

附件 2:

CAEPI

中国环境保护产业协会标准

T/CAEPI □□—20□□

污染地块绿色可持续修复通则

Principles for Green and Sustainable Remediation

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

20□□-□□-□□发布

20□□-□□-□□实施

中国环境保护产业协会

发布

目 次

前言.....	3
1 适用范围.....	1
2 标准引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 绿色可持续修复总则.....	3
5 可持续性评价.....	4
6 绿色可持续修复实施内容与要求.....	10
附录 A（资料性附录） 典型修复技术设计与施工的最佳管理措施	15
附录 B（资料性附录） 最佳管理措施筛选和实施记录表	21
附录 C（资料性附录） 可持续性评价指标.....	22
附录 D（资料性附录） 可持续性评价报告大纲	23
附录 E（资料性附录） 可持续性评价及绿色可持续修复案例	24

前 言

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》，保护生态环境，保障人体健康，促进污染地块的绿色可持续修复，制定本标准。

本标准规定了绿色可持续修复的原则、评价方法、实施内容和技术要求。

本标准为首次发布。

本标准由中国环境保护产业协会组织制订。

本标准起草单位：清华大学、中国环境科学研究院、环境保护部环境规划院、北京建工环境修复股份有限公司、北京高能时代环境技术股份有限公司。

本标准主要起草人：侯德义、李广贺、宋易南、司传海、谷庆宝、张红振、李书鹏、魏丽、李淼、张芳、刘鹏、伍斌、董璟琦、李淑彩、李静文、申坤。

本标准由中国环境保护产业协会 2018 年□□月□□日批准。

本标准自 2018 年□□月□□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，由清华大学、中国环境科学研究院等起草单位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，请将相关资料寄送至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)。

污染地块绿色可持续修复通则

1 适用范围

本标准规定了污染地块绿色可持续修复的原则、评价方法、实施内容和技术要求以及推广措施。

本标准适用于土地使用权人在经风险评估确认需要治理与修复的污染地块，开展的污染土壤和地下水修复及其相关活动。针对污染地块或者污染区域的城市规划、用地规划等项目也可参考使用。

本标准不适用于放射性污染或致病性生物污染地块的修复。

2 标准引用文件

本标准内容引用了下列文件中的条款。凡是不注日期的引用文件，其有效版本（含修改单）适用于本标准。

GB/T 24040	环境管理 生命周期评价 原则与框架
GB/T 24044	环境管理 生命周期评价 要求与指南
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	污染场地修复技术导则
HJ 682	污染场地术语

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1 污染地块 contaminated site

按照国家技术规范确认超过有关土壤环境标准的疑似污染地块。

3.2 地块修复 site remediation

采用物理、化学或生物的方法，转化、降解、吸收、转移、固定或阻隔污染地块土壤和地下水中的污染物，将有毒有害的污染物转化为无害物质，或使其含量降低到可接受水平，或降低污染物的溶出性和迁移能力，或阻断其暴露途径，满足相应土壤环境功能或使用功能

的过程。

3.3 可持续性评价 sustainability assessment

通过定性、半定量、或者定量的方法，对修复方案或者修复过程涉及到具体措施进行综合评估，确定其环境、社会、经济影响，为修复过程中的决策提供科学的支撑。

3.4 绿色可持续修复 green and sustainable remediation (GSR)

在满足地块环境功能、使用功能和风险控制的基础上，为了减少修复本身所带来的负面影响，综合考虑修复全生命周期内的环境、社会、经济因素，采取使修复净效益最大化的方案和措施。

3.5 过度修复 over engineering

由于缺乏对污染物在土壤中的迁移和转换的科学认识，未能建立准确的污染地块概念模型，或是采纳过于严格的修复标准，导致修复工程本身造价过高以及不必要的资源能源消耗和环境二次影响，最终造成修复的环境、经济、社会净效益远远低于正常修复达成的净效益。

3.6 二次环境影响 secondary impact

二次环境影响指的是污染修复本身所带来的负面环境影响，包括材料和能源的消耗、废物的产生、制造修复材料和装备过程中的污染物排放以及污染修复过程中产生的环境污染。

3.7 绿色可持续修复最佳管理措施 green and sustainable remediation best management practice

在修复过程中，所采取的有利于提升修复环境、经济、社会其中任何一方面的效益，促进修复可持续性的行为。

3.8 场地概念模型 site conception model

综合描述地块污染源释放的污染物通过土壤、水、空气等环境介质，进入人体并对地块周边及地块未来居住、工作人群的健康产生影响的关系模型。地块概念模型包括污染源、污染物的迁移途径、人体接触污染的介质和接触方式等。

3.9 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。

3.10 生命周期评价 life cycle assessment (LCA)

对一个产品或服务系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价。

3.11 功能单位 functional unit

用来作为基准单位的量化的产品或服务系统性能。

3.12 系统边界 system boundary

通过一组准则确定哪些功能单位属于产品或服务系统的一部分。

3.13 生命周期清单分析 life cycle inventory analysis (LCI)

生命周期评价中对所研究产品或服务整个生命周期中输入和输出进行汇编和量化的阶段。

3.14 影响类型参数 impact category indicator

对影响类型的量化表达。

3.15 特征化因子 characterization factor

由特征化模型导出,用来将生命周期清单分析结果转换成影响类型参数共同单位的因子。

3.16 生命周期影响分析 life cycle impact analysis (LCIA)

