

附件 5

《生态环境损害鉴定评估技术指南
总纲和关键环节 第 3 部分：恢复效果评估
(征求意见稿)》

编制说明

标准编制组
二零二二年九月

目 录

1 项目背景	1
1.1 任务来源.....	1
1.2 工作过程.....	1
2 标准制定的必要性	2
2.1 恢复效果评估是贯彻落实生态环境损害赔偿制度的必然要求	2
2.2 恢复效果评估是生态环境损害鉴定评估工作的重要组成	2
2.3 恢复效果评估是衡量生态环境治理与建设工作成效的重要手段	3
3 标准的编制原则和思路	4
3.1 标准的编制原则.....	4
3.2 标准的编制思路.....	4
3.2.1 基本思路.....	4
3.2.2 技术路线.....	5
4 国内外恢复效果评估相关标准和方法	7
4.1 发达国家恢复效果评估相关标准和方法	7
4.1.1 土壤地下水环境修复效果评估标准	7
4.1.2 土壤环境修复效果评估方法	8
4.1.3 地下水环境修复效果评估方法	14
4.1.4 场地关闭标准和程序	22
4.1.5 生态恢复效果评估标准和方法	23
4.2 国内恢复效果评估相关标准	26
5 标准主要技术内容和依据	31
5.1 适用范围.....	31
5.2 规范性引用文件.....	31
5.3 术语和定义.....	32
5.4 工作内容与工作程序	33
5.4.1 工作内容	33
5.4.2 工作程序	34
5.5 前期准备	34
5.6 恢复过程评估	35
5.6.1 恢复过程总结	35
5.6.2 过程监测数据分析	35
5.6.3 过程监测要求	35
5.7 恢复达标评估	37
5.7.1 概念模型构建	37

5.7.2 恢复达标评估调查与监测	39
5.7.3 达标分析	40
5.8 效果评估报告编制	41
6 对实施本标准的建议	42
7 参考文献	43

1 项目背景

1.1 任务来源

为进一步健全生态环境损害鉴定评估技术标准体系，生态环境部法规与标准司于 2021 年 1 月下达了国家生态环境标准项目任务书，明确由生态环境部环境规划院负责《生态环境损害鉴定评估技术指南 恢复效果评估》编制任务及相关技术性工作，项目编号为 2021-41。

1.2 工作过程

2021 年 2 月，启动本标准前期调研工作，广泛收集国内外环境修复、生态恢复效果评估相关标准规范、研究文献、案例等资料，总结环境修复和生态恢复过程监测和效果评估相关技术方法；

2021 年 4 月，启动标准草案编制工作，编制期间多次开展内部研讨；

2021 年 7 月 4 日，生态环境部批准了本标准的立项；

2021 年 7-9 月，与生态环境部法规与标准司、生态环境部标准研究所完成本标准制定任务书的签订；

2021 年 9 月，完成标准草案和开题报告编制；

2021 年 9 月 18 日，生态环境部法规与标准司组织召开标准开题专家论证会，与会专家一致同意通过标准开题；

2021 年 9 月-2022 年 6 月，按照开题论证会专家意见对标准文本进行修改，编写完成标准征求意见稿和编制说明。

2 标准制定的必要性

2.1 恢复效果评估是贯彻落实生态环境损害赔偿制度的必然要求

2017年12月，中办、国办印发的《生态环境损害赔偿制度改革方案》规定：“赔偿权利人及其指定的部门或机构对磋商或诉讼后的生态环境修复效果进行评估，确保生态环境得到及时有效修复”“生态环境修复效果要向社会公开，接受公众监督”。2020年8月，生态环境部等11部门印发的《关于推进生态环境损害赔偿制度改革若干具体问题的意见》（环法规〔2020〕44号，以下简称《意见》）提出：“赔偿权利人及其指定的部门或机构在收到赔偿义务人、第三方机构关于生态环境损害修复完成的通报后，组织对受损生态环境修复的效果进行评估，确保生态环境得到及时有效修复”。2022年4月，14单位印发的《管理规定》提出：“赔偿权利人及其指定的部门或机构，应当组织对受损生态环境修复的效果进行评估，确保生态环境得到及时有效修复”。制定出台生态环境恢复效果评估标准是贯彻落实生态环境损害赔偿制度的重要举措，是确保受损生态环境得到科学规范、及时有效恢复的重要技术支撑，对在全国范围内建立起责任明确、途径畅通、技术规范、保障有力、赔偿到位、“修复有效”的生态环境损害赔偿制度具有重要的意义。

2.2 恢复效果评估是生态环境损害鉴定评估工作的重要组成

2020年12月，生态环境部联合国家市场监督管理总局发布了《生态环境损害鉴定评估技术指南 总纲与关键环节 第1部分：总纲》等6项国家标准，其中包含总纲、损害调查等不同环节的标准、土壤和地下水以及地表水和沉积物等不同要素的标准、水污染虚拟治理成本法和大气污染虚拟治理成本法等不同方法的标准。《生态环境损害鉴定评估技术指南 总纲与关键环节 第1部分：总纲》（GB/T 39791.1—2020）规定“总纲和关键环节技术指南规定生态环境损害鉴定评估的一般性原则、程序、内容和方法”，还提出生态环境损害鉴定评估的程序包括工作方案制定、损害调查确认、因果关系分析、损害实物量化、损害价值量化、评估报告编制和恢复效果评估。可见，恢复效果评估是生态环境损害鉴定评估的关键环节，恢复效果评估标准是总纲和关键环节类生态环境损害鉴定评估标准的重要组成部分。

2.3 恢复效果评估是衡量生态环境治理与建设工作成效的重要手段

2015年，中共中央、国务院印发的《生态文明体制改革总体方案》提出“以解决生态环境领域突出问题为导向，保障国家生态安全，改善环境质量”。习近平总书记多次强调，要持续打好污染防治攻坚战，加强大气、水、土壤污染综合治理，持续改善城乡环境；要统筹山水林田湖草沙系统治理，实施好生态保护修复工程，加大生态系统保护力度，提升生态系统稳定性和可持续性。生态环境恢复涉及土壤、地下水、地表水、沉积物、森林、湿地、草地等多种环境和生态系统要素，包括基本恢复、补偿性恢复、补充性恢复。其中，基本恢复包括污染清除、环境修复和生态恢复，补偿性恢复用于补偿生态环境受损至恢复基线水平期间的生态服务功能损失，最终实现生态环境及其生态服务功能等量恢复。恢复效果评估是对多种生态环境要素、不同恢复阶段的恢复过程和达标情况进行评估，进而对受损环境和生态服务功能恢复效果进行总体评价。因此，恢复效果评估是确保受损生态环境得到及时有效恢复的有力保障，是衡量生态环境保护建设成效的重要手段。

3 标准的编制原则和思路

3.1 标准的编制原则

本标准编制主要遵循以下原则：

完整性原则：标准制定过程中，充分调研并借鉴了国内外现有恢复效果评估相关标准、生态环境监测技术导则等，相较于国内外现有针对单一生态环境要素的恢复效果评估指南更为系统全面；相较于现有的各类生态环境监测技术导则和规范，本标准是对各种环境和生态要素及其生态服务功能是否达到恢复目标的总体考量。指南不仅适用于受损生态环境本身的基本恢复措施的效果评估，也适用于针对期间损害的补偿性恢复措施的效果评估。

针对性原则：针对生态环境损害恢复效果评估，提出可用于指导土壤、地下水、地表水、沉积物、生物以及生态系统等不同要素的应急处置、环境修复和生态恢复等不同阶段效果评估工作程序和技术要求。

可操作性原则：充分考虑国内生态环境损害恢复现有管理政策，结合国内生态环境恢复技术与实施现状，细化各要素监测指标、监测方法、监测频率、评估方法等，确保指南的可操作性，便于实施与推广。

3.2 标准的编制思路

3.2.1 基本思路

本标准的编制遵循以下基本思路：

(1) 针对过程监测不足带来反复评估的问题设计生态环境损害恢复效果评估程序。恢复效果评估通常是指在恢复工程完成后，对相关指标是否达到恢复目标进行评价。目前强制实施恢复效果评估的主要是土壤和地下水环境修复工程，在实际的土壤环境修复效果评估中，存在因修复过程不规范、修复不到位等带来的效果不达标问题，对修复过程监管的缺失，导致实践中开展多轮效果评估的现象比较普遍，造成人力、物力和财力的浪费。因此，本标准将生态环境损害恢复效果评估程序分为两个阶段，第一阶段开展恢复过程评估，第二阶段开展恢复达标评估。在前期恢复过程评估阶段，将恢复过程总结和监测数据分析作为两个重要的环节，以初步判断恢复基本到位，再启动恢复达标评估，避免后续多轮反复评估。

(2) 针对各类生态环境要素特点进行评估指标和监测要求的差异化规定。

由于生态环境损害恢复可能涉及土壤、地下水、地表水、沉积物、生态等多种要素的恢复，且不同的生态环境要素在恢复目标指标方面具有较大的差异，在调查监测方法方面也有不同的要求，因此本标准充分考虑环境要素与生态要素的特点和差异性，分别规定了土壤和地下水、地表水和沉积物、生物与生态服务功能过程和达标评估监测的指标、方法、频次和时间、参照标准等内容和要求，提升标准适用的针对性、合理性和可操作性。

(3) 充分借鉴现有方法构建生态环境恢复效果评估方法体系。关于土壤、地下水、海洋等要素的风险管控和修复效果评估相关标准已经较为成熟，且地表水和沉积物等要素的风险管控与治理修复技术和方式同土壤、地下水有类似之处，因此，本标准参考土壤、地下水环境修复效果评估相关方法提出了地表水和沉积物的损害恢复效果评估方法，采用较为严格的逐一比对法和统计分析法进行评估。生态恢复过程同环境要素恢复过程差异较大，恢复的周期也较长，因此，本标准针对生态恢复，提出了初步效果评估和最终效果评估两个阶段，初步恢复效果主要是评估生态恢复是否达到稳定状态（如造林是否成功），最终效果评估则是评估生态恢复是否达到恢复方案中提出的目标。针对初步效果评估，可以采用趋势分析法、造林成效法评估生态恢复是否达到稳定状态，针对最终效果评估，考虑到生态恢复各项指标完全达到目标值的难度较大，放松了评估要求，设计了综合指数法，即通过综合指数法判断生态系统是否整体达到可接受的状态。

3.2.2 技术路线

本标准按照图 3-1 所示技术路线进行制定。

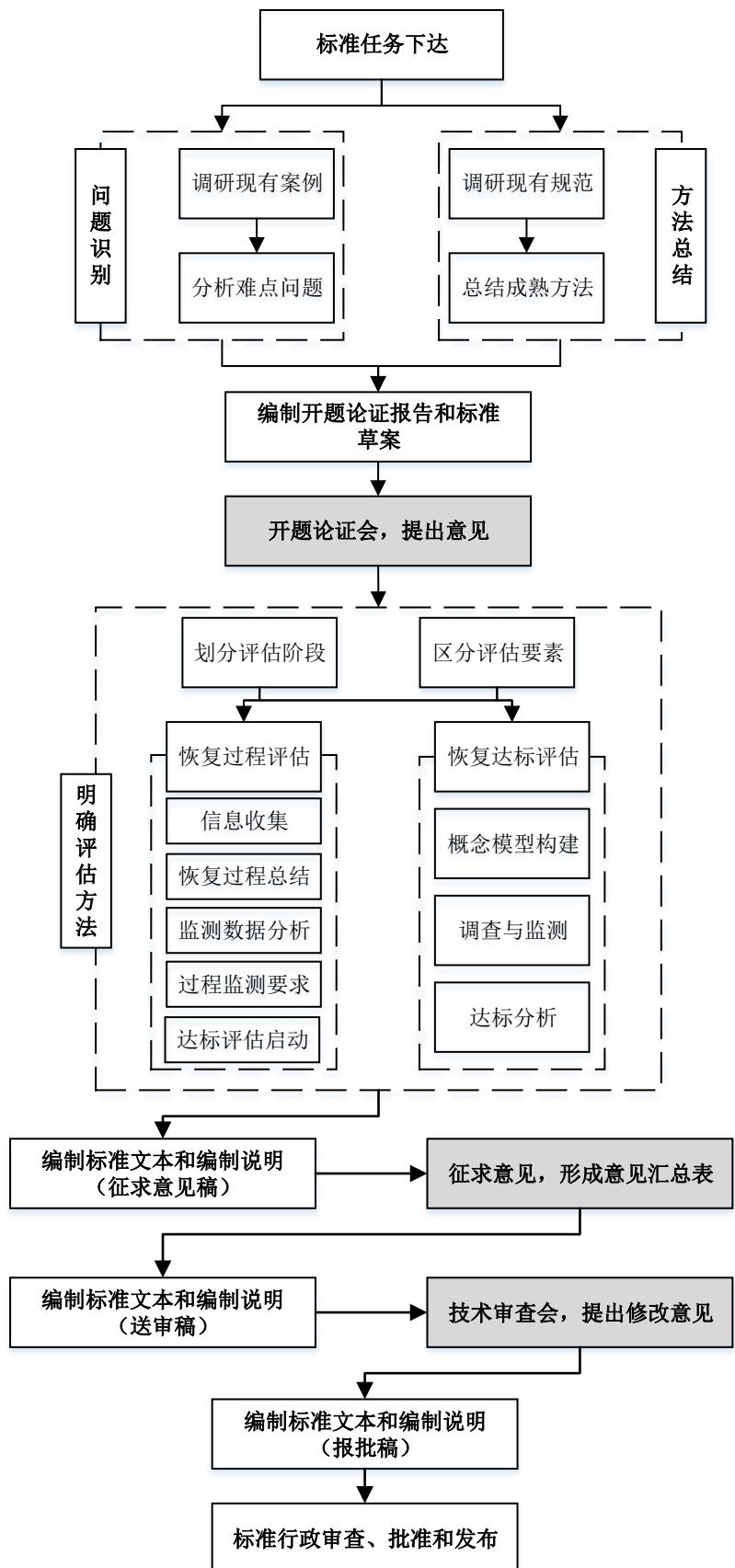


图 3-1 生态环境损害恢复效果评估标准制定技术路线

4 国内外恢复效果评估相关标准和方法

4.1 发达国家恢复效果评估相关标准和方法

发达国家现有的恢复效果评估标准和方法主要集中在土壤和地下水环境修复领域，地表水、沉积物环境修复以及生态恢复领域相关的标准和方法较少。

4.1.1 土壤地下水环境修复效果评估标准

美国发布了大量土壤和地下水环境修复效果评估相关标准。美国环保局于1990年前后发布了评价土壤、地下水和固废达标的方法标准，包括《场地清理达标评估方法 卷 1：土壤》(《Methods for -Evaluating the Attainment of Cleanup Standards Volume 1: Soils》)、《场地清理达标评估方法 卷 2：地下水》(《Methods for -Evaluating the Attainment of Cleanup Standards Volume 2: Ground Water》)、《评估场地清理达标统计方法 卷 3：基于对照场地土壤和固废标准》(《Statistical Methods for Evaluating the Attainment of Cleanup Standards Volume 3: Reference-Based Standards for Soils and Solid Media》)，2003年针对 RCRA 设施，发布了《资源保护与恢复行动计划设施中完成修复措施的最终指南》(《Final Guidance on Completion of Corrective Activities at RCRA Facilities》)。美国固体废物和应急响应办公室于 2011 年发布了《国家优先名录场地关闭程序》(《Close Out Procedures for National Priorities List Sites》)，2014 年发布了《评估地下水监测井地下水修复完成推荐方法》(《Recommended Approach for Evaluating Completion of Groundwater Restoration Remedial Actions at a Groundwater Monitoring Well》)。美国密歇根州自然资源部于 1994 年发布了《土壤修复效果评估导则》(《Guidance Document for Verification of Soil Remediation》)，环境质量部 2002 年发布了《清理评价相关的采样策略和统计分析方法培训材料》(《Sampling Strategies and Statistics Training Materials for Part 201 Cleanup Criteria》)；新泽西州 2012 年发布了《调查、修复调查、验收阶段采样的导则》(《Technical Guidance for Site Investigation of Soil, Remedial Investigation of Soil, and Remedial Action Verification Sampling for Soil》)；明尼苏达州于 1998 年发布了《基于风险的场地刻画和采样导则》(《Draft Guidelines Risk Based Site Characterization and Sampling Guidance》)；加州于 2001 年发布了《验证性采样和分析计划》(《Confirmation Sampling and Analysis Plan》)；新罕布什尔州于 2004 年发布了《污染场地关闭指南》(《Contaminated Site Closure: A Property Owner's Guide》)。

