

重金属污染底泥原位修复指南

Guidelines of in-situ remediation for heavy metal contaminated sediment

2023 - 08 - 22 发布

2023 - 09 - 22 实施

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 总则与工作程序 2

 4.1 总则 2

 4.2 工作程序 2

5 原位覆盖 3

 5.1 材料筛选 3

 5.2 材料铺设 3

 5.3 维护管理 4

6 原位钝化 4

 6.1 材料筛选 4

 6.2 材料投加 5

 6.3 维护管理 5

7 原位植物修复 5

 7.1 植物筛选 5

 7.2 种苗定植 5

 7.3 维护管理 6

8 监控式自然修复 6

 8.1 修复资料收集 6

 8.2 修复趋势评估 6

 8.3 实施要点 6

 8.4 维护管理 6

附录 A（资料性） 山东省常见对底泥重金属修复效果良好的水生植物 7

附录 B（资料性） 山东省常用水生植物种苗质量要求及定植密度 8

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由山东省生态环境厅提出并组织实施。

本文件由山东省环保标准化技术委员会归口。

重金属污染底泥原位修复指南

1 范围

本文件提供了河流、湖泊、水库等水体重金属污染底泥进行原位覆盖、原位钝化、原位植物修复和监控式自然修复的指导和建议，并给出了相关信息。

本文件适用于镉、汞、砷、铅、铬、铜、镍、锌等重金属污染底泥原位修复。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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/T 15566.1 公共信息导向系统 设置原则与要求 第1部分：总则
- GB 15618 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）
- HJ 915 地表水自动监测技术规范（试行）
- JGJ/T 188 施工现场临时建筑物技术规范
- SL 319 混凝土重力坝设计规范
- DB37/T 4327 底泥污染状况调查点位布设技术规范
- DB37/T 4471 底泥重金属污染状况评价技术指南

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

3.2 底泥 sediment

经过长时间物理、化学及生物等作用及水体传输而沉积于水体底部所形成的黏土、泥沙、有机质及各种矿物的混合物。

3.3

3.4 原位修复 in-situ remediation

不移动受污染的底泥（3.1），直接在发生污染的位置对其进行原地修复或处理，以减轻底泥污染物对环境、人体或其他生物体的危害。

3.5

3.6 原位覆盖 in-situ capping

利用具有重金属阻隔作用的材料铺设于污染底泥（3.1）上，将底泥与上覆水物理隔离，以降低底泥污染物向水体释放能力。

3.7

3.8 原位钝化 in-situ inactivation

向底泥（3.1）中投加对重金属具有吸附或化学稳定等功能材料，改变底泥重金属的化学形态和赋存状态，降低底泥重金属生物有效性和迁移性。

3.9

3.10 原位植物修复 in-situ phytoremediation

综合利用植物系统及其根系与根际微生物的吸附、吸收转运、稳定、阻隔、过滤等多种功能，吸收和固定底泥（3.1）中的重金属污染物，或降低污染物中的重金属毒性，达到消除污染、修复底泥目的。

3.11

3.12 监控式自然修复 *monitored natural recovery*

在有计划的监控模式下，通过水体底泥（3.1）中自然发生的物理、化学及生物等自然修复作用，将底泥中污染物的数量、毒性、生物有效性降低到风险可接受水平。

4 总则与工作程序

4.1 总则

4.1.1 宜在外源污染得到控制的前提下，开展重金属污染底泥原位修复工作。

4.1.2 对存在多区段重金属污染底泥修复时，宜确定不同区段的修复顺序，确保上游区段不影响下游区段的修复效果。

4.1.3 重金属污染底泥原位修复场地标志牌和警示牌的设置应符合 GB/T 15566.1 的规定。

4.1.4 可在水环境敏感区域建设地表水水质采样站，监测底泥修复工程对水质的影响，其建设应符合 HJ 915 的规定。

4.1.5 原位修复过程中，宜采取有效措施，避免对河道防洪、湖库库容及水体其他水利功能造成不利影响。

4.1.6 施工现场临时建构物的建设应符合 JGJ/T 188 的规定。

4.2 工作程序

4.2.1 底泥污染调查

重金属污染底泥调查应符合 DB37/T 4327 的规定，点位布设可根据实际需要增加采样断面或采样点位，柱状样采集深度依据现场情况确定。底泥重金属污染状况评价应符合 DB37/T 4471 的规定。