生命周期评价中分析和评价产品系统在产品或服务整个生命周期中的潜在环境影响大小和重要性的阶段。

3.17 敏感性分析 sensitivity analysis

用来估计所选用方法和数据对研究结果影响的系统化程序。

3.18 不确定性分析 uncertainty analysis

用来量化由于模型的不确定性、输入的不确定性和数据变动的积累而给生命周期清单分析结果带来的不确定性的系统化程序。

3.19 生命周期解释 life cycle interpretation

生命周期评价中根据规定的目的和范围的要求对清单分析和(或)影响评价的结果进行评估以形成结论和建议。

4 绿色可持续修复总则

4.1 全面性原则

在达到污染地块修复目标的基础上,通过可持续性评价全面考虑修复的环境、社会、经济影响,使修复的“净效益”最大化。

4.2 利益相关方参与及公开透明原则

修复方案的制定与实施应公开透明,并充分考虑污染地块修复的利益相关方的诉求。

4.3 绿色可持续修复实施总体流程

实施绿色可持续修复应结合可持续性评价和最佳管理措施,总体流程见图1。

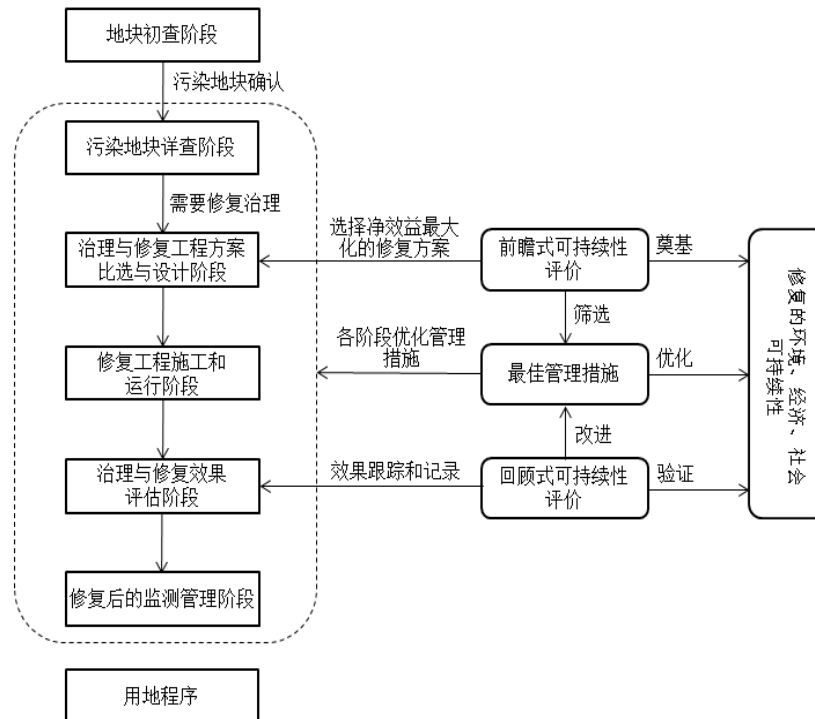


图1 绿色可持续修复实施总体流程图

5 可持续性评价

可持续性评价根据评价目的分为前瞻性可持续性评价和回顾式可持续性评价。在治理与修复工程方案比选与设计阶段，通过前瞻性可持续性评价评估污染地块修复造成的影响，选择环境、社会、经济综合效益最优的修复方案。在治理与修复效果评估阶段，通过回顾式可持续性评价对修复工程的可持续性进行跟踪和记录，总结绿色可持续修复实践经验，改进和优化最佳管理措施。

5.1 可持续性评价框架

宜采用生命周期评价评估修复的环境影响，加以社会、经济方面的影响评价，构成污染地块修复可持续评价性方法体系。

可持续性评价的方法可分为三个层次：定性可持续性评价；半定量可持续性评价；定量可持续性评价。分层次的可持续性评价方法流程框架见图2。

选择可持续性评价方法时需分析和解释以下因素：

- (1) 可持续性评价目的；
- (2) 评价指标及其性质；
- (3) 项目规模及复杂程度；

(4) 评价数据的来源与质量。

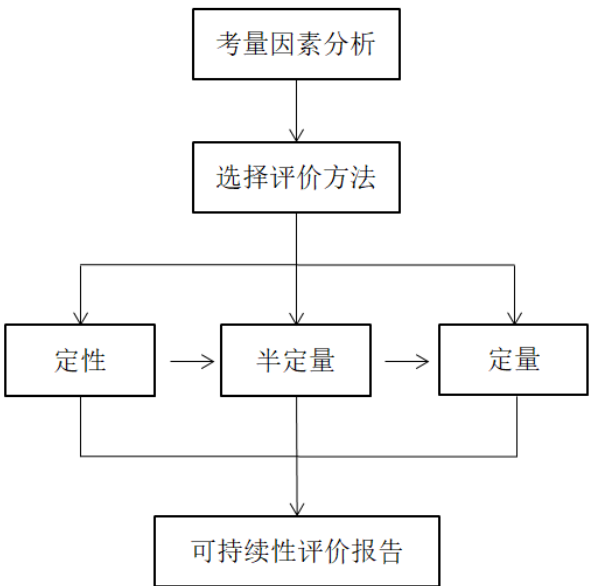


图 2 分层次的可持续性评价示意图

评价的数据来源包括：

- (1) 直接数据：现场实测或者项目过程的数据收集得到的数据；
- (2) 间接数据：有关资料，如文献、实验报告等获取的数据；
- (3) 推算数据：在类似项目有关数据的基础上进行推算后得出的数据；
- (4) 代替数据：直接套用的类似项目有关数据。

回顾式可持续性评价应优先使用直接数据。

可持续性评价参考性指标见附录 C。可持续性评价方法选择矩阵见表 1。

表 1 可持续性评价方法选择矩阵

评价目的	前瞻式可持续性评价			回顾式可持续性评价		
项目规模	小	→ 中	→ 大	小	→ 中	→ 大
环境	⊙	⊙/●	●	●	●	●
社会	○	○/⊙	⊙	○	⊙	⊙
经济	○	⊙/●	⊙/●	○	⊙	●
注： ○——定性评价； ⊙——半定量评价； ●——定量评价 项目规模判断依据：污染介质方量（小型<1000m ³ ；中型 1000-30000m ³ ；大型>30000m ³ ）						

5.1.1 定性可持续性评价

定性可持续性评价只考虑修复过程中最主要的影响因素，根据相应的可持续性指标对修复技术方案进行简单的分析和比选，应执行如下流程：

- (1) 根据评价目的，确定环境、社会、经济方面的定性可持续性评价指标；
- (2) 针对各指标进行定性评价并评分；
- (3) 根据各指标评分对修复技术方案进行综合评分。

5.1.2 半定量可持续性评价

当通过定性可持续性评价方法难以达到可持续性评价目的时，可以采用可持续半定量或定量评价方法。半定量可持续性评价宜采取多准则分析（Multi-criteria analysis），执行如下流程：

- (1) 根据评价目的以及地块条件确定环境、社会、经济可持续性指标；
- (2) 确定各项可持续性指标的评分标准并评分；
- (3) 确定各项可持续性指标权重；
- (4) 根据指标评分、权重计算和比较不同修复技术方案的可持续性总分。

对于可定量可持续性指标和影响类型，应给予量化评分标准，或执行 5.1.3 定量可持续性评价；对于定性可持续性指标，执行 5.1.1 定性可持续性评价；各项可持续性指标的权重宜通过利益相关方共同商议得出。

5.1.3 定量可持续性评价

对于规模较大、较为复杂的地块修复项目宜采用定量可持续性评价。环境影响的定量可持续性评价可采用生命周期评价等方法；对于社会和经济可持续性的评价，可采用成本效益分析（Cost-benefit analysis）等方法。

环境定量可持续性评价方法参见本章 5.2 节。

5.2 生命周期环境影响评价

环境影响的定量评价宜使用生命周期评价（Life Cycle Assessment）的方法，或简化的生命周期评价，如环境足迹评价（Environmental Footprint Analysis）。针对污染地块修复的生命周期评价流程如图 3 所示。

5.2.1 目的及范围的确定

生命周期评价目的确定包括：

- (1) 确定应用意图，即生命周期评价所解决的问题；
- (2) 确定评价结果的接受者（如政府部门、地块业主、社区群众等），确保接受者所

关注的问题被充分评价和解释。

根据生命周期评价目的，确定生命周期评价范围，主要内容包括：

- (1) 确定评价方法学框架；
- (2) 确定所需信息和数据的质量要求，即数据来源、准确性、详细程度；
- (3) 评价结果所要求的报告类型和格式。

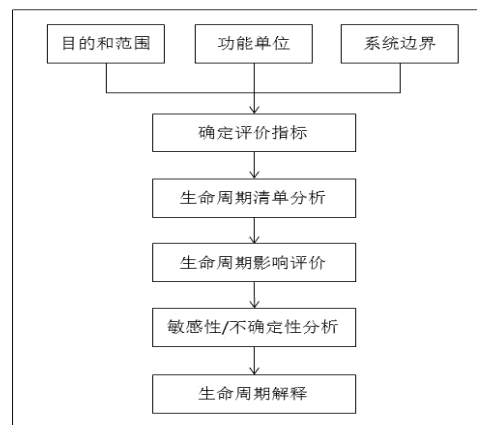


图 3 生命周期评价流程图

5.2.2 确定功能单位

功能单位描述了系统的基本面，为数据的输入和输出提供了统一的基准。功能单位的要素有：

- (1) 污染土壤（地下水）处理量；
- (2) 污染物的削减标准，如污染物削减量（率）或是降至相关规定限值。

5.2.3 确定系统边界

系统边界包括以下三类：

- (1) 过程边界：评价包含的单元过程；
- (2) 地理边界：评价所涵盖的区域；
- (3) 时间边界：评价的时间尺度。

系统边界由评价目的和所评价的修复技术方案决定。系统边界描述应详细，对不同修复技术方案进行生命周期评价时必须使用一致的系统边界。可以通过修复系统流程图的方式对系统边界加以说明。

