

团体标准

T/SEEPLA 04—2023

山地丘陵村镇水土环境协同修复技术指南

The technical guide for coordinate remediation of water-soil pollution in mountain rural area

2023 - 03 - 06 发布

2023 - 03 - 06 实施

四川省生态环境政策法规研究会 发布

目 次

前言	II
引言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 基本原则	2
5 修复技术与要求	2
附录 A（资料性） 植物配置	9
附录 B（资料性） 技术运行参数	10
参考文献	12

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。

本文件由中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所提出。

本文件由四川省生态环境政策法制研究会归口。

本文件起草单位：中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所，四川省环境政策研究与规划院，重庆大学，同济大学，华中农业大学。

本文件主要起草人：周明华、罗彬、王恒、任春坪、宋玲、李蕾、张超杰、黄丽、朱波、汪涛、张璐、刁剑、谷丰、谢义琴。

引 言

我国城市化进程快速推进，围绕城市环境的修复、监测技术和仪器设备研发近年发展较快，在涉及城市环境治理、监测、信息化管理的应用实践方面也取得了重要进展。与此同时，村镇产业经济和社会发展迅猛，伴随污染物排放量显著增大，导致环境承载力已达上限，严重影响村镇人居环境质量。近年国家大力实施“乡村振兴”战略，已按照产业兴旺、生态宜居、乡风文明、治理有效、生活富裕的总要求全面推进，加强村镇环境综合整治和加快村镇水土污染防治与修复则是重中之重。然而，针对村镇社区环境特征，经济、可靠、实用性强的环境监测技术仍十分缺乏，导致对村镇社区污染类型以及污染物多介质迁移过程认识不清，十分缺乏适宜于村镇社区生产生活特征、复合交叉污染环境的精准有效、高效、低成本的水土环境修复方法与技术体系，并开发针对性的修复设备。因此，当前及未来国家乡村振兴战略和绿色宜居村镇建设行动计划亟需村镇社区水土环境污染修复技术体系科技支撑。

我国是世界山地大国，山地面积约占陆地国土面积的 65%。一方面，我国地域广阔，不同地域、不同气候带所处的自然生态环境差异较大，对技术的针对性和适宜性有明显的特殊要求。另一方面，国家对生态环境的要求在不断的严格，环境质量标准在不断的提升，控制指标在不断的扩展。上述需求就要求立足镇社区污染综合性和复合性以及气候带和生活方式带来的区域差异性的特点，以精准施治、精确管理的需求导向，研发经济适应性好、技术针对性强的村镇水土环境修复关键技术与小型设备，满足美丽宜居村镇建设的迫切需求十分迫切。四川省地处长江上游，是我国山地丘陵地貌的集中分布区和代表性区域。由于坡地流水地貌广泛分布，导致水土流失严重且壤中流极度发育，加之农业垦殖强度高和村镇经济发展快，工业及城市污染向农村转移，表现为面源污染为主且与点源污染共存。受区域经济发展水平制约，城乡二元结构突出，农村环境基础设施匮乏，土壤与水体环境恶化、土壤污染与水环境污染相互交叉、二次污染严重，导致农村人居环境形式非常严峻。特别是降雨集中季节，一方面，降雨-地表径流冲刷驱动较高污染负荷进入到下游水体；另一方面，由于壤中流发育引发土壤频繁的干湿交替过程，导致了污染物在土壤-壤中流-地表径流等多介质、多界面的迁移转化过程更加复杂，缺乏适宜该区域特点的水土环境污染协同修复技术体系。因此，针对山地丘陵村镇水土环境污染特点，研发村镇社区及周边污染土壤-壤中流-地表水的协同修复技术和设备是破解山地丘陵村镇人居环境综合整治难题的关键，也可为山地丘陵区乡村振兴战略实施和绿色宜居村镇建设提供科技支撑。

在国家重点研发计划项目“村镇社区环境监测及修复关键技术研发”的支持下，课题承担单位中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所组织课题参与单位同济大学、重庆大学和华中农业大学，联合四川省环境政策研究与规划院，根据《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国水污染防治法》和《中华人民共和国土壤污染防治法》，共同编写了本文件，用于指导山地丘陵村镇社区及周边土壤-壤中流-地表水体水土环境协同修复实践。

山地丘陵村镇水土环境协同修复技术指南

1 范围

本文件规定了长江上游低山丘陵区紫色母岩发育的土壤、壤中流和地表水污染物修复技术的基本原则、修复技术内容、运行与维护等。

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 3838—2002 地表水环境质量标准
- GB 15618—2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）
- GB 16889—2008 生活垃圾填埋场污染控制标准
- HJ 25.6—2019 污染地块地下水修复和风险管控技术导则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