4.2.2 修复目标提出

4.2.2.1 目标污染物确定

依据 4.2.1 发现的重金属污染物种类，结合污染水域周边的地质背景、水体功能区划和水文地质等因素，确定底泥污染修复的目标污染物。

4.2.2.2 修复目标值提出

根据底泥目标污染物种类，宜参考 GB 15618 规定的农用地污染风险筛选值及 DB37/T 4471 规定的底泥污染风险筛选值，结合水体功能、水质目标、周边土壤污染物背景值等因素，确定修复目标值。

4.2.2.3 修复范围确定

根据底泥污染的调查结果及修复目标，确定污染底泥修复的边界范围。

4.2.3 修复方式选择

4.2.3.1 底泥重金属污染原位修复适用于轻中度污染底泥，其评价方法宜遵循 DB37/T 4471 的规定。

4.2.3.2 对具有一定水深、且水文地质等条件对覆盖材料或钝化材料扰动不大的水体，宜选用原位覆盖或原位钝化。

4.2.3.3 对本土水生植物繁茂或适宜生长水生植物的水体，宜选用原位植物修复。

4.2.3.4 对自然修复趋势明显的水体，宜选用监控式自然修复。

4.2.3.5 为提高污染底泥修复效果，根据工程实际情况，可联合运用多种原位修复方式。

4.2.4 修复方案制定

4.2.4.1 根据确定的原位修复方式，制定备选修复方案。备选修复方案包括但不限于：技术路线制定、工艺参数确定、监控计划制定、工程量估算、成本核算及修复周期确定等。

4.2.4.2 从技术指标、工程费用、环境及健康安全等方面比较备选修复方案，确定最优修复方案。

4.2.5 工程设计及施工

4.2.5.1 根据修复方案，开展修复工程设计及施工。

4.2.5.2 工程设计要点宜包括：修复分区、监测点位、覆盖材料、钝化材料、覆盖层厚度、钝化剂投加量、水生植物定植方法及定植密度、溢流坝等附属设施的设计。

4.2.5.3 工程施工宜包括施工准备、施工过程，施工过程宜同时开展环境管理。

4.2.6 工程运行监测

4.2.6.1 宜定期开展工程运行监测。

4.2.6.2 监测指标包括底泥、水质及水生生物指标。底泥与水质监测指标分别为底泥及水体中的目标污染物浓度；水生生物监测指标为水生植物组织及底栖生物体的目标污染物含量。

4.2.6.3 采用原位覆盖时，宜考虑增加覆盖层的工程性能指标监测，工程性能指标包括覆盖层的阻隔性能、连续性、完整性。

4.2.6.4 监测点（断面）布设宜考虑代表性、合理性、连续性和准确性等原则，宜设置在底泥重金属含量较高、亲水区、靠近敏感点等典型区域，采样深度依据现场情况确定。

4.2.6.5 宜每季度开展1次底泥、水质及水生生物指标监测。针对原位覆盖，宜每年开展1次覆盖层的工程性能指标监测。

4.2.7 修复效果评估

4.2.7.1 底泥修复效果评估标准值为底泥污染修复目标值。

4.2.7.2 若底泥各监测点目标污染物指标均达到修复目标值，则判断达到修复效果。

5 原位覆盖

5.1 材料筛选

5.1.1 宜根据污染底泥重金属的种类，结合水深、水流动性等水文特征等进行覆盖材料筛选，筛选原则如下：

- a) 选择性：优选对底泥目标污染物具有良好物理阻隔性能的覆盖材料；
- b) 生态性：宜选择环境友好、不造成底泥及水体二次污染的覆盖材料；
- c) 经济性：宜选择来源广泛，价格低廉的覆盖材料。