5.2.4 确定评价指标

评价指标可以量化地块修复的可持续性影响，是生命周期评价的依据。环境影响因素包括：资源和能源消耗、设备材料消耗、二次污染、废物产生等方面。

对于评价指标的选择需要考虑：

- (1) 评价的目的和范围；
- (2) 评价的系统边界；
- (3) 该项指标对于决策的影响程度；
- (4) 不同评价的修复技术方案对于该项指标的差异程度；
- (5) 该项指标的数据质量是否满足要求；
- (6) 利益相关方的意见。

生命周期评价参考指标参见附录 C。

5.2.5 生命周期清单分析

根据评价指标进行数据的收集，并将数据和其对应的单元过程进行关联，最终形成生命周期清单。数据质量直接影响输出的结果，进而影响评价结果的准确性。数据质量的影响因素有：

- (1) 数据的代表性；
- (2) 数据的不确定性；
- (3) 数据的完整性；
- (4) 数据的可重复性；
- (5) 数据来源。

生命周期清单分析具体方法执行 GB/T 24044 相关内容。

5.2.6 生命周期影响评价

生命周期影响评价的目的是根据生命周期清单分析结果对污染地块修复造成的潜在生态环境影响和人体健康影响进行评价。生命周期影响评价的主要流程分为三步：

- (1) 选择影响类型、类型参数和特征化模型；
- (2) 将生命周期清单结果分类；
- (3) 类型参数结果的计算。

生命周期影响评价具体方法执行 GB/T 24044 相关内容。

5.2.7 敏感性及不确定性分析

为了了解评价结果的有效性和局限性，进行敏感性分析和不确定性分析。通过敏感性分析分析生命周期清单数据与评价结果的关系确定对评价结果影响较大的评价指标和影响类型参数，通过不确定性分析对评价过程中使用的假设和数据的精准性进行说明。不确定性分析对象主要包括：

- (1) 地块污染情况；
- (2) 修复周期；
- (3) 修复效率；
- (4) 生命周期清单数据。

5.2.8 生命周期解释

在敏感性分析和不确定性分析的基础上，确定修复可持续性的主要影响因素，主要影响因素类型包括：

- (1) 生命周期清单参数；
- (2) 可持续性评价指标；
- (3) 修复单元过程。

生命周期解释是对生命周期影响评价的总结，为修复的决策提供依据。

5.3 社会和经济影响评价

5.3.1 社会影响评价

通常情况下，社会影响难以被完全量化，因此可以采用定性或者半定量可持续性评价方法对社会影响进行评价，基本流程执行本章 5.1.1 和 5.1.2。社会影响指标可包括但不限于：

- (1) 工人健康与安全：现场修复人员的污染暴露风险及施工安全情况；
- (2) 公众参与及满意度：在整个修复过程中利益相关方的参与程度，周边居民受到修复施工的负面影响以及对修复工程的认可度；
- (3) 提供就业：修复过程中为修复工人提供就业机会，修复成功后地块再利用的就业岗位。
- (4) 修复弹性：环境与社会状况变化之后，修复结果是否仍然有效。

工人健康与安全，公众参与及满意度是社会影响评价的核心指标，利益相关方的参与程度的评价可以以公众参与渠道、公众参与频次、意见反馈情况等作为依据；对修复工程的认可度可以通过满意度调查确定。

5.3.2 经济影响评价

经济影响可以通过成本效益分析（Cost-benefit analysis）等方法来评价。当修复的效益难以量化时，可通过半定量可持续性评价方法将经济指标结果以经济可持续性得分展现，便于与环境、社会影响进行比较。经济影响指标可包括但不限于：

- (1) 修复成本：包括地块调查、方案制定、基础建设、修复实施、修复后监测等阶段的费用，可分为项目设计与建设费用，以及运行维护费用；

(2) 社会经济影响：包括对地方经济的影响，以及对当地居民收入的影响等。

需要指出的是，在进行成本效益分析时需要考虑资金的时间价值，用合理的利率来计算全生命周期成本。

5.4 总体可持续性评价

为了权衡修复的环境、社会、经济影响，需要进行总体可持续性评价。宜使用半定量可持续性评价方法对可行修复方案的环境、社会、经济影响进行赋分和加权，得到总体可持续性得分，通过比较不同修复方案的总体可持续性得分，选择“净效益”最大化的修复方案。

半定量可持续性评价方法基本流程执行本章 5.1.2。

5.5 可持续性评价报告编写

可持续性评价报告是对可持续性评价的总结，应对评价的各个阶段的方法、模型、假设、数据以及局限性做出说明。可持续性评价报告的内容包括：

- (1) 基本情况；
- (2) 可持续性评价内容；
- (3) 结论和建议。

当使用生命周期评价的方法评价环境可持续性时，环境评价部分内容的编写执行 GB/T 24044 中的相关内容。可持续性评价报告大纲见附录 D。

6 绿色可持续修复实施内容与要求

在污染地块管理的各个阶段，通过采取最佳管理措施实现修复的环境、社会、经济绿色可持续目标。最佳管理措施的核心要素有：

- (1) 修复工程对环境产生的不良影响小于不采取修复工程对环境的影响；
- (2) 减少能源消耗，鼓励使用可再生能源；
- (3) 减少材料消耗及废弃物产生，鼓励使用再利用材料；
- (4) 减少二次污染物生成与排放及保障现场工作人员的安全与健康；
- (5) 使用全生命周期的方法选取和优化修复技术方案；
- (6) 通过可持续性评价全面考虑修复的社会经济影响。

针对污染地块修复各个阶段特点，分别制定规划、调查、修复技术方案制订、施工、修复后监测与再开发阶段的可能最佳管理措施。最佳管理措施的选择需要考虑实际的地块情况与技术条件。可持续性评价宜作为修复方案设计阶段和施工阶段的最佳管理措施选择依据。

最佳管理措施筛选和实施记录表见附录 B。

6.1 地块规划阶段

地块规划阶段决定了地块用途，是修复目标值和修复方案制定的基础，将可持续性考虑融入地块规划阶段有助于绿色可持续修复的实施。供规划决策方参考的最佳管理措施包括：优化规划配置，如将学校、医院和住宅等敏感用地配置在无污染或低污染地块，将工业、绿地等低敏感用地配置在高污染地块；将需要大量挖方的建设目标规划在需要进行污染土壤大量挖方的区域；在规划阶段引入污染调查和修复设计从业人员的专业意见；提高决策过程中利益相关各方的参与性等。