其它发达国家也普遍发布了污染场地修复效果评估相关指南或在污染场地管理指南中明确了效果评估要求。澳大利亚 2020 年发布了《地下石油储罐技术注意事项：场地验收报告》(《UPSS Technical Note: Site Validation Reporting》), 2011 发布了《污染场地咨询报告指南》(《Guidelines for Consultants Reporting on Contaminated Sites》), 南澳大利亚 2006 年发布了《地下水污染评价和修复导则》(《Guidelines for the Assessment and Remediation of Groundwater Contamination》); 新西兰 2011 年修订了《污染场地管理指南 卷 1—场地报告》(《Contaminated Land Management Guidelines No.1 - Reporting on Contaminated Sites in New Zealand》) 和《污染场地管理指南 卷 5—场地土壤调查和分析》(《Contaminated Land Management Guidelines No 5 - Site Investigation and Analysis of Soils》); 英国环保局于 2004 年发布了《污染场地管理程序》(《Model Procedures for the Management of Land Contamination》), 2010 年发布了《污染场地修复验证》(《Verification of Remediation of Land Contamination》); 加拿大于 1999 年发布了《联邦污染场地指南》(《A Federal Approach to Contaminated Sites》), 2012 年发布了《联邦污染场地关闭指南》(《Guidance for Site Closure Tool for Federal Contaminated Sites》), 安大略省 1996 年发布了《污染场地采样和分析方法导则》(《Guidance on Sampling and Analytical Methods for Use at Contaminated Sites in Ontario》)。

4.1.2 土壤环境修复效果评估方法

通过对上述标准的分析，总结土壤环境修复效果评估主要有以下方法：

4.1.2.1 基于平均值比对

基于平均值比对判断环境修复是否达标的方法和程序如下：

(1) 简单随机布点法

简单随机布点法采样程序为：确定所需样本量、确定采样点位置、对采样数据进行统计分析、根据规则判定是否需要补充修复。计算样本数量需要用到环境修复目标值、平均浓度、假阳性率 (α)、假阴性率 (β)、标准偏差估计值（从先前的数据获得，或者通过开展小规模调查获得）。按照要求采样后，对数据进行统计分析，计算平均值和置信区间。如果 $100(1-\alpha)$ 百分比置信上限低于环境修复目标值，表明该区域已经清理干净；如果高于环境修复目标值，表明没有清理

干净。

(2) 分层随机布点法

分层随机布点采样程序为：确定每一层所需的样本量；在每一层中，识别样本的位置，收集样本进行分析；对数据进行统计分析，确定是否达标。当使用多种统计测试或涉及多种污染物时，应使用每一层中计算得到的最大样本量。基于层的数量、某层中土壤体积或面积占总样本区域的比例、在某层采集处理和分析土壤样本的相对成本（如果假设所有层对于附加样本具有相同的相对成本，则对所有层使用默认值 1）、某层检测结果的标准偏差估计值（如果只有一个总体估计值，则对所有层使用此估计值）、平均浓度、环境修复目标值、 α 、 β 计算样本量。按照要求采样后，对数据进行统计分析，计算平均值和置信区间。如果 $100(1-\alpha)$ 百分比置信上限低于环境修复目标值，表明该区域已经清理干净；如果高于环境修复目标值，表明没有清理干净。

(3) 系统布点法

系统布点采样程序为：使用随机采样公式估计样本大小；采用与随机采样相同的方式估算平均值和置信区间。可采用混合方法，即从田间采集 n 个土壤样本，按照 10 个/组进行分组，以创建 m ($n/10$) 个样本，将其送到实验室进行分析，对 m 个样本结果进行统计分析，以确定平均值是否达到清理标准。

(4) 系统随机布点法

密歇根州规定，对于面积大于 0.25 英亩的大中型场地，采用随机抽样策略，具体步骤如下：

1) 在环境修复区域建立网格系统。网格点数量应与区域的面积大小成正比（见表 4-1）。对于涉及开挖的情况，在确定面积大小时需包括侧壁和底部面积。使用以下公式之一来确定场地的网格间距：

$$\text{medium site: } \frac{\sqrt{A/\pi}}{4} = \text{GI}$$

$$\text{large site: } \sqrt{\frac{A\pi}{SF}} = \text{GI}$$

A 为网格面积（平方英尺）； GI 为网格间隔； SF 为场地因子，即要划分网格

的区域长度（无单位）； π 为 3.14159。

系统随机采样网格间距确定方法见表 4-1。

表 4-1 系统随机采样网格间距确定方法

场地大小（英亩）	平方英尺	网格间距
<0.25（小）	<10890	按表 4-2 中的样品数确定 网格
0.25-3（中）	10890-130680	15-50 英尺
>3（大）	>130680	30 英尺

将某些点（通常是西南角）指定为 0 点坐标，然后调整网格使采样覆盖范围最大化。对于形状异常的区域，可能需要进行一些网格调整，确保每个侧壁至少采集一个样本。

- 2) 子网格化。可能需要在环境修复区域内不同单元设置不同间隔的网格，以便将采样集中在可疑区域（例如集水坑、储罐泄漏区域等）。
- 3) 进一步随机化。由于回填时间、生产顺序或场地物理条件而可能具有模式化废物或污染分布的场地可能需要进一步随机抽样。在这种情况下，可以选择以下网格单元采样模式，而不是每次都在网格中心点采样，即将每个要采样的网格单元必须分成九个大小相等的“子单元”。接下来，依次使用随机数表来选择在哪个子单元格中取样。
- 4) 涉及具有显著垂直分量的土壤和/或废物的原位和异位环境修复应从三个维度进行评估（体积评估），如原位土壤蒸汽提取或异地生物修复等。在环境修复区域上叠加一个网格，并在每个节点上添加一个垂直分量。
- 5) 可以同时对所有网格点进行采样，也可以分阶段对网格点子集进行采样或分析。网格点子集是通过为所有网格点分配坐标并使用随机数生成器或随机数表随机选择网格点来创建的。最初应至少对所有网格点中的 12 个样本或 25%（以较大者为准）进行采样和分析，以提供足够大的数据进行统计分析。
- 6) 计算每种污染物浓度平均值的 95% 置信上限（UCL），并与环境修复目标值进行比较。如果 UCL 小于环境修复目标值并且已收集足够数量的样本并进行空间评估，则认为环境修复已完成。

4.1.2.2 基于超标概率（0.01 或 0.05）统计

（1）随机采样

随机采样步骤为先确定样本大小，再识别采样位置，采集样本送到实验室检

测，对检测数据进行适当的统计分析，最后决定是否需要额外的环境修复。样本大小取决于 P_0 （定义采样区域已清理干净还是未清理干净的标准）、 P_1 （控制假阴性率的替代假设下的 P 值， $P_1 < P_0$ 说明已清理干净）、 $Z_{1-\alpha}$ 、 $Z_{1-\beta}$ （概率为假阳性率、假阴性率的正态分布临界值）。按照要求进行采样后，对数据进行统计分析，估计受污染比例和相关的标准误差，受污染比例等于超标样品数量/总样本数量，标准误差由受污染比例和总样本数量计算得到。当超标样本数量大于 10，使用大样本正态近似计算超标比例的置信上限 P_U ，基于受污染比例、标准误差和临界值 ($Z_{1-\alpha}$) 计算得到。 $P_U < P_0$ ，表明达到清理目标， $P_U > P_0$ ，表明未达到清理目标；如果不符合适应性，根据样本量 n 、 α 和 P_0 ，确定临界值 $r_{\alpha, n}$ ；确定超标样品数量，将其与 $r_{\alpha, n}$ 对比，如果数量小于 $r_{\alpha, n}$ ，表明达到环境修复目标；如果数量大于 $r_{\alpha, n}$ ，表明未达到环境修复目标。

（2）分层采样

分层采样步骤为先确定样本大小，在每个层中确定采样位置，采集样本送到实验室进行检测，对检测数据进行统计分析，确定是否达标。每层的样本数量通常根据以下参数确定：各层土壤体积或面积占总样本区域的比例、从相应层中采集和处理样本的成本、 P_0 、 P_1 、 $Z_{1-\alpha}$ 、 $Z_{1-\beta}$ 、 P_h （预测各层中化学浓度超过指定临界值的土壤单元的比例）。计算每层中的超标比例，然后根据每层中超标比例，计算总体超标比例（根据每层超标比例和每层大小比例计算）及其标准误差，然后根据总体超标比例及其标准误差和 $Z_{1-\alpha}$ 计算超标比例的单边置信上限。如果该上限小于 P_0 ，表明达到环境修复目标；如果该上限大于 P_0 ，表明未达到环境修复目标。

（3）顺序采样

顺序采样程序为先形成一个受污染土壤单元累计数量的可接受或者拒绝的区域（即根据 P_0 、 P_1 、 α 、 β 计算 M 、 C_A 和 C_B ， M 为可接受或拒绝区域两条边界线的斜率， C_A 和 C_B 为两条线与垂直轴的交点），确定固定样本大小（固定样本大小由 P_0 、 P_1 、 $Z_{1-\alpha}$ 、 $Z_{1-\beta}$ 计算得到），然后每次评估一个土壤采样单元，评估完后，统计污染土壤单元的累计数量 k ，如果 k 越过最上面的线进入可接受区域，则表明存在污染 ($k \geq nM + C_A$)，如果累积数量保持低值并越过最下面的线进入拒绝区域，则表明该场地已清理干净 ($k \leq nM + C_B$)，如果两种情况都不满足，继续

采样和评价（见图 4-1）。如果采样单元总数超过 2 倍固定样本量，停止使用该方法。

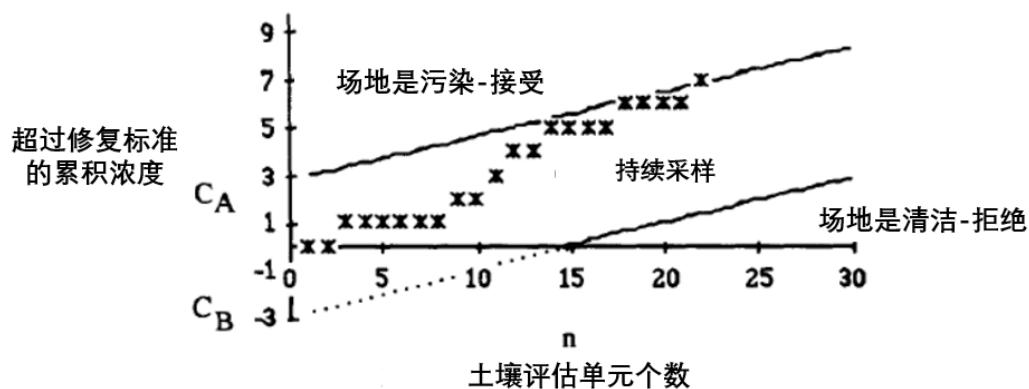


图 4-1 顺序采样可接受或拒绝区域示意

4.1.2.3 基于逐个比对

密歇根州规定，对于<0.25 英亩的场地，采用有偏采样策略，根据对释放或污染物分布的现场特定分析以及土壤类型等，从最有可能超过清理标准的区域进行土壤采样。通过逐点比较来验证是否修复达标。如果在任何采样点超过清理标准，则可能需要在该点进行额外的环境修复，直到满足标准。由于选择采样位置需要专业判断和现场特定知识，因此必须在验证报告中记录选择这些位置的原因。未经事先批准，不得使用混合样品。混合可能导致污染物浓度不能代表土壤中残留物质的浓度。如果浓度低，混合可能会将污染物的浓度稀释到其阈值检测限以下。此外，即使在混合样品中表明存在污染，也无法获知污染的位置。验证通过开挖修复的受污染的土壤是否修复干净需要从开挖底部和侧壁取样（见表 4-2 和表 4-3）。

表 4-2 坑底样本量确定方法

面积（平方英尺）	样本数量
<500	2
500<1000	3
1000<1500	4
1500<2500	5
2500<4000	6
4000<6000	7
6000<8500	8
8500<10890	9
>10890	按表 4-1 中网格间距确定样本数量

表 4-3 侧壁样本量确定方法

面积 (平方英尺)	样本数量
<500	4
500<1000	5
1000<1500	6
1500<2000	7
2000<3000	8
3000<4000	9
>4000	每 45 英尺一个样 (侧壁)

4.1.2.4 基于超标点位数量统计

基于超标点位数量统计是一种判断场地是否达到清理标准的简单超标法，它仅需要指定 α 、 P_0 和允许超标数量即可得到样本大小（如表 4-4 所示），根据实际超标样品数量和允许超标数量比对结果，即可判断是否满足清理标准。

