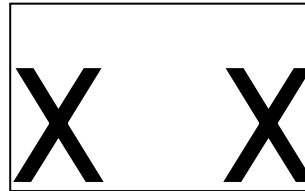


ICS XXXXXX

CCS:XXX

备案号: XXXX-XXXX



上海市土木工程学会标准

XX/T XXXX-XXXX

代替 XX/T XXXX-XXX

河网地区受污染村镇地表水-土壤-地下水 一体化修复技术指南

Technical guide for integrated remediation of surface water-soil-
groundwater in polluted rural river network areas

2024-03-14 发布

2024-04-01 实施

上海市土木工程学会发布

上海市土木工程学会标准

河网地区受污染村镇地表水-土壤-地下水 一体化修复技术指南

Technical guide for integrated remediation of surface water-soil-
groundwater in polluted rural river network areas

主编单位：同济大学

批准部门：上海市土木工程学会

实施日期：2024年04月01日

2024 上海市

目次

前 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 地表水污染单项修复技术	2
4.1 生态补水技术	2
4.2 人工曝气技术	2
4.3 化学修复技术	2
4.4 人工湿地技术	3
4.5 生态浮床技术	3
5 地下水污染单项修复技术	4
5.1 多相抽提技术	4
5.2 异位生物修复技术	4
5.3 可渗透反应墙修复技术	5
5.4 原位空气注入强化生物修复技术	6
5.5 原位化学氧化/还原技术	6
6 土壤污染单项修复技术	7
6.1 植物-微生物联合修复技术	7
6.2 异位土壤淋洗技术	7
6.3 固化稳定化技术	8
6.4 异位热处理法	8
6.5 阴燃法	9
7 水土污染一体化修复程序与技术选择	9
7.1 水土污染一体化修复工作程序	9
7.2 水土污染一体化修复技术选择基本规定	11
附录 A (资料性) 水土污染一体化技术实施实例	13
附录 B (资料性) 水土污染一体化修复技术原理及特点	14
B.1 污染物迁移转化的基本途径	14
B.2 污染物在河流-地下水系统中运移的影响因素	14
B.3 污染物在河流-地下水系统中的行为特征	15
附录 C (资料性) 地表水、地下水和土壤修复技术比选	17
C.1 地表水修复技术比选可参考表 C.1	17
C.2 地下水修复技术比选可参考表 C.2	18
C.3 土壤修复技术比选可参考表 C.3	19

前 言

本文件按照《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》GB/T 1.1-2020 起草。
本文件由上海市土木工程学会（地址：上海市黄浦区新闻路 249 号。邮编：200003。E-mail：
sscesh@vip.163.com）提出。

本文件由上海市土木工程学会归口。

起草单位：同济大学、中南大学、东华大学、上海市地矿工程勘察院、上海环钻环保科技股份有限公司、上海同瑞环保科技有限公司

主要起草人：王亚宜、薛罡、马卫武、赵江、汪涵

参与起草人：钱雅洁、吴敏、苏长青、高品、陈红、李响、张艾、王天蓓、俞俊武、周长凯

主要审查人：李怀正、张怀宇、黄瑾、唐利、杨雪

全国团体标准信息平台

河网地区受污染村镇地表水-土壤-地下水一体化修复技术指南

1 范围

本文件规定了河网地区村镇地表水-土壤-地下水污染一体化修复技术的术语和定义、地表水污染单项修复技术、地下水污染单项修复技术、土壤污染单项修复技术以及河网地区村镇水土污染一体化修复技术工作程序。本文件适用于河网地区受污染村镇地表水-土壤-地下水一体化修复。

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 3838	地表水环境质量标准
GB 36600	土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准（试行）
GB/T 14848	地下水质量标准
GB 15618	土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准（试行）
HJ 25.4	建设用地土壤修复技术导则
HJ/T 166	土壤环境监测技术规范
HJ 574	农村生活污染控制技术规范
HJ 964	环境影响评价技术导则 土壤环境（试行）
HJ 2005	人工湿地污水处理工程技术规范
RISN-TG006	人工湿地污水处理技术导则