6.2 地块调查阶段

污染地块调查阶段应评估表 2 所列最佳管理措施，实施所有可行的措施并对实施效果进行记录和评价。对不可行的措施，应提供筛选依据。

表 2 地块调查阶段最佳管理措施示例

最佳管理措施	影响类型		
	环境	社会	经济
确保地块调查资金投入来源，地块调查经费宜占污染地块调查修复总经费的 10%以上，为合理的风险管控或修复设计提供科学基础。	√	√	√
详细追溯分析地块污染历史、地块水文地质情况等信息，制定科学的调查布点、采样方案。建立地块概念模型，分析污染物暴露途径。对污染复杂的地块，宜加密布点。合理规划初步调查和详细调查工作量，动态优化检测指标、布点方案等，以减少送检量，节省检测成本，同时提高调查质量和精度		√	√
采用直压式钻井代替螺旋钻建井，以缩短钻井时间，减少钻屑的产生	√		
动态调整和优化钻探方案，避免钻探过程造成的污染迁移、扩散；临时监测井应及时废井并填筑密封。	√		
充分使用高分辨率成像探测技术	√		
充分使用遥感勘测，减少现场调查工作量	√		√
充分使用便携式现场检测仪器	√		√
对钻探孔进行有效管理，避免污染扩散	√		
回收和就近处置地块调查过程中产生的废弃物	√	√	
向公众告知地块调查结果		√	
可使用现场测试试剂盒进行筛测			√
收集与地块情况更贴近的条件参数，用于本地块的风险评估	√	√	
结合地块未来利用规划，确定合理的修复目标建议值，避免过度修复	√	√	√

6.3 治理与修复技术方案比选与设计阶段

治理与修复技术方案比选与详细设计阶段应评估表 3 及附录 A 中所列相关最佳管理措施,实施所有可行的措施并对实施效果进行记录和评价。对不可行的措施,应提供筛选依据。

附录 A 给出了土壤淋洗、热脱附、生物修复、固化/稳定化、植物修复等典型修复技术的方案制定最佳管理措施。

表 3 修复技术方案设计阶段最佳管理措施示例

最佳管理措施	影响类型		
	环境	社会	经济
考虑采取原位修复代替土壤挖掘后异位处置的可行性	√		
设计污染废水现场集中处理方案	√		
考虑能最大化保留地块及周边绿地的施工布置方案	√	√	
设计良好的交通模式及场外运输方案以减少运输量	√	√	√
考虑避免季节因素导致修复过程能耗的增加（如加热或冷却）	√		√
考虑各种再生能源，如太阳能、风能及填埋场甲烷燃气等整合利用方案	√		√
修复技术尽量利用或模拟自然过程	√	√	√
考虑使处理污染土壤减量化的可行性	√		√
将修复过程中废弃物的回收与再利用方案纳入设计	√	√	
修复技术方案需要考虑修复工程实施后生态系统的恢复	√	√	
修复技术方案需要考虑利益相关方的诉求		√	
建立公众参与渠道，反馈公众意见，提高公众认可度		√	
进行小试或者中试确保修复技术方案的可行性，降低修复风险			√
根据地块实际情况，适当进行补充调查，确保修复技术设计依据的准确性	√		√
综合权衡不同修复技术方案的近期和长远的成本及效益			√
优先选择通用型或就近的设备、材料，减少设备和材料的再造成本或运输成本			√
对于粗颗粒含量较高的土壤，优先考虑使用土壤淋洗技术，实现土壤资源的清洁再生	√	√	√

6.4 修复工程施工和运行阶段

修复工程施工和运行阶段应评估表 4 及附录 A 中所列相关最佳管理措施，实施所有可行的措施并对实施效果进行记录和评价。对不可行的措施，应提供筛选依据。附录 A 给出

了土壤淋洗、热脱附、生物修复、固化/稳定化、植物修复等典型修复技术的方案制定最佳管理措施。

表 4 施工阶段最佳管理措施示例

最佳管理措施	影响类型		
	环境	社会	经济
对开挖的污染土进行全过程管控，防止土壤遗洒、挥发性有机物扩散和雨水冲蚀等	√		
开挖覆盖区采用可生物降解的材料进行覆盖	√		
使用低排放的运输车辆	√	√	
对于挥发性、半挥发性有机物污染土壤的大规模异位修复，选用可多次循环使用的密闭车间对开挖区进行封闭开挖，控制二次污染	√	√	
运输车辆出场前清洗轮胎上携带的污染土壤	√	√	
对废水进行循环利用，控制雨水径流，建立雨水收集装置。施工中进行雨污分流，减少污水产生量	√		
对特定污染区域进行洒水降尘，优先选用中水进行洒水	√	√	
使用生物柴油、超低硫柴油清洁能源	√		
使用可再生、可生物降解产品代替化石燃料生产的产品	√		
就近在场内或近地块位置寻找可利用的基坑回填材料	√		√
对修复过程中产生的余热进行回用	√		√
选择使用就近的废物处置设施和垃圾填埋场	√	√	√
采用降低或阻隔噪音的集成技术	√	√	
定期向公众公示修复进展情况，调查及反馈公众意见		√	
通过自动控制等方式避免机械空转	√	√	√
合理安排施工，动态调整工作计划，整合现场可用的资源		√	√
建立项目基准信息表，记录能源、水、材料等消耗量与异位处理量等数据，用以控制与改善运行系统的处理效率		√	√
工艺许可时，废弃的处理有机物的活性炭优先进入现场热解吸系统进行协同处置，减少外运工作		√	√
针对量足够大的可再生的辅材，联系生产厂家回收进行再生利用	√	√	√
执行国家节能环保相关其他规定和要求	√	√	√

6.5 修复后监测管理阶段

修复后监测管理阶段应评估表 5 及附录 A 中所列相关最佳管理措施，实施所有可行的措施并对实施效果进行记录和评价。对不可行的措施，应提供筛选依据。附录 A 给出了土

壤淋洗、热脱附、生物修复、固化/稳定化、植物修复等典型修复技术的方案制定最佳管理措施。

表 5 修复后监测与再开发阶段最佳管理措施示例

最佳管理措施	影响类型		
	环境	社会	经济
使用以可再生能源为动力源的采样与监测设备	√		√
对修复后的地块使用本土植物进行绿化	√	√	
尽可能重复利用已有钻孔和监测井	√		√
尽可能使用自动化、可远程控制的监测设备	√		√
回收拆除、采样与监测过程产生的废弃物	√		
对冲洗设备用水进行处理和回用，避免造成二次污染	√	√	
通过优化管理，避免或减少拆除过程产生的二次污染	√	√	
向公众展示监测结果及地块再开发情况，调查及反馈公众意见		√	
考虑采用被动采样或原位在线监测的方法			√
对地块的再开发采取经济激励措施			√

附 录 A
(资料性附录)

典型修复技术设计与施工的最佳管理措施

表 A.1~A6 给出了土壤淋洗、热脱附、生物修复、固化/稳定化、植物修复等典型修复技术在设计阶段与施工阶段的最佳管理措施。需要指出的是，绿色可持续修复既包括在特定地块条件下选择更绿色和更可持续的修复技术方案，也包括对选定技术方案的优化。本附录中的最佳管理措施，仅仅涉及对已选定技术的优化，不表明该技术本身就是绿色和可持续的。

表 A.1 土壤淋洗最佳管理措施

最佳管理措施	影响类型		
	环境	社会	经济
治理与修复技术方案比选与设计阶段：			
选择细颗粒（粒径 $<75\ \mu\text{m}$ ）含量少于 20%的污染土壤使用本技术	√		√
通过淋洗工程小试及中试，对设备分级进行优化			√
需进一步处置的泥饼量最小化	√	√	√
最大化回收使用淋洗修复合格的土壤	√	√	√
就近选择废弃物接收地	√		
修复工程施工和运行阶段			
土壤开挖中减少土壤的遗撒或雨水冲蚀	√	√	
对含挥发有机物的污染地块，喷洒气味抑制剂或采用可移动式密闭开挖车间	√	√	
定期对设备进行维护，如按时换油，提高燃油效率			√
在可行的情况下，给设备使用电能或超低硫柴油	√		
使用低能耗设备	√		√
避免设备空转，若有长时间停机时在设备上安装自动关机装置	√		√
安装辅助动力装置，在机械不运转时，用于驾驶室的取暖和制冷	√	√	√
采用生物柴油，尤其推荐来自于回收副产物产生的生物柴油	√		
优先选用环境友好型燃料，比如天然气	√	√	√
传送干物料的传送带安装防尘罩等防尘措施	√	√	
对噪声较大的机械和设备安装消音设备或设施	√	√	