表 4-4 基于超标点位数量统计方法判断达标的样本量确定方法

误报率 α ($1-\alpha$)	判断清理干净 的比例 $1-P_0$	采样点数量 (个)			
		0.99	459	662	1001
0.01 (0.99)	0.95	90	130	198	259
	0.90	44	64	97	127
	0.99	299	473	773	1049
0.05 (0.95)	0.95	59	93	153	208
	0.90	29	46	76	103
	0.99	230	388	667	926
0.10 (0.90)	0.95	45	77	132	184
	0.90	22	38	65	91
	允许超标数量 (个)	0	1	3	5

4.1.2.5 基于热点区域核实

热点检测的采样计划可以通过三种方式制定，已知或假设热点区域椭圆形状（短轴 S 和长轴 L ）和误报率 (α)，确定样本大小 (n ，取决于采样区大小和网格间距) / 网格间距 (G)；已知样本大小/网格间距和椭圆形状，确定误报率；已知误报率和样本大小/网格间距，确定椭圆形状（见图 4-2）。确定了采样间距和样品数量后，进行样品采集、检测和数据分析。如果其中一项检测结果超过清理标准，则表明发现了热点，无法验证环境修复是否完成。如果没有任何样本超过清理标准，则假定该场地已清理干净，并根据与采样计划相关的置信水平得出结

论，即该场地不太可能存在热点。

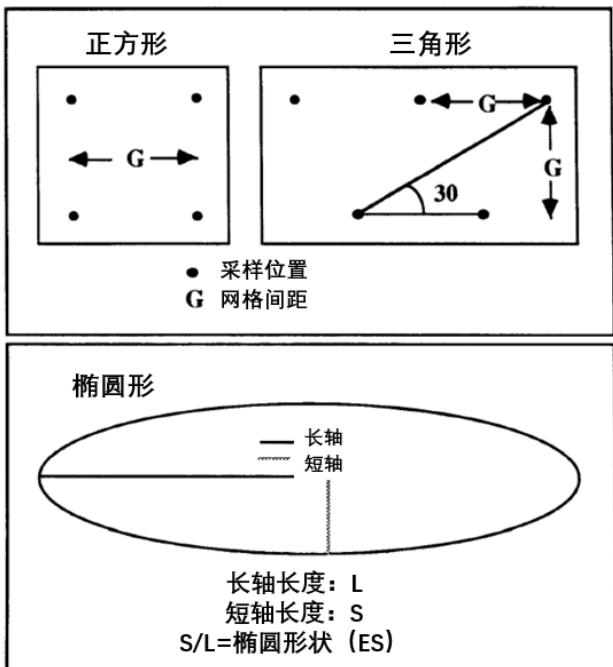


图 4-2 热点区域识别方法示意

4.1.3 地下水环境修复效果评估方法

4.1.3.1 总体要求

发达国家在污染场地地下水环境修复效果评估方面已经开展了多年的研究和实践，从场地关闭的原则和程序、布点的方法以及环境修复效果评价等方面制定了一系列较为完善的技术指南，为我国地下水风险管控与环境修复效果评估工作的开展和相关技术指南的制定提供了丰富的经验。

美国环保局 1992 发布了《场地清理达标评估方法 卷 2：地下水》，其中的统计程序可用于评估实施抽出-处理方法后地下水污染物浓度是否保持在将达到并继续达到清理标准的水平，并用于评估实施阻隔方法后由于流量的变化而达到新的平衡后，地下水污染水平是否达到相关标准；对于生物修复，可以在处理后使用指南中的统计方法来评估环境修复成功与否。

该指南提供了一套确定场地是否达到所需的清理标准的抽样和统计方法，在允许的不确定性下对风险标准和现场数据进行统计分析和比较，从而为现场决策提供依据。环境修复、采样及评估环境修复达标等程序见图 4-3、图 4-4 和表 4-5。

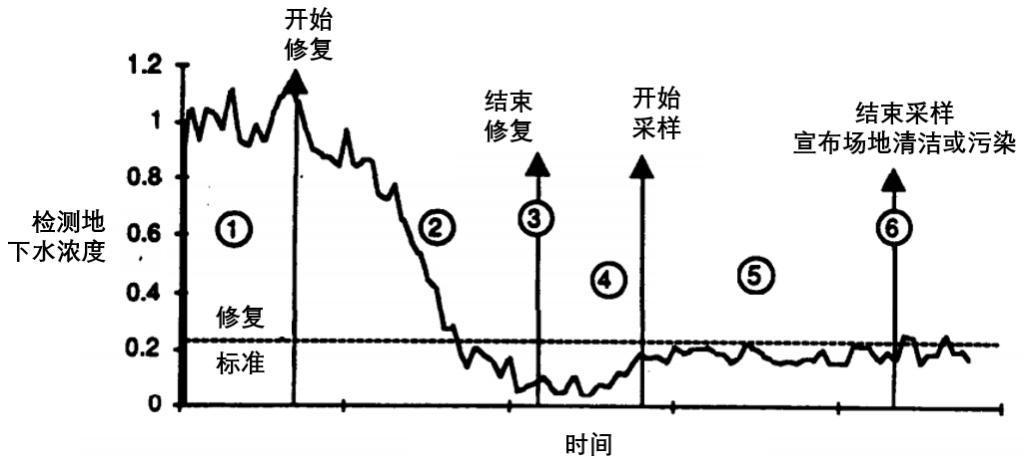


图 4-3 环境修复、采样及评估环境修复达标等程序

表 4-5 环境修复、采样及评估环境修复达标等程序及解释

序号	阶段	解释
1	评估场地，选择环境修复技术	尽管场地评估和环境修复技术选择需要一些统计程序，但该指南不涉及到这个方面。
2	实施执行修复清理	通过实施环境修复补救清理措施，污染物的浓度通常会呈现下降的趋势。由于季节变化、自然波动、抽水计划的变化、实验室测量误差等原因，所测浓度会围绕趋势线发生波动。在环境修复过程中，可以运用一些统计程序来分析环境修复过程数据。
3	决定何时终止环境修复工程	根据地下水相关专业知识和在环境修复过程中收集的数据，决定何时终止修复。对环境修复过程中收集的数据进行分析，结果可能会表明，所选择的修复方法无法达到清理标准，在这种情况下，必须重新评估修复技术和目标。
4	评估地下水污染物浓度何时达到稳定状态	环境修复过程中地下水系统将从其自然状态变为受干扰状态，包括抽水或回注地下水，处理结束后，地下水位和水流将逐渐恢复到其自然状态。在这一过程中，污染物浓度可能以不可预测的方式发生变化。在评估开始之前，地下水必须恢复到其自然水平和流动模式，称为稳定状态，这样收集到的数据才可以用于未来的评估。一旦确定场地处于稳定状态，就可以开始采样。
5	评估环境修复达标	当水位和流量达到稳定状态后，就可以开始取样，以评估是否达到环境修复标准。评估达标所用的统计检验可以是固定样本量检验，也可以是顺序检验。在许多场地，可能会优先选择顺序检验。在评估阶段，检测到的浓度可能会围绕某一固定浓度波动或逐渐减少。如果测量值持续增加，要么是地下水系统没有处于稳定状态，要么是污染源没有得到充分清理，在这种情况下，需要对数据进行重新评估，以确定是否需要更长时间才能使现场处于稳定状态，或者是否需要进行

序号	阶段	解释
		补充修复。
6	基于统计检验判断环境修复是否达标	如果已达到清理标准，则建议实施定期抽样，以分析是否有未预料到的问题。清理达标是基于几个假设，从统计学的角度来看，达标后定期监测的目的是检查假设的有效性；如果尚未达到目标，则必须重新评估清理技术和目标。

指南中对环境修复达标的定义为：将平均浓度或选定的浓度百分位数与环境修复目标值进行比较，如果统计检验表明平均浓度（或百分位数）不太可能大于环境修复目标值，那么地下水就达到了清理标准。

由于浓度随时间的波动，短时间内污染物的平均浓度可能与长时间内的平均浓度有很大的不同。短期评估是基于在想要关注的时间段内收集的数据；长期评估为基于较长关注期收集的数据。长期评估被用来评估是否达标；短期评估可以用来做临时决策。

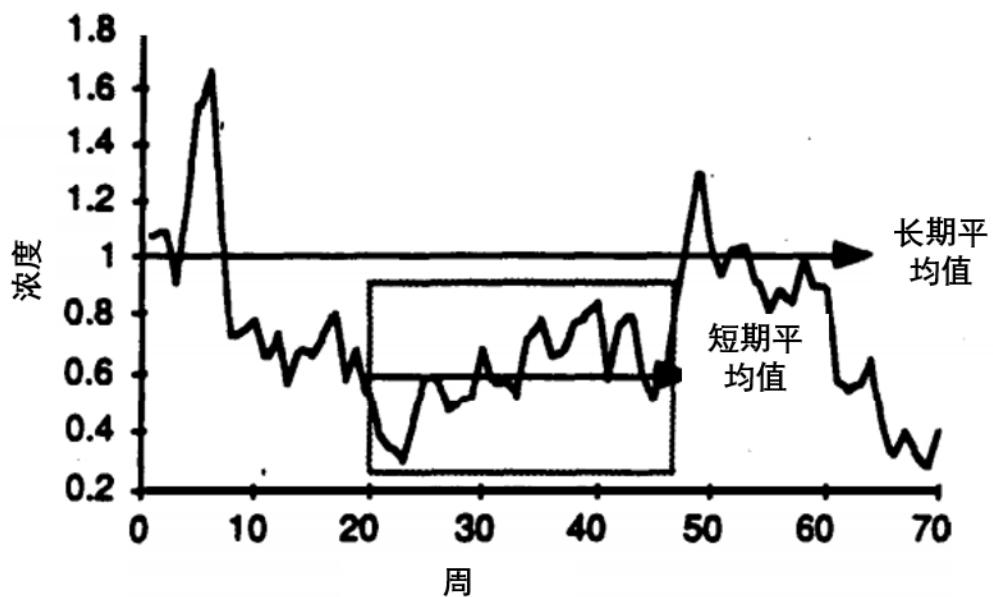


图 4-4 环境修复、采样及评估环境修复达标等程序

4.1.3.2 基于与平均值或百分位数比对评估达标

(1) 统计参数选择

如果环境修复目标值是为特定时间段内的平均浓度制定的基于风险的标准，则将环境修复目标值与平均浓度进行比较是合乎逻辑的。如果环境修复目标值是为极少超过的极端浓度制定的基于风险的标准，测试浓度分布的上百分位数是合乎逻辑的。具体见表 4-6。

表 4-6 选择平均值、上百分位数、中位数时的要点

参数	考虑要点
平均值	<ul style="list-style-type: none"> (1) 易于计算和估计置信区间; (2) 当清理标准是基于致癌效应或慢性长期健康影响时是有用的; (3) 当不同样本或不同季节数据变化不大时有用; (4) 如果数据的变异系数很大(大约大于 1.5), 检验平均数可能需要比检验上百分位数更多的样本, 才能为人体健康和环境提供同样的保护; (5) 在样本规模小、数据偏差大的情况下, 即当污染水平整体较低, 只有偶尔短期的高污染时, 可能会有较高的假阳性率; (6) 当低于检测限的值占很大比例时不适用; (7) 受到一些数据值中的异常值或错误值的不利影响。
上百分位	<ul style="list-style-type: none"> (1) 根据所选的百分位数, 要求最高百分位数低于清除标准可以限制高浓度样本的出现; (2) 不受小于检测限值的影响, 只要检测限值小于清除标准; (3) 如果污染物对健康的影响是急性的, 那么极端浓度就值得关注, 最好的检验方法是确保大部分测量值低于清除标准; (4) 必须选择低于清除标准的样品比例; (5) 对于高度变异的数据, 样本规模要比检验平均值时小; (6) 相对不受少数异常值的影响。
中位数	<ul style="list-style-type: none"> (1) 优于平均值, 不受异常值和高度变异数据的严重影响, 可以用于存在大量低于检测限值的情况; (2) 具有平均数的许多正面特征, 特别是在评估基于致癌或慢性健康影响和长期平均暴露的清除标准方面有用; (3) 对于正偏倚数据, 中位数低于平均值, 检验中位数比检验平均值对人类健康和环境提供的保护更少; (4) 保留了平均值的一些负面特征, 即检验中值无法限制极值的出现。

如果所关注的化学污染物对人类健康或环境有短期或严重影响, 则建议基于上百分位数进行评价, 当污染物浓度分布的变异系数较高时, 则选择较高的百分位数进行评价。如果所关注的化学污染物对人类健康或环境有长期或慢性影响, 根据表 4-7 进行参数选择。

表 4-7 统计参数选择依据

变异系数	低于检出限的数据比例	
	约 30%	高(>30%)
大的变异系数 ($Cv > 1.5$)	平均值或上百分位(上百分位需要较少样品)	上百分位
中间的变异系数	平均值或上百分位	上百分位

变异系数	低于检出限的数据比例	
	约 30%	高(>30%)
($0.5 < Cv < 1.5$)		
小的变异系数 ($Cv < 0.5$)	平均值或中位数	中位数

(2) 评估程序

1) 基于均值比较

基于均值比较的程序包括计算平均值、方差和标准差，分析序列相关性以及构建均值置信区间。

对于不同的采样方式（随机采样和系统采样），标准差的计算方法不同。

序列相关性是指不同时间测得的数据的相关性。假定没有季节性变化，由于污染事件、地下水流量和水位的历史波动，地下水测量值将围绕平均值波动。即使测量值在平均值附近以看似随机的模式波动，但采样时间间距较短的地下水样本（例如连续采样）的测量值通常会比时间相距较远的测量值（例如相隔一年）更相似，即更相关。显著序列相关性的存在会影响均值的标准差。

如果均值置信上限低于环境修复目标值，表明达到目标；如果均值置信上限高于环境修复目标值，表明未达标。

2) 基于浓度百分位数

指南中还给出了一种基于浓度分布百分位数判定是否达标的方法。该方法基于容差区间，如果数据中存在季节性变化或其他系统模式，则不建议使用该技术。此外，此过程对数据（或转换后的数据）服从正态分布的假设相对敏感，如果怀疑数据不能充分近似符合正态分布（即使在转换之后），则不应使用容差区间。

该方法的程序为计算浓度百分位数，如果浓度百分位数低于环境修复目标值，表明相应百分比的地下水污染物浓度低于环境修复目标值；如果浓度百分位数高于环境修复目标值，表明相应百分比的地下水污染物浓度大于等于环境修复目标值。