5.1.2 修复区域有足够的水深且底泥污染物潜在释放通量不高时，可选用未污染的底泥、黏土、沙子、膨润土等惰性颗粒类材料。

5.1.3 修复区域水深较浅时，可选用土工织物类材料。

5.2 材料铺设

5.2.1 覆盖分层

5.2.1.1 可根据底泥污染状况、材料特性等，设置单层或多层覆盖。单层覆盖采用一种覆盖材料，多层覆盖采用多种覆盖材料。

5.2.1.2 多层覆盖采用土工织物类材料时，宜将其设置于底层；无土工织物材料时，细颗粒类材料宜设置于底层。

5.2.2 覆盖厚度

5.2.2.1 宜根据底泥污染特征及覆盖材料的重金属阻隔效应选择覆盖厚度。

5.2.2.2 当采用多层覆盖时，覆盖层厚度宜通过试验确定。

5.2.3 铺设方式

5.2.3.1 宜根据底泥污染区域特征、覆盖材料物理性质及水体流动特性等确定覆盖材料铺设方式。

5.2.3.2 污染底泥区域靠近岸边，处于覆盖材料运输及铺设机械设备倾倒可达到范围内时，可采用机械设备表层倾倒的铺设方式。

5.2.3.3 污染水体适宜行船且水流扰动不大时，可采用驳船表层撒布或水力喷射表层覆盖的铺设方式；水流扰动较大时，可采用驳船管道水下覆盖。

5.2.3.4 使用土工织物类覆盖材料，可采用机械或人工铺设。

5.2.4 铺设注意事项

5.2.4.1 铺设无机覆盖材料时，宜确保覆盖材料在污染底泥表层连续。

5.2.4.2 铺设土工织物类覆盖材料，宜做到和底泥基面严密贴合，覆盖层平整连续。覆盖材料宜自然搭接，接缝宜错开，留有一定的搭接宽度。底泥表面有一定坡度时，宜采用上幅压下幅的方式进行搭接。

5.2.4.3 水流扰动较大时，宜在覆盖层上铺设一定厚度的块石或卵石等，以防止水流对覆盖层的冲刷侵蚀。

5.3 维护管理

5.3.1 施工期宜及时评估覆盖材料投放效果，及时解决投放中存在的问题。

5.3.2 一旦覆盖层受到外界强烈扰动，宜及时对覆盖层的工程性能进行检测。

5.3.3 如需在覆盖区域周边开展河道边坡整治或湖泊（水库）除险加固等水利工程活动，宜预先评估其对覆盖层的影响，并采取有效措施，确保覆盖层的完整性。

5.3.4 在船舶航行通过区域实施的原位覆盖修复工程，宜增加监测频次，一旦发现覆盖层遭到侵蚀或破损，宜及时补充或更换覆盖材料。

6 原位钝化

6.1 材料筛选

6.1.1 宜根据污染底泥重金属的种类，结合水深、水流动性等水文特征等进行原位钝化材料筛选，筛选原则如下：

- a) 选择性：优选对底泥目标污染物具有良好吸附、稳定效果的钝化材料；
- b) 生态性：宜选择环境友好、不造成底泥及水体二次污染的钝化材料；
- c) 经济性：宜选择来源广泛，价格低廉的钝化材料。