表 A.2 热脱附最佳管理措施

最佳管理措施	影响类型		
	环境	社会	经济
治理与修复技术方案比选与设计阶段：			
构建地块模型，针对本地块特征和污染物性质，确定适合的加热温度	√		√
明确具体的修复目标区域，以便于减少加热率和加热时间	√	√	√
最大程度缩短抽提井区域到尾气处理系统之间的管线连接距离	√		√
考虑采用分区分阶段加热方法	√		√
选用可重复利用的地面覆盖物	√		
考虑水平井与垂直井的结合使用，改善抽提效率	√		
废气处理考虑采用低温冷凝技术代替热氧化技术	√		
考虑冷凝水的循环重复利用	√	√	√
使用可再生能源	√	√	
回收余热进行再利用	√	√	
控制适合的含水率，保证加热效率的同时降低用电量			√
对拟进行异位热脱附修复的污染区进行补充详细调查，按污染轻重程度划分土壤污染等级，并结合本地块土质特征及污染物性质，确定各类污染土壤最适的加热温度及停留时间等工艺参数	√		√
根据污染物性质及尾气浓度，确定适合的尾气二燃处理温度和停留时间	√		√
尾气急冷处理环节优化调节水量，使所喷淋水的气化吸收热量刚好满足尾气降温需求，无废液产生	√		√
尾气碱喷淋环节优化控制碱液喷淋量，满足尾气排放达标要求即可	√		√
碱喷淋尾气之后的废液中无污染物，作为中水可回收用于加湿热脱附出料的土壤，起到降温和除尘的作用		√	√
优先使用液化天然气、压缩天然气等清洁能源，其次可使用液化石油气，避免使用重油等作为燃料	√	√	
修复工程施工和运行阶段			
采用热传导方式加热前，进行充分的阻隔降水，节约加热所需能量			√
选择适合的材料和施工方法，以保持修复区外围竖向帷幕的止水和隔热性能			√
考虑在同一个钻孔内同时安装井管加热和抽气设备			√
优先选择可循环利用的材料	√	√	
采用降低或阻隔噪音的集成技术	√	√	
考虑回灌处理后的干净水到地下含水层中	√	√	
使用清洁燃料、清洁排放技术和节省燃料技术	√		

优先选用 HDPE 膜材料来维持地表密封状态	√		√
采用离心式鼓风机，而不是容积式鼓风机		√	
修改抽气流量以满足地块条件的变化			√
修复过程要连续评估减少或关闭设备使用的可能性			√
最大化使用自动化、可远程控制的监测设施			√
使用现场检测便携仪器	√		√
对于污染土壤在热脱附修复前，在密闭车间内进行预干化，节约热脱附修复所需能量	√		√
加强设备维护，使停机检修工作定期可预判，避免突然故障停工造成的损失			√

表 A.3 生物修复最佳管理措施

最佳管理措施	影响类型		
	环境	社会	经济
治理与修复技术方案比选与设计阶段：			
通过小试及中试，明确生物降解的有效性及其潜在二次污染	√		
充分利用已有或新建的井作为注射通道，避免资源浪费	√		√
充分利用地下水循环传质作用，尽量少建注射井	√	√	√
使用基于废物或工农业副产物的药剂	√	√	
合理设计药剂注入或抽出-注入循环方案，避免污染羽的扩散	√		
尽量使用来自于地块的土著微生物，避免使用外源微生物	√		
定期监测生物降解副产物，避免有毒副产物的富集与扩散	√	√	
考虑水平井与垂直井的结合使用，增大药剂影响半径，提高注入效率			√
结合生物地球化学过程，优化自然衰减，保证长期稳定性	√		√
修复工程施工和运行阶段：			
建设临时或永久性监测井和注入井时，尽量使用直压式钻进而非传统的螺旋钻进，减少钻屑的产生或丢弃	√		
使用其它工程过程中的清洁水或处置水，用于药剂或泥浆浆液的配制或者作为循环用水进行注入	√		√
土壤混合搅拌区与固废存储区应分开，避免造成交叉污染	√	√	
在一些特定的地质单元中，无需高压注入也能保证介质均匀分布时，推荐利用现有的注入井进行常压重力注药	√		√
为提高能源利用效率，尽量使用脉冲式注入替代连续式注入	√	√	
药剂等材料采用可循环使用的容器或罐体包装，减少包装废物的产生	√	√	
用火车代替货车运输修复所用的大体积工业副产品	√		√

表 A.4 固化/稳定化最佳管理措施

最佳管理措施	影响类型		
	环境	社会	经济
治理与修复技术方案比选与设计阶段：			
优先使用原位固化/稳定化技术（对比异位固化/稳定化）	√		√
综合考虑固化/稳定化的长期有效性	√	√	
明确长期监测和管控机制	√	√	
固化/稳定化过程用水考虑回收使用修复地块本身存在的污水	√		√
固化/稳定化材料优先选用工农业废物回收制备的药剂	√		√
固化/稳定化材料优先选用制备过程中环境足迹低的药剂	√	√	
优先选用低碳材料，譬如新型绿色水泥，或者固碳材料，譬如生物炭	√		
有针对性的选择固化/稳定化药剂进行小试和中试，优化药剂配方，尽可能降低药剂的使用量，降低增容量	√		√
提前与附近社区相关人士进行积极沟通，尽可能降低对其的干扰程度		√	
固化/稳定化的药剂添加量根据土壤污染浓度不同按照分类分块添加药剂的原则进行修复	√	√	√
修复工程施工和运行阶段：			
采取施工工人的安全与健康保障措施		√	
涉及土壤开挖需要减少土壤的遗撒或雨水冲蚀	√	√	
土壤混合搅拌区与固废存储区应分开，避免造成交叉污染	√	√	
使用可循环使用的容器或罐体包装修复药剂等材料，以减少包装废物的产生	√	√	
用火车或轮船代替货车运输修复所用的大体积工业副产品	√		√
采用降低或阻隔噪音的集成技术和设备	√	√	
在可行的情况下，给设备使用电能或超低硫柴油	√		
避免设备空转，长时间停机时在设备上安装自动关机装置	√		√
采用生物柴油，尤其推荐来自于回收副产物产生的生物柴油	√		
安装防尘罩等防尘措施		√	
施工过程对施工人员进行完善的 PPE 保护，确保人身安全	√	√	