3 术语和定义

3.1

河网地区村镇 rural plain river network areas

长三角、珠三角、松辽平原等河流密度较大，形成密集的河网，地表水和地下水交换活跃的平原地区村镇。

3.2

一体化修复 integrated remediation and restoration

制定多目标、多功能协同的系统修复方案而实现对受污染的地表水、地下水、土壤的联合协同修复。

3.3

生物修复技术 biological remediation technology

利用微生物、植物及动物等单一或共同的作用，对水中污染物进行吸收、转化及降解，使污染水体得到净化的技术。

3.4

异位修复 ex-situ remediation

将受到污染的地表水、地下水、土壤从发生污染的原有位置，通过抽出、挖掘等方式转移后进行治理修复的技术。

3.5

原位修复 in-situ remediation

不移动受到污染的地表水、地下水、土壤，直接在场地发生污染的位置对其进行原地修复或处理的修复技术。

3.6

固定式曝气 fixed aerator

在污染河段修建固定的增氧曝气构筑物，集中对河道水体进行充氧。

3.7

移动式曝气 movable aerator

在污染河段设置漂浮在河道的移动充氧平台，对河道进行供氧。

3.8

污染物迁移 migration of pollutants

污染物在环境中所发生的空间位移及其所引起的富集、分散和消失的过程。

3.9

污染物转化 transformation of pollutants

污染物在环境中通过物理、化学和生物的作用改变存在形态或转变为另一类物质的过程。

4 地表水污染单项修复技术

4.1 生态补水技术

4.1.1 生态补水应满足河流生态基流的要求。

4.1.2 生态补水技术能提高污染水体水力条件、复氧能力，改善生态环境，提高自净能力，在截污完成的情况下，加快污染河道的水质改善。

4.1.3 生态补水技术可用于水体污染治理辅助手段使用。

4.1.4 当水源稳定性差、补水费用高时不宜采用生态补水。

4.1.5 生态补水的水源水质宜优于 GB 3838 规定的Ⅳ类水体环境质量要求。

4.1.6 生态补水线路宜做到线路顺直，缩短管线的长度，避开天然或人工障碍物，减少施工难度。

4.1.7 生态补水应比较各种管材的材质、使用条件，采用符合要求、经济合理、安全可靠的管材。

4.2 人工曝气技术

4.2.1 人工曝气技术是通过机械等曝气方式，以提高水体溶解氧含量，增强水中生物特别是好氧微生物的代谢活性，加快水体中污染物的降解速率，达到改善水质的目的。

4.2.2 人工曝气技术适用于流动性较小的河流。

4.2.3 应综合河道水位、功能、实施条件等要素选择固定式曝气或移动式曝气。

4.2.4 根据受污染水体水质选择曝气强度和连续或间歇曝气方式，以满足修复目标规定的水体溶解氧需求。

4.2.5 应合理布置曝气供风管路，布气支管间距不宜小于 0.5 m。

4.3 化学修复技术

4.3.1 化学修复技术是通过添加化学药剂与污染物发生反应的方式，使污染物发生形态转化，实现水质快速净化。

4.3.2 化学修复技术适用于黑臭水体应急治理，或作为生态修复技术的特定补充技术。

4.3.3 化学修复技术应针对水体污染特征，选择性投加生物安全性和生态安全性较好的化学物质。

4.3.4 投加人工化学物质应控制化学物质浓度，应根据小试实验确定最佳配比药量，常见化学物质投加范围可参考为：

- a) 混凝药剂聚合氯化铝的投加量宜为 (10~20) g/m³ 水；
- b) 混凝药剂聚合氯化铁投加量宜为 (30~50) g/m³ 水；
- c) 氧化药剂过氧化钙的投加量宜为 (10~30) g/m³ 水；
- d) 除藻药剂硫酸铜的投加量宜 (1~10) g/m³ 水。