壤中流 interflow

壤中流指沿潜水层或隔水层间的含水层，向河流、湖泊、沼泽、海洋等汇集的水流。

3.2

地表水 surface flow

地表水指沿地表向河流、湖泊、沼泽、海洋等汇集的水流。

3.3

简易垃圾填埋场 simple landfill

简易垃圾填埋场指利用自然地形条件对垃圾进行填埋，未采取防渗、雨污分流、压实、覆盖等工程措施，并未对渗沥液、填埋气体及臭味等进行控制的垃圾填埋场。

3.4

原位修复 in-situ remediation

不移动污染土壤和水体的空间位置，仅在污染的原地点采取一定工程措施的修复方式。

3.5

异位修复 ex-situ remediation

移动污染土壤和水体到邻近地点或其它地点采取工程措施的修复方式，包括原位异地修复和异地异位修复。

3.6

植物修复 phytoremediation

利用绿色植物的生命代谢活动来转移、转换或固定土壤环境中的重金属元素，使其有效态含量减少或生物毒性降低，从而达到净化污染或部分恢复的效果。

3.7

可渗透反应墙 permeable reactive barrier, PRB

以原位渗透处理带作为修复主体的技术，利用特定的反应介质，通过物理化学和生物作用等方法降解去除水体中的有机质、重金属和无机盐等污染物，使污染组分转变为环境可接受的形式，以达到阻隔和修复污染带的目的。

3.8

水土协同修复 cooperative restoration of water and soil

水土协同修复是指通过同一修复过程同时修复地表水、壤中流和土壤中的污染物。

4 基本原则

4.1 因地制宜

整理利用现有的地形优势，包括地势高度差，沟、塘、低洼易涝地等实施土壤-壤中流-地表水协同修复技术。

4.2 生态优先

优先选用生态型的材料，采用景观效果好，净化能力强的本土物种和近自然群落进行净化系统的生物配置。

4.3 节约高效

遵循成本节约的原则，选择设施结构简单，运维成本低，能高效净化污染物的修复技术。

4.4 环境友好

修复技术应避免对环境造成二次污染，修复植物的栽种能够进一步增加修复地绿色覆盖率。

5 修复技术内容

5.1 主要修复技术概述

本文件提出的修复技术主要用于长江上游低山丘陵区小流域内地表水-壤中流-土壤的协同修复，共包括 4 项修复技术，即：山丘村镇社区地表水阶梯型湿地环境修复技术（地表水氮（N）、磷（P）污染物修复）、多介质反应墙山丘村镇社区壤中流修复技术（壤中流氮（N）污染物修复）、简易垃圾填埋场土壤原位修复技术（土壤镉（Cd）、铜（Cu）、铅（Pb）、锌（Zn）等重金属修复）以及多级可渗透反应屏障简易垃圾填埋场壤中流修复技术（壤中流氮（N）污染物修复），如图 1 所示：