表 A.5 植物修复最佳管理措施

最佳管理措施	影响类型		
	环境	社会	经济
治理与修复技术方案比选与设计阶段：			
优先考虑风险管控和农艺调控相结合的方法，减少修复量		√	√
综合考虑包括植物焚烧和飞灰处理在内的全生命周期成本及环境足迹	√		√
选择对土壤功能的保持有利的植物，避免负面生态影响	√	√	
减少焚烧耗能，利用焚烧产能	√		√
就近焚烧收获的富集植物，减少生物质的运输里程	√		√
充分与业主、土地所有者和使用者等沟通协调		√	
考虑将植物修复与光能发电、风能发电和生物质发电等联用	√		√
优先选择项目所在地本身所具有的超富集植物	√	√	√
优先选用具备生物质能源转化能力的植物，如油菜可提炼工业用油	√	√	√
修复工程施工和运行阶段：			
鼓励雇佣当地的农民参加修复工作		√	√
植物修复过程中使用的农具、种子、肥料、农药等，争取从地块所在地附近购买或者租赁		√	√
注意修复过程中修复工人的安全防护		√	
防止运输过程中污染生物质的遗散	√		
保证焚烧过程空气排放达标，飞灰处理达标	√		

附 录 B
(资料性附录)

最佳管理措施筛选和实施记录表

应对各阶段潜在可行的最佳管理措施和实际所实施的最佳管理措施进行记录,并利用直接数据对实施效果进行评价。表 B.1 给出了最佳管理措施筛选和实施记录表及示例。

表 B.1 最佳管理措施筛选和实施记录表

污染地块修复阶段: 以修复工程施工和运行阶段为例			
编号	最佳管理措施内容	筛选结果	实施效果/筛选依据
1	例: 回收抽出处理系统所使用的活性炭	√	活性炭再生使用节省了 25%的活性炭成本
2	例: 安装风力发电设备为抽出处理系统供能	√	风力发电每年实现二氧化碳减排 6.7 吨, 氮氧化物减排 0.587 吨, 二氧化硫减排 0.519 吨; 每年供电 3800 MW·h, 预计 6-8 年回收成本。
3	例: 使用被动的采样方式, 并优化采样布点, 减少所需样品数	√	87%的监测井中使用了被动采样装置, 6 年内节省采样成本约 40 万美元
4	例: 样品现场检测, 减少实验室分析工作量	√	通过对样品现场检测降低了分析成本, 相比实验室检测每年节省开支超过 4 万美元
...			

注: 示例资料来源于 <https://clu-in.org/greenremediation>

附 录 C
(资料性附录)
可持续性评价指标

表 C.1 给出了主要的环境、社会、经济方面可持续性评价指标。该指标体系仅供参考，针对具体的地块条件和评价目标，应适当调整指标。

表 C.1 环境、社会、经济可持续性评价指标

可持续评价类型	影响类型	评价指标
环境	人体健康	人体毒性
		空气颗粒物污染
		温室气体排放
	生态环境	酸雨
		富营养化
		土地占用与转化
		生态毒性
	资源和能源	化石能源消耗
		水资源消耗
		金属资源消耗
		废物产生
社会	工人健康与安全	修复期间事故概率
		修复期间污染物暴露风险
	公众参与及满意度	公众参与度
		公众满意度
	创造就业	修复项目本身创造的工作岗位
		修复地块再利用新增的工作岗位
	修复弹性	变化条件下的修复有效性/长期有效性
经济	修复成本	项目设计及建设总费用
		运行及维护费用
	社会经济影响	地方经济影响
		当地居民收入影响

附 录 D
(资料性附录)
可持续性评价报告大纲

基本情况

地块基本信息

评价目的

评价依据

可持续性评价内容

环境影响

环境可持续性评价指标与方法

环境可持续性评价数据来源

环境影响评价结果

社会和经济影响

社会和经济可持续性评价指标与方法

社会和经济可持续性评价数据来源

社会和经济影响评价结果

可持续性总体评价

结论和建议

治理与修复技术方案的选择与实施（适用于前瞻式可持续性评价）

修复技术方案的选择建议

拟采取的最佳管理措施

绿色可持续修复实施结果（适用于回顾式可持续性评价）

最佳管理措施实施效益分析

修复可持续性结论

问题与建议

附 录 E
(资料性附录)
可持续性评价及绿色可持续修复案例

案例 1 我国某工业污染地块修复可持续性评价案例

案例背景

某地块长期作为工业企业用地。企业于近年停产后拆迁，该地块被规划为新建设用地。地块调查结果显示，该地块受到重金属和有机物污染，污染土壤总量数十万立方米。

修复方案设计

土壤淋洗+热脱附+固化/稳定化（方案 1）

污染土壤经筛分去除粒径大于 50 mm 砾石后，通过土壤洗脱设备将污染土壤减量化，粒径大于 75 μm 的粗颗粒清洗干净达标后填埋或者资源化利用，小于 75 μm 的细颗粒泥饼进热脱附设备彻底去除多环芳烃，再通过钝化剂（氧化镁为主）进行固化/稳定化处理控制土壤中重金属的环境风险至可接受水平，达到无害化的目的，验收合格后回填至建设单位指定区域。

阻隔填埋（方案 2）

将污染土壤挖出，污染较重部分经过水泥固化/稳定化处理，置于防渗阻隔填埋场内，使污染土壤与四周环境隔离，并使用清洁土壤回填于建设单位指定区域。

可持续性评价

通过前瞻式可持续性评价，筛选环境、社会、经济综合效益最优的修复方案。

环境影响评价

采用生命周期评价对两种修复方案的环境二次影响进行比较。功能单位为在 100 年内，修复行为使全部污染土壤量达到修复目标所造成的环境影响。修复系统边界通过修复系统流程图描述，如图 E.1 所示。

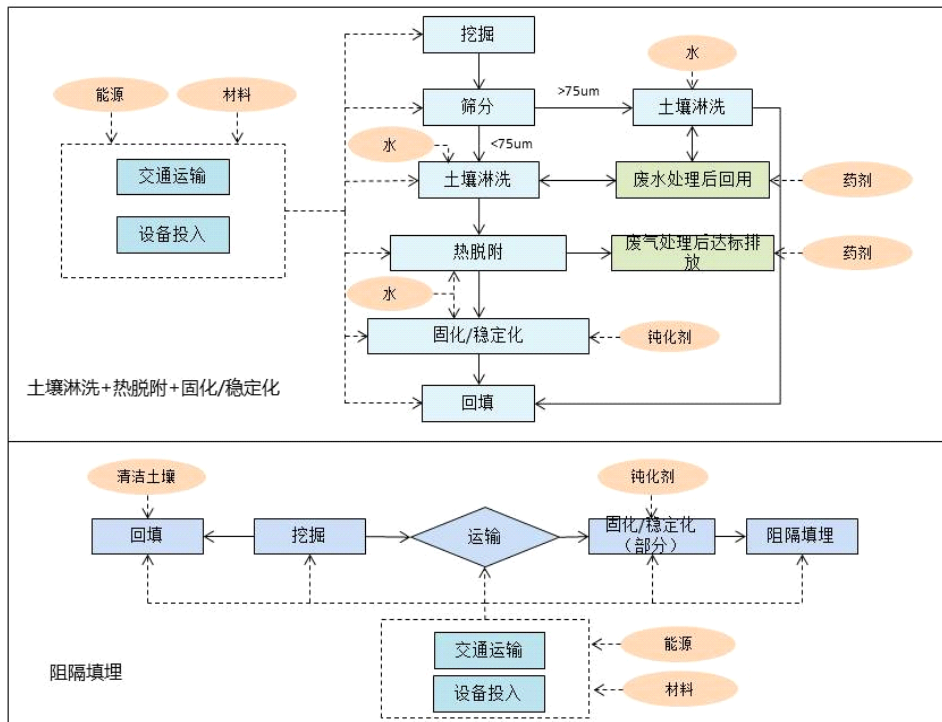


图 E.1 修复系统流程图

该案例中所使用的环境影响评价指标主要围绕人体健康、生态环境、资源消耗三个方面。根据环境影响评价指标，建立生命周期清单。生命周期清单数据由修复实施方提供，包括图 E.1 所述流程涉及的能源、材料的消耗和污染排放等。

