备。

4.1.2 保护水资源

修复过程中应尽量避免对原有水资源的扰动，减少和控制场地内的降雨，保护水资源。在工程设计中加入雨水收集系统（如雨水收集渠、雨水收集孔管等）能有效捕获场地内的降雨，并进行回收再利用或注入地下。场区内所有水排放必须满足相关要求。

4.1.3 改善生态系统，促进生态恢复

4.1.3.1 绿色修复在管理上注重生态系统的保护和恢复，要求受污染场地在修复后达到：

- 增加了野生动植物的栖息地；

- 增加了碳封存；

- 减少了风和水的侵蚀；

- 保护了水资源；

- 建立了新的绿色区域；

- 增加了周边地区的价值；

- 提高了社区绿色理念。

4.1.3.2 绿色修复考虑整个生态系统的恢复，最大程度上减少对野生生物的扰动，包括大力减少对稀有物种的噪音和光影响。生态恢复的目标是在不添加任何化学添加剂（如肥料等）情况下，本地植物在场地内恢复到原来的 50%。同时，绿色修复考虑在修复过程中土壤的流失和底泥的产生，包括有：

- 防止由雨水径流和风蚀造成的土壤流失；

- 防止底泥随雨水在地表水中运输；

- 防止灰尘和颗粒物的弥散。

4.1.4 废物的管理

绿色修复中废物管理考虑材料和设备的使用周期（lifecycle）成本，其中包括自然资源的损耗。工程废物应尽可能回收再利用，鼓励施工人员使用可回收管道、可回收手套、分类垃圾箱等。修复过程中产生的废物如废液、受污染的个人保护设备等应在场区外集中收集处理，避免二次污染。

4.2 能源

能源使用时绿色修复中最为核心的一个要素之一。通过优化修复系统和使用新能源可大量减少能源损耗。可替换和可再生能源的使用在大大减少修复过程中的环境足迹同时，还能：

- 对冲化石燃料价格，有短期和长期节省成本的潜力；
- 降低对传统能源的要求；
- 减少尾气排放控制；
- 提供了新能源市场和就业机会。

经实践证明，可再生能源系统可以设计为一个或几个特殊部分供电或者为整个修复系统提供能源，以此来部分或全部满足系统运行中能量要求。常用的转化为电能的可再生能源有：太阳能、风能、生物能等。可再生能源在周期长的修复项目中优势明显，他们能单独供电或者同电力系统协同供电。其中单独供能适用于工程中耗能较小的部分，如小型泵等；协同供能中能将可再生能源储存供使用。可再生能源系统的成本近年来一直在降低，同时政府的鼓励也为修复项目中使用新能源提供了机会。

4.2.1 太阳能

太阳能可通过光伏电池直接或间接为系统供电、供热等方式应用于修复场地中。一个光伏单元包括吸收和将太阳能转化为电能的半导体材料。

通常 40 个光伏单元组成一个太阳能电板，10 块太阳能电板组成一列，6 到 12 块太阳能电板可以组成一个系统，以满足一个低能耗的修复系统。

太阳能电板以固定角度面向南方，或者装有特有装置追踪捕获太阳能，以确保最大的能量捕获量。太阳能也可以用于修复过程中供热，原理是通过工程设计板或墙将太阳能转化为热能，为场区直接提供低温供热。

4.2.2 风能

风能是由大量空气流动产生的动能，空气流速越大，动能越大。一般来说，6 迈/时（mph）的风速能满足较小的能量需求，9 mph 的风速能驱动地下水抽出等工程活动，若场区内平均风速在 12 mph，一个小型 10-kW 的风车能每年产生 10000 kWh 的电力。

修复系统中压缩空气可以由风力发电机供能。这类发电机通过风力推动小汽轮机或风车来获取、压缩和引导空气进入液压泵等装置。据统计，风能转化为电能有效率达 90%，比传统能源效率高 55%，同时风能系统造价在近 20 年内降低了 80%，是名副其实的经济高效能源。

4.2.3 废物能源

废物能源（Waste-to-energy, WTE）系统的原理是将固体废物转化为电能或将液体废物转化为可

替换燃料。大型场地修复项目提供了“变废为宝”的机会：

- 减少垃圾填埋场处置无害废物的负担
- 减少场地垃圾填埋场的建设量
- 获得一个长期的可再生能源来源
- 减少废物的运输
- 提供就业机会

WTE 系统相较于传统能源大幅度减少了二氧化碳的排放，但是造价较高，并且依赖于不断进入一定数量的固体废物，因此在国外普遍应用于周期较长的项目。

5 策略实施

策略贯穿整个修复过程，其中包括场地调查、修复设计、修复施工、操作和维持及监测等。修复单位应考虑到每个阶段各方的要求，以满足绿色修复的社会效益。

5.1 场地调查

5.1.1 阶段描述

场地调查是指通过对场地进行调查，定义自然及污染物对土壤、地下水、沉积物和其他媒介的影响，并且确定潜在受体。系统的计划和明确的目标建立是场地调查前期必要的准备。场地调查中使用绿色修复策略将会为将来的修复工程带来较大的收益。

5.1.2 绿色修复技术考量

5.1.2.1 在场地调查阶段使用绿色修复技术能在使用较少的资源、产生较少的温室气体和废物排放的条件下完成调查目的。

5.1.2.2 调查阶段绿色修复技术可分类：

- a) 减少特定场地调查工程活动，如减少车辆和器械的使用等；
- b) 综合考虑减少对社区和环境的影响，如选择排放较少温室气体的钻井方式等。

5.1.2.3 从环境、社会和经济三方面列出了场地调查阶段可使用的绿色修复技术见表 2。

表 2 场地调查阶段绿色修复技术列表

环境	社会	经济
最大程度减少车辆器械运输	及时与社区交流场地条件和场地风险,共同商讨场地修复计划和场地再利用	使用场地筛选、快速检测等技术了解场地特性,减少取样次数
建立和完善场地概念模型,确定所有暴露途径		
使用可降解材料,减少一次性材料使用,减少废物产生		
应用合适的场地分析方法和技术,减少场地内移动	建立关键联络人列表,以促进通信	使用本地施工队,减少成本
使用可回收利用材料		
考虑对生态系统影响最小的方法	注重栖息地的恢复和场地再利用的其他选择	发现场地潜在的重建利用价值
收集可能的修复方法风险数据		

5.1.3 绿色修复技术评估

绿色修复策略在场地调查的评估需要至少涉及到一个或更多 BMP 的使用。

现有两种方法对土壤采样分析,以了解整个场地的特性,一种是采样后运送实验室分析,第二种是利用移动实验室当场采样分析。

经比较,两种方法成本相近,但方法一实施过程中产生的温室气体总量大于方法二。对于绿色修复策略的评价可以更加具体和量化,可以包括水的消耗量,空气污染量,废物产生量等。

5.1.4 绿色修复技术实施途径

绿色修复策略实施指将选定的方法应用于实际工程中。其中关键步骤是列出绿色修复的要求和场地施工计划,这样实施人员才能在理解绿色修复的理念上完成如钻井和取样等工作。

5.1.5 跟踪和记录

场地调查阶段绿色修复策略的实施应被追踪和记录,在场地调查报告上应有体现,在报告中应高亮环境、社会和经济三个方面的共同效益。成功的实施案例可以为今后的场地调查,以及该场地之后的修复工程提供重要参考。

5.2 修复设计

5.2.1 阶段描述

修复设计包括满足修复目标的修复技术比选和确定以及相关工程建造设计等。此阶段结合绿色修复工程技术影响着整个修复过程,是能为环境、社会和经济谋取最大效益的关键点。

5.2.2 绿色修复技术考量

5.2.2.1 在修复设计阶段,应在以下几个方面考虑绿色修复技术的结合。

5.2.2.2 政府、业主和社区的参与

在修复设计前期考虑政府、业主和社区的各方利益；结合场地规划和修复过程中可能涉及到的人力物力。

5.2.2.3 明确修复量

通过设计阶段绿色修复技术的考量，进一步缩小污染土壤、地下水和其他介质的待修复量。

5.2.2.4 针对不同污染介质修复技术的筛选

对不同污染介质，使用不同的修复技术手段，比选每一种可行性技术，并用绿色修复来评价技术的优缺点。

5.2.2.5 确定修复技术的具体工艺参数

具体工艺参数包括该种修复技术的耗能，温室气体的排放和水的使用量等，为今后绿色修复评价提供重要依据。

5.2.2.6 通过技术比选，量化绿色修复的收益

将场地内不同介质的修复技术集合，量化绿色修复技术的收益（环境、社会和经济）。

5.2.2.7 绿色修复评价

运用绿色修复的评价方法对整个修复设计进行考核。

5.2.2.8 修复设计阶段绿色修复技术分类

- a) 优化和提高某特定修复技术以减少其影响同时完成修复目标；
- b) 综合考虑减少对周围社区和环境的影响，高效完成修复目标。

5.2.2.9 修复设计阶段绿色修复技术列表

从环境、社会和经济三方面列出了修复设计阶段可使用的绿色修复技术见表 3。

表 3 修复设计阶段绿色修复技术列表

环境	社会	经济
将能耗和温室气体排放列入技术比选重要因子	及时与政府沟通, 考虑未来场地规划	使用场地内的修复措施, 降低成本
考虑建立栖息地		在对整个场地修复设计之前, 进行小试/中试研究
使用可再生能源(太阳能、风能等)和提高能源利用率	考虑修复过程短期和长期的风险	
使用可回收利用的材料		考虑周边敏感区域, 与社区一同设计方案, 并顾及修复过程中对周边居民的影响
使用低耗能、低排放的技术和设备	结合环境和社会收益, 综合考虑短期和长期修复成本	
着重考原位修复技术		收集各方专家意见, 综合考虑
设计移动监测系统	考虑今后土地利用	