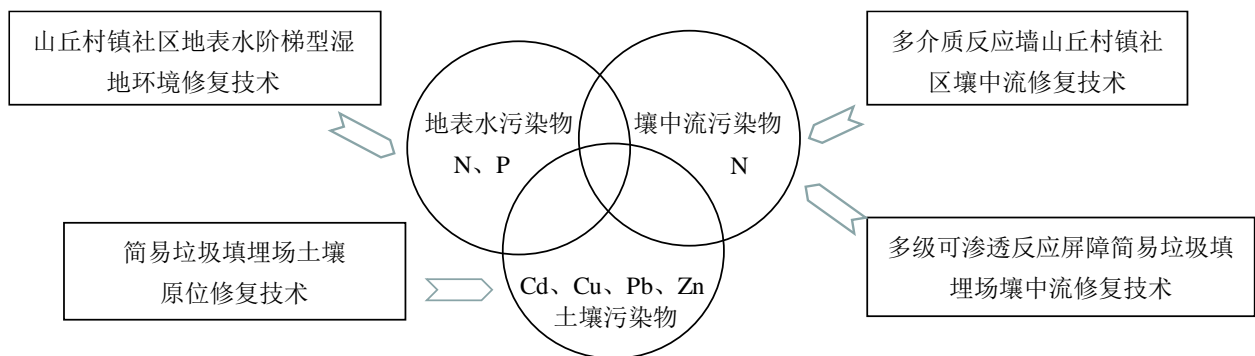


图1 长江上游低山丘陵区小流域内地表水-壤中流-土壤协同修复技术整体示意图

5.2 山丘村镇社区地表水阶梯型湿地环境修复技术内容

5.2.1 技术适用场景

本技术适用于长江上游低山丘陵区具有典型丘陵地貌和地势起伏的区域。

5.2.2 技术应用范围

本技术适用于长江上游低山丘陵区中小规模村镇降水、生活污水等地表水体的净化修复。

5.2.3 组成单元

山丘村镇社区地表水阶梯型湿地环境修复技术主要由级联生物滤池和生态沟渠两部分组成。

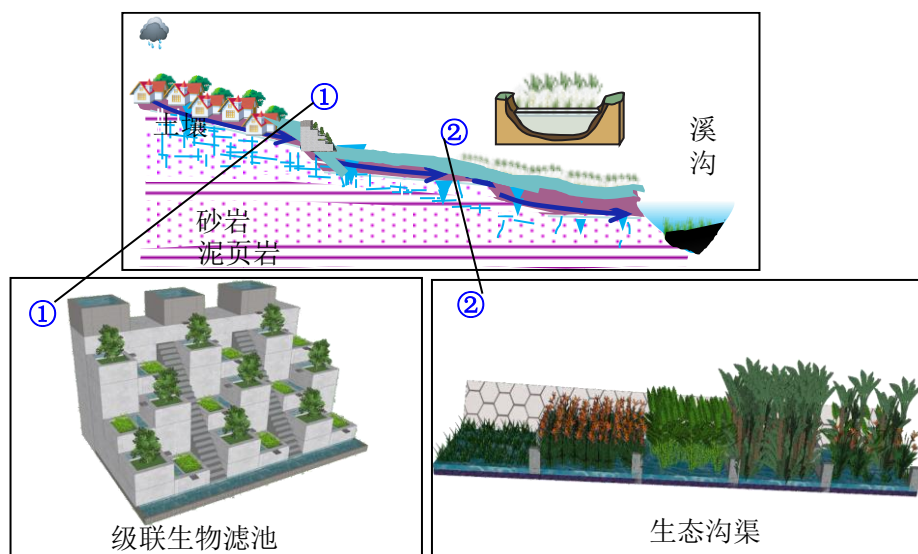


图2 山丘村镇社区地表水阶梯型湿地环境修复技术示意图

5.2.4 级联生物滤池规格

级联生物滤池由测量池、沉淀滤池和反应滤池三部分组成。各池子大小为 $1.5\sim 3\text{ m}\times 1.5\sim 3\text{ m}\times 1.5\sim 3\text{ m}$ 。

5.2.5 生态沟渠规格

生态沟渠沟体断面宜为倒等腰梯形，口宽宜 $0.8\text{ m}\sim 3\text{ m}$ ，深度宜大于 0.6 m 。宜利用原有农田排水沟通过生态化改造构建。

5.2.6 护坡材料

生态沟渠沟壁宜采用土质或具有一定透水性的材料，宜适于植物扎根生长，应保证边坡稳定。沟底宜为土质。

5.2.7 植物配置

反应滤池中宜选取根系发达、喜湿、抗污染、耐修剪且寿命长的植物（e.g. 小叶榕）与高富集氮磷水生植物（e.g. 铜钱草、狐尾藻）搭配种植。

生态沟渠中宜配置耐污能力强、根系发达、生物量大的挺水、沉水和浮水植物，可一种或几种搭配栽种。常水位以上沟坡宜种植草本植物。植物种类参见附录 A。

5.2.8 水位控制

宜在级联生物滤池入水口设置分流池，雨量大时或排水量大时，将分流池出口打开，反之，则将分流池出口关闭。应保障级联生物滤池反应池内的水体高度满足管道溢流标准而在各级池子间流动。

5.2.9 运行与维护

参照 GB 3838-2002 管理水体质量，并运行和定期维护。每一季末收割低矮且生长繁殖较快的铜钱草、狐尾藻等湿地小型水生植物，每年底收割一次大型的挺水湿地植物。收获后的植物可以作为有机肥经处理后再利用。定期清理沉淀单元及滞留池沉降的泥沙及更换秸秆，雨季需打开组合系统中的分流池出口。