6.1.2 钝化材料宜选择有成功应用案例的药剂或材料，可选用铁氧化物、磷灰石、沸石、凹凸棒土、碳基材料等。

6.1.3 钝化材料在使用之前，宜先开展相关试验，确定其对目标污染物的钝化效果。

6.2 材料投加

6.2.1 可根据水体地貌与水文状况，钝化材料投加宜选择悬浊液或溶剂的形式喷洒。

6.2.2 钝化材料可与覆盖材料一起联合投加，将钝化材料投加到底泥—水界面上方形成钝化层，再在钝化层上方投加覆盖材料形成覆盖层。

6.3 维护管理

6.3.1 施工期宜及时评估钝化材料投放效果，及时解决投放中存在的问题。

6.3.2 如在船舶通行区域实施底泥重金属钝化工程，宜增加监测频次，一旦发现钝化层遭到侵蚀或破损，及时补充投加钝化材料。

7 原位植物修复

7.1 植物筛选

7.1.1 宜根据底泥目标污染物种类，结合水深等水文特征，选择适宜的水生植物种类，筛选原则如下：

- a) 富集性：优选重金属富集性能强、生物量大的植物；
- b) 本土性：优选本土植物，不宜引进外来植物；
- c) 观赏性：在满足生态修复功能的前提下，选择兼具观赏和社会价值的植物；
- d) 易维护：选择易于定植、成活及收割的植物；
- e) 抗逆性：选择具有抗病性、抗寒性、抗污性的植物。

7.1.2 山东省常见对底泥重金属具有良好修复效果的水生植物参见附录 A。

7.1.3 挺水植物宜定植于相对静止、流速低缓的河、湖岸边；沉水植物宜定植于靠近河流中泓或湖泊中央有一定水深处；浮叶植物可根据水体具体情况，定植于岸边或水面中央。

7.2 种苗定植

7.2.1 分区定植

7.2.1.1 可根据污染物种类、水深等，将受污染底泥区域划分为若干修复分区，以便于水生植物配置及定植。挺水植物宜定植在岸边浅水处；浮叶植物、沉水植物宜定植在河道或湖（库）水面中央。

7.2.1.2 宜结合修复分区设置隔离围栏及围护设施，减缓船行波对植物及底泥的冲刷；植物定植初期宜设置隔离及围护设施，控制植物无序蔓延。

7.2.2 定植季节

挺水、浮叶植物定植以春季为宜，一般气温低于5℃时不宜定植；沉水植物播种宜在春、夏季进行。

7.2.3 定植水深

挺水植物、浮叶植物种苗定植完毕后，宜根据植物生长逐渐将水深提高至常水位。对水位随季节变化较大的河道，在不影响河道防洪及其他水利功能的情况下，可利用河道原有设施或新建溢流堰调节水位，以满足水生植物定植及生长要求。溢流堰的设置应符合SL 319的规定。

7.2.4 种苗质量

宜选择植株健壮、新芽饱满、根系完整、无病虫害、无枯枝叶的种苗，山东省常用水生植物种苗质量要求参见附录B。

7.2.5 定植规格和密度

宜根据种苗规格、质量及设计要求确定定植密度，山东省常用水生植物定植密度见附录B。

7.2.6 定植方法

种苗宜随到随种；若不能及时种植，宜采取覆盖、假植或浸泡水中等保护措施。挺水、浮叶、沉水植物可选择容器苗定植、抛掷定植和叉植定植等方法。

7.3 维护管理

7.3.1 宜在水生植物的不同生长期进行管理，补种缺苗，勤除杂草。

7.3.2 宜对枯黄、枯死和倒伏植株及时修剪，对过密植株适当删剪。冬至后至立春萌动前宜对枯萎枝叶进行删剪。

7.3.3 水生植物病虫害防治宜采取预防为主、治疗为辅的方针，宜优先采用物理、生物方法防治病虫害，不宜使用除草剂、杀虫剂等易破坏生态系统的药剂。

7.3.4 有条件的情况下，可及时调整挺水、浮叶植物的生长水位，遵循由浅入深的原则。沉水植物生长水深与透明度比例宜控制在2:1以下。

7.3.5 宜根据植物生长及富集重金属情况确定收割次数，收割时间宜在植物休眠期或者枯萎后，收割后的植物应按国家和山东省相关规定妥善处理处置。

8 监控式自然修复

8.1 修复资料收集

在修复方式确定之前，宜收集包括但不限于以下资料：

- a) 污染底泥基本理化性质及其重金属随时间变化的相关监测数据；
- b) 底泥重金属在水生植物、水生动物体内的含量与分布随时间变化的相关监测数据等；
- c) 新生底泥产生量及其重金属含量随时间变化的相关监测数据等；
- d) 因水力扩散作用造成的底泥及上覆水污染含量随时间变化的相关监测数据等。