5.2.3 绿色修复技术评估

在修复设计阶段，对绿色修复技术的评估旨在综合考虑技术的多样性、可操作性和设备的选择等，保证在完成修复目标的前提下选择最优设计方案，以保证环境、社会和经济的最大效益。在修复设计过程中，我们不仅要注重每个技术的绿色要点，同时整体的去评价修复过程。第 4 章节给出了一些具体的评价方法。

5.2.4 绿色修复技术实施途径

修复技术的选择对整个修复过程中的碳足迹有重大影响，因此我们应综合考虑环境、社会和经济因素，找到最合适的修复技术、方法和设备，并且重点减少二次污染的产生，在设计中包括雨水的收集系统、废物的回收利用系统和渗滤液收集系统等。同时，我们要记录整体预期效益，绿色修复分析等内容，为之后的修复过程提供依据。

5.2.5 跟踪和记录

修复设计中绿色修复技术应被合理纳入技术比选过程并做记录，其中应包括绿色修复对象，绿色修复技术的选择和理由，限制因素和不稳定因素，以及清晰的工程作图和描述等。

5.3 修复施工

5.3.1 修复施工阶段描述

修复工程的施工通常包括修复井和地下修复系统的建造，土壤的挖掘，室内处理设备的安装等工程。绿色修复设计方案的实施是整个修复过程中重要的一环。只有在修复技术的评选阶段就优先考虑绿色修复技术，才能将绿色修复理念贯彻到整个修复工程。不同的修复技术在施工过程中都会产生各种环境影响。工程期间可能涉及到大型的耗能机械进入场地，而机械燃料的燃烧和尾气的排放与噪音污染都是施工期间可能存在的环境问题。施工的土壤挖掘过程也会产生大量的废土和废渣。因此，应在施工前

合理规划，才能最大限度减少修复工程对环境产生的负面影响。

5.3.2 绿色修复技术考量

施工阶段使用的绿色修复技术包括对修复方案的实施和考虑最佳的施工方案，目的是减少修复的不利影响。从环境、社会和经济三方面列举了可选择的绿色修复技术见表 4。

表 4 施工阶段绿色修复技术列表

环境	社会	经济
最大程度减少机械的闲置率	在社会宣传栏张贴工程进程公告或举行社区会议向社区汇报工程进展	在节约工程成本的基础上，为社区经济提供
减少尘埃，废气，噪声以及光污染，营造和谐的生态环境	尽可能多地利用当地的人力物力	
对大气污染进行检测，在有必要时对气味，噪音以及光污染进行检测	合理安排工期，减少工程带来的噪音污染、交通问题等社会问题。例如，有时可优化工程进度，工程的某些阶段可同时进行来缩减工期，从而减少对当地社会环境的干扰	尽可能在当地企业购买设备材料
建立综合的场地废弃物、废水及残渣的回收系统		
选择合适的施工机械，实行节能减排		

5.3.3 绿色修复技术评估

在施工阶段，对绿色修复技术的评估主要指对施工方案设计和施工过程中是否最大程度上减少了对周围环境的影响，同时能经济有效的完成既定的修复目标。

5.3.4 绿色修复技术实施途径

绿色修复的实施涉及到将修复技术或者最佳治理方案投入到实际应用当中。其中很重要的一点是施工人员充分了解绿色修复技术的具体设计方案。尽管绿色修复技术或者最佳治理方案已经包含在设计方案中，仍有必要为项目合同准备一份施工方案。其中必须明确阐述绿色修复技术的组分，以使得施工方对工程量有深入的了解。同时合同双方应仔细审核合同草案，以确保其中包含设计的绿色修复组分。

5.3.5 跟踪和记录

如果想全面了解修复方案的效果，应当根据之前列出的绿色修复评价表中的指标对施工现场进行监测并采集一系列数据。修复工程中收集的实测数据在多大程度上和修复设计的指标所吻合能体现出修复方案的效果。可采集的数据包括：

- 电量的使用；
- 施工机械的油耗；
- 运输车辆的运行距离；

- 工业耗水；
- 回收的废弃物量；
- 再利用的废物量。

在技术实施后，可以利用绿色修复技术软件对所收集的数据进行分析、评测实际修复效果并与修复设计阶段设立的修复指标相比较。修复工程竣工报告应当包含对最佳修复技术及其优缺点评价的章节，并强调其环境，社会与经济效益。

5.4 运行、维护与监测

5.4.1 运行，维护与监测阶段描述

运行、维护与监测阶段包括维护处理系统与监测系统的运行效果。所有的修复技术，包括长期监测，都存在可持续问题。如果修复系统不能长时间运转，这些问题也会不断累积。大型和高能耗的系统诸如抽出处理系统，多相抽提技术和其它的原位修复系统可以运行数年。现在高能耗的修复系统能被更绿色、节能的系统所取代。当涉及到地表水或地下水修复时，应优化修复系统来节能减排。在系统运行时，周边社区可以提供宝贵意见，以便于系统优化，减少对周边地区的干扰。

5.4.2 绿色修复技术考量

绿色修复技术的运行、维护与监测阶段包括利用最佳治理方案和优化现有方案，以此达到节能减排，减少环境影响的目的（比如噪声污染）。从环境、社会和经济三方面列举了可选用的绿色修复技术见表 5。

表 5 运行、维护和监测阶段绿色修复技术列表

环境	社会	经济
利用遥感技术远程监测数据,替代现场勘查及收集数据	通过网络, 邮件或者公告等媒体形式聘用股东	使用低能耗方案来减少能耗
秉承绿色原则, 对污染样品进行回收		
污染检测尽可能用最少的样品	尽可能多地利用当地的人力物力	更多地利用现场监测和统计的方法减少运输及实验室分析费用
使用节能车辆减少燃料的使用及废气排放		
使用小型及节能机械完成修复工程	评价股东或者社区对修复工程的接受度和满意度	数据进行电子化统计和传输, 减少了打印和运输产生的能耗及费用
使用当地的废弃物处理设备对废弃垃圾进行处理		

5.4.3 绿色修复技术评价

在运行、维护与监测阶段，绿色修复技术的评价涉及到对不同修复方案是否达到绿色修复的预期

目标的定期检测。绿色修复技术的评价，应包括对一种或多种最佳治理方案达到的节能减排量，或减少的环境影响。也可涉及更详细的对不同运行、维护与监测技术、程序或方案的评价。

5.4.4 绿色修复技术实施途径

运行、维护与监测阶段，绿色修复技术的实施包括将某种最佳治理方案应用到实际修复工程中，或遵循项目程序的运行与维护守则和合同书中的细则来实现绿色修复的目标。

5.4.5 跟踪与记录

绿色修复技术在运行、维护与监测阶段的跟踪与记录，起码应包括绿色修复方法与涉及的环境利益的评定。这可能涉及到对一系列数据和信息的收集，比如能耗、垃圾与废水的产生、工业耗水及其他可鉴定的绿色修复指标。这些收集的指标应当与绿色修复评价体系所要求的指标相对应。如果需要了解到修复项目的实际影响或者效果，在运行、维护与监测阶段应当收集一系列实测数据。这些收集的实测数据在多大程度上和修复设计的指标所吻合能体现出修复的效果。

6 绿色修复评价工具

绿色修复评价工具是用来定性定量的评价绿色修复工程中不同技术、不同阶段、不同完成程度对环境、社会和经济的影响。

6.1 绿色修复评分框架

绿色修复评分框架见表 6。

表 6 绿色修复评分框架 *

影响因子	影响介质	机理/影响	是/否**	评分
排放/保护				
空气传播 NO _x 和 SO _x	空气	酸雨和光化学烟雾		
氯氟烃气体	空气	臭氧损耗		
温室气体	空气	地球变暖		
空气传播有毒气体/颗粒/其他气体/水蒸气	空气	一般空气污染/有毒气体/湿度增加		
废液的产生	水	水体毒性/底泥		
固体废物的产生	土地	土地使用/毒性		
热排放				
热水	水	栖息地变暖		
热空气	空气	大气湿度增加		
物理干扰				

影响因子	影响介质	机理/影响	是/否**	评分
土壤结构干扰	土地	栖息地破坏/土壤不育		
噪音/臭气/震动干扰	环境	人体厌恶/安全		
交通干扰	土地、环境	人体厌恶/安全		
场地停滞	土地、环境	修复时间/修复效率/重建		
资源耗竭/增益（回收）				
石油（能源）	地下	不可再生能源损耗		
煤矿	地下	不可再生能源损耗		
建筑材料（土壤/混凝土/塑料）	土地	损耗/再利用		
土地和空间	土地	蓄水/再利用		
地表水和地下水	水、土地	蓄水/隔离/再利用		
生态资源（植物/动物/微生物）	空气、水、土地、环境	物种消失/生物多样性减少/生态系统再生能力减小		
总评分				

注：评分框架默认各因素对环境影响相同，可根据实际情况（如业主、社区要求等）对不同影响因子进行加权评分。

注：阐明是否有可替换技术以及是否受影响因子影响，并做进一步评估。

6.2 碳足迹评价

6.2.1 碳足迹（Carbon Footprint）指的是在修复周期中直接或间接排放的温室气体总量。绿色修复过程中进行碳足迹计算和评价的主要目的是量化温室气体的减排量，涉及到的相关工程活动有：

- 电能的转换；
- 绿色或可再生能源的使用；
- 减少不可再生能源的使用；
- 减少有增加温室效应潜力的化学品使用；
- 减少工程用水以及保护水资源；
- 材料废物合理管理。