5.2.10 技术运行参数

见附录 B。

5.3 多介质反应墙山丘村镇社区壤中流修复技术内容

5.3.1 技术适用场景

本技术的适用场景主要为长江上游低山丘陵区紫色土土壤的壤中流氮（N）污染修复。

5.3.2 技术应用范围

本技术适用于修复具有间歇产流、硝酸盐浓度高、C/N 低等特点的壤中流及其他具有相似特点的水体。

5.3.3 组成单元

漏斗门式可渗透反应墙（FGPRB）构筑物主体主要由隔水墙、导水门和反应介质三部分组成。

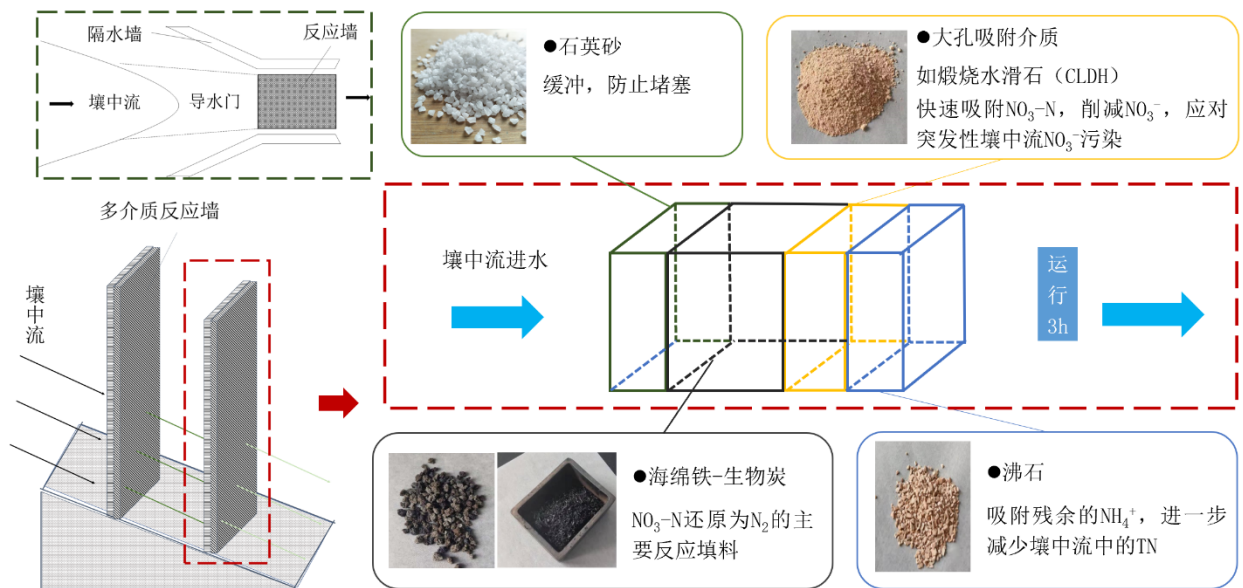


图3 多介质反应墙山丘村镇社区壤中流修复技术示意图

5.3.4 反应墙规格

反应墙体整体的长和高依据场地的土壤层横截面确定。壤中流的平均流速约为 0.0167 mm/s，土壤渗透系数为 0.415~0.972 cm/min，相对应的水力停留时间为 2~4 h。设置墙体的主反应层厚度为 20~50 cm，单级反应墙规格依据场地范围设置。PRB 墙体的渗透性是土壤渗透系数的 2~5 倍，具体参数根据土壤渗透系数和理论水力停留时间确定。

5.3.5 隔水墙规格

5.3.5.1 根据场地水文地质条件和造价成本，隔水墙可采用高密度聚乙烯（HDPE）柔性截水帷幕或水泥帷幕灌浆，截水帷幕底部的建设深度应至少位于弱透水层以下 0.2 m，外侧使用粘性土填实。

5.3.5.2 拆模后应立即在隔水墙间架设支撑，支撑的水平间距一般为 1.00~1.50 m，上下各一道。支撑可采用方木或角钢代替，当遇到不良地质时，适宜进行土体加固或采用深导墙。

5.3.5.3 隔水墙的厚度一般为 30~100 cm，两墙的间距和长度应根据前期污染羽调查、刻画、模拟，尽可能地涵盖污染羽流，为保证隔水墙的隔水效果以及受污染水体汇入反应单元内，隔水墙所呈现的角度原则与壤中流流向垂直。

5.3.6 多介质布设方式

反应墙的结构包括：

- a) 缓冲防堵层，主要材料为粗粒石英砂和细粒石英砂，使用不同级配的石英砂组合实现缓冲和防堵的功能，石英砂粒径与级配根据土壤粒径确定，推荐质量比为 1~3: 1~3；

- b) 主反应层，主要材料为海绵铁和生物炭，二者体积比推荐为 1:3，质量比为 3.9~4；
- c) 一级吸附层，主要材料为大孔吸附介质；
- d) 二级吸附层，主要材料为细粒径沸石和粗粒径沸石，推荐质量比为 1~2: 1~2。

5.3.7 运行与维护

5.3.7.1 PRB 的运行、维护和安全应符合 HJ 25.6—2019 及其他现行有关标准的要求。

5.3.7.2 在 PRB 上下游及 PRB 内布置监测井观测水位深度变化，并周期性地监测相关的水文地质化学参数、流速等。在浓度较高或接近反应墙的位置集中布置监测井。

5.3.7.3 常规监测指标有目标污染物、降解中间产物、ORP（氧化还原电位）、pH 值、Eh、BOD₅、COD 等。运行过程中产生沉淀、阻塞介质、超过吸附容量的填料等需要进行及时的监测与维护管理。

5.3.8 技术运行参数

见附录 B。

5.4 简易垃圾填埋场土壤原位修复技术内容

5.4.1 技术适用场景

本技术的适用场景主要为长江上游丘陵区村镇简易垃圾填埋场周边重金属（土壤镉(Cd)、铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)等）污染土壤的修复。