8.2 修复趋势评估

8.2.1 基于收集的修复资料，建立底泥重金属修复模型，合理确定修复时限。

8.2.2 基于底泥重金属修复模型，分析污染底泥修复趋势及修复时限内修复目标的可达性。

8.3 实施要点

8.3.1 宜通过历史及现场监控资料分析，核实污染底泥存在明显的自然修复趋势后选用该修复模式。

8.3.2 实施过程中，宜监控底泥、水体及水生生物指标等因素的变化，矫正底泥重金属修复模型。

8.3.3 监控发现底泥污染修复趋势减缓，预测在修复时限内无法达到修复目标时，可采取与原位覆盖、原位钝化或原位植物修复等联用的强化措施。

8.4 维护管理

8.4.1 宜采取有效措施，保护水体水生生物生境，防止人类活动破坏水体自然修复功能。

8.4.2 宜根据底泥污染修复模型验证反馈信息，及时调整监控模式及修复措施。

8.4.3 联合原位覆盖、原位钝化和原位植物修复时，其维护管理分别参照5.3、6.3及7.3的相关要求。

附 录 A

附 录 B（资料性）

附 录 C 山东省常见对底泥重金属修复效果良好的水生植物

表A. 1给出了山东省常见对底泥重金属修复效果良好的水生植物。

表 A. 1 山东省常见对底泥重金属修复效果良好的水生植物

底泥重金属 污染类型	水生植物
Cd	狐尾藻，黑藻，苦草，伊乐藻，香蒲，芦苇，荷花，睡莲，水葱，灯芯草，水生美人蕉，水蓼，黄菖蒲，菹草
Hg	狐尾藻，金鱼藻，水薄荷，千屈菜，菹草，黑藻
As	狐尾藻，黑藻，睡莲，菹草，苦草，金鱼藻
Pb	苦草，金鱼藻，香蒲，芦苇，黄菖蒲，睡莲，菹草，灯芯草，千屈菜，慈姑
Cr	狐尾藻，黑藻，金鱼藻，荷花，睡莲，芦苇，石菖蒲，黄菖蒲，千屈菜，慈姑，香蒲
Cu	狐尾藻，黑藻，苦草，伊乐藻，金鱼藻，香蒲，芦苇，荷花，菖蒲，睡莲，菹草，慈姑，菱，萍蓬草
Ni	花叶芦竹，香蒲，水葱，芦苇，黄菖蒲，狐尾藻
Zn	狐尾藻，苦草，金鱼藻，香蒲，芦苇，菹草，水葱，花叶芦竹，水菖蒲，黄菖蒲，花菖蒲，慈姑