3) 基于超标比例

该方法的程序为先计算超标比例，再计算超标比例的标准差，再计算超标比例的单边 $100(1-\alpha)$ 百分比置信上限。如果超标比例的单边 $100(1-\alpha)$ 百分比置信上限低于 P_0 ，表明污染物浓度超过环境修复目标值的比例低于 P_0 ；如果超标比例的单边 $100(1-\alpha)$ 百分比置信上限大于等于 P_0 ，表明污染物浓度超过环

境修复目标值的比例高于 P_0 。

4) 中位数附近的非参数置信区间

如果即使在转换后数据也不能充分遵循正态分布，则可以构建围绕中位数的非参数置信区间。如果分布是对称的，则中值浓度等于平均值。中位数的非参数置信区间通常比基于正态分布的均值的相应置信区间更宽，并且需要更多数据。因此，只有在真正需要的时候才使用。

需要至少 7 个观测值才能构建中位数的 98 % 的两侧置信区间或 99 % 的单侧置信区间。基于中位数的非参数置信上限比对的程序为：根据数据量 N 和误判率 α ，计算 M 。将 X_m （按从小达到排列，第 M 个数据）与环境修复目标值进行比对， X_m 小于环境修复目标值，表明达到环境修复目标； X_m 大于等于环境修复目标值，表明未达到环境修复目标。

(3) 利用组合标准进行达标判断

大多数地下水样品的浓度应低于环境修复目标值，高于环境修复目标值的浓度不宜太大。可以通过比较 75 百分位数是否低于环境修复目标值，且高于环境修复目标值的浓度平均值是否小于清除标准的 2 倍的组合标准来判断是否达标。

如果希望平均浓度小于环境修复目标值，且数据的标准偏差较小，可以通过比较平均值是否低于环境修复目标值和标准偏差是否低于指定值这一组合标准来判断是否达标。

4.1.3.3 使用回归分析决定是否终止环境修复

在地下水环境修复达标中，回归分析方法可用于评价污染物浓度水平随时间的变化趋势、确定影响浓度水平的变量以及预测未来某个时间点的污染物浓度。回归分析的第一步是选择线性或非线性模型，通常可以通过观察随时间变化的样本数据图来做出决策（见图 4-5）。

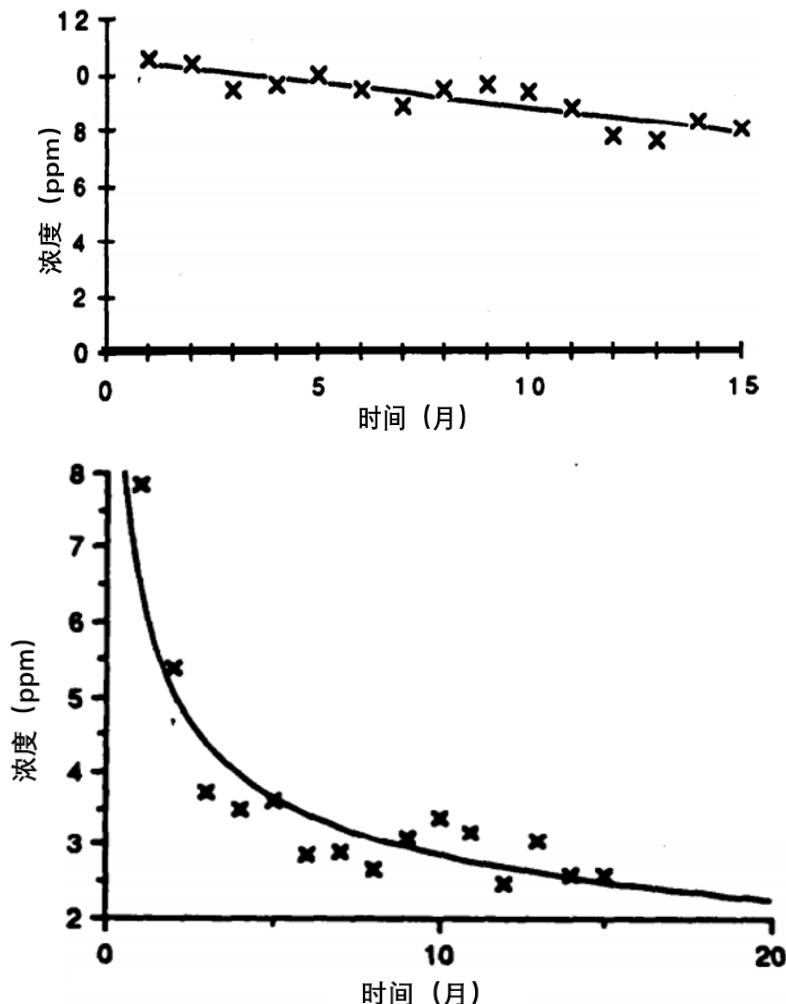


图 4-5 地下水污染物浓度变化趋势分析示意图

在回归分析中，“拟合模型”的过程是指从观测数据中估计回归参数和相关抽样误差的过程。有了这些估计，就可以（1）确定模型是否提供了对观察到的化学测量数据的充分描述；（2）检验化学测量值是否随时间出现显著趋势；（3）获得未来时间点的浓度水平估计值。

给定一组浓度测量值和相应的时间值，可以利用方程计算得到拟合回归线的估计斜率和截距。对于拟合模型，还应计算误差平方和 SSE 和决定系数 R^2 （模型拟合通常是一个迭代过程，如果拟合模型存在不足，可以通过考虑数据变换来获得更好的拟合模型）。然后计算决定系数和斜率的标准差，最后计算斜率的置信区间。如果置信区间包含零值，则没有足够的证据（在显著性水平上）得出它们有趋势的结论；如果置信区间只包含负（或正）值，将得出存在显著的负（或正）趋势的结论。

如果拟合的回归模型是基于环境修复期间收集的数据，那么给出的置信区间

可能并不适用于环境修复终止后。因此，基于环境修复期间数据的置信区间，应谨慎用于推断环境修复后的数据。

如果地下水巾污染物浓度有显著下降趋势，长期平均浓度或浓度的上百分位数低于环境修复目标值，则环境修复达标。

具体过程见图 4-6。

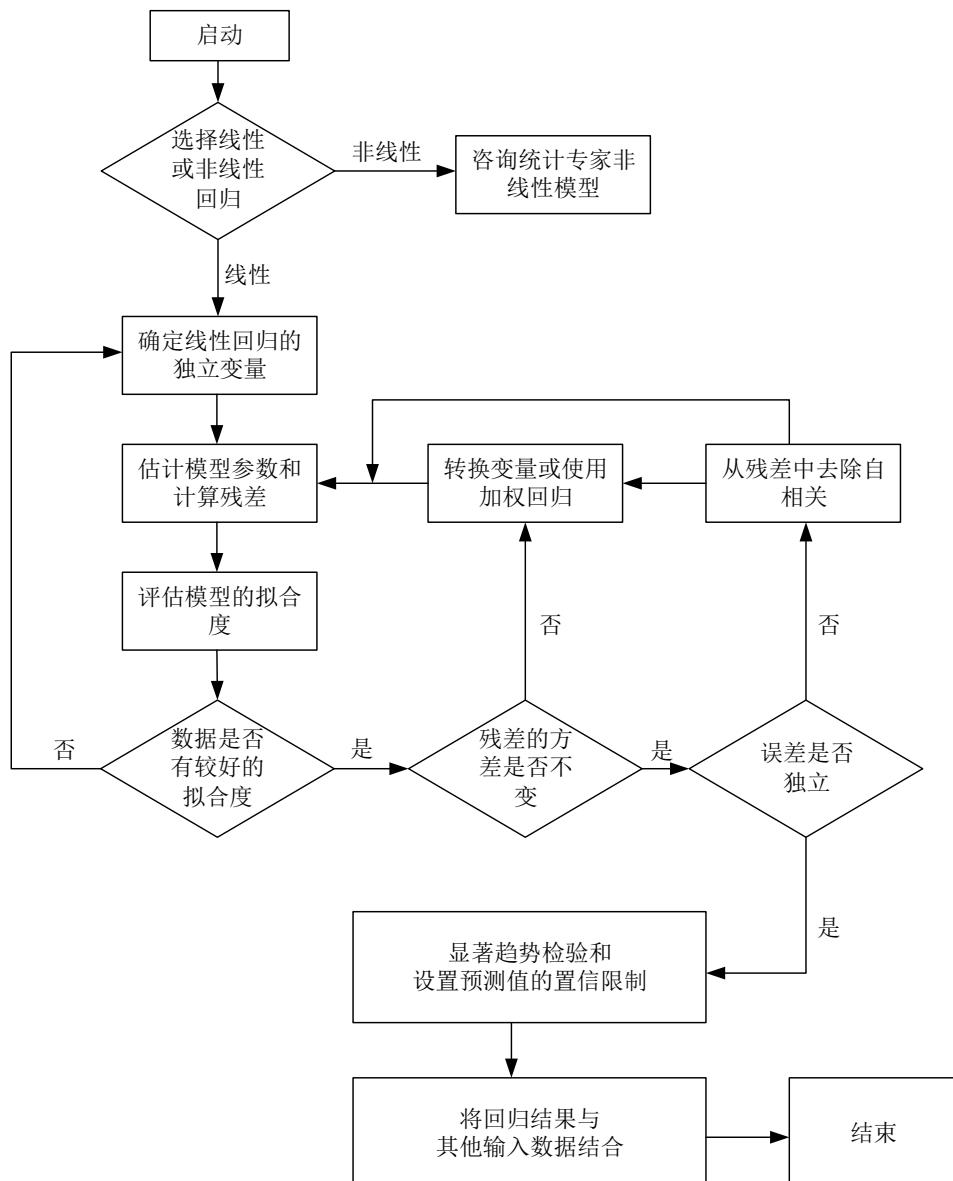


图 4-6 应用回归分析判断是否达标的步骤

4.1.3.4 不同采样方法及达标评估

(1) 固定样本评估达标

当使用固定样本时，有三种基于平均值评估的程序。第一种方法基于平均值具有正态分布的假设，即标准 t 检验；第二种方法假设平均值的分布是偏态的，

类似于对数正态分布，而不是对称的，需要进行对数转换。大多数情况下建议使用第二个方法，当数据中有缺失值且缺失值在全年中分布不均匀时，建议采用第一种方法。第三种方法需要计算季节效应和序列相关性，以确定平均值的方差，因为第三种方法对数据的偏态很敏感，只在残差分布是合理对称的情况下才推荐使用。无论采用何种程序，首先要确定基于平均值评估所需的样本量。

建议每个采样井每年至少收集 4 个样本（如按季度），以合理地反映一年内测量浓度的变化。计算年平均值的置信上限，如果置信上限小于清理标准，且浓度没有随着时间的推移而增加，则判定地下水达到清理标准。如果所有井的地下水达到了清理标准，则认为该场地的地下水达到了清理标准。

当地下水平均浓度低于清理标准，进行回归分析检验趋势，以确定在采样周期内每年的地下水平均浓度是否有显著的增加趋势，至少需要 3 年的数据来确定趋势。

（2）顺序检验评估达标

在顺序检验中，地下水样本必须定期收集，例如每两个月一次。连续收集 3 年的数据后开始分析，每年进行一次统计检验，以确定采集的地下水是否达到清理标准，是否需要更多的数据才能做出判断；如果需要更多的数据，再收集一年的数据执行下一次统计检验。

与固定样本量检验不同的是，使用顺序检验做出达标判断所需的样本量在抽样开始时是未知的。整体来言，顺序检验需要更少的样本和相应更短的时间作出达标决策。如果地下水明显达到清除标准，顺序检验几乎总是比固定样本量检验需要更少的样品；只有当污染物浓度小于清除标准且大于替代假设的平均值时，顺序检验才可能比固定样本量检验需要更多的样本。

为了减少错误地得出浓度随时间增加结论的可能性，建议将测试斜率的 α 值设置为一个小值，例如 0.01。如果没有明显的证据表明斜率大于零，且长期平均值明显低于清除标准，则证明地下水达到清除标准。如果斜率明显大于零，那么污染物水平超过清除标准的可能性仍然存在。在这种情况下，必须进一步考虑造成这种明显增加的原因，也许还需要采取更多的补充环境修复措施。

4.1.4 场地关闭标准和程序

美国固体废物和应急响应办公室 2011 年发布的《超级基金场地关闭程序》

主要针对国家优先治理污染场地顺序名单（NPL）中的场地。该指南主要描述了在超级基金清单场地关闭时候需要考虑的关键原则和目标，总结了超级基金场地关闭的关键节点。环境修复设施完成（Remedial Action Completion）指的是场地某个单元的环境修复设施完成，对于源清理，要求达到环境修复目标；对于工程控制和地下水环境修复，要求环境修复设施达到操作性与功能性，对设施是否正常运行的观察期一般小于一年。当环境修复场地达到修复标准后，一般还需进行5年的跟踪监测，确定稳定达标时，可将其从NPL中删除。在整个环境修复期间，可将场地已稳定达标的部分区域或污染物提前从NPL中删除。

英国2004年的《污染场地管理程序》中明确规定了环境修复后效果验收的重要性，将验收定义为基于定量分析证明风险已经降低到环境修复标准和目标的过程，并对验收计划和验收报告做出了要求。验收计划是收集数据来证实环境修复是否达到环境修复目标和标准的计划。验收报告是提供环境修复行动的完整记录以及验收过程收集的数据，以证明环境修复是否达到目标和标准。

4.1.5 生态恢复效果评估标准和方法

从全球来看，生态保护恢复行动重点是围绕人类社会可持续发展，持续关注生物多样性保护，分类对某些类型的生态系统恢复提出倡议和制订一些国际性公约，主要有“湿地公约”、“防治荒漠化公约”及“世界遗产公约”等。为更好地保护和恢复生态系统，实现人类社会可持续发展，联合国首次于1972年召开的斯德哥尔摩人类环境会议通过的《人类环境宣言》就开始关注生态保护与修复的问题。1992年，联合国环境与发展大会通过的《联合国可持续发展二十一世纪议程》成果文件中，广泛关注森林生态系统、沙漠和干旱半干旱地区的脆弱生态系统、海洋生态系统、水生生态系统以及生物多样性保护与恢复，提升生态系统对人类可持续发展的基础支撑能力。2017年，联合国大会审议通过了《联合国森林战略规划（2017-2030年）》，对全球森林发展战略制定了目标和行动领域，提出了各层级开展行动的执行框架，明确了实现全球森林目标的监测、评估和报告体系。2019年3月1日召开的联合国大会通过决议，将2021-2030年确定为“生态系统恢复十年”。如何科学准确地评估生态系统保护修复对生态系统状况改善的成效，改进、优化和制定生态保护修复措施或行动计划，成为一个关键的命题，也是生态系统综合评估的热点问题之一。