基于生命周期清单数据，使用生命周期评价软件 SimaPro 8.0 进行生命周期建模，模型结果输出为人体健康、生态环境、资源消耗三个方面的量化影响，如图 E.2 所示。同时，通过基于过程的生命周期评价可以分析修复各单元过程的环境二次影响，结果如图 E.3 所示。

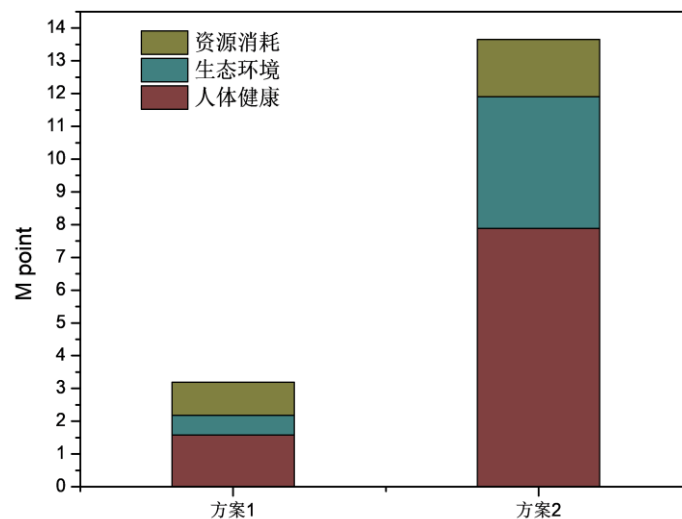


图 E.2 环境影响评价结果

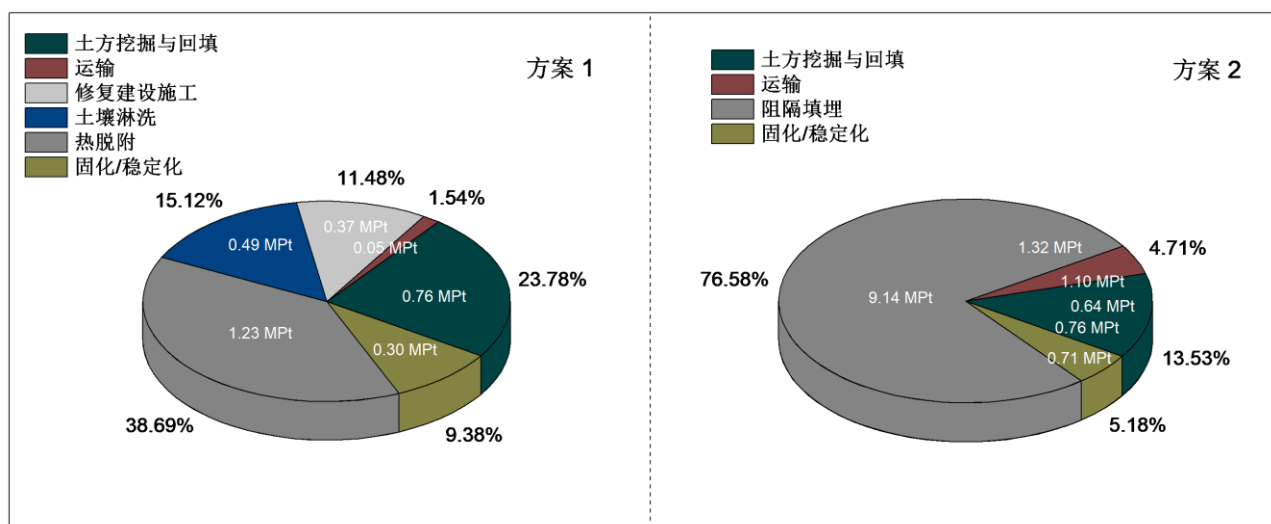


图 E.3 修复单元过程的环境影响

SimaPro 是应用最为广泛的生命周期评价软件之一，诸如此类的软件或工具还包括 GaBi、EIO-LCA 等，它们包含多种数据库和评价模型，可用于进行生命周期建模。

社会和经济影响评价

该案例中，修复的社会和经济影响评价采用定性与半定量的方法。社会影响方面，由于该修复工程施工量大，对周边社区环境扰动、交通等方面会造成一定影响，因此除了表 C.1 中的评价指标外，还加入了对周边社区影响的考量。经济影响方面，考虑地块再开发对修复工期上的要求，加入了修复周期的考量。具体的社会经济评价指标与结果见表 E.1。

表 E.1 社会经济影响评价

影响类型	评价指标	类型	方案 1	方案 2	单位	赋值依据
社会影响						
工人健康与安全	修复期间事故概率	定性	4	2	n/a	方案 2 涉及更多的运输作业，事故概率更高；
	修复期间污染暴露风险	定性	2	3	n/a	土壤淋洗和固化/稳定化的污染暴露风险更高；
公众参与及满意度	公众参与度	定性	2	2	n/a	调查显示，公众参与程度较低，当地市民对
	公众满意度	定性	3	2	n/a	污染地块修复情况缺乏了解；
创造就业	修复期间创造就业岗位	定量	119.1	155.8	年·人	以修复期间工人工作时间总和计；

修复弹性	条件改变下修复有效性	定性	4	5	n/a	方案 1 中，回填土含有经固化/稳定化处理的泥饼，长期有效性有待验证；
周边社区影响	交通影响	定量	7075	87308 车次		以污染地块车辆的往返次数计；
	扬尘、噪声等	定性	3	2	n/a	方案 2 涉及更多的挖方和运输作业；
经济影响						
修复成本	修复生命周期成本	定性	4	3	n/a	依据修复方案设计；
	修复周期	定量	22	12 月		依据修复方案设计；
修复效益	社会经济效益	定性	5	5	n/a	地块修复后用于房地产开发，经济效益显著

注：表中定性指标赋值 1-5 分，其中 5 分代表最理想的情况。

总体可持续性评价

通过公式（1）权衡修复的环境和社会经济影响。

$$S = \sum \left(\frac{I}{I_{max}} \times W \right) \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- S——修复方案可持续性总体得分；
- I——环境、社会、经济指标的定性或者定量赋值；
- W——指标对应的权重，本案例中环境、社会、经济指标的权重分别加和为 1。