6.2.2 绿色修复中使用的碳足迹计算方法主要是以过程分析为基本出发点，通过修复过程分析来计算整个周期的碳排放，计算过程包括下列步骤。

6.2.2.1 建立修复过程流程图

尽可能地列出所涉及的原料、活动和过程。

6.2.2.2 确定系统边界

一旦建立了产品的流程图，就必须严格界定工程碳足迹的计算边界。系统界定的关键原则在于要囊括修复过程中所有直接和间接的碳排放，其中施工人员活动导致的碳排放、小型交通工具导致的碳排放等可忽略不计。

6.2.2.3 数据收集

其中两类数据是计算碳足迹必须包括的：

- a) 修复过程中所有物质和活动；
- b) 碳排放因子，即单位物质或能量所排放的 CO₂ 等价物；

6.2.2.4 计算碳足迹

在计算碳足迹之前通常需要建立质量平衡方程，即输入等于累积和输出之和。根据质量平衡方程计算碳排放，其基本公式为：

$$E = \sum_{i=1} Q_i \times C_i$$

式中：

E—为修复过程的碳足迹；

Q_i—为 i 物质或活动的数量或强度数据（质量/体积/千米/千瓦时）；

C_i—为单位碳排放因子。

6.2.2.5 结果检验

这一步骤用来检测碳足迹计算结果的准确性，并使不确定性达到最小化提高碳足迹评价的可信度。提高结果准确度的途径包括：用原始数据代替次级数据，使用更准确而合理的次级数据，计算过程更符合工程具体情况并细致化和请专家审视评价等。

6.3 净环境效益分析

6.3.1 净环境效益分析

环境修复本身是一种高耗能、易产生二次污染的行为，不恰当的修复方案和技术可能会给系统带来零收益：a) 无效、高耗能的修复方案；b) 对环境产生更大的危害，包括产生的二次污染和生态风险等。

净环境效益分析是一种有效评价绿色修复的方法。虽然该方法局限于需要建立跨多个可选择技术的步骤分析，片面的分析会使整个评价过程变得主观，但它可以被看成一种更定向的、更细化的生态风险评价，旨在帮助决策者确保修复工程对环境和生态环境的影响是正向的。

由于绿色修复过程中取得巨大的环境收益能在净环境效益分析中得到体现，因此被认为是当前较好的评价方法之一。

6.3.2 净环境效益分析主要比较和评价的修复方案有：

- a) 原地封存、填埋；
- b) 物理和化学等传统修复方法；
- c) 绿色修复方法；
- d) 几种方法的集成等。

6.3.3 不同技术净环境效益分析的框架

环境修复时不同技术净环境效益分析的框架见图 1。

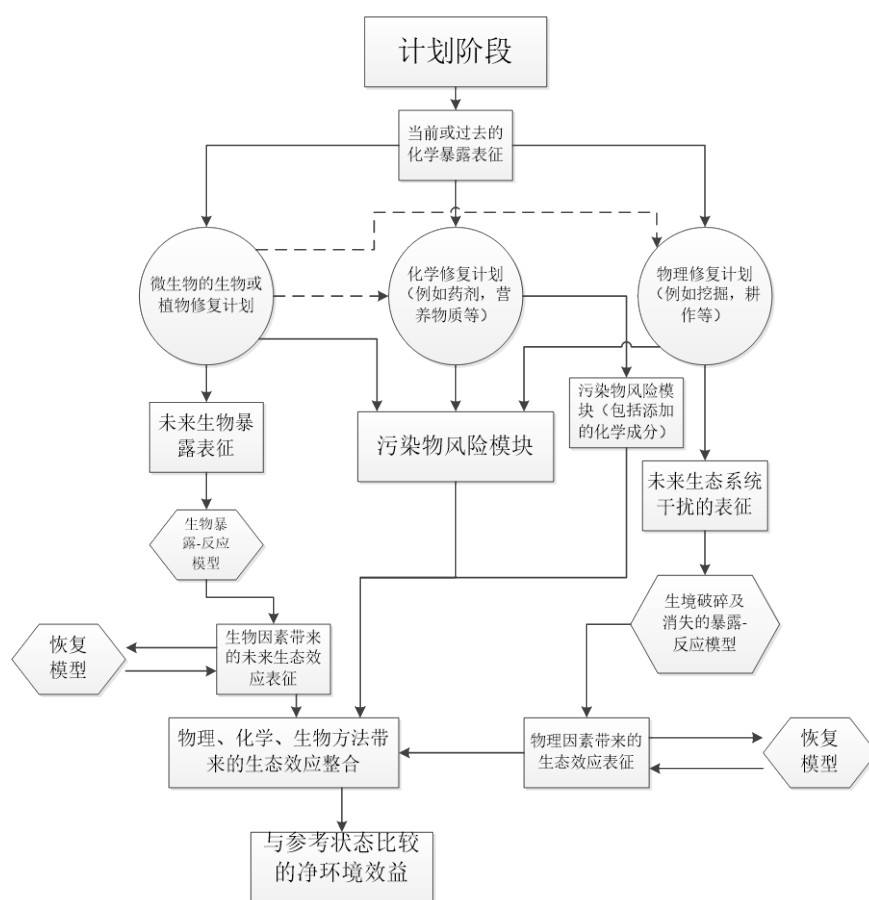


图 1 环境修复时不同技术净环境效益分析的框架

6.3.4 绿色修复技术的净环境效益分析流程图见图 2。

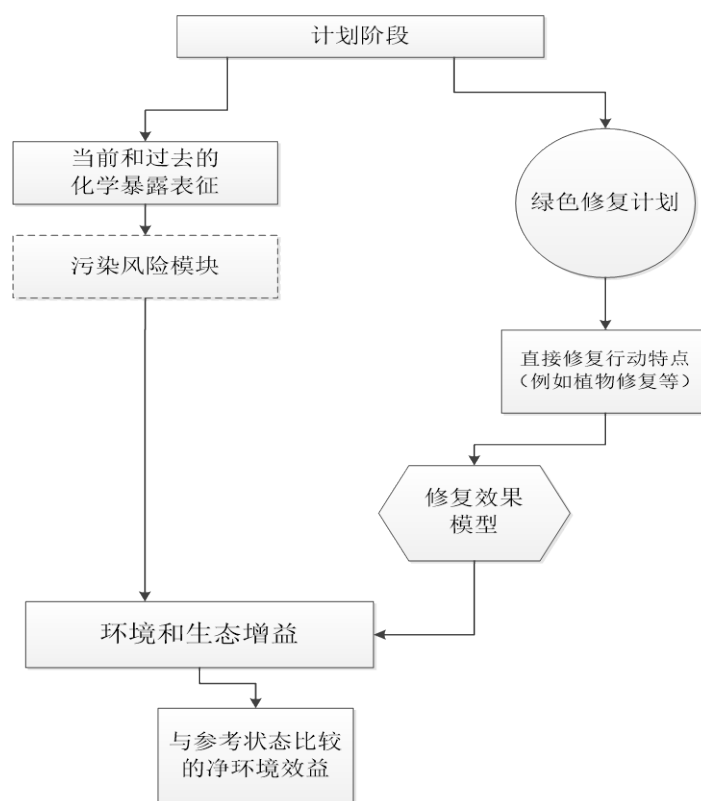


图 2 绿色修复技术的净环境效益分析流程图

6.3.5 净环境效益分析典型案例见附录 A

6.4 生命周期评价

6.4.1 生命周期评价 (Life-Cycle Assessment, LCA)，指的是一种评价产品、工艺或活动，从原料采集，到产品生产、运输、销售、使用、回用、维护和最终处置整个生命周期阶段有关的环境负荷的过程。它首先辨识和量化整个生命周期阶段中能量和物质的损耗及环境释放，再去评价这些消耗和释放对环境的影响，最后辨识和评价减少这些影响的机会。

6.4.2 生命周期评价关注的是整个修复过程中能源的消耗和废物的产生，并且可以和碳足迹等其他方法共同评价绿色修复过程。生命周期评价可以帮助决策者选择最佳的绿色修复方案，原则是在达到修复目标的基础上，a) 减少能耗；b) 最大化使用可再生能源；c) 提高能源利用率；d) 减少废物、污染和温室气体的产生；e) 恢复当地栖息地和生态系统；e) 考虑经济因素。

6.4.3 数据采集在生命周期评价中尤为重要。在对绿色修复评价时，以下数据必须收集：

—人员（如施工人员，设计人员等）

—消耗品（如原料，化学试剂等）

—自然资源（如水、煤矿、土地等）

—可再生和不可再生能源，包括修复过程中的能耗，运输人员、物资、副产品的能耗等

6.4.4 常用的生命周期评价软件工具

常用的生命周期评价软件工具有：

—SimaPro (Product Ecology Consultants

2011, www.pre-sustainability.com/simapor-lca-software);

—GaBi Software® (PE International 2011, www.gabi-software.com/china/software);

—Economic Input-Output Life Cycle Assessment (EIO-LCA, www.eiolca.net)。

它们都有丰富的数据集和不同的评价方法（改良的水足迹评价和场地废弃物建模，碳足迹和碳平衡模型等）能开展生命周期评价，温室气体排放计算，碳足迹计算，能源效率分析等多项绿色修复评估工作。

7 典型技术

绿色可持续修复可具体应用的技术有很多，有些已在国内外广泛得到运用，有些在实际修复或工程示范中较少，还处于中试阶段。下面列举三种典型的、较为成熟的绿色可持续修复技术，其中包括有生物堆技术、原位植物稳定技术和原位生物通风技术。

7.1 生物堆

7.1.1 名称

技术名称：生物堆 (Biopile)