5.4.2 技术应用范围

本技术应用于长江上游低山丘陵区简易垃圾填埋场周边或农田土壤重金属（Cd、Cu、Pb、Zn 等）复合污染的修复，适宜弱酸性到弱碱性、中轻度重金属污染的土壤。

5.4.3 技术简介

根据污染土壤的状况选择一种富集植物与钝化剂配方，通过植物种植富集部分重金属并活化其形态，盛花期收获后向土壤中施加钝化剂，通过钝化材料和植物联合降低土壤重金属的活性，构建村镇简易垃圾填埋场土壤重金属污染的原位修复技术。

5.4.4 修复植物的选择

富集植物选择龙葵或三叶鬼针草。土壤为中性或弱碱性，优先选择种植三叶鬼针草；土壤为弱酸性，优先选择龙葵作为修复植物。

5.4.5 钝化剂的选择

钝化剂有以下两种配方供选择：

- a) 2% 生物炭和 1% 海泡石混合施用；
- b) 1% 硅肥和 0.2% 磷矿粉混合施用。

5.4.6 钝化剂与植物联合修复技术要点

在污染土壤上撒播种植龙葵（2 kg/ha）或者三叶鬼针草（30 kg/ha），间苗保持种植密度 280~290 株/m²。于盛花期收获植物的地上部（收获后焚烧或萃取再利用）。将钝化剂各自研磨过 40 目筛，按配方混合均匀，撒施入到表层（0~20 cm）土壤中，通过翻耕将钝化剂和土壤混合均匀，维持土壤含水量为 60% 田间持水量。

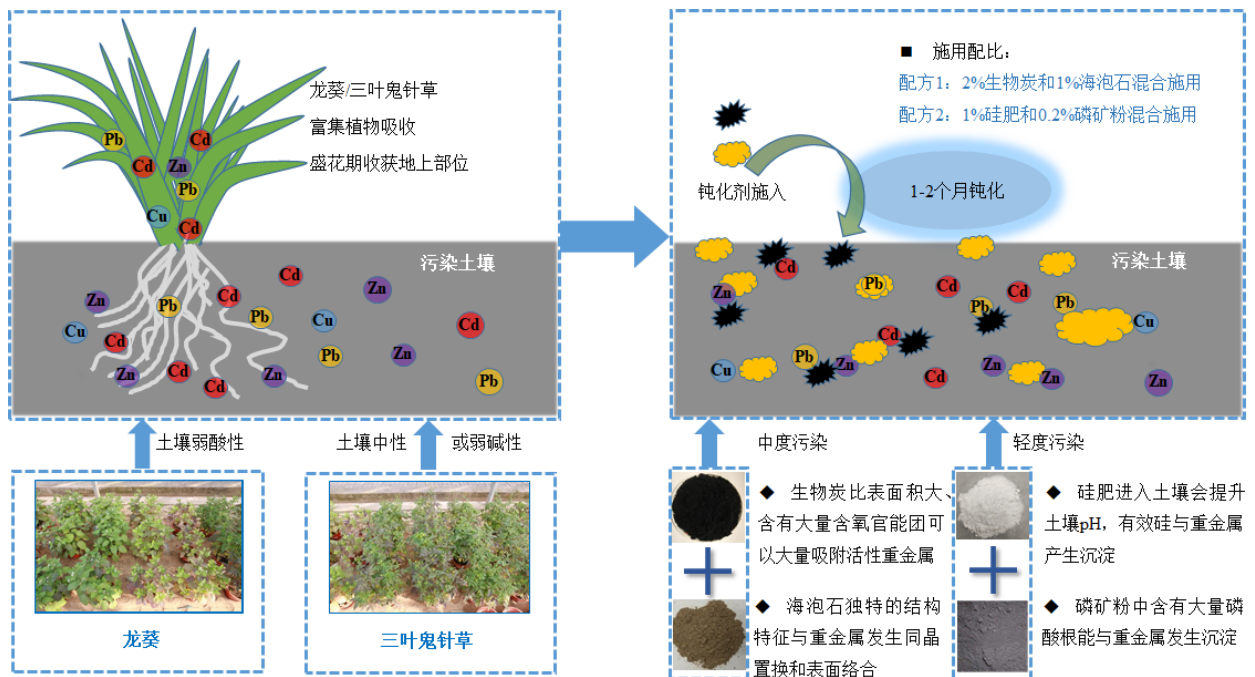


图4 村镇社区简易垃圾填埋场土壤原位修复技术示意图

5.4.7 植物栽培与田间管理

种植修复植物前，土壤中施加基肥，松土。均匀播种后覆土育苗，保持土壤湿润，待修复植物生长至生物量最大时（盛花期）收获植物地上部，将其焚烧或萃取再利用。植物生长过程中实时监测植物生长状况，避免植物发生病害或者虫害。植物收获后加入复配钝化剂，依据 GB 15618-2018 判断土壤重金属（Cd、Cu、Pb、Zn 等）污染状况，若污染程度为风险管制值以下可进行 1~2 个月的钝化修复。修复过程中定期采集土样，按照 GB/T 23739-2009 测定土壤中重金属有效态含量，监测含量是否降到 GB 15618-2018 中风险筛选值以下。若土壤没有达标则可以延长修复时间，期间保持土壤湿润（60% 田间持水量）。