图 E.4 为可持续性总体评价结果，得分越高表明越理想。

本案例的敏感性分析主要针对不同的修复过程假设条件和权重进行重复性评价。

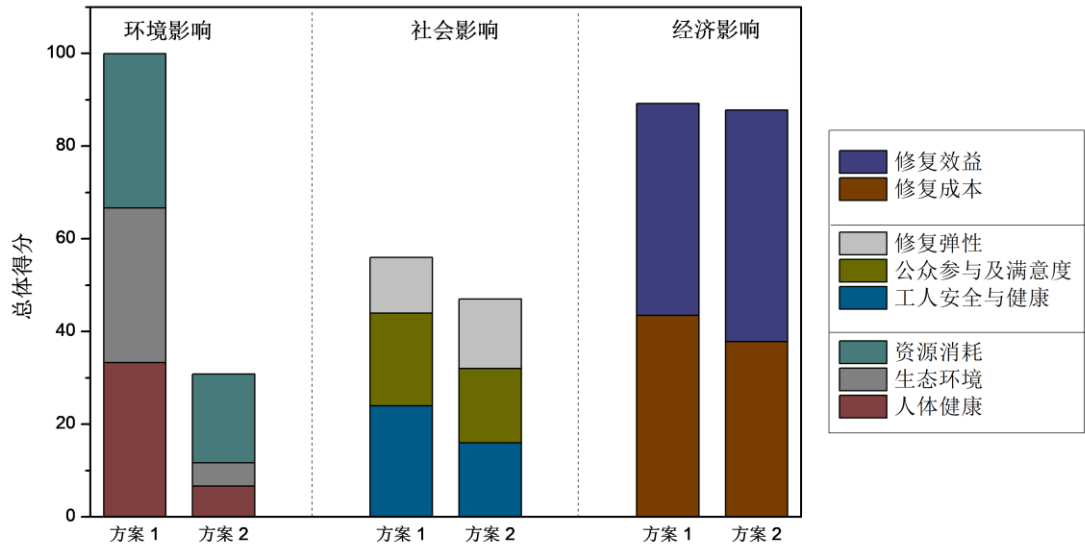


图 E. 4 修复单元过程的环境影响

由可持续性评价可知，方案 1 的综合环境、社会、经济效益高于方案 2，主要是因为方案 1 的环境影响更小。热脱附过程的能耗是方案 1 的环境影响主要因素，可以通过使用生物质能源或可再生能源降低这部分影响。

案例 2 美国垃圾处理场污染地块可持续修复案例

案例背景

美国某地块长期作为垃圾处理场用地，事故导致垃圾渗滤液泄漏，调查显示约三万立方米的地块土壤到污染。由于该地块受到《美国资源保护和回收法》（resource conservation and recovery act, RCRA）的约束，根据 RCRA 的规定，对该地块采取了应急措施，主要包括：快速诊断地下水污染源和风险源、阻止污染物扩散、治理修复受污染区域。

绿色可持续修复的实施

该地块污染治理与修复过程中，绿色可持续修复的实施在地块调查、治理与修复技术方案比选和详细设计、修复工程施工和运行 3 个阶段得到了体现。

地块调查阶段

地块调查阶段采取的最佳管理措施见表 E.2。

表 E. 2 地块调查阶段最佳管理措施筛选和实施结果

污染地块修复阶段： 地块调查			
编号	最佳管理措施内容	筛选结果	实施效果
1	咨询场地业主及相关管理部门，尽可能多的获取场地信息，如场地水文地质条件、污染源位置、污染排放历史等	√	精准制定采样布点，提高地块调查精度，减少采样工作量
2	制定动态地块调查策略	√	节省资源，减少样品储存和运输投入，降低场地调查的成本和时间
3	使用光电离检测器（PID）筛查土样，检测结果在线传输	√	
4	样品尽量采用现场检测的方式	√	
5	委托地方单位进行采样和施工	√	
6	采用直压式钻井	√	缩短钻井时间、减少钻屑的产生
7	采用原位处理的方式控制地块二次污染源，如通过便携式设备集中收集和处理滞留的污染雨水径流。	√	降低污染暴露风险，节省污染物处理所需的运输投入

修复技术方案比选和详细设计阶段

修复技术方案比选和详细设计阶段，考虑到地块实际污染情况，对修复技术方案基本要求包括：

- （1）保障施工人员的安全，不造成不必要的环境和健康风险；
- （2）确保污染物不迁移至地下水中。

根据 RCRA 规定，修复技术方案在满足基本要求的前提下，需要根据 RCRA 有关标准进行评估筛选，与修复可持续性有关的 RCRA 评价标准包括：

- (1) 修复的长期有效性
- (2) 污染物毒性和迁移性的降低
- (3) 工人安全与环境风险
- (4) 修复周期
- (5) 修复成本

经过 RCRA 评价标准筛选后可行的修复技术方案包括：

方案 1：污染土壤清挖 - 异位填埋处置 - 清洁土壤回填

方案 2：污染土壤清挖 - 原址异位热脱附处理后回填

方案 3：重度污染土壤清挖 - 异位填埋处置 - 清洁土壤回填；中轻度污染土壤原位热脱附处理

对上述修复技术方案进行可持续性评价，选择环境、社会、经济综合效益最优的修复技术方案。根据利益相关方的意见，选取的可持续性评价指标见表 E.3。需要指出的是，以下可持续性评价指标是在美国现适用于该地块的法律法规（RCRA）所限定的考虑因素基础上的细化和补充，因此指标体系所涵盖的可持续性影响因素并不全面。

表 E.3 可持续性评价指标

影响类型	评价指标	类型
<i>环境</i>		
资源和材料消耗	水资源	定性
	清洁土壤	定量
	修复所需材料	定性
	水泥	定量
	其他	定性
二氧化碳排放	燃料	定量
	电能	定量
废弃物产生和回用	处置或回填土壤	定量
	其他废弃物（如水泥）	定量
<i>社会经济</i>		

周边社区影响	噪声污染	定量
	交通影响	定量
企业形象和发展	企业形象	定性
	企业发展可持续性	定性

采用半定量可持续性评价方法，根据各项指标的定性评价或定量结果给予 1-3 的评分，得分越低，表明结果越理想。表 E.4 给出了定量指标评价结果；表 E.5 给出了可持续性评价总体结果。

表 E.4 定量指标评价结果

修复方案 定量指标	方案 1	方案 2	方案 3
清洁土壤用量/t	50000	0	15000
二氧化碳排放/t	500	6300	5850
废弃土壤量/t	50000	0	15000
运输量/辆	4550	25	1360
循环利用土壤量/t	0	50000	0

表 E.5 可持续性评价总体结果

可持续性评价指标	方案 1	方案 2	方案 3
资源和材料消耗	3	1	2
二氧化碳排放	3	9	6
废弃物产生和回用	3	1	2
周边社区影响	3	1	2
公司形象和发展	1	1	2
可持续性总分	13	13	14
修复技术方案筛选结果	√	√	×

根据可持续性评价，方案 1 和方案 2 的可持续性总分相同，但考虑到方案 1 相比于方案 2 的修复周期更短、成本更低，因此选择方案 1 作为该污染地块的修复方案。

修复工程施工和运行阶段

修复工程施工和运行阶段采取的最佳管理措施见表 E.6。

表 E.6 修复工程施工和运行阶段最佳管理措施筛选和实施结果

污染地块修复阶段： 修复工程施工和运行			
编号	最佳管理措施内容	筛选结果	实施效果/筛选依据
1	在大排量修复设备上安装烟气净化系统以减少有害气体排放。	×	租赁设备，无法改造
2	使用超低硫柴油作为修复设备或运输车辆燃料	✓	减少了化石燃料消耗和二氧化碳排放
3	修复设备空转不超过两分钟(宜根据实际情况调整，如冬季为了预热设备应延长空转时限)	✓	
4	修复项目中引入碳排放交易	✓	
5	充分利用需要回填的土料，合理规划回填运输线路，减少运输量	✓	
6	定期检查和维护修复设备	✓	保障了施工效率
6	对地块构筑物拆除和修复实施过程中收集的废弃水泥进行回收，以减少废弃物的处置需求	×	由于废弃水泥性能存疑，回收机构无法保证回收水泥的合理利用，因此选择填埋处置
7	低温工作时段为地块施工工人提供集中供暖场所	✓	集中供暖，提高了供暖效率，保障了工人工作环境
8	涉及大规模运输时与当地交管部门沟通，规划合理运输路线	✓	降低了对地块周边社区交通影响
9	通过报纸、网络等媒体，定期向公众公示修复进展情况	✓	提高了公众知情和公众满意度