7.1.2 适用性

7.1.2.1 适用的介质：污染土壤、油泥等

7.1.2.2 可处理的污染物类型：石油烃等易生物降解的有机物

7.1.2.3 应用限制条件：不适用于重金属、难降解有机污染物污染土壤的修复，粘土类污染 土壤修复效果较差

7.1.3 介绍

7.1.3.1 原理

对污染土壤堆体采取人工强化措施，促进土壤中具备污染物降解能力的土著微生物或外援微生物的生长，降解土壤中的污染物。

7.1.3.2 系统构成和主要设备

生物堆主要由土壤堆体、抽气系统、营养水分调配系统、渗滤液收集处理系统以及在线监测系统组成。其中，土壤堆体系统具体包括污染土壤堆、堆体基础防渗系统、渗滤液收集系统、堆体底部抽气管网系统、堆内土壤气监测系统、营养水分添加管网、顶部进气系统、防雨覆盖系统。抽气系统包括抽气风机及其进气口管路上游的气水分离和过滤系统、风机变频调节系统、尾气处理系统、电控系统、故障报警系统。营养水分调配系统主要包括固体营养盐溶解搅拌系统、流量控制系统、营养水分投加泵及设置在堆体顶部的营养水分添加管网。渗滤液收集系统包括收集管网及处理装置。在线监测系统主要包括土壤含水率、温度、二氧化碳和氧气在线监测系统。

主要设备包括抽气风机、控制系统、活性炭吸附罐、营养水分添加泵、土壤气监测探头、氧气、二氧化碳、水分、温度在线监测仪器等。

7.1.3.3 关键技术参数或指标

影响生物堆技术修复效果的关键技术参数包括：污染物的生物可降解性、污染物的初始浓度、土壤通气性、土壤营养物质含量、土著微生物数量、土壤含水率、土壤温度和 pH、运行过程中堆体内氧气含量以及土壤中重金属含量。

- 1) 污染物的生物可降解性：对于易于生物降解的有机物（如石油烃、低分子烷烃等），生物堆技术的降解效果较好；对于 POPs（持久性有机污染物）、高环的 PAHs（多环芳烃）等难以生物降解的有机污染物污染土壤的处理效果有限。
- 2) 污染物初始浓度：土壤中污染物的初始浓度过高时影响微生物生长和处理效果，需要采用清洁土或低浓度污染土对其进行稀释。如土壤中石油烃浓度高于 50000 mg/kg 时，应对其进行稀释；
- 3) 土壤通气性：污染土壤本征渗透系数应不低于 10^{-8} cm^2 ，否则应采用添加木屑、树叶等膨松剂增大土壤的渗透系数；
- 4) 土壤营养物质比例：土壤中碳:氮:磷的比例宜维持在 100:10:1，以满足好氧微生物的生长繁殖以及污染物的降解；
- 5) 微生物含量：一般认为土壤微生物的数量应不低于 10^5 数量级；
- 6) 土壤含水率：宜控制在 90% 的土壤田间持水量；

- 7) 土壤温度和 pH: 温度宜控制在 30~40℃ 范围, pH 宜控制在 6.0~7.8;
- 8) 堆体内氧气含量: 运行过程中应确保堆体内氧气分布均匀且含量不低于 7%
- 9) 土壤中重金属含量: 土壤中重金属含量不应超过 2500 mg/L。

7.1.3.4 生物堆的具体工艺流程图见图 5。

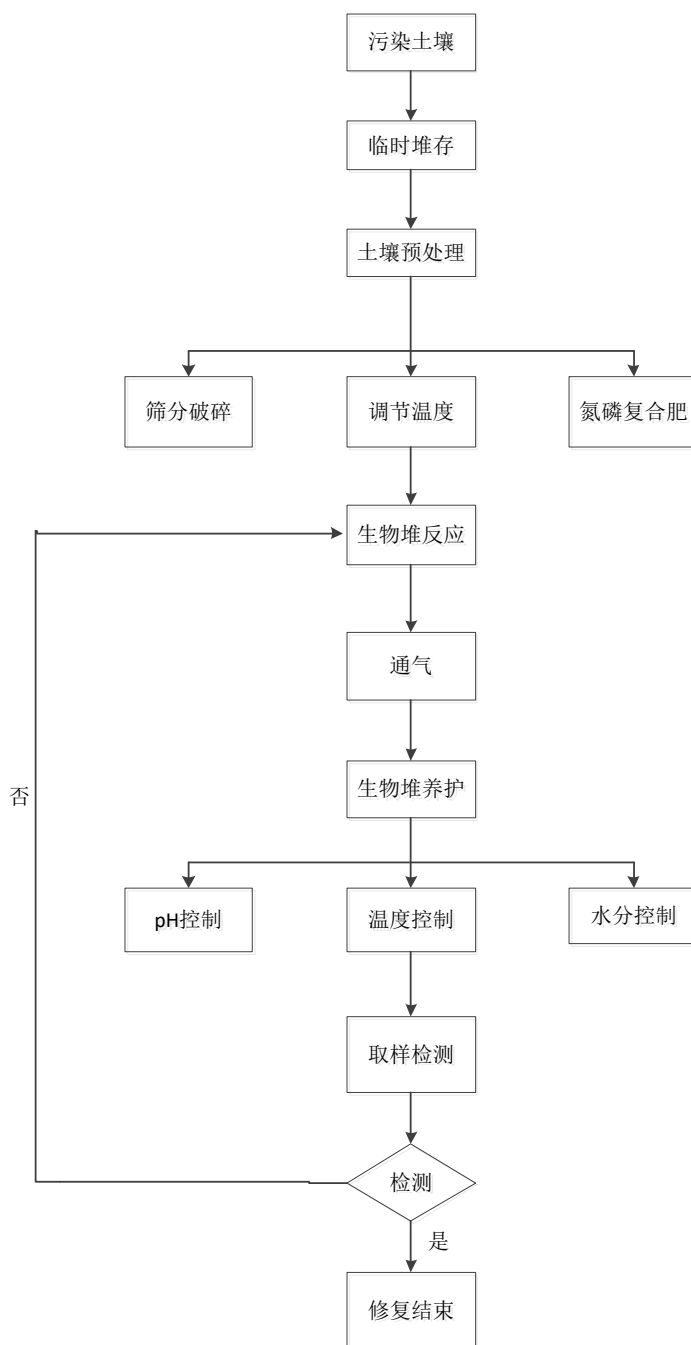


图 5 生物堆技术工艺流程图

7.1.3 技术应用基础和前期准备

在利用生物堆技术进行修复前，应进行可行性测试，对其适用性和效果进行评估并获取相关修复工程设计参数，测试参数包括：土壤中污染物初始浓度、污染物生物降解系数（或呼吸速率）、土著微生物数量、土壤含水率、营养物质含量、渗透系数、重金属含量等。

7.1.4 实施过程

- 1) 对挖掘后的污染土壤进行适当预处理（调整土壤中碳、氮、磷、钾的配比，土壤含水率、土壤孔隙度、土壤颗粒均匀性等）；
- 2) 在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见图 6。将预处理后的土壤堆置其上形成堆体。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。

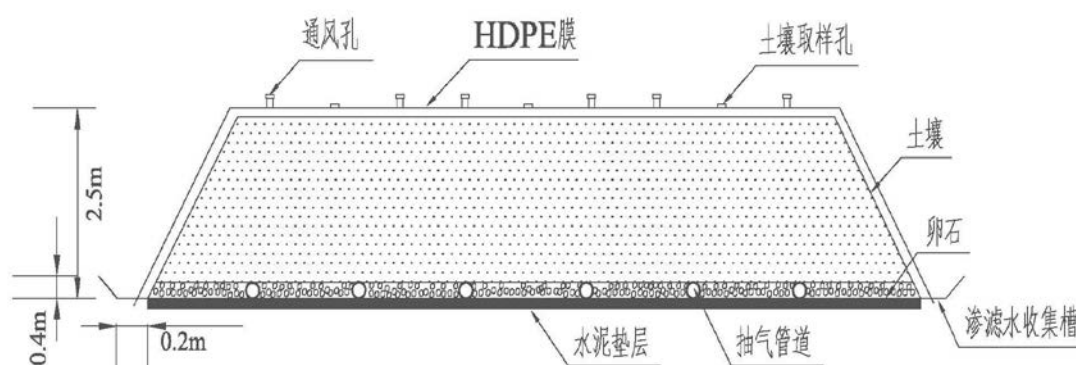


图 6 生物堆堆体剖面示意图

- 3) 开启抽气系统使新鲜空气通过顶部进气口进入堆内，并维持堆内土壤中氧气含量在一定浓度水平。定期监测土壤中氧气、营养、水分含量并根据监测结果进行适当调节，确保微生物处于最佳的生长环境，促进微生物对污染物的降解。定期采集堆内土壤样品，了解污染物的去除速率。

7.1.5 运行维护和监控

运行过程中需对抽气风机、管道阀门进行维护。定期对堆内氧气含量、含水率、营养物质含量、土壤中污染物浓度、微生物数量等指标进行监测。为避免二次污染，应对尾气处理设施的效果进行监测，以便及时采取应对措施。

7.1.6 修复周期及参考成本

该技术处理周期一般为 1-6 个月。在美国应用的成本约为 130-260 美元/ m^3 ，国内的工程应用成本约为 300-400 元/ m^3 。特定场地生物堆处理的成本和周期，可通过实验室小试或中试结果进行估算。

7.1.7 生物堆技术见附录 B。

7.2 原位植物稳定技术

7.2.1 技术名称

技术名称：植物稳定 (Soil phyto-stabilization)