2005 年国际生态恢复协会（SER）公布了 9 个生态恢复评价指标。该指标体系认为作为恢复的生态系统应该具有以下特点：1) 与参考地点具有类似的多样性和群落多样性；2) 本地物种的出现；3) 对于生态系统长期稳定其重要作用的功能群体的出现；4) 能够为种群繁殖提供生境的能力；5) 常规功能；6) 景观的整体性；7) 潜在威胁的消除；8) 对于自然干扰的恢复力；9) 自我支持能力。这些指标总体上可以分成三类，即多样性、植被结构、生态过程。对它们的评价可以反映生态系统恢复的轨迹和自我维持的能力。因此，生态恢复评价可以从以上指标中选择能反映生态系统功能的至少两个变量，同时，至少选取两个参考地点以分析生态系统的变化。在实际的评价中，尽管测量这些特性可以非常全面的进行生态恢复评价，但是由于资金有限，很难监测所有的特性，而且对于许多指标的评估需要长期细致的研究。

生态系统恢复效果评价指标体系呈现多样化特点。国外基于生物多样性的效果评估中，Benayas 等对全球范围内 89 个不同类型生态系统恢复研究进行 Meta 分析，测评生态修复效果，发现修复帮助提升了 44% 的生物多样性，其生物多样性的主要测量指标包括丰度、物种丰富度、多样性、生长或生物量等。Hernández 等探究了 1768 个横跨美国大西洋和海湾沿岸的牡蛎礁生态修复项目的实施效果，结果显示整体修复效果不显著，修复工程仅帮助重建了修复地 4.5% 的珊瑚礁区域。也有一些研究基于生态服务功能开展恢复效果评估，Eric 等分析了多瑙河三角洲 1960 年到 1989 年经济发展期以及 1990 年到 2010 年生态修复期间引起的湿地生态系统服务变化，从粮食生产、旅游和游憩、科学教育、生物多样性保护等方面共 13 项指标评估多瑙河三角洲生态系统服务价值，结果显示三角洲三分之二的生态系统服务功能已退化，且由于三角洲湿地受损严重，目前，生态修复尚未完全扭转生态系统服务下降的趋势。Hands 等基于视觉偏好视角评价研究区生态修复效果，发现诸如鸟窝、岩石等乡土元素以及场地内元素色彩的多样性和数量从不同程度上影响美学价值，提出了改善生态修复效果的具体方案。Emma 等从基于公众感知的角度开展恢复效果评估，调查了英国北部迪恩河流（River Dearne）生态修复实施 14 年后当地居民的感知价值变化，其主要调查评估的因素包括：风景优美、河岸植被和河道形态的状况、观察动植物的机会、河流环境的清洁度、通往河流的通道、河流与周围景观之间的连接等，通过探析影响居民感

知的生态及人文景观因素，提出文化价值研究框架和理想化知觉研究框架，为基于感知价值的生态修复效果评价提供参考。

基于生物资源的恢复效果评价包括生物资源单项评价及其与其他指标的综合评价。单项评价重点关注生物资源的保护与修复，如祖国掌等以宿松县泊湖生态修复区为研究对象，根据生态修复前后研究区水体水生生物资源（含浮游生物、底栖动物和沉水植物）的变化评价修复效果。综合评价研究相对较为广泛，关注生态修复的整体性和综合性。朱林海等采用植被调查与土壤取样检测的方法对岷江干旱河谷典型地段整地造林效果评估，主要植被指标包括造林树种密度、覆盖度、株高、地径、冠幅等，土壤性质包括土壤容重、饱和含水量、毛管含水量、总孔隙度、毛管孔隙度、自然含水率，结果发现，岷江柏在栽植多年后仍有大量死亡，保存率明显下降，造林 16 a 后仅为 38 %；乡土植被总盖度、灌木盖度、草本盖度、地衣苔藓盖度均低于对照区域。费永俊、柯林等运用层次分析法建立了废弃采石场人工生态恢复效果综合评价指标体系并计算各指标的权重。通过分析，权重排在前位的评价指标依次为：植被覆盖率、物种多样性、生态服务功能及价值、乡土植物的比重、物种丰富度、与自然环境的协调性、根系状况、土壤厚度。符小明等从生物资源、环境两方面构建海洋生态修复效果评价指标体系，二级指标为生物多样性、渔业资源结构、营养盐和水质指标，系统评价海州湾生态修复效果。杨薇等针对我国黄河三角洲退化湿地，基于水量补给、沉积物理化性质变化、生物资源修复（含大型底栖生物和植被）三方面探析生态修复效果。

部分区域生态修复效果研究采用生态系统服务功能指标作为评价依据。生态系统服务评估主要涉及单项评估和综合评估。在生态修复效果评价过程中，单项评估重点关注生态修复对生物多样性保护、土壤保持、气候调节等功能的改善效果。有研究通过对生态系统服务进行综合评价，即量化生态修复前后生态系统服务功能的变化分析生态修复效果。邵全琴等综合生态系统服务、结构及质量变化的动态过程，构建生态修复成效评估指标体系（表4-8），对三江源生态保护和建设一期工程展开生态修复效果评估。张秋丰等基于生态系统服务功能构建生态修复效果评估指标体系，基于供给服务、调节服务、文化服务、支持服务四类服务共15项指标的价值量变化情况，对天津海岸带1983-2016年生态修复效果进行评估。

表 4-8 三江源生态修复效果评估指标体系

指标类别	评估指标	
	一级指标	二级指标
生态系统宏观结构	生态系统宏观结构	生态系统分类面积、变化率、动态度 (S)
	生态系统宏观结构变化指数 (EMSCI)	
生态系统质量	草地退化与恢复	草地退化与恢复分类面积、草地退化与恢复分类面积占比、草地退化状况变化指数 (GDCI)
	植被状况	植被生物量、植被覆盖度、植被净初级生产力、植被状况变化指数
	宏观生态状况	土地覆被状况指数、土地覆被转类指数
	植物物种多样性	物种丰富度、物种重要值、多样性指数、均匀度指数
	环境质量	地表水环境质量指数、土壤环境质量指数、环境空气质量指数
	多年冻土上限深度	
	生态系统质量变化指数 (EQCI)	
生态系统服务	水源涵养	枯水季河流径流量、水源涵养量、水源涵养服务保有率、夏汛期河流径流调节系数
	土壤保持	河流径流含沙量、土壤水蚀模数、土壤保持量、土壤保持服务保有率
	防风固沙	土壤风蚀模数、防风固沙量、防风固沙服务保有率
	牧草供给	草地产草量、草地理论载畜量
	水供给	河流径流量、湖泊面积、湖泊水量、冰川面积、地下水资源量
	生态系统服务变化指数	
生态系统变化的影响因素	气候变化	气温、降水、湿润系数
	人类活动	生态工程、草地载畜压力指数、生态系统变生 态系统变化的工程影响指数
	生态工程和气候变化贡献率	评价参数 (植被净初级生产力、水源涵养服务、土壤保持服务、防风固沙服务) 变化的生态工 程贡献率
		评价参数 (植被净初级生产力、水源涵养服务、土壤保持服务、防风固沙服务) 变化的气候变 化贡献率

4.2 国内恢复效果评估相关标准

对于土壤、地下水环境修复已有较为明确的效果评估标准。目前国内关于污

染场地环境修复工程的效果评估工作尚处于起步阶段，国家层面出台的专门技术导则或规范明显不足，且相关细节依然只能参考其他相关技术规范。原环境保护部 2014 年发布了《场地环境监测技术导则》(HJ 25.2-2014)，对场地环境修复的监测与效果评估提出了一些要求，包括污染土壤清挖效果的监测、污染土壤治理修复的监测、污染场地环境修复工程验收监测点位的布设等，该导则于 2019 年进行了修订，更名为《建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则》(HJ 25.2-2019)，细化了环境修复效果评估监测布点、土壤垂向采样间隔等内容。2014 年，原环境保护部发布了《工业企业场地环境调查评估与修复工作指南（试行）》（公告 2014 年第 78 号），对场地环境修复验收的工作程序、关键技术要点等进行了规定；2016 年颁布的第 42 号部令《污染地块土壤环境管理办法》（试行），对治理与修复效果评估报告应当包含的内容进行了规定。2018 年，生态环境部发布了《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则（试行）》(HJ 25.5-2018)，是国家层面第一部专门针对环境修复效果评估的技术导则，该导则规定了建设用地污染地块风险管控与土壤环境修复效果评估的内容、程序、方法和技术要求。目前还没有发布专门针对地下水环境修复效果评估的技术导则，仅在《建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则》(HJ 25.2-2019) 和 2019 年发布的《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》(HJ 25.6-2019) 中对地下水监测布点、采样、检测指标和达标性等提出了一些要求。

部分地方也结合区域特点，制定了污染场地环境修复效果评估标准。在地方层面，北京市、上海市、重庆市、浙江省、广东省和江西省均发布了污染地块环境修复效果评估技术规范或指南，其中北京市《污染场地修复验收技术规范》(DB11/T783-2011)发布时间较早，国家和其他地方制定相关导则时，均参考了北京的导则。2015 年，上海市发布了《上海污染场地修复工程验收技术规范（试行）》，该规范规定了上海市污染地块土壤和地下水环境修复工程验收工作的基本原则、程序、内容和技术要求。2016 年，重庆市发布了《重庆市污染场地治理修复验收评估技术导则》(DB50/T 724-2016)，该规范规定了重庆市污染地块环境修复验收的程序、内容、方法和技术要求。2018 年，浙江省发布了《污染地块治理修复工程效果评估技术规范》(DB33/T 2128-2018)，该规范提出了浙江省污染地块环境治理修复工程效果评估的程序，明确了评估对象、范围和时间段，

将评估工作分为效果评估工作方案制定、现场采样与实验室检测、污染修复效果评估、效果评估报告编制等步骤。2018 年，广东省发布了《广东省污染地块治理与修复效果评估技术指南（征求意见稿）》，该技术指南规定了污染地块治理修复工程效果评估工作中的基本概念、工作程序、资料整理与现场踏勘、采样布点要求、实验室检测、效果评估、报告编制要求等，适用于污染土壤、地下水治理修复工程效果的评估。2019 年，江西省发布了《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术指南》（DB36/T1176-2019），该技术指南规定了建设用地污染地块风险管控与土壤环境修复效果评估的工作程序、方法和技术要求，适用于建设用地污染地块风险管控与土壤环境修复效果评估工作。

针对海洋修复发布了专门的技术导则，其中明确了修复效果评估的要求。《海洋生态修复技术指南（试行）》（自然资办函〔2021〕1214 号）中针对红树林生态修复、盐沼生态修复、海草床生态修复、海藻场生态修复、珊瑚礁生态修复、牡蛎礁生态修复等典型生态系统修复以及岸滩整治与生态修复、河口生态修复、海湾生态修复、海岛生态修复等综合生态系统修复，均给出了跟踪监测和效果评估的方法，跟踪监测部分包括监测指标、点位布设、监测频次、技术要求等，效果评估部分包括评估时间、评估内容、评估标准、评估方法等。

在造林相关技术规程中明确了造林质量评价和造林成效评价的相关方法。在《造林技术规程》（GB/T 15776）和《全国营造林综合核查技术规程》（LY/T 2083）中给出了无林地造林、林冠下造林、四旁植树等不同造林方式的造林质量和造林成效的评估方法，其中造林质量评估主要包括按作业设计施工率、造林/补植成活率、二次破坏等指标，造林成效评估则包括郁闭度、盖度、株树保存率等。

其它类型生态修复效果评估缺乏专门标准规范，但可借鉴生物多样性观测系列导则开展监测。生态环境部（原环境保护部）发布了《生物多样性观测技术导则 陆生维管植物》（HJ 710.1）、《生物多样性观测技术导则 陆生哺乳动物》（HJ 710.3）、《生物多样性观测技术导则 鸟类》（HJ 710.4）等系列陆地生态系统生物要素观测与调查技术规范，规定了相关调查内容、技术要求和方法。生物多样性观测技术导则侧重于生态系统类型复杂，以动物、植物、微生物个体参数为主要目标的生态调查。调查方式以样线、样方、样点相结合为主，样线通常在 1 km～5 km 之间，在样线上等间距铺设样方、样点，涉及动物的常用调查方法还包括

标记重捕法、红外相机自动拍摄法等。生物多样性观测技术导则调查指标丰富详实，植物包括物种名称、胸径、定位、高度、冠幅、枝下高、物候期、盖度、生物量、生物多样性等指标，动物包括种类、种群数量、性比、生活史、生物量、生境类型等指标。导则还提供了人为干扰调查指标与动植物群落特征参数数据处理、计算方法。生物多样性调查工作量较大，导则规定对乔木观测时间为5年一次、灌木3年一次、草本1年一次，动物按照其生活习性通常春季、秋季至少一次。

全国生态状况调查评估系列技术规范明确了除生物以外的其他指标监测要求。2021年，生态环境部发布了全国生态状况调查评估技术规范，包括《全国生态状况调查评估技术规范—森林生态系统野外观测》(HJ 1167)、《全国生态状况调查评估技术规范—草地生态系统野外观测》(HJ 1168)、《全国生态状况调查评估技术规范—湿地生态系统野外观测》(HJ 1169)、《全国生态状况调查评估技术规范—荒漠生态系统野外观测》(HJ 1170)等共计十一项标准，用于指导和规范生态状况调查评估。全国生态状况调查技术规范适用于区域生态系统简单、以植被为主要目标的生态调查，调查方式为每 10000 km^2 设置1个以上 $100\text{ m}\times100\text{ m}$ 固定样地，在样地内根据植被类型设置两个以上的重复样方，样方大小乔木 $20\text{ m}\times20\text{ m}$ 、灌木样方 $10\text{ m}\times10\text{ m}$ 、草本样方 $1\text{ m}\times1\text{ m}$ ，调查次数一年一次，调查时间在7月~9月左右，调查更侧重于植被类型、植被覆盖度、主要优势种、植被平均高度、生物量等反映群落整体特征的信息。