5.5 多级可渗透反应屏障简易垃圾填埋场壤中流原位修复技术内容

5.5.1 技术适用场景

本技术的适用场景主要为山地丘陵地区小型村镇简易垃圾填埋场周边壤中流污染阻隔与修复，尤其适用于规模较小（垃圾堆存量小于 1 万立方米）且与村镇居民生活种植区无明显边界的填埋场。

5.5.2 技术应用范围

本技术适用于拟使用多级可渗透反应墙技术原位修复填埋场周边壤中流的工程场景。适用于该类修复工程的建设与运行管理，可作为工程设计、施工、运行状况监测、效果评估等的参考依据。

5.5.3 组成单元

村镇小型简易垃圾填埋场壤中流原位修复多级可渗透反应墙应包括隔水单元和可渗透反应屏障单元等。多级可渗透反应墙宜按图 5 设计：

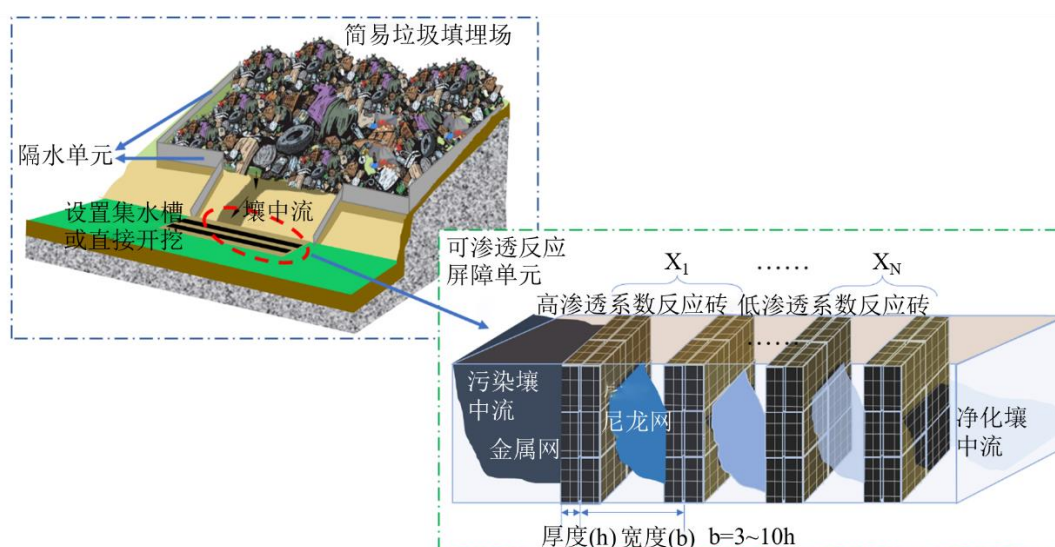


图5 简易垃圾填埋场壤中流原位修复多级可渗透反应墙示意图

5.5.4 多级可渗透反应墙隔水单元设计要点

5.5.4.1 水文地质特征

山地丘陵地区简易垃圾填埋大多位于山坳山谷，隔水屏障布设时通常根据地形地势和水文特征进行布设：

- 隔水屏障的位置应根据地势自高向低进行布设，尽可能地涵盖污染羽，避开不影响汇流的不良地质；
- 隔水屏障的角度应根据壤中流流向进行布设，一般垂直于壤中流的流向进行设置，隔水屏障应当呈现汇流的趋势，能够引导壤中流污染羽汇合至地势较低且较为平坦处，可充分利用现有沟渠水洼以降低成本。

5.5.4.2 隔水材料筛选

隔水材料应该具有良好的隔水性能、机械强度和使用寿命。优先选择渗透系数低、理化性质稳定的材料。推荐采用隔水砖和水泥固化联合使用的方式构筑隔水屏障。

5.5.4.3 隔水屏障施工

隔水屏障施工前应先考察填埋场周边地质情况和居民种植情况，降低对周边环境的影响。隔水屏障布设应该嵌入隔水层下方 0.2~0.5 m，在反应屏障前、水流量大和地形特殊处可以将隔水层厚度增加到 0.3~1.0 m，同时可在原有埋深的基础上增加 0.3~0.5 m，确保隔水屏障的稳定性，避免发生绕流。