7.2.2 技术适用性

7.2.2.1 适用介质：污染土壤

7.2.2.2 可处理的污染物类型：主要针对重金属污染物（如砷、镉、铅、镍、铜、锌、钴、锰、铬、汞等）

7.2.2.3 应用限制条件：不适用于未找到修复植物的重金属，对有机污染物污染土壤修复效果一般；植物生长受气候、土壤等条件影响，本技术不适用于污染物浓度过高或土壤理化性质严重破坏不适合修复植物生长的土壤。

7.2.3 技术介绍

7.2.3.1 原理

植物稳定化一般指将重金属污染的土壤按一定比例与稳定剂混合，经熟化使土壤形成具有一定强度、化学稳定性及低渗透率的稳定体，从而降低重金属在环境中的迁移渗透和生物有效性。其中，加入化学稳定剂使重金属转化为稳定形态而丧失毒性是比较常用的方法。随后通过种植绿色植物，利用植物根基的一些特殊性质对稳定后的土壤进行养护。

7.2.3.2 系统构成和主要设备

该技术主要由原位预处理系统、稳定剂添加、植物育苗、植物种植与再利用系统组成。主要设备包括预处理土壤预处理设备，原位药剂添加设备，种植所需农业机具（翻耕设备、灌溉设备、施肥器械），重金属回收设备等。

7.2.3.3 关键技术参数或指标

关键技术参数包括：污染物类型，污染物初始浓度，土壤颗粒，土壤含水率，稳定化药剂的选择，土壤 PH，温度，绿色植物的修复，重金属提取效率等。

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；

- 1) 土壤颗粒：对污染土壤进行预处理（破碎和均匀化），保证土壤颗粒直径在 0.5-5 cm 之间；
- 2) 土壤含水率：通过喷洒，晾晒等方式保持土壤含水率在 30%-40%之间，确保植物较好生长的土壤田间持水量；
- 3) 稳定化药剂：不同材料对不同重金属的稳定效果不同（表 8）。针对土壤性质、场地环境特性以及污染程度等条件，应合理选择稳定化药剂。利用稳定化药剂中钙氧化物、磷酸盐和硫化物等组分与重金属离子进行化学反应，及其化学基团与重金属形成稳定的矿物盐和矿物质；

表 8 不同材料对重金属的稳定效果 *

	As	Hg	Cr (VI)	Pb	Cd	Zn
钙氧化物	-	+	-	++/-	++	++/-
磷酸盐	-	+	-	++	+	+
含铁化合物**	++		++	+	+	+
硫化物	+	++		+	+	+
粘土	+/-	+	+/-	+	+	+
有机物	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-
还原剂	-		++			
氧化剂	+					
活性炭、沸石	+	++	+	+	+	+

* 其中“++”表示非常好，“+”表示好，“-”表示不利

** 这里含铁化合物包括零价铁、铁盐、铁氧化物

- (1) 土壤 pH：重金属污染物稳定化后的土壤 pH 值应适合于大多数植物生长，但不同植物生长最优的 pH 值不一定相同；
- (2) 气温条件：低温条件下植物生长会受到抑制。在气候寒冷地区，需通过地膜或冷棚等工程措施确保植物生长；
- (3) 绿色植物的选择：除了根据设计提出对规格和外观的要求外，要注意选择长势健旺、无病虫害、无机械损伤、根须发达的植物。

7.2.4 技术应用基础和前期准备

修复前应进行相应的可行性试验，目的在于评估该技术是否适合于特定场地的修复以及为修复工程设计提供基础参数。试验参数包括：土壤中污染物初始浓度、土壤 PH 值、稳定化药剂中试、气候条件、土壤肥力等，并根据已有的研究成果确定植物的生长情况以及重金属的稳定效果等。

7.2.5 实施过程

实施过程包括：（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); (2) 提出修复目标, 制定修复计划; (3) 土壤预处理; (4) 选取合适的稳定化药剂, 原地与污染土壤均匀混合; (5) 污染场地田间整理、设置高程控制桩、运料摊铺, 栽种并养护植物。

7.2.6 运行维护和监测

该技术要求在污染土壤中加入稳定化药剂后满足土壤浸出液中重金属浓度的修复目标, 之后对植物生长过程进行相应的灌溉和施肥等农业措施, 并定期对污染土壤中污染物浓度等相关指标进行监测。

7.2.7 修复周期及参考成本

该技术处理周期一般为 3-6 个月。具体应视修复目标值、工程大小、待处理土壤体积、污染物化学性质及其浓度分布情况及地下土壤特性等因素而定。根据美国 EPA 数据显示, 应用于浅层污染介质的修复成本约为 60-90 美元/ m^3 。

7.2.8 原位植物稳定技术的典型案例见附录 C。

7.3 原位生物通风技术

7.3.1 技术名称

技术名称: 原位生物通风 (In-Situ Bioventing)

7.3.2 技术适用性

7.3.1.1 适用的介质: 非饱和带污染土壤

7.3.1.2 可处理的污染物类型: 挥发性、半挥发性有机物

7.3.1.3 应用限制条件: 不适用于重金属、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

7.3.3 技术介绍

7.3.3.1 原理

生物通风法由土壤气相抽提法 (SVE) 发展而来, 通过向土壤中供给空气或氧气, 依靠微生物的好氧活动, 促进污染物降解; 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。可通过注入热空气、营养液、外源高效降解菌剂的方法对污染物去除效果进行强化。

7.3.3.2 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、汽水分离罐、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。

7.3.3.3 关键技术参数或指标

影响生物通风技术修复效果的因素包括：土壤理化性质、污染物特性和土壤微生物三大类。

1) 土壤理化性质因素包括：

—土壤的气体渗透率，一般应该大于 0.1 达西。

—土壤含水率，达到 15-20% 时，生物修复的效果最好。

—土壤温度，大多数生物修复是在中温条件（20-40℃）下进行的，最大不超过 40℃。土壤的 pH：大多数微生物生存的 pH 范围为 5-9，通常酸碱中性条件下微生物对污染物降解效果较好。

—营养物的含量，一般认为，利用微生物进行修复时，土壤中 C:N:P 的比例应维持在 100:5-10:1，以满足好氧微生物的生长繁殖以及污染物的降解，并为缓慢释放形式时，效果最佳。一般添加的 N 源为 NH_4^+ ，P 源为 PO_4^{3-} 。

—土壤氧气/电子受体，氧气作为电子受体，其含量是生物通风最重要的环境影响因素之一。在生物通风修复中，除了用空气提供氧气外，还可采用 H_2O_2 、 Fe^{3+} 、 NO_3^- 或纯氧作为电子受体。

2) 污染物特性因素包括：

—污染物的可生物降解性，生物降解性与污染物的分子结构有关，通常结构越简单，分子量越小的组分越容易被降解。此外，污染物的疏水性与土壤颗粒的吸附以及微孔排斥都会影响污染物的可生物降解性。

—污染物的浓度，土壤中污染物浓度水平应适中。污染物浓度过高会对微生物产生毒害作用，降低微生物的活性，影响处理效果；污染物浓度过低，会降低污染物和微生物相互作用的几率，也会影响微生物的降解率。

—污染物的挥发性，一般来说挥发性强的污染物通过通风处理易从土壤中脱离。

3) 土壤微生物因素包括：

一般认为采用生物降解技术对土壤进行修复时土壤中土著微生物的数量应不低于 10^5 数量级；但是土著微生物存在着生长速度慢，代谢活性低的弱点。当土壤污染物不适合土著微生物降解，或是土壤环境条件不适于土著降解菌大量生长时，需考虑接种高效菌。

7.3.4 技术应用基础和前期准备

在利用生物通风技术进行修复前，应进行相应的可行性测试，目的在于评估生物通风技术是否适合于场地的修复并为修复工程设计提供基础参数，测试参数包括：土壤温度、土壤湿度、土壤 pH 值、营养物质含量、土壤氧含量、渗透系数、污染物浓度、污染物理化性质、污染物生物降解系数（或呼吸速率）、土著微生物数量等，可在实验室开展相应的小试或中试实验。

7.3.5 实施过程

在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。大部分低沸点、易挥发的有机物直接随空气一起抽出，而高沸点、不易挥发的有机物在微生物的作用下，可以被分解为 CO_2 和 H_2O 。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）。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。

7.3.6 运行维护和监测

生物通风技术的运行维护较简单，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。同时，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。同时，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。

7.3.7 修复周期及参考成本

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/ m^3 （土壤 10000cy，约合 7646 m^3 ）。

7.3.8 原位生物通风技术的典型案例见附录 D。

附录 A（资料性附录）净环境效益分析典型案例

A.1 2006 年净环境效益分析成功应用于美国密西西比河上游 9 万加仑柴油泄漏事件。决策者运用了净环境效益分析的思路，确定了受污染区域的重点物种、栖息区及重点污染单元（图 A.1，图 A.2），并提供了可能的应对修复措施。

A.2 核心部分是利用风险评估矩阵，来确定敏感物种（濒临灭绝鱼类和贝类等）、重点栖息地以及哪些区域能通过自净修复，哪些区域需要介入必要的修复手段进行修复。其中，1A 评级表示对濒临灭绝物种可能的毁灭性影响，4D 评级表示对物种的微小影响。