其他相关技术导则可以作为生态恢复效果评估过程及达标评估阶段监测的参考。国家林草局（原国家林业局）发布了《森林生态系统生物多样性监测与评估规范》(LY/T 2241-2014)、《干旱半干旱区森林生态系统定位观测指标体系》(LY/T 1688-2007)、《自然保护区生物多样性调查规范》(LY/T 1814-2009)，规定了森林生态系统生物多样性监测与评估内容和方法。国家质量监督检验检疫总局和国家标准化管理委员会发布了《森林生态系统长期定位观测指标体系》(GB/T 35377-2017)和《森林生态系统长期定位观测方法》(GB/T 33027-2016)，规定了森林生态系统各类观测指标及观测方法。在生态环境损害恢复效果评估指南的调查监测阶段应根据受损区域生态系统类型选择合适的调查标准。受损面积较大、监测植被、以恢复生态系统服务功能为主要目的应参考生态系统类观测规

范；受损面积较小，监测动、植物的物种资源价值、生物多样性价值恢复效果应参考生物多样性观测技术导则，合理布置观测样方。此外，2020 年，生态环境部印发了《生态环境损害鉴定评估技术指南 总纲和关键环节 第 1 部分：总纲》（GB/T 39791.1-2020）和《生态环境损害鉴定评估技术指南 总纲和关键环节 第 2 部分：损害调查》（GB/T 39791.2-2020），包含了涉及生态系统的主要调查内容和方法，可以为生态环境损害恢复效果评估提供依据。

5 标准主要技术内容和依据

5.1 适用范围

这部分规定了本标准的适用范围，适用于污染清除、环境修复、生态服务功能恢复等不同阶段的损害恢复效果评估，且适用于替代性恢复措施实施效果的评估。

由于生态环境损害的成因可能是突发环境事件，也可能是历史遗留污染事件，因此，其损害恢复过程可能包括污染清除、环境修复、生态服务功能恢复等阶段。由于生态环境损害恢复也有可能采取其它替代性恢复措施，因此，在适用范围里强调了该标准同样适用于替代性恢复。

由于我国已经针对污染地块风险管控与土壤修复效果评估、污染地块地下水修复和风险管控效果评估、耕地污染治理效果评价、海洋生态修复效果评估等制定了相关的技术指南和导则，本标准规定土壤、地下水、海洋等的恢复效果评估，直接参照上述指南和导则执行；对上述指南和导则未覆盖的地表水、沉积物、除海洋以外的其它生物要素和生态系统恢复效果评估，则参照本标准执行。

由于本标准中除了对最终恢复效果评估的相关要求进行了规定，也给出了恢复过程监测的一些相关要求，因此，生态环境损害恢复过程相关监测工作和恢复效果评估和参照本标准执行。

5.2 规范性引用文件

为了与现有的土壤、地下水、海洋等修复效果评估要求相衔接，规范性引用文件中包含了《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则（试行）》（HJ 25.5）、《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》（HJ 25.6）、《海洋生态修复技术指南（试行）》（自然资办函〔2021〕1214号）、《耕地污染治理效果评价准则》（NY/T 3343）。《造林技术规程》（GB/T 15776）中规定了造林质量评价的相关方法，本标准中也进行了参考。《突发环境事件应急监测技术规范》（HJ 589）规定了突发环境事件应急监测的相关方法和要求，本标准涉及突发环境事件监测的内容直接参照 HJ 589。

由于本标准需要明确地表水和沉积物的恢复效果评估方法，因此，需要引用地表水调查相关指南，包括《水质 采样方案设计技术指导》（HJ 495）、《地表水和污水监测技术规范》（HJ/T 91）、《地表水环境质量监测技术规范》（HJ 91.2）。

由于本标准需要明确生物要素和生态系统的恢复效果评估方法，因此，需要引用生物要素和生态系统调查监测相关指南，包括 HJ 710 生物多样性观测系列技术导则、HJ 1167、HJ 1168、HJ 1169、HJ 1173 等生态状况调查评估技术规范。由于在生态恢复过程中，可能存在有害生物入侵问题，因此，本标准还引用了《植物有害生物发生状况确定指南》(GB/T 27619)，以评估损害恢复过程中的二次破坏情况。

此外，在对生态服务功能达标情况进行评估时还需要开展生态系统服务功能相关指标的监测，结合生态系统恢复过程监测的一些相关要求，本标准还引用了 GB/T 27648、GB 50026、GB 50179、GB 50286、GB 50330、SL 44、CH/T 1026、LY/T 1678、NY/T 87、NY/T 88、NY/T 1121.3、NY/T 1121.4、NY/T 1121.6、NY/T 1121.16、NY/T 1121.24、NY/T 1377、TD/T 1055 等文件。

在达标分析部分，对于未达到恢复目标的情况，应按照总纲要求采取补充恢复措施或者进行生态环境损失量化，因此，引用了《生态环境损害鉴定评估技术指南 总纲和关键环节 第 1 部分：总纲》(GB/T 39791.1)。

在长效监管部分，为了明确长效监管的启动条件，本标准引用了 GB/T 14848、GB 3838、GB 15618、GB 36600、LY/T 1678 等文件。

5.3 术语和定义

(1) 替代性恢复

当原基本恢复或补偿性恢复方案不可行时，基于资源或服务等量原则，采取异位或原位恢复措施和活动，使恢复措施获得的资源或生态服务收益与原生态恢复方案获得的资源或生态服务收益相等的过程。

该定义改编自《生态环境损害鉴定评估工作指南与手册》中定义。

(2) 目标污染物

生态环境损害鉴定评估阶段确定的需要进行风险管控与治理修复的污染物。

该定义改编自《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则》(HJ 25.5)。

(3) 恢复效果评估

通过资料回顾与现场踏勘、布点采样与实验室检测、样方样带调查、测量测绘等手段，评估是否按照恢复方案实施了恢复工程，是否达到了设定目标，是否造成了二次污染或破坏。

该定义改编自《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则（试行）》（HJ 25.5）中“风险管控与土壤修复效果评估”定义，并结合了本标准中效果评估工作的具体内容。

（4）恢复过程评估

对恢复过程进行评估，分析是否按照恢复方案实施了所有工程，分析恢复过程是否造成了二次污染或破坏，初步判断相关指标是否达到恢复目标或是否达到了稳定状态。

该定义根据本标准中恢复过程评估阶段工作的具体内容进行定义。

（5）恢复达标评估

通过调查监测和数据分析，评估是否达到了生态环境损害恢复方案中设定的恢复目标。

该定义根据本标准中恢复达标评估阶段工作的具体内容进行定义。

（6）二次污染

受损生态环境恢复过程中因污染物迁移扩散、废水废气排放、固体废弃物排放堆存等导致恢复区域外的其它区域污染物超标、或导致其它介质中污染物超标。

该定义给出了二次污染产生的原因，即生态环境恢复过程中的污染物迁移扩散、废水废气排放、固体废弃物排放堆存，以及二次污染的主要情形，即导致恢复区域外的其它区域污染物超标、导致其它介质中污染物超标。

（7）二次破坏

受损生态环境恢复过程中因污染物引流、土地侵占、施工碾压、养护不当等原因导致土地利用的不利改变、生境条件恶化、植被破坏、有害生物发生、外来物种入侵、生物多样性降低等情况。

该定义给出了二次破坏的原因，即污染物引流、土地侵占、施工碾压、养护不当等，以及二次破坏的主要情形，即土地利用的不利改变、生境条件恶化、植被破坏、有害生物发生、外来物种入侵、生物多样性降低等。

5.4 工作内容与工作程序

5.4.1 工作内容

根据《生态环境损害鉴定评估技术指南 总纲和关键环节第 1 部分：总纲》

(GB/T 39791.1) 中的流程, 损害恢复效果评估主要是跟踪生态环境损害恢复方案的实施情况, 开展必要的调查和监测, 评估生态环境恢复的效果。因此, 损害恢复效果评估应在损害恢复开始后尽早启动, 且损害恢复效果评估的内容包含前期准备、恢复达标评估、效果评估报告编制, 根据需要开展恢复过程评估。

5.4.2 工作程序

恢复效果评估通常是指在恢复工程完成后, 对相关指标是否达到恢复目标进行评价, 但在恢复效果评估实践中, 效果评估单位也可以对恢复过程是否规范、恢复工程量是否满足设计要求等内容进行全面评价。本标准在达标评估的基础上, 增加了恢复过程评估环节, 对恢复过程监测提出了明确要求。

恢复效果评估的程序包括前期准备、恢复达标评估和效果评估报告编制, 根据需要开展恢复过程评估。

前期准备包括开展资料收集、人员访谈和现场踏勘, 收集应急处置、环境修复、生态恢复工程实施、监理监测相关方案、数据、报告、图件等资料。

恢复过程评估的程序包括基于所收集的资料, 梳理受损生态环境恢复过程, 分析是否按照恢复方案实施了所有工程, 分析恢复过程是否造成了二次污染或破坏。结合损害鉴定评估结果、损害赔偿磋商结果、诉讼判决结果等, 确定恢复效果评估指标和恢复目标。开展数据分析, 初步判断相关指标是否达到恢复目标或是否达到了稳定状态, 数据不足以开展分析时, 要求开展补充监测。

恢复达标评估阶段需构建概念模型, 为最终效果调查监测计划制定提供依据。制定恢复达标评估调查监测计划, 明确恢复达标评估阶段的调查对象、时间、点位、数量以及分析指标等。开展现场调查监测, 对调查所获取的数据进行必要的分析, 判断相关指标是否达到了生态环境损害恢复方案中设定的目标。如果未达到恢复目标, 则继续开展补充性恢复或实施货币化赔偿; 如果达到恢复目标, 则结束评估。

经达标评估达到恢复目标后, 编制生态环境损害恢复效果评估报告。

5.5 前期准备

通过资料收集、人员访谈、现场踏勘等方式, 从责任方、相关管理部门、参与前期工作的相关单位处收集受损区域应急处置、环境修复、生态恢复实施过程情况, 环境保护措施落实情况, 相关监测工作开展情况及监测结果等, 为评价是

否恢复到位、分析是否造成二次污染/破坏等提供基础资料，同时为损害恢复效果调查监测方案的制定提供依据。

5.6 恢复过程评估

5.6.1 恢复过程总结

分析是否恢复到位以及是否产生了二次污染和破坏。这一阶段主要是基于资料收集、人员访谈、现场踏勘所获取的信息，全面梳理生态环境损害调查评估、恢复方案制定、恢复工程实施等过程，分析是否按照恢复方案实施了恢复工程。如果存在恢复工程未覆盖恢复方案确定的建设内容或对象、恢复工程量不满足方案设计要求、恢复的范围与设计文件不一致等情况，且未经过合理的设计变更，应及时要求相关责任单位开展补充恢复。如果存在药剂类型、注入流量、种植养护方式、灌溉方式、孵化保育方式等技术指标与技术方案不一致的情况，应要求施工方提供合理的变更说明。

此外，该阶段还应分析施工方是否采取了必要的固体废弃物、废水、废气、噪声等二次污染防治措施或者必要的土壤资源、生物群落、生态系统的二次破坏防控措施，如果未采取相应的措施，应分析是否可能产生二次污染或二次破坏，以为恢复达标评估方案制定提供依据。

5.6.2 过程监测数据分析

基于监测数据分析判断是否达到恢复目标或是否达到稳定状态。这一阶段需对已经开展的监测工作所获取的数据进行总结，分析施工单位和相关管理部门是否按照恢复方案和相关标准规范要求开展了必要的监测。数据不足以开展分析时，要求相关责任主体开展补充监测，标准 6.3 节给出了过程监测要求。数据充分时，应初步判断相关指标是否达到恢复目标或是否达到了稳定状态，具体要求见标准 7.3 节。如遇到异常情况判断无法达到目标，应及时对恢复方案做出相应调整。

5.6.3 过程监测要求

土壤地下水的相关过程监测直接参照现有效果评估技术导则中的要求。

由于《突发环境事件应急监测技术规范》(HJ 589) 对突发环境事件应急监测要求进行了明确，因此，涉及突然环境事件监测的，直接参照《突发环境事件应急监测技术规范》(HJ 589) 执行。

由于地表水、沉积物、除海洋以外的生物要素和生态系统的恢复均没有相关的导则对恢复过程监测做出规定，因此，本标准中给出了地表水、沉积物、除海洋以外的生物要素和生态系统的恢复过程监测要求。一方面引导相关责任主体按照该要求实施恢复过程监测，另一方面当发现数据不足以开展恢复效果初判时，要求相关责任主体按照本标准要求开展补充监测。

这一章节分两部分进行编写，即环境监测以及生物监测，两部分分别围绕指标、点位/样方（样线、样点）、频次、方法等内容展开。

环境监测部分，过程监测指标主要根据恢复方案中确定的恢复目标来确定。地表水、沉积物的环境修复虽然缺乏相应的技术标准规范，但本标准充分借鉴了现有地表水监测相关技术导则中的要求，提出了地表水环境修复过程监测的相关指标、点位布设、监测频次等。对于沉积物，考虑到其环境修复模式与土壤的相似性和差异性，本标准在借鉴土壤环境修复效果评估导则的基础上，充分结合沉积物环境修复的特点，分别针对原位以及原地异位或异位环境修复，提出了过程监测的要求。

地表水监测点位参照《水质 采样方案设计技术指导》(HJ 495)、《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91)、《地表水环境质量监测技术规范》(HJ 91.2) 等技术指南进行规定，总体原则是要优先根据水体功能区、所采用的修复技术特点等布设，选择代表性断面进行监测，同时兼顾可能存在的薄弱区，批次处理的，应保证每批次 1 个样品。沉积物监测点位参照《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则》(HJ 25.5)，同时结合沉积物的特点进行设计，区分原位恢复、异位或原地异位等不同方式规定了监测点位布设要求。监测频次和时间综合考虑监测指标类型、介质类型、恢复技术类型等进行确定。

生物监测部分，过程监测指标重点关注植物、动物等生物资源和物理环境相关指标，根据恢复目标和生态系统的关键属性，从生态系统结构（物种组成）、物理环境（如土壤养分等）及生态胁迫（如有害生物等）等方面提出生态恢复过程评估的指标。主要根据恢复方案中确定的恢复目标来确定，同时考虑可能影响动植物生长的各类指标，如影响陆生植物生长的土壤 pH、有机质、含水率、容重、渗透性、含盐量、全氮、全磷、全钾、污染物浓度、有害生物种类等，影响陆生动物生长的栖息地面积、有害生物种类等，影响湿地水生生物生长的径流量、

积水水深、pH、溶解氧、土壤有机碳密度、土壤湿度、底泥的理化性质、土壤的渗透性、水体和沉积物污染物含量等。由于生态损害现场通常尺度较小，综合考虑尺度、实施成本和可操作性，本标准未纳入二氧化碳通量、氧化亚氮通量、营养循环过程等生态系统过程指标，这些指标通常针对大空间尺度、长时间序列、研究需要开展监测评估。