4.3.5 药剂宜采用溶液投加的方式，根据药剂要求配置投加。

4.4 人工湿地技术

4.4.1 人工湿地技术是通过基质微生物分解、吸附和植物吸收等综合作用实现水质净化的方式。

4.4.2 人工湿地技术适用于土地资源充裕、能满足人工维护要求的地区，适宜土壤质地可参考 HJ 574。

4.4.3 应根据进水污染物负荷、处理程度、可用地面积、景观需求和运行维护等因素选择表面流人工湿地、水平潜流人工湿地和垂直潜流人工湿地等类型，并宜符合下列规定：

- a) 进水污染物负荷低、可用地面积充足和对景观要求高的地表水水处理可选择表面流人工湿地；
- b) 进水污染物负荷高、可用地面积较少的地表水水处理项目可选择水平潜流人工湿地和垂直流人工湿地，且要求人工湿地水面应低于基质层顶部，并采取适当预处理措施，避免基质堵塞；
- c) 可采用不同形式人工湿地进行组合。

4.4.4 应优化湿地植物的配置。湿地植物优先选用本土挺水、浮水、沉水植物。

4.4.5 表面流人工湿地水力负荷宜小于 0.1 m³/(m²·d)，水平潜流和垂直流湿地水力负荷可采取约 0.1 m³/(m²·d)~0.5 m³/(m²·d)，应根据实际工程规模与原水水质适当选择水力负荷上限。技术参数可参考 HJ 2005、RISN-TG006。

4.4.6 湿地除磷填料可根据水质要求选用砾石、石英砂、陶粒等除磷基质，或植物秸秆等多孔生物介质。

4.5 生态浮床技术

4.5.1 生态浮床技术是以水生植物为主体，运用无土栽培技术原理，以高分子材料等为载体和基质，通过应用物种间共生关系，充分利用水体空间生态位和营养生态位的方式，实现水体中污染负荷削减。

4.5.2 生态浮床技术适用于土地资源较为紧张的情况，能用来修复小型河流、湖泊。

4.5.3 对水体治理要求成效快，季节变化性大，对处理效果要求高的，可采用组合技术。

4.5.4 生态浮床技术宜应用新型材料改进浮床结构，提升机械强度。

4.5.5 生态浮床技术可悬挂新型生物膜填料如铁碳填料，提升浮床系统中微生物及水生动物的协同净化机制，扩大其在黑臭水体及其他特殊废水中的应用能力，满足在实际水体治理中的需求。

4.5.6 生态浮床技术应用时应增加与周边水体的交换控制措施。

4.5.7 生态浮床技术的技术指标与技术细则可参考表 1。

表 1 生态浮床技术指标与技术细则

技术指标	技术细则
浮床植物	植物种类宜选用耐污能力强，根系发达的当地水生植物。
浮床床体	浮床床体可由浮床单体拼接而成，拼接个数应由具体河道或湖泊水面灵活设定。浮床单体材质应选择惰性材料外形可为方形，单边尺寸可为（300~400）mm，厚度可为（50~70）mm。
种植篮	种植篮孔直径为（150~200）mm，每个浮床单体上可仅设一个。
支撑填料	种植篮中支撑填料可选用沸石、砾石、火山岩、炉渣等。每个种植篮中可仅装一种填料或者多种填料混合，提供植物生长载体，装填厚度可占种植篮高的 1/2~3/4。
生物膜填料	可选用已商品化的大比表面积产品，也可选用新型填料如铁碳填料（铁刨花、海绵铁、活性炭、焦炭等），填料数量根据实际条件灵活配置。

5 地下水污染单项修复技术

5.1 多相抽提技术

5.1.1 多相抽提技术是通过真空等提取手段，抽取地下污染区域的土壤气体、地下水和浮油层至地面进行相分离及处理，以控制和修复土壤与地下水中有有机污染物。

5.1.2 适用于渗透性较好、地下水水位变动较小的场地中易挥发、易流动的非水相液体，如挥发性有机物、总石油烃类物质等污染物的去除。不宜用于渗透性差或地下水水位变动较大的场地。