5.5.5 多级可渗透反应墙可渗透反应屏障设计要点

5.5.5.1 反应介质的选择

反应介质应该具有吸附高效性、导水适宜性、安全稳定性和经济可行性。简易填埋场主要为碳、氮污染，推荐吸附性填料、固定化填料和孔隙支撑填料联合使用。吸附性填料推荐使用活性炭、陶粒、沸石和膨胀珍珠岩等吸附能力较强的填料；固定化填料推荐使用水泥等价格较低的填料；孔隙支撑填料推荐使用石英砂等渗透系数变化明显的填料。

5.5.5.2 屏障渗透系数筛选

屏障渗透系数应高于修复场地含水层的渗透系数。建议采用高渗透系数和低渗透系数两种砖体布设的方式，有利于延长屏障使用寿命。高渗透系数反应砖的渗透系数大于含水层渗透系数的 10 倍以上，低渗透系数反应砖的渗透系数大于含水层渗透系数的 4 倍以上。高低渗透系数屏障推荐的介质配比范围为：活性炭：陶粒：沸石：膨胀珍珠岩：水泥：石英砂= 4~6：2~4：3~5：0~4：8~10：0~1；低

渗透系数屏障推荐的介质配比范围为：活性炭：陶粒：沸石：膨胀珍珠岩：水泥：石英砂= 4~6：2~4：3~5：0~4：8~10：1~2.7。

5.5.5.3 屏障规格确定

村镇简易垃圾填埋场通常位于山坳山谷，且常与周边居民种植区域无明显边界，宜选择小规格尺寸（如 300~400 mm×200~400 mm×30~60 mm）的反应屏障单块砖体，利于屏障的布设和施工，同时也可降低对周边居民农业活动的影响。

5.5.5.4 布设间距和级数筛选

通过槽实验确定屏障布设级数和间距。宜采用多组多级布设，每组 4 级（高渗透系数-高渗透系数-低渗透系数-低渗透系数）。当壤中流污染物浓度较低，单组出水水质符合 GB 16889-2008 要求时，可一组单独使用；当壤中流污染物浓度较高，单组出水水质无法满足 GB 16889-2008 要求时，适当增加组数至出水满足 GB 16889-2008 要求。渗透系数相同的两块反应砖紧贴布置，高低渗透系数反应砖之间的间距/厚度比值宜为 3~10。

5.5.5.5 布设方式

根据屏障厚度、施工深度等，选择尺寸匹配的金属网作为骨架材料，将反应屏障置于金属网中；同时金属网外宜布设尼龙网等隔离材料，减少土壤对屏障造成堵塞；反应屏障、金属骨架和隔离材料共同构成一级完整的可渗透反应屏障系统，作为修复和后期维护更换的基本单元。

5.5.6 运行与维护

多级可渗透反应屏障简易垃圾填埋场壤中流原位修复的运行与维护主要包括以下几方面：

- a) 运行期间宜根据出水水质设置不同组数的反应屏障串联使用保障修复效果，设置组数通过每组出水水质是否符合 GB 16889-2008 确定，为保证出水水质达标，当出水水质处于 GB 16889-2008 边缘时，可增加一组以保障出水达标；
- b) 运行期间应当在屏障上下游及每级反应屏障间设置监测井，需对反应屏障性能进行监测，判定每层反应屏障性能是否可以达到修复效果；
- c) 当下游出水水质不符合 GB 16889-2008 或单级可渗透反应屏障效果急剧下降时，应当将效果较差的屏障整级取出，并将备用的屏障布设重新布设至相同位置，更换过程中应该避免对周边屏障造成影响；
- d) 反应屏障更换应该尽可能选择旱季、不产流或产流少的时间段，且宜于多日晴天后的时间段进行更换。

附 录 A
(资料性)
植物配置

表A.1 山丘村镇社区地表水阶梯型湿地环境修复技术植物配置一览表

植物类型		植物名称
水生植物	挺水植物	芦苇、香蒲、灯芯草、菖蒲、风车草、美人蕉、再力花、水葱、水芹、灯芯草、茭白、水芹菜、荷花、梭草鱼、泽泻、黑三棱、千屈菜、菱草、慈菇、蔗草等
	浮水植物	绿狐尾藻、大漂、水蕹菜、紫萍、凤眼莲、浮萍、睡莲等
	沉水植物	狐尾藻、伊乐藻、苦草、菹草、茨藻、石龙尾、光叶眼子菜、竹叶眼子菜、水生马齿苋、金鱼藻、黑藻等
陆生植物	草本植物	龙须草、狗牙根、黄花菜、黑麦草、三叶草、野菊花、紫苏、万寿菊、艾蒿、格桑花、马莲、小冠花、苕子、二月兰、红豆草、绛三叶、田青等
	灌木植物	金银花、金叶连翘、沙棘、榛子、胡枝子、紫穗槐、乌药、桑树、水马桑、酸木瓜、杜鹃、木槿、连翘等
	乔木	杨树、柳树、沼柳、国槐、柏树、松树、大叶女贞、香樟、化香、海棠、水杉、樱花等