附 录 D

附 录 E （资料性）

附 录 F 山东省常用水生植物种苗质量要求及定植密度

表B. 1给出了山东省常用水生植物种苗质量要求及定植密度。

表 B. 1 山东省常用水生植物种苗质量要求及定植密度

生活 方式	植物名称	拉丁名	所属科名	质量要求	定植密度
挺 水 型	水葱	<i>Schoenoplectus tabernaemontani</i> (C.C.Gmel.) Palla	莎草科	15 芽/丛~20 芽/ 丛	8 丛/m ² ~10 丛/m ²
	荷花	<i>Nelumbo mucifera</i> Gaertn.	睡莲科	3 芽/丛~4 节藕/ 株	1 丛/m ² ~2 株/m ²
	芦苇	<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.	禾木科	3 芽/丛~5 芽/丛	5 丛/m ² ~8 丛/m ²
	灯芯草	<i>Juncus effusus</i> L.	灯芯草科	20 芽/丛~25 芽/ 丛	12 丛/m ² ~16 丛/ m ²
	水生美人蕉	<i>Canna glauca</i> L.	美人蕉科	5 芽/丛~7 芽/丛	3 丛/m ² ~6 丛/m ²
	花叶芦竹	<i>Arundo donax</i> L.	禾本科	3 芽/丛~5 芽/丛	12 丛/m ² ~16 丛/ m ²
	香蒲	<i>Typha orientalis</i> C.Presl	香蒲科	不少于 10 芽/丛	3 丛/m ² ~5 丛/m ²
	水菖蒲	<i>Acorus calamus</i> L.	南天星科	不少于 5 芽/丛	9 丛/m ² ~12 丛/m ²
	石菖蒲	<i>Acorus calamus</i> var. <i>angustatus</i> Besser	南天星科	8 芽/丛~10 芽/丛	5 丛/m ² ~6 丛/m ²
	黄花鸢尾（黄菖蒲）	<i>Iris pseudacorus</i> L.	鸢尾科	3 芽/丛~4 芽/丛	9 丛/m ² ~12 丛/m ²
	花菖蒲	<i>Iris ensata</i> Thunb.	鸢尾科	3 芽/丛~5 芽/丛	12 丛/m ² ~15 丛/ m ²
	千屈菜	<i>Lythrum salicaria</i> L.	千屈菜科	不少于 4 杆/株	12 丛/m ² ~16 株/ m ²
	花蔺	<i>Butomus umbellatus</i> L.	花蔺科	3 芽/丛~5 芽/丛	20 丛/m ² ~25 丛/ m ²
	水蓼	<i>Persicaria hydropiper</i> (L.) Delarbre	蓼科	3 芽/丛~4 芽/丛	5 丛/m ² ~8 丛/m ²
	慈姑	<i>Sagittaria sagittifolia</i> L.	泽泻科	2 芽/丛~3 芽/丛	4 丛/m ² ~5 丛/m ²
浮 叶 型	菱	<i>Trapa natans</i> var. <i>bispinosa</i> (Roxb.) Makino	菱科	3 芽以上/丛	3 丛/m ² ~5 丛/m ²
	水鳖	<i>Hydrocharis dubia</i> (Bl.) Backer	水鳖科	—	60 丛/m ² ~80 株/ m ²
	萍蓬草	<i>Nuphar pumila</i> (Timm) DC.	睡莲科	根茎长 8 cm~10 cm	1 丛/m ² ~2 株/m ²
	睡莲	<i>Nymphaea tetragona</i> Georgi	睡莲科	根茎长 5 cm~8 cm	1 丛/m ² ~2 株/m ²
沉 水 型	苦草	<i>Vallisneria natans</i> (Lour.) H.Hara	水鳖科	5 株/丛~10 株/丛	5 丛/m ² ~10 丛/m ²
	黑藻	<i>Hydrilla verticillata</i> (L.f.) Royle	水鳖科	不少于 10 芽/丛	9 丛/m ² ~12 丛/m ²
	伊乐藻	<i>Elodea nuttallii</i> (Planch.) H.St.John	水鳖科	不少于 5 芽/丛	20 丛/m ² ~25 丛/ m ²
	金鱼藻	<i>Ceratophyllum demersum</i> L.	金鱼藻科	5 芽/丛~6 芽/丛	20 丛/m ² ~25 丛/ m ²
	菹草	<i>Potamogeton crispus</i> L.	眼子菜科	5 芽/丛~6 芽/丛	10 丛/m ² ~12 丛/ m ²
	狐尾藻	<i>Myriophyllum verticillatum</i> L.	小二仙草科	5 芽/丛~6 芽/丛	20 丛/m ² ~25 丛/ m ²