5.1.3 多相抽提技术关键参数与适用范围可参考表 2。

表 2 多相抽提技术关键参数与适用范围

项目	关键参数	适用范围
场地参数	渗透系数	$(10^{-5} \sim 10^{-3})$ cm/s
	渗透率	(0.01~1) 达西
	导水系数	小于 0.72 cm ² /s
	空气渗透性	小于 10^{-8} cm/s
	地质环境	砂土至黏土
	土壤异质性	均质
场地参数	污染区域	包气带、饱和带、毛细管带
	包气带含水率	较低
	地下水埋深	大于 3 英寸
	土壤含水率	(40~60)% 饱和持水量
	含氧量	大于 2%
污染物性质	饱和蒸汽压	(0.5~1) mm Hg
	沸点	小于 (250~300) °C
	亨利常数 (20°C)	大于 0.01
	土-水分配系数	适中
	轻质非水相液体厚度	大于 15 cm
	LNAPL (轻质非水相液体) 黏度	小于 10 cp

5.2 异位生物修复技术

5.2.1 异位生物修复技术是将地下水中的污染物抽取出来，在地面上利用生物反应过程去除的方式。

5.2.2 异位生物修复技术适用于可生物降解的半挥发性有机物、石油烃类物质、可生物降解的部分农药类物质，以及其他可生物降解污染物等。

5.2.3 异位生物修复技术指标与适用范围可参考表 3。

表 3 异位生物修复技术指标与适用范围

技术指标	适用范围
生物种类及数量	对于缺少相关菌群或相关菌群数量少的土壤，应采用生物强化的方法引入或增加菌群的数量。
污染物种类	可生物降解的污染物。
污染物浓度	宜逐步驯化微生物以适应较高污染浓度。
pH 值	宜为 6~9。
营养物浓度	微生物生长所需营养比 C : N : P = 100 : 10 : 1~100 : 10 : 0.5，根据处理污染物不同适当补充氮和磷。
供氧情况	生物修复技术应保持好氧化过程，需要提供满足微生物作用的充氧量。
温度	应根据实际选用的生物修复技术进行温度选择。

5.3 可渗透反应墙修复技术

5.3.1 可渗透反应墙技术（permeable reactive barrier, PRB）是在受污染地下水流经的途径上建造由反应介质组成的反应墙，通过反应介质的吸附、沉淀、氧化还原和生物降解等方式去除地下水中的污染物。

5.3.2 PRB 宜用于处理某些碳氢化合物如苯、甲苯、乙苯、二甲苯、石油烃、氯代脂肪烃、氯代芳香烃等，以及无机物如金属、非金属、硝酸盐、硫酸盐等。

5.3.3 PRB 不适用于承压含水层以及含水层深度超过 10 m 的非承压含水层。

5.3.4 PRB 技术指标与技术细则可参考表 4。

表 4 PRB 技术指标与技术细则

技术指标	技术细则
安装位置	<ul style="list-style-type: none"> a) 通过土壤和地下水体取样、试验室测试研究、现有数据整理，圈定污染区域，其范围应大于污染物羽流。 b) 通过现场水文地质勘察，绘出地下水流场，了解地下水大体流向。 c) 根据地下水动力学，探讨污染物的迁移扩散方式和范围，在污染物可能扩散圈的前端划定可渗透反应墙的安装位置。 d) 在初定位置的可能范围进行地面调查。
结构	<ul style="list-style-type: none"> a) 对于比较深的承压含水层，采用灌注处理式可渗透反应墙比较合适。 b) 对于浅层潜水，可采用的可渗透反应墙形式多种多样。 c) 使用高成本的反应材料时，可采用材料消耗较少的漏斗-导水门式结构。使用便宜的反应原料时，宜选用连续式渗透反应墙。
规模	<ul style="list-style-type: none"> a) PRB 的高度一般底端嵌入不透水层至少 0.60 m，PRB 的顶端需高于地下水最高水位。 b) 通过耦合地下水数值模型、地块概念模型和实验室测试数据，确定 PRB 的宽度、厚度和深度。
水力停留时间	根据污染物的反应速率常数计算停留时间，如果存在多种污染物，停留时间由反应半衰期最长的污染物确定。
走向	<ul style="list-style-type: none"> a) 根据长期的地下水水文资料，确定地下水流向随季节变化的规律。 b) 建立考虑时间的地下水动力学模型，根据近乎垂直原理，确定反应墙的走向。