附 录 B
(资料性)
技术运行参数

B.1 山丘村镇社区地表水阶梯型湿地环境修复技术运行参数

水力负荷宜小于 $0.2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ d})$ ，总氮面积负荷宜不大于 $8.0 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$ ，总磷面积负荷宜不大于 $1.0 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$ 。水力负荷和污染物面积负荷计算见公式(1)和公式(2)：

$$q_{hs} = Q/A \dots\dots\dots (1)$$

式中：

q_{hs} ——水力负荷， $\text{m}^3/(\text{m}^2 \text{ d})$ ；
 Q ——设计进水流量， m^3/d ；
 A ——净化设施面积， m^2 。

$$N_A = Q \times (S_0 - S_1)/A \dots\dots\dots (2)$$

式中：

N_A ——污染物面积负荷，以总氮、总磷等计， $\text{g}/(\text{m}^2 \text{ d})$ ；
 Q ——设计进水流量， m^3/d ；
 S_0 ——进水污染物浓度， g/m^3 或 mg/L ；
 S_1 ——出水污染物浓度， g/m^3 或 mg/L ；
 A ——净化设施面积， m^2 。

B.2 多介质反应墙山丘村镇社区壤中流修复技术运行参数

PRB 主要的设计参数包括 PRB 安装位置的选择、结构的选择、埋深、规模、水力停留时间、反应墙的渗透系数、活性材料的选择及其配比。在 PRB 安装前，获取含水层性质，并借助达西定律估算壤中流流速和方向，壤中流平均速度计算见公式(3)：

$$v_x = \frac{K}{n_e} \frac{dH}{dl} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

v_x ——平均壤中流流速， m/s ；
 K ——含水层的渗透系数；
 dH/dl ——水力梯度，其中 dH 为等水位线两点的水位高程差， dl 为两点的水平距离；
 n_e ——有效孔隙度。

反应单元的厚度主要由污染物的停留时间和壤中流流速确定，见公式(4)：

$$L = V \cdot t_w \dots\dots\dots (4)$$

式中：

L ——PRB 活性填料区厚度， m ；
 V ——壤中流流速， m/s ；
 t_w ——停留时间， s 。

在长期运行中，反应介质的孔隙率由逐渐减小的趋势，因此，在设计中一般采用最大流速。场地中 PRB 反应单元内的容积密度通常会低于实验室柱实验模拟时得出的容积密度。

设计 PRB 活性填料区需要的水力性质包括：渗透系数 (K)、孔隙度 (n) 和密度 (B) 等。利用柱实验和达西定律可估算出 K 的值，见公式(5)：

$$K = \frac{V \cdot L}{A \cdot t \cdot H} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

V ——时间 t (s) 内流过介质区域的体积， m^3 ；
 L ——渗流途径， m ；

A ——横截面积, m^2 ;

H ——水头损失, m。

污染物羽流在反应墙的停留时间(t)主要由污染物的半存留期和污染羽流经反应墙初始浓度决定。现场的壤中流污染物浓度分布不均匀,基于工程安全性考虑,设计按照污染物的场地内最大的浓度值计算。计算见公式(6):

$$t = Nt_{0.5}\mu_1\mu_2R \dots\dots\dots (6)$$

式中:

N ——半存留期的次数;

$t_{0.5}$ ——半存留期, $t_{0.5} = \ln 2/k$ (k 为一次反应速率);

μ_1 ——温度校正因子,可取 2.0~2.5,正常温度为 20~25°C;

μ_2 ——密度校正因子,可取 1.5~2.0;

R ——安全系数,可取 2.0~3.0。

参 考 文 献

- [1] GB/T 23739—2009 土壤质量 有效态铅和镉的测定 原子吸收法
 - [2] GB 50869—2013 生活垃圾卫生填埋处理技术规范
 - [3] HJ 25.4—2019 建设用地土壤修复技术导则
 - [4] HJ 25.5—2018 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则（试行）
 - [5] HJ 564—2010 生活垃圾填埋场渗滤液处理工程技术规范
 - [6] HJ 2015—2012 水污染治理工程技术导则
 - [7] JB/T 8939—1999 水污染防治设备安全技术规范
 - [8] NY/T 395—2012 农田土壤环境质量监测技术规范
 - [9] DB 11/T 783—2011 污染场地修复验收技术规范
 - [10] DB 43/T 1125—2016 重金属污染场地土壤修复标准
 - [11] T/GIA—2021 地下水污染管控或修复技术指南 漏斗门式可渗透反应墙（FGPRB）
-