敏感物种是指对石油泄漏和修复技术最为敏感的物种，它们是绿色修复技术选择的关键因子。

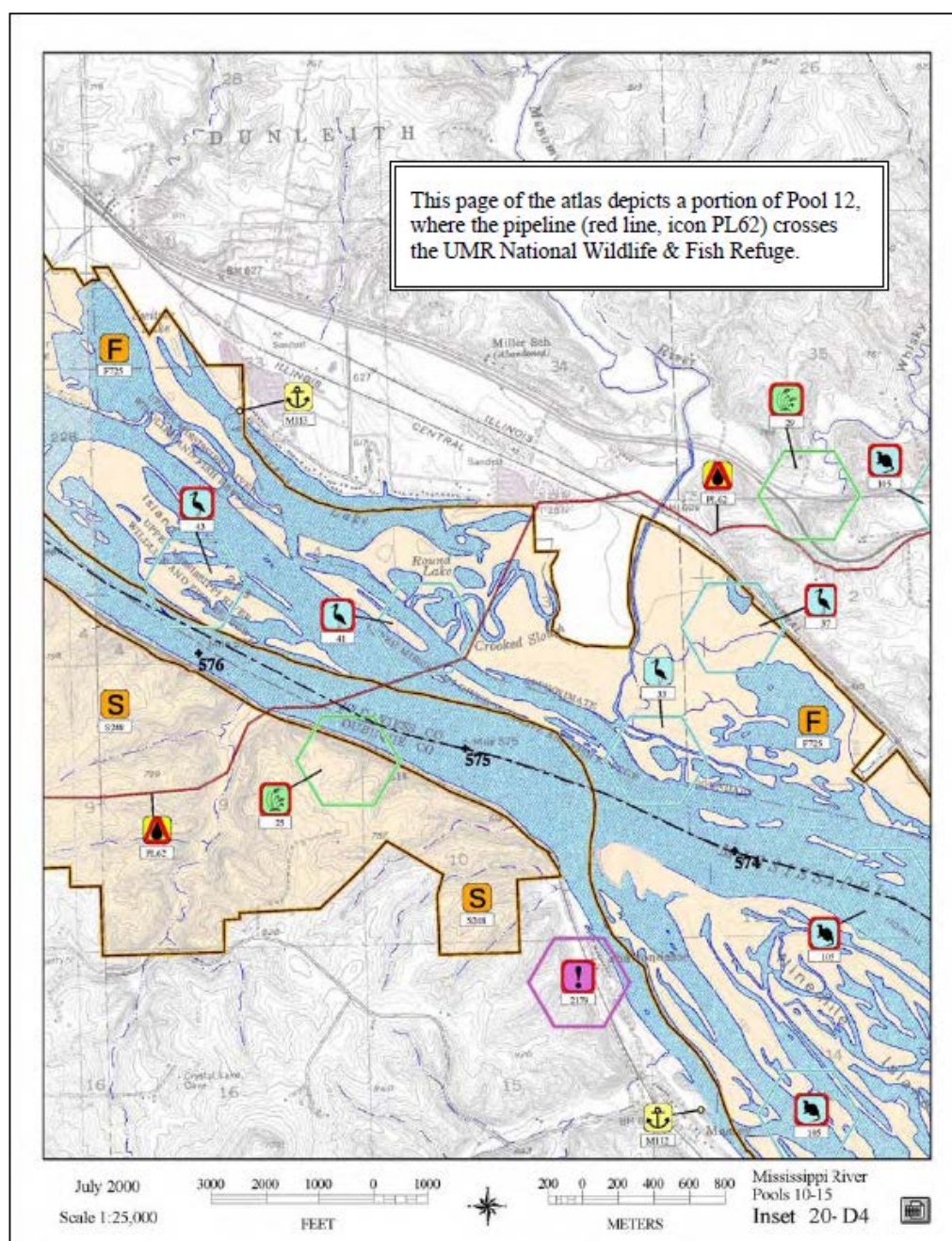
A.3 风险评估矩阵

风险评估矩阵见表 A.1。

表 A.1 美国密西西比河上游柴油泄漏事件净环境效益分析-风险评估矩阵

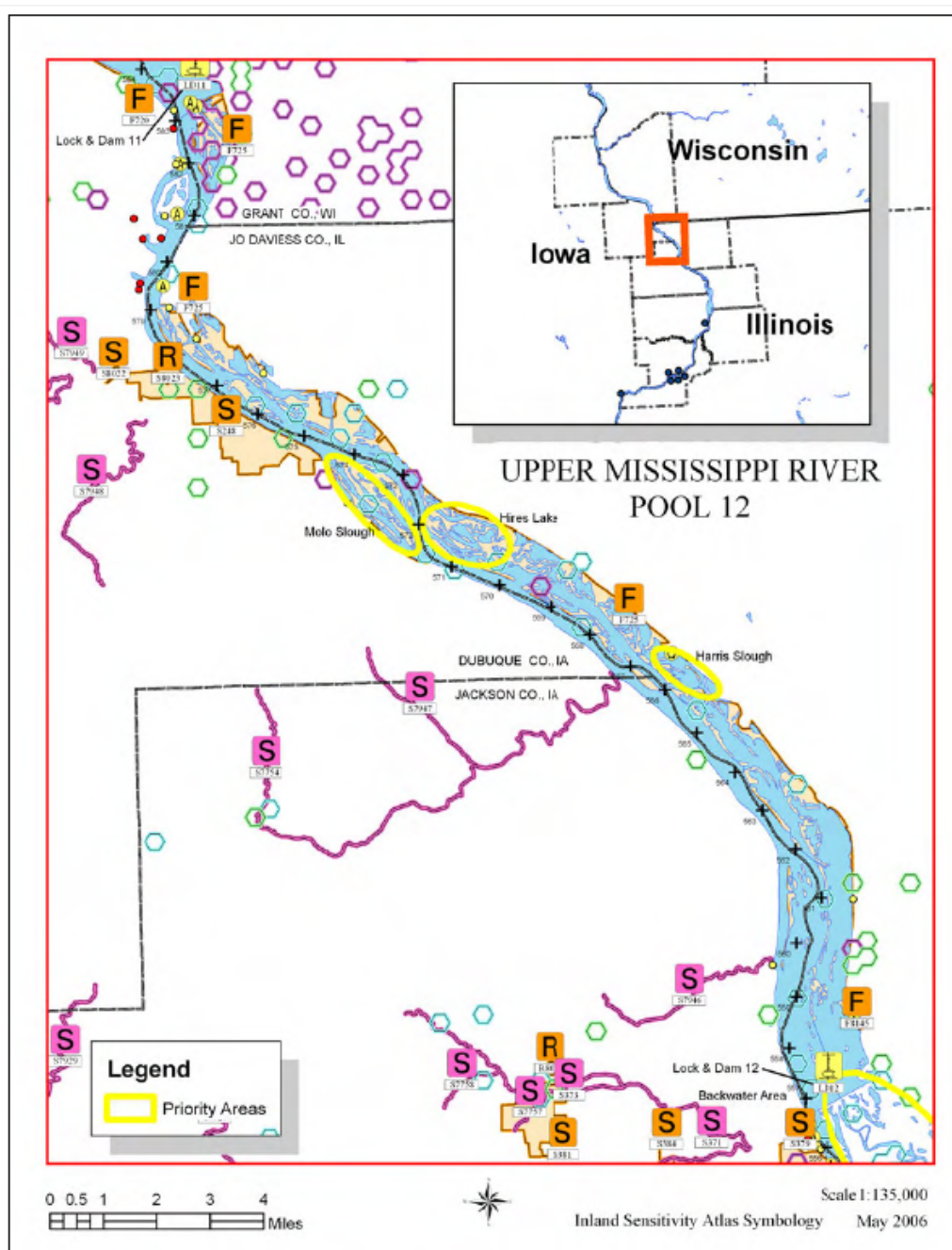
		潜在修复时间			
		可能的物种 崩溃	长期 (4-7 年)	中期 (2-3 年)	短期 (1 年或 更短)
资源损坏程度	毁灭性的	1A	2A	3A	4A
	重要的	1B	2B	3B	4B
	边际的		2C	3C	4C
	可忽略不计的		2D	3D	4D

*深灰色表示应高度重视，浅灰色表示应一般重视，白色表示可忽略



注：图中黄色的石油标志表明了泄漏石油管道的位置。该图还标明了沿水域内陆的敏感区域以及重点关注物种（如海鸥、海龟等）。

图 A. 1 美国密西西比河上游柴油泄漏事件泄漏地点及敏感物种确定



注：黄色区域为重点区域。为了保护重点动植物，专家定义了 5 块重点区域，为应对措施和修复技术的选择作参考。

图 A. 2 美国密西西比河上游柴油泄漏事件净环境效益分析中重点修复区

附录 B（资料性附录）生物堆技术典型案例

B.1 工程背景

某化工园区，经场地调查和风险评估后得知存在苯胺污染土壤约 49920 m³，为满足修复目标和项目施工进度，这部分污染土壤采取生物堆异位处理的方法，使得苯胺浓度小于 4 mg/kg。

B.2 工程规模

工程规模 49920 m³。

B.3 主要污染物及污染程度

主要污染物为苯胺，最大检出浓度为 5.2 mg/kg。苯胺饱和蒸汽压为 0.3，辛醇-水分配系数为 0.9，具备一定的挥发性，能在负压抽提下部分通过挥发而去除。同时，研究表明，其好氧条件下的生物降解半衰期为 5-25 天，降解性能较好。

B.4 土壤理化特性

污染土壤以中砂为主，有机质含量较低，污染物“拖尾”效应“弱。土壤通风性能较好，本征渗透系数达 10^{-6} cm²，有利于氧气的均匀传递。

B.5 方案设计

生物堆是一种通过生物降解减少有机物成分浓度的典型绿色修复技术。

该项技术是将土壤从污染地区挖掘出来，运送到一个地上指定地点（布置防渗衬底和通风管道等）进行生物降解的异味修复方法。

这种方法包括将受到的污染土壤合理堆放，并且依靠通风、加入营养物质和微量元素、增加湿度等手段，促进土壤中好氧生物降解以除去土壤中吸附的高分子污染成分，尤其对于场地土壤有机质含量低、渗透性好，污染较轻，具有良好生物降解性的挥发性有机污染物有优秀的修复效果。