由于生物多样性观测系列技术导则和全国生态状况调查评估系列技术规范中明确了各类生物和生态系统调查监测的要求，因此，生物监测的样方、样线、样点布设、监测频次和时间、调查监测方法等主要参照上述导则和规范。针对一些通用的要求在指南中进行了明确，如不同指标的监测频次、监测时间、监测方法等。森林、草地、湿地、荒漠相关指标监测优先参照 HJ 1167、HJ 1168、HJ 1169、HJ 1170 执行。同时，陆生维管植物、陆生哺乳动物、鸟类、爬行动物、两栖动物、蝴蝶、大中型土壤动物、蜜蜂类监测具体参照 HJ 710.1、HJ 710.3、HJ 710.4、HJ 710.5、HJ 710.6、HJ 710.9、HJ 710.10、HJ 710.13。水生维管植物、内陆水域鱼类、淡水底栖无脊椎动物、两栖动物监测参照 HJ 710.12、HJ 710.7、HJ 710.8、HJ 710.6。有害生物调查监测及有害生物发生状况确定参照 GB/T 27618 和 GB/T 27619。对于具有迁徙性或周期性特点的动物，应根据观测目标和观测区域野生动物的繁殖、迁徙及其出现的季节规律等确定调查时间。对于植物，应当根据各类型植物物候特征确定调查时间。

5.7 恢复达标评估

5.7.1 概念模型构建

概念模型构建是基于前期资料收集、人员访谈、现场踏勘等过程掌握的信息以及恢复过程总结、监测数据分析结果等，对风险管控与治理修复或生态恢复情况、目标指标完成情况、影响恢复目标达标的的相关自然环境条件等进行综合展示的过程，这一过程对于后续恢复效果评估调查监测计划的制定具有重要的作用，因此，为了保障效果评估调查监测方案设计的合理性，本标准规定开始达标效果评估时，应对前期资料收集、人员访谈、现场踏勘等过程掌握的信息以及恢复过程总结、目标可达性监测数据分析结果进行总结，并用文字、图、表等形式构建概念模型，根据概念模型制定完整的调查监测计划。

概念模型中应包含风险管控与治理修复、生态恢复方案及实施的相关情况，

具体包括风险管控与治理修复、生态恢复起始时间、范围、目标、主要技术和工艺参数及其变化情况、废气废水固废产生和排放情况；对于环境修复案例，涉及药剂添加时包括药剂添加量等情况；对于生态恢复案例，涉及植被种植时包括覆土量、植被类型、覆盖度、养护等情况，涉及动物恢复时包括动物类型、数量等情况。目标指标的变化情况是概念模型的核心，对于环境修复案例，概念模型中应主要包括目标污染物原始浓度以及环境修复过程中浓度的时空变化，二次污染物产生及其浓度和分布情况；对于生态恢复案例，概念模型中应包含主要关注生物的原始情况以及恢复过程中的时空变化，二次破坏情况。此外，一些自然环境条件也会影响生态环境恢复过程及目标指标的变化，如果前期调查掌握了相关情况，也应体现在概念模型中，对于环境修复案例，主要包括地质和水文地质条件及其变化情况，水体和沉积物理化性质及其变化情况，周边敏感受体及相关暴露途径等；对于湿地生态恢复案例，主要包括水体相关物理、化学、生物条件及其变化情况，对于林地、草地、荒漠等生态恢复案例，主要包括气候、土壤等条件及其变化情况。

对于环境修复工程，概念模型通常需要包含地质与水文地质条件、污染物类型及其分布相关情况、所采取的风险管控与治理修复措施及其平面布置等情况，周边敏感受体及其环境条件等情况，全面反映风险管控与治理修复措施实施过程中污染物的迁移转化情况和可能产生二次污染的情况、受各种环境条件或水文地质条件等影响导致实施过程中可能存在的盲点以及实施以后污染物可能的水平和垂向分布情况、过程中对周边产生的二次污染和区域内残留污染可能对周边敏感受体构成的风险，以辅助确定达标评估阶段调查评估对象和范围、指标和标准、采样点位置和深度、采样时间节点等。

对于生态恢复过程，概念模型需要包含生态损害范围、生态系统类型、生物种群和群落构成、影响生物要素的自然环境条件和生物地球化学过程、所采取的恢复措施和后期养护措施等，以辅助确定调查评估对象和范围、指标和标准、样点样方布设位置、监测时间节点等。以湿地生态恢复为例，需要明晰区域湿地生态系统形成与演化的基本特征，时空变化的驱动力和湿地生态恢复的内在因素及表征生态质量的生态特征。从外部压力来讲地形地貌、气候的影响最为显著，是水文格局、生态过程、生物群落组成时空变化的主要驱动力；内在因素是由外部

驱动引起的生态系统内发生的物理或化学变化，如水文、水质、物理外貌、生物地球化学过程会导致生态系统中生物成分、格局和关系发生重大改变。根据外部压力和内在影响因素最终选择配套表征生态质量的生态特征，如动植物群落结构参数、生物多样性、底栖动物生物量、关键保护物种的生存状况等，形成外部压力-内在因素-生态特征的生态恢复概念模型，模拟整个区域内湿地受损前后以及恢复过程中的时空变化、二次破坏等情景。

5.7.2 恢复达标评估调查与监测

概念模型构建的一个最重要的作用就是作为恢复达标评估调查监测计划制定的依据，因此，在构建完概念模型后，应制定恢复达标评估调查监测计划，指导后续调查监测活动。

恢复达标评估调查与监测分环境修复和生态恢复两部分进行规定。每部分都从评估内容和区域、指标、点位布设（样方、样线、样点布设）、频次和时间等四个方面展开，为更好地指导实际操作，生态恢复效果调查监测部分还包含了常用方法。

与过程监测相比，达标评估阶段，不仅需要对恢复区域进行评估，还需要对可能产生二次污染或二次破坏的区域进行评估，且不同的恢复模式下，需要考虑的评估内容和区域不同。因此，本标准重点规定了恢复达标评估阶段需要考虑的评估内容和监测区域。指标方面，重点是对是否达到恢复方案中确定的恢复目标进行评估，同时考虑二次污染或二次破坏相关的指标，点位布设或样方、样线、样点布设要求与过程监测一致。

环境修复达标评估调查与监测的内容主要包括恢复后的地表水、沉积物环境质量状况、恢复过程中可能产生的二次污染等，如果涉及清挖，还应包含清挖效果评估，如果涉及风险管控措施，还应包含风险管控措施的性能评估。除了恢复方案中确定的恢复目标以外，指南重点对二次污染相关的区域和指标进行了列举，区域包括周边区域、污染水体和沉积物暂存区、环境修复区、临时处置区、待检区、试剂对方去；指标包括反应过程二次产物、试剂中可能涉及的污染物、固废、危废和废水中可能涉及的污染物、运输材料可能涉及的污染物等。点位布设要求和过程监测阶段相同。环境修复周期通常较短，通常采用1次性评估，在环境修复完成且环境修复介质的物理、化学、生物学状态及生态服务功能达到稳

定后以及受到其它扰动前进行；采用风险管控措施控制沉积物污染风险的，应对上覆水中的目标污染物监测 4 次，每次间隔不少于 1 个月，确保稳定达标。

生态恢复达标评估调查与监测主要针对恢复区域（流域）以及周边区域（流域），以及恢复过程中可能产生二次破坏的区域。生态恢复达标评估的调查监测主要针对恢复方案中设定的目标指标进行，附录 B 给出了支持服务和供给服务核心监测指标以及调节和文化服务应该监测的参考指标的监测方法、监测频次与参考标准。指南重点给出了二次破坏相关的调查监测指标，包括针对污染物引流占用土地的土壤污染物浓度、土壤理化性质等指标，针对碾压导致植被破坏的面积、覆盖度，针对清淤、药剂使用对水生生物造成影响的生物体污染物残留浓度、物种数量及其密度，针对植被高水分和养分需求导致当地生境条件恶化的地下水位、土壤含水率、土壤养分含量等，针对有害生物发生的有害生物物种数量及其密度，针对物种扩张的物种数量及其密度、多样性等。样方、样线、样点布设方法、监测频次以及调查监测方法与过程监测相同。生态恢复周期较长，规定在生态恢复工程竣工后 1~3 年左右开展初步效果评估，并在竣工后 3~5 年或更长期的时间开展恢复效果的中长期效果评估。

本标准评估对象空间尺度较小、时间跨度较短，支持服务和供给服务是该尺度级别生态系统服务功能的核心关注对象，支持和供给服务功能的有效恢复是调节服务和文化服务得以发挥的重要基础，因此，本标准以支持服务和供给服务作为核心指标，以调节服务和文化服务作为参考指标开展生态环境损害恢复评估。综合考虑评估工作的可操作性以及监测指标的适用性，在开展生态系统服务功能评估指标监测过程中，主要监测人为活动可直接导致变化、易于监测或计算的典型生态类型指标，如生物物种种类和数量、植被生物量、数字高程、土壤理化性质、库容变化等。对于降水、风速、径流等主要由环境背景状况决定、日常气象和水文监测涵盖的指标，以及植物的空气净化能力、不同群落的降雨截留率等需要开展大量室外监测与室内模拟试验的研究性指标，本标准没有将其纳入规定。

5.7.3 达标分析

达标分析部分重点参考了美国以及国内现有的土壤和地下水环境修复效果评估导则，在总结现有效果评估方法的基础上，本标准提出了五种达标分析方法，包括针对土壤、地下水、地表水和沉积物的逐一比对法和统计分析法，针对地下

水和生态恢复的趋势分析法，针对林地恢复的造林成效法，以及针对其他类型生态恢复的综合指数法。

逐一比对法和统计分析法的要求相对较为严格，即在调查样品数量较少（<8个）时要求每个样品污染物浓度均达标，在调查样品量较大（≥8个）时，其均值的95%置信上限或下限达标，且最大值不超过或不低于2倍目标值即可，这两种方法主要来源于美国土壤地下水环境修复效果评估相关技术导则以及我国的污染地块土壤和地下水环境修复效果评估导则。由于技术的发展，土壤地下水中的污染物要修复到基于风险的可接受浓度水平在技术上已经基本能够实现，因此，可以采用这类方法进行达标评估。由于地表水沉积物的修复和土壤地下水的修复有一定的相似性，因此，这两种方法对地表水沉积物也适用。

此外，由于生态恢复和地下水环境修复均具有长期性、不稳定性等特征，因此，本标准中将美国地下水环境修复效果评估导则和我国的地下水环境修复效果评估导则中用到的趋势分析法用于原位地下水环境修复和生态恢复的初步效果评估中。此外，GB/T 15776等指南中的造林质量法采用施工率、成活率等指标评估造林是否成功，如果达到造林合格标准，可以判定林地恢复达到初步恢复目标，因此，本标准中利用该方法进行林地恢复的初步效果评估。由于生态恢复目标中通常涉及多个指标，除污染物浓度、有害生物等指标必须一一达标外，对于生态恢复最终评估阶段，推荐采用综合指数评估法进行达标评估，该方法是国内外目前针对区域等较大尺度生态系统普遍采用的评估方法，并建立了相应的评价指标体系，本标准结合局地小尺度生态环境损害恢复效果评估的需要简化了评估方法，对达标标准进行了柔性规定，即只要通过各类目标指标计算的综合指数达到一定限值以上就可以认可其恢复效果，而不要求所有指标完全达到目标值。

5.8 效果评估报告编制

标准中以附录形式给出了恢复效果评估报告的格式和内容要求。

6 对实施本标准的建议

本标准是专门针对生态环境损害恢复效果评估制定的，对规范我国生态环境损害恢复具有重要的现实意义。生态环境损害恢复涉及土壤、地下水、地表水等不同的生态环境要素，与相关管理部门的工作可能存在大量的交叉，相关管理部门之间应进一步理顺联动工作机制，加强对于评估技术方法、关键难点问题的研究，不断完善管理制度和技术体系。为了保证本标准的实施，建议生态环境部门、科技部门加强对生态环境损害恢复效果评估技术方法研究的支持力度，为保障生态环境的有效恢复提供更有力的技术支撑。建议加大标准的宣传，扩大标准的影响力，促进标准在科研、司法实践以及其他领域的应用。本标准是第一次发布，还有诸多不完善的地方，建议在实践中不断修订完善。

7 参考文献

- [1] 中华人民共和国土壤污染防治法[R/OL]. (2018-08-31)[2022-07-13]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/fl/201809/t20180907_549845.shtml.
- [2] 国务院. 国务院关于印发土壤污染防治行动计划的通知（国发〔2016〕31号）[R/OL]. (2016-05-31)[2022-07-13]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm.
- [3] 中华人民共和国生态环境部. 污染地块土壤环境管理办法（环境保护部令 第42号）[R/OL]. (2016-12-31)[2022-07-13]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bl/201701/t20170118_394953.htm.
- [4] 中华人民共和国生态环境部. 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB 36600-2018) [R/OL]. (2018-08-01)[2022-07-13]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/trhj/201807/t20180703_446027.shtml.
- [5] 中华人民共和国生态环境部. 土壤环境监测技术规范 (HJ/T 166) [R/OL]. (2004-12-09)[2022-07-13]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/jcffbz/200412/t20041209_63367.shtml.
- [6] 中华人民共和国生态环境部. 建设用地土壤污染状况调查技术导则 (HJ 25.1) [R/OL]. (2019-12-05)[2022-07-13]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/trhj/201912/t20191224_749894.shtml.
- [7] 中华人民共和国生态环境部. 建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则 (HJ 25.2) [R/OL]. (2019-12-05)[2022-07-13]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/trhj/201912/t20191224_749891.shtml.
- [8] 中华人民共和国生态环境部. 建设用地土壤污染风险评估技术导则 (HJ 25.3) [R/OL]. (2019-12-05)[2022-07-13]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/trhj/201912/t20191224_749893.shtml.
- [9] 中华人民共和国生态环境部. 建设用地土壤修复技术导则 (HJ 25.4) [R/OL]. (2019-12-05)[2022-07-13]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/trhj/201912/t20191224_749895.shtml.
- [10] 中华人民共和国生态环境部. 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则 (HJ 25.5) [R/OL]. (2018-12-29)[2022-07-13]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/trhj/201901/t20190107_688646.shtml.
- [11] 中华人民共和国生态环境部. 污染地块地下水修复和风险管控技术导则 (HJ 25.6) [R/OL]. (2019-06-18)[2022-07-13]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/trhj/201906/t20190620_707197.shtml.
- [12] 中华人民共和国生态环境部. 建设用地土壤污染风险管控和修复术语 (HJ 682) [R/OL]. (2019-12-05)[2022-07-13]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/trhj/201912/t20191224_749892.shtml.