同时，该技术相较于传统物理、化学修复方法，有明显的优势：

- a) 批次处理能力大；
- b) 设备成熟环保；
- c) 运行管理简单；
- d) 二次污染少，并且符合绿色可持续修复的相关要求。

减少了分批处理的次数，减少了重型器械和交通工具的使用，有效降低了工程能耗，减少了温室

气体的排放；

对机械和生物堆尾气、生物堆渗滤液进行收集和集中处理，有效减少了空气和水体污染；

运行和管理相较于传统方法简单，有效减少了人力物力的投入以及废物的产生。

B. 6 工艺流程和关键设备

B. 6. 1 生物堆工艺流程

生物堆工艺流程包括：

- 1) 污染土壤首先进入土壤暂存场暂存，然后根据土壤处置的进程安排，取土进行土壤筛分，筛分设施配备除尘和尾气净化设备，保证筛分过程中产生的粉尘和废气能达到排放标准；
- 2) 筛分后的土壤和卵石运入土壤处置场，卵石铺设在生物堆的最底层，用于通气管网的气体分配和保护；
- 3) 运行生物堆对污染土壤进行处理，并定期监测污染物的去除程度和压力、温度、湿度、堆内氧气含量等参数。处理过程中产生的废气进入尾气净化设备处理，渗滤液进入废水处理设施；
- 5) 修复后的土壤达到修复目标后可用于填埋造地，尾气净化后达标排放，废水处理按照修复方案的废水利用标准进行回用。

B. 6. 2 生物堆工艺流程图

生物堆工艺流程图见图 B. 1。

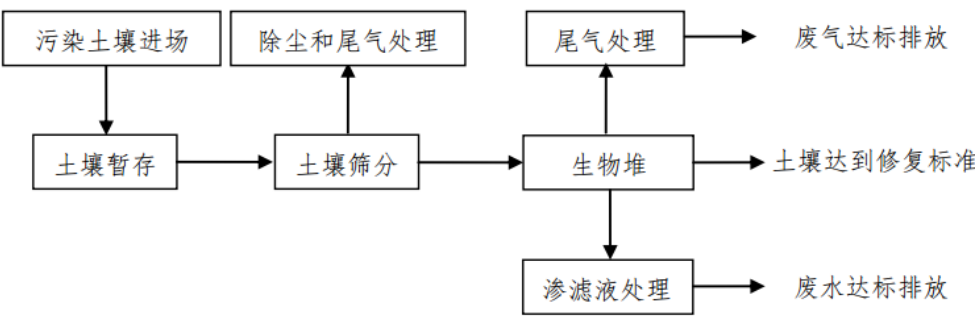


图 B. 1 某化工厂生物堆修复工艺流程图

B. 6. 3 生物堆技术的关键设备

该项目生物堆的设备主要由通气设备、气液分离设备和尾气净化设备组成等。

B. 7 主要工艺及设备参数

考虑到该项目的土方量及甲方要求的修复工期，该项目采用模块化设计，单个批次总共建设 3 个堆体，长 100 m，宽 50 m，高 2 m，批次处理能力约为 10000 m³，每个堆体配置独立的抽气控制设备进行控制，每个堆体的设计处理时间为 1.5 个月。

B.7.1 生物堆底部建造

生物堆底部包括地基，防渗衬垫，渗滤液遏制护堤和清洁土壤层。一旦地基建造好后，在上面放置防渗衬垫。这里防渗衬垫使用 20m×25m 的高浓度聚乙烯膜（HDPE）。衬垫和护堤建造好后，在上面铺设 20~25cm 的清洁土壤层，它的作用是在建造和移除生物堆的时候保护衬垫。

B.7.2 通气系统安装

为保证微生物在土壤中污染物的降解效率和速率，生物堆体重需给予充足的通风。氧气为影响生物堆修复效率最为重要的电子受体，因此充足的通风十分重要。

通风系统的通风方式分为主动通风和被动通风两种。被动通风设计与操作较为简单：在生物堆体的不同高度设置排水瓦管、多孔管、割缝管；管道的长度需要满足条件使得其末端能够伸出生物堆体之外，使得通风系统能够正常通风。

被动通风不需要鼓风设备，因此能够减少生物堆建设的成本。除此之外，由于被动通风的通风率较小，能够避免由于过度通风引起的水分过量散失。

主动通风相比被动通风系统，能够大大提高生物对中微生物降解的速率。主动通风分为抽气和鼓气两种形式。都需要在生物堆体中布设连接鼓风机的多孔管道，将空气抽出或者鼓入生物堆中。通常生物堆设计的通风率能够满足避免土壤中微生物处于缺氧的状态即可，过高的通风率可能会带来土壤中污染物的过度挥发。

考虑到该场地的实际情况和有机污染物特性，利用鼓风的方式进行通风，并对生物堆体的尾气进行收集处理。

B.7.3 养料增加

在构建生物堆之前，需要在土壤中添加、搅拌所需的营养元素。同时，若在生物堆运行的过程中如需再次添加养料，可以通过管道系统将溶解在水中的养料均匀喷淋在生物堆中。需要注意的是对于吸附能力不强或是遇水结块的土壤，直接添加分装的养料比溶解在水中更高效。

氮、磷、钾等养料的添加量需要根据场地内待处理土壤中原有氮、磷、钾的含量加以计算，使得添加养料后生物堆中的土壤 C、N、P 的比例在 100:10:1~100:10:0.5。

B.7.4 水分增加

生物堆有效含水量（通常在 70%~95%）对微生物降解起到至关重要的作用。水分过多会造成生物堆中孔隙阻塞，阻碍通风，同时造成污染物及微生物所需的营养物质的渗漏和流失。生物堆水分的添加量需要根据环境及生物堆的含水率等实际情况进行调节。通常的环境条件下，生物堆会损失约 1%~2% 质量的水分，因此，若通过土壤混翻和在生物堆建设时添加足够的水分，通常无需再建设水分灌溉系统进行水分添加，土壤持水量的值可以通过实验室检测获得。

B.7.5 生物堆形成

在污染土壤预处理之后，将其置于要建生物堆的底部。本场地中，我们设计的生物堆为 $100 \times 50 \times 2\text{m}$ ，边和高的比例为 1.25:1 的斜率。

B.8 监测与分析

在生物堆初期的设计和建成后的运行过程中，都需要进行相关参数的监测，以满足绿色修复的要求。监测的对象包括土壤、土壤气体及产生的渗滤液等。

B.9 成本分析

本项目包含建设施工投资、设备投资、运行管理费用的处理成本大约为 350 元/ m^3 。

B.10 修复效果

依据绿色修复的理念，该项目 49920 m^3 污染土壤中苯胺的浓度均降至修复目标 4.0 mg/kg 以下，满足修复要求并通过了环保部门的验收。

附录 C（资料性附录）植物稳定技术典型案例

C.1 工程背景

某镍网厂原厂址，经场地调查和风险评估后得知存在铬（III）、铜、镍等污染。

C.2 工程规模

工程规模 1250 m³。

C.3 主要污染物及污染程度

土壤中铬的最高检出浓度为 21200 mg/kg，铜的最高检出浓度为 936 mg/kg，镍的最高检出浓度为 34900 mg/kg。

C.4 方案设计

经过对重金属污染土壤修复技术比选，确定采用异位植物稳定化技术修复处理。设计原则是通过重金属耐受性植物降低重金属的活性，减少重金属被淋滤至地下水或通过空气载体扩散进一步污染环境的可能性。

目前，该技术已在矿区修复上效果明显，如废弃矿山重金属污染的植物稳定修复、尾矿库区的植被重建等。植物稳定修复的作用主要有两方面：一是通过根部累积、沉淀、转化重金属，或通过植物根表面吸附作用固定重金属；二是保护污染土壤不受风蚀、水蚀，减少重金属渗漏污染地下水和向四周迁移污染周围环境。

重金属在土壤中可与有机物如木质素、腐殖质等结合，或在含铁氢氧化物或铁氧化物表面形成重金属沉淀及多价螯合物，从而降低重金属的可移动性和生物有效性。植物稳定利用和强化了这一过程，进一步降低了重金属的活性。它的局限在于没有将重金属从土壤中彻底清除，而且效果较为缓慢。

该工程采取先将重金属污染的土壤按一定比例与稳定剂混合，经熟化使土壤形成具有一定强度、化学稳定性及低渗透率的固化体，以此降低重金属在环境中的迁移渗透和生物有效性，高效满足修复目标。通过种植选定的绿色植物，利用其根际的一些特殊物质对稳定化后土壤进行养护。