- [13] 中华人民共和国生态环境部. 工业企业场地环境调查评估与修复工作指南（试行）（公告 2014 年 第 78 号文）[R/OL]. (2014-12-01)[2022-07-13]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201412/t20141211_292830.htm.
- [14] 北京市环境保护局. 污染场地修复验收技术规范（DB11/T783）[R/OL]. (2011-04-28)[2022-07-13]. <https://doc.wtbworld.com/doc/21642.html>.
- [15] 重庆市质量技术监督局. 污染场地治理修复验收评估技术导则（DB50/T 724-2016）[R/OL]. (2017-09-12)[2022-07-13]. http://sthjj.cq.gov.cn/zwgk_249/zfxxgkml/kjbz/gjjdfhj/dfhjbz/201901/t20190128_3795152_wap.html.
- [16] 浙江省质量技术监督局. 污染地块治理修复工程效果评估技术规范（DB33/T 2128）[R/OL]. (2018-07-17)[2022-07-13]. <http://sthjt.zj.gov.cn/module/download/downfile.jsp?classid=0&filename=902c0592f39a4cbbaab496582e82d374.pdf>.
- [17] 上海市. 上海市污染场地修复工程验收技术规范（试行）[R/OL]. (2016)[2022-07-13]. <https://crtps.jlu.edu.cn/2015Shanghaigongchengyanshoujishugufan.pdf>.
- [18] 广东省. 广东省污染地块治理与修复效果评估技术指南（征求意见稿）[R/OL]. (2018-07-16)[2022-07-13]. <https://huanbao.bjx.com.cn/news/20180717/913335.shtml>.
- [19] 江西省. 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术指南（DB36/T 1176）[R/OL]. (2019-11-05)[2022-07-13].
- [20] 祖国掌,鲍传和,胡建华,荣朝振,刘鑫,段荣会,王欣欣,王磊,刘全美,程必胜,刘天文.宿松县泊湖生态修复区水生生物资源演变情况调查研究[J].安徽农业大学学报, 2012, 39(03): 327-335.DOI:10.13610/j.cnki.1672-352x.2012.03.001.
- [21] 朱林海,包维楷,何丙辉. 岷江干旱河谷典型地段整地造林效果评估[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(6):7.
- [22] 费永俊,柯林,王琼,韩烈保,辜再元,杨敏. 废弃采石场人工生态恢复质量评价体系研究[C] //全国水土保持生态修复学术研讨会论文集,2009:224-229.
- [23] 符小明,唐建业,吴卫强,张硕. 海州湾生态修复效果评价[J].大连海洋大学学报, 2017, 32 (01): 93-98.
- [24] 杨薇,裴俊,李晓晓,孙涛,王文燕.黄河三角洲退化湿地生态修复效果的系统评估及对策[J].北京师范大学学报(自然科学版),2018,54(01):98-103.
- [25] 张秋丰,白洁,马玉艳,高文胜,屠建波.天津海岸带生态修复效果评估方法研究[J]. 海洋环境科学,2019,38(05):782-789.
- [26] 邵全琴,樊江文,刘纪远,黄麟,曹巍,徐新良,葛劲松,吴丹,李志强,巩国丽,聂学敏,贺添,王立亚,邴龙飞,李其江,陈卓奇,张更权,张良侠,杨永顺,杨帆,周万福,刘璐璐,祁永刚,赵国松,李愈哲.三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估[J]. 地理学报,2016,71(01):3-20.
- [27] Davis S M,Childers D L,Lorenz J J,et al.A conceptual model of ecological interaction s in the mangrove estuaries of the Florida Everglades[J]. Wetlands,2005,25(4):832

- [28] 孙晓萌,彭本荣.中国生态修复成效评估方法研究[J].环境科学与管理,2014,39(7):153-157.
- [29] 王柯,郭义强,张建军,张亚男,刘时栋.基于时空分析的生态保护与修复试点工程实施效果评估——以赣州市为例[J].生态学报,2019,39(23):8867-8877.
- [30] 付战勇,马一丁,罗明,陆兆华.生态保护与修复理论和技术国外研究进展[J].生态学报,2019,39(23):9008-9021.
- [31] 刘红玉,周奕,郭紫茹,戴凌骏,王成,王刚,李玉凤.盐沼湿地大规模恢复的概念生态模型——以盐城为例[J].生态学杂志,2021,40(01):278-291.DOI:10.13292/j.1000-4890.202101.005.
- [32] 于贵瑞,王永生,杨萌.生态系统质量及其状态演变的生态学理论和评估方法之探索[J].应用生态学报,2022,33(04):865-877.DOI:10.13287/j.1001-9332.202204.026.
- [33] EPA. An overview of methods for evaluating the attainment of cleanup standards for soils, solid media, and groundwater, EPA Volumes 1, 2, and 3[R/OL]. (1996-01)[2022-07-13]. <https://triadcentral.clu-in.org/mgmt/tech/documents/overview.pdf>.
- [34] EPA. Methods for Evaluating the Attainment of Cleanup Standards Volume 1: Soils and Solid Media[R/OL]. (1989-02)[2022-07-13]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=200081SR.TXT>.
- [35] EPA. Methods for Evaluating the Attainment of Cleanup Standards Volume 2: Ground Water[R/OL]. (1992-07)[2022-07-13]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=200091OR.TXT>.
- [36] EPA. Statistical Methods For Evaluating The Attainment Of Cleanup Standards Volume 3: Reference-Based Standards For Soils And Solid Media[R/OL]. (1992-12)[2022-07-13]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=200082GP.TXT>.
- [37] EPA. Methods from monitoring pump-and-treat performance[R/OL]. (1994-06)[2022-07-13]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=3000371J.TXT>.
- [38] The Office of Solid Waste and Emergency Response. Close Out Procedures for National Priorities List Sites[R/OL]. (2011-05)[2022-07-13]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P100GCAJ.TXT>.
- [39] The Office of Solid Waste and Emergency Response. Recommended Approach for Evaluating Completion of Groundwater Restoration Remedial Actions at a Groundwater Monitoring Well[R/OL]. (2014-08)[2022-07-13]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P100NB98.TXT>.
- [40] Michigan Department of Natural Resources. Guidance document for verification of soil remediation[R/OL]. (1994-04)[2022-07-13]. <https://semspub.epa.gov/work/05/168984.pdf>.
- [41] Michigan Department of Environmental Quality Remediation and Redevelopment Division. Sampling Strategies and Statistics Training Materials for Part 201 Cleanup Criteria[R/OL]. (2002-08)[2022-07-13]. https://www.michigan.gov/documents/deq/deq-erd-stats-s3tm_250015_7.pdf.
- [42] Ontario Ministry of the Environment. Guidance on Sampling and Analytical Methods

- for Use at Contaminated Sites in Ontario[R/OL]. (1996-12)[2022-07-13]. <https://archive.org/details/03guidanceonsampli00onta/page/n1/mode/2up>.
- [43] New Jersey Department of Environmental Protection. Alternative and Clean Fill Guidance for SRP Sites[R/OL]. (2011-12-29)[2022-07-13]. https://www.nj.gov/dep/srp/guidance/archive/fill_protocol_v2.0_20111229.pdf.
- [44] New Jersey Department of Environmental Protection. Technical Guidance for Site Investigation of Soil, Remedial Investigation of Soil, and Remedial Action Verification Sampling for Soil[R/OL]. (2015-03)[2022-07-13]. https://www.nj.gov/dep/srp/guidance/srra/soil_inv_si_ri_ra.pdf.
- [45] Minnesota Pollution Control Agency. Draft Guidelines Risk Based Site Characterization and Sampling Guidance[R/OL]. (1998-09)[2022-07-13]. <https://www.pca.state.mn.us/sites/default/files/siteches.pdf>.
- [46] Minnesota Pollution Control Agency. Soil Sample Collection and Analysis Procedures: Guidance Document 4-04 Petroleum Remediation Program[R/OL]. (2021-01)[2022-07-13]. <https://www.pca.state.mn.us/sites/default/files/c-prp4-04.pdf>.
- [47] Minnesota Pollution Control Agency. Risk based site characterization and sampling guidance, Minnesota Pollution Control Agency Site Remediation Section[R/OL]. (1998-09)[2022-07-13]. <https://www.pca.state.mn.us/sites/default/files/sitechfs.pdf>.
- [48] California Department of Toxic Substance Control. Confirmation Sampling And Analysis Plan[R/OL]. (2011-12-13)[2022-07-13]. https://basmaa.org/wp-content/uploads/2021/01/cw4cb_task-3-sap_final_2012-0910.pdf.
- [49] New Hampshire Department of Environmental Services. Contaminated Site Closure: A Property Owner's Guide[R/OL]. (2019-10-07)[2022-07-13]. <https://www.des.nh.gov/sites/g/files/ehbemt341/files/documents/2020-01/rem-9.pdf>.
- [50] The Contaminated Sites Management Working Group, Canada. 1999. A Federal Approach to Contaminated Sites[R/OL]. (2000-11)[2022-07-13]. <https://www.canada.ca/content/dam/eccc/migration/fcs-scf/B15E990A-C0A8-4780-9124-07650F3A68EA/fa-af-eng.pdf>.
- [51] Government of Canada. Guidance for site closure tool for federal contaminated sites[R/OL]. (2012-07)[2022-07-13]. https://publications.gc.ca/collections/collection_2014/ec/En14-19-4-2013-eng.pdf.
- [52] Environmental Agency. Land contamination risk management (LCRM) [R/OL]. (2010-08)[2022-07-13]. <https://www.gov.uk/government/publications/land-contamination-risk-management-lcrm>.
- [53] Environmental Agency. Verification of remediation of land contamination[R/OL]. (2010-02)[2022-07-13]. <https://gateleyhamer-pi.com/filer/sharing/1602150933/7825/>.
- [54] Department of Environment, Climate Change and Water NSW. UPSS Technical Note: Site Validation Reporting[R/OL]. (2010-01)[2022-07-13]. <https://www.environment.nsw.gov.au/resources/clm/1035technotesvr.pdf>.

- [55] Office of Environment and Heritage, NSW. Authority. Guidelines for Consultants Reporting on Contaminated Sites[R/OL]. (2011-08)[2022-07-13]. <https://cupdf.com/document/guidelines-for-consultants-reporting-on-contaminated-sites-consultants-on-the-investigation.html?page=3>.
- [56] Ministry for the Environment, New Zealand. Contaminated Land Management Guidelines No.1 - Reporting on Contaminated Sites in New Zealand[R/OL]. (2021-06-17)[2022-07-13]. <https://environment.govt.nz/publications/contaminated-land-management-guidelines-no-1-reporting-on-contaminated-sites-in-new-zealand/>.
- [57] Ministry for the Environment, New Zealand. Contaminated Land Management Guidelines No 5 - Site Investigation and Analysis of Soils[R/OL]. (2021-06-17)[2022-07-13]. <https://environment.govt.nz/publications/contaminated-land-management-guidelines-no-5-site-investigation-and-analysis-of-soils/>.
- [58] Ministry for the Environment, New Zealand. Checklist of reporting requirements for contaminated sites[R/OL]. (2011-10)[2022-07-13]. <https://environment.govt.nz/assets/Publications/Files/checklist-of-reporting-requirements.pdf>.
- [59] Office of Solid Waste and Emergency Response. Recommended Approach for Evaluating Completion of groundwater Restoration Remedial Actions at a Groundwater Monitoring Well[R/OL]. (2014-08)[2022-07-13]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P100NB98.TXT>.
- [60] USEPA. RCRA Groundwater Monitoring: Draft Technical Guidance. [R/OL]. (1992-11)[2022-07-13]. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/rcra_gwm92.pdf.
- [61] California State Water Resources Control Board. Low-Threat Underground Storage Tank Case Closure Policy[R/OL]. (2012-11-6)[2022-07-13]. https://www.waterboards.ca.gov/board_decisions/adopted_orders/resolutions/2012/rs2012_0016atta.pdf.
- [62] Air Force Center for Engineering & The Environment Lackland AFB. Low-Risk Site Closure Guidance Manual to Accelerate Closure of Conventional and Performance Based Contract Sites[R/OL]. (2012-07)[2022-07-13]. <https://studylib.net/doc/18247194/low-risk-site-closure---gsi-environmental-inc>.
- [63] USEPA. Institutional Controls: A Site Manager's Guide to Identifying, Evaluating and Selecting Institutional Controls at Superfund and RCRA Corrective Action Cleanup[R/OL]. (2000-09)[2022-07-13]. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-01/documents/icfactfinal.pdf>.
- [64] EPA. Institutional Controls: A Citizen's Guide to Understanding Institutional Controls at Superfund, Brownfields, Federal Facilities, Underground Storage Tank, and Resource Conservation and Recovery Act Cleanups[R/OL]. (2005-02)[2022-07-13]. https://www.epa.gov/sites/default/files/documents/ic_ctzns_guide.pdf.
- [65] EPA. Institutional Controls: A Guide to Planning, Implementing, Maintaining, and Enforcing Institutional Controls at Contaminated Sites[R/OL]. (2012-12)[2022-07-13]. https://www.epa.gov/sites/default/files/documents/ic_guide.pdf.

//www.epa.gov/fedfac/institutional-controls-guide-planning-implementing-maintaining-and-enforcing-institutional.

- [66] EPA. Groundwater Road Map Recommended Process for Restoring Contaminated Groundwater at Superfund Sites[R/OL]. (2011-07)[2022-07-13]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P100EKSZ.TXT>.
- [67] EPA. Summary of Key Existing EPA CERCLA Policies for Groundwater Restoration [R/OL]. (2009-06-26)[2022-07-13]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P100GET6.TXT>.
- [68] New Jersey Department of Environmental Protection Site Remediation Program. Technical Impracticability Guidance for Ground Water [R/OL]. (2013-12-3)[2022-07-13]. https://www.nj.gov/dep/srp/guidance/srra/ti_guidance_gw.pdf.
- [69] José M, Rey, et al. Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: a meta-analysis.[J]. Science, 2009. 325 (5944) :1121-1124
- [70] Ada B H, Brumbaugh R D, Peter F, et al. Restoring the eastern oyster: how much progress has been made in 53 years?[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2018, 16 (8): 462-471.
- [71] E Gómez-Baggethun, Tudor M, Doroftei M, et al. Changes in ecosystem services from wetland loss and restoration: An ecosystem assessment of the Danube Delta (1960-2010)[J]. Ecosystem Services, 2019, 39.100965
- [72] Hands D E, Brown R D. Enhancing visual preference of ecological rehabilitation sites [J]. Landscape & Urban Planning, 2002, 58(1):57-70.