C.5 工艺流程

植物稳定化修复土壤的工艺流程框架见图 C.1。

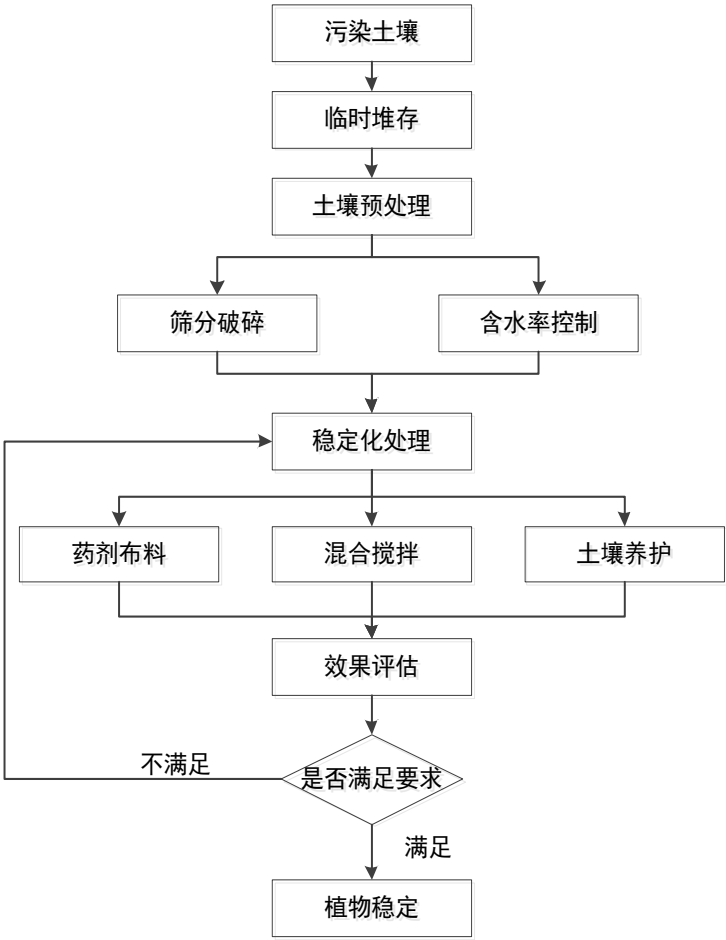


图 C.1 污染土壤重金属修复工艺流程图

通过该技术处理污染土壤，首先根据重金属污染土壤的分布范围进行放线，挖掘后在场地内暂存。随后对污染土壤进行预处理过程，对于大块的污染物需要通过筛分破碎设备将其筛分至一定大小，均匀的土壤；对于含水率较高的土壤，需要采用化学药剂或晾晒等方法减少土壤中的含水率，使含水率控制在药剂反应最佳的范围内。

将污染土壤预处理完毕后，则通过加入稳定化药剂稳定土壤中的重金属。该过程中需要根据土壤中重金属的污染程度确定药剂的添加量，并将药剂与土壤充分混合反应，养护一段时间后，对稳定化效果进行评估。

评估满足修复要求后，对于处理后的土壤平铺在道路的两侧，进行植物稳定，进一步达到稳定效果、防止土壤冲蚀及飞尘。

C.6 关键参数

C.6.1 稳定化药剂

所用稳定剂为复合药剂，由硫化物、钙氧化物、硫酸盐、铁粉、水泥、铝氧化物（所列出成分为主要组份，其余不在此罗列，以及独特的稳定粘合剂等复合而成。

C.6.2 绿色植物

绿色植物的选择，除了根据设计提出对规格和外观的要求外，要注意选择长势健旺、无病虫害、无机械损伤、适合常州环境、根须发达，且不会对重金属造成累计作用的植物。

针对污染场地的特征，选择绿色植物为弯叶画眉草。

C.6.3 主要参数

污染土壤重金属植物稳定化修复主要技术参数见表 C.1。

表 C.1 污染土壤重金属植物稳定化修复主要技术参数

项目	技术参数
修复设备	可以对土壤进行筛分，破碎后土壤颗粒小于 5cm
修复工程量	1250m ³
修复时间	14 个工作日稳定化 其他时间进行绿色植物稳定
药剂添加量	0.5~5%（质量百分数）

C.7 修复效果

经处理后的土壤浸出毒性远远低于 GB 5085.3-2007 中重金属的浸出限值，通过了环保部门的验收。

附录 D（资料性附录）原位生物通风技术典型案例

D.1 工程背景

原位生物通风技术在我国实际修复或工程示范较少，但在美国应用广泛，其中美国犹他 Hill 空军基地的污染修复尤为典型。该场地的污染物来源于航空燃料油的泄漏，存在总石油烃污染土壤 30000 m³。修复目标是使污染物小于 5 mg/kg。

D.2 工程规模：

工程规模 30000 m³

D.3 主要污染物及污染程度

主要污染物是总石油烃，最大检出浓度为 20000 mg/kg，平均浓度为 400 mg/kg，不均匀的分布在地下 20 m 以内。

D.4 土壤构成

场地地下土壤主要由混砂、砾石和黏土组成。

D.5 方案设计

项目设计基于气相抽提（SVE），采取抽出-注入的方式对场地的土著微生物进行通风。场地内布设抽提井、注入（通气）井和监测井。土壤气体被真空泵抽出再注入，并对尾气集中处理后排入大气。原位生物通风示意图见图 D.1。

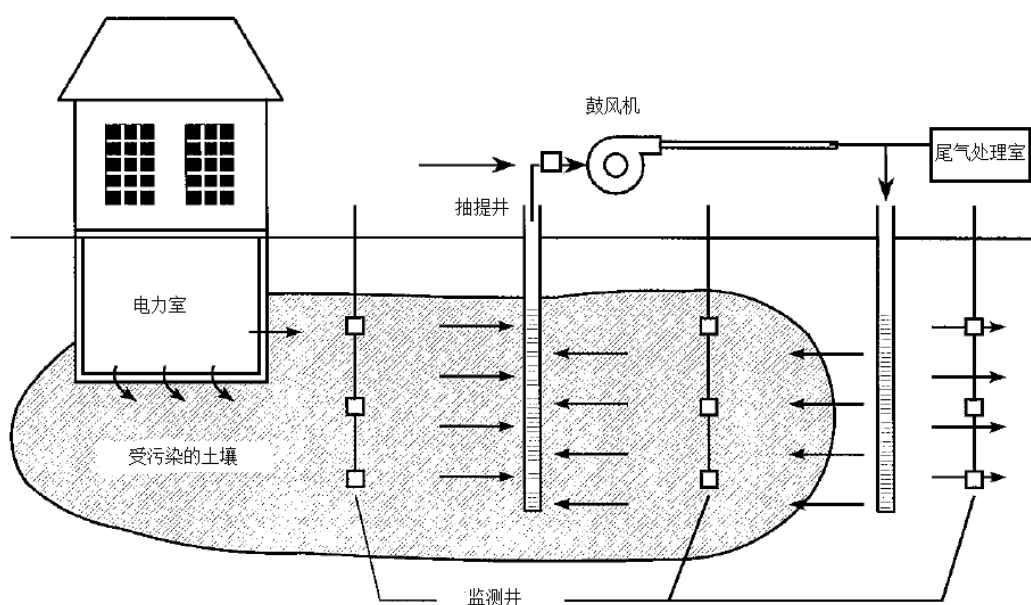


图 D.1 原位生物通风示意图

D.6 关键设备及工艺参数

工程井均采用 UPVC 材质, 井径 25 mm, 井深 3.5 m。气体流量第一年保持在 1500 cfm (42000 L/min), 随后调整至 300 cfm - 600 cfm (8500-17000 L/min)。同时, 在工程第二年向地下加入了适当的水分和营养物, 保证了微生物的降解环境。

D.7 修复效果

经检测, 两年的修复效果见图 D.2, 地表以下 20 米污染土壤中的总石油烃浓度基本降至 5 mg/kg, 完成了修复目标。

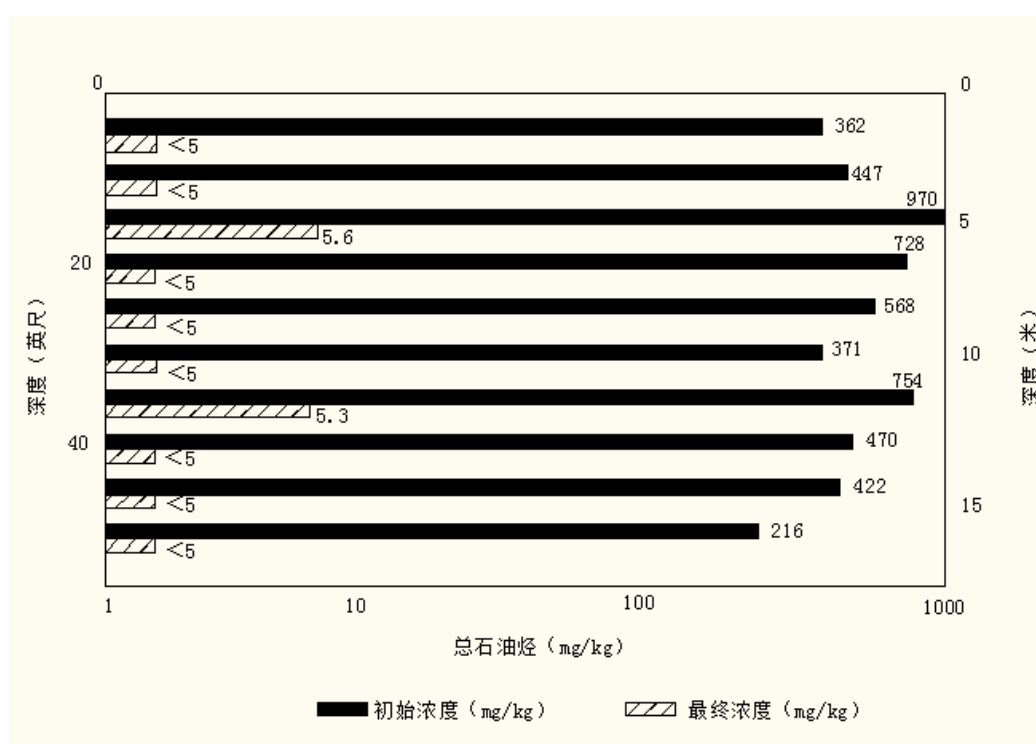


图 D.2 美国犹他 Hill 空军基地原位生物通风技术修复效果