表 4 （第 2 页/共 2 页）

技术指标	技术细则
渗透系数	反应墙的渗透系数宜为含水层渗透系数的 2 倍以上，漏斗-导水门结构宜为含水层渗透系数的 10 倍以上。
活性材料的选择	反应介质的选择应考虑稳定性、环境友好性、水力性能、反应速率、经济性和粒度均匀性等因素。PRB 处理污染地下水使用的反应材料可选择零价铁、生物炭、活性炭、沸石、石灰石、离子交换树脂、铁的氧化物和氢氧化物、磷酸盐以及有机材料（城市堆肥物料、木屑）等。

5.4 原位空气注入强化生物修复技术

5.4.1 原位空气注入强化生物修复技术是通过将压缩空气注入地下水饱和带，提高污染场地内氧气浓度，利用挥发和好氧生物降解等过程将挥发及半挥发性有机物去除。

5.4.2 原位空气注入强化生物修复技术适用于可生物降解的挥发性/半挥发性有机污染物、石油烃类物质、可生物降解的部分农药类物质等，不适用于重金属、难降解有机物污染修复，不宜用于粘土等渗透系数较小的土壤地块的修复。

5.4.3 原位空气注入强化生物修复技术技术指标及污染物特性可参考表 5。

表 5 原位空气注入强化生物修复技术土壤性质及污染物特性

指标类型	技术指标	适用范围
土壤性质	气体渗透率	宜大于 0.1 达西。
	含水率	宜为 (15~20) %。
	pH	宜为 5~9。
	温度	宜为 (20~ 40) °C，不应超过 40°C。
土壤性质	营养物的含量	C: N: P 的比例应为 100: (5~10) : 1，以满足好氧微生物的生长繁殖以及污染物的降解，为缓慢释放形式时，效果最佳。
	氧气/电子受体	除了用空气提供氧气外，还可采用 H ₂ O ₂ 、Fe ³⁺ 、NO ₃ ⁻ 或纯氧作为电子受体。
污染物特性	可生物降解性	生物降解性与污染物的分子结构有关，通常结构越简单，分子量越小的组分越容易被降解。
	浓度	污染物浓度水平应适中。
	挥发性	挥发性强的污染物还可采用多相抽提技术。

5.5 原位化学氧化/还原技术

5.5.1 原位化学氧化/还原技术是通过引入氧化剂或还原剂，强化添加剂与污染物发生氧化或还原作用的方式，将污染物转化为无害或低毒性的物质。

5.5.2 原位化学氧化/还原技术适用于各类受污染土壤和地下水：

a) 化学氧化技术能处理石油烃、苯、甲苯、乙苯、二甲苯、酚类、甲基叔丁基醚、含氯有机溶剂、多环芳烃、农药等大部分有机物；

b) 化学还原技术能处理重金属类和氯代有机物等。

5.5.3 原位化学氧化/还原技术的应用应考虑地下水中腐殖酸、还原性金属、土壤渗透性、pH 值以及化学氧化/还原过程可能发生的产热、产气等的影响。

5.5.4 原位化学氧化/还原技术关键指标与技术细则可参考表 6。

表 6 原位化学氧化/还原技术关键指标与技术细则

技术指标	技术细则
药剂投加量	药剂用量由污染物药剂消耗量、土壤药剂消耗量、还原性金属的药剂消耗量等因素决定。投加时应控制药剂注入的速率，避免发生过热现象，防止污染物挥发。

表6（第2页/共2页）

技术指标	技术细则
污染物类型和质量	不同药剂适用的污染物类型不同。如存在非水相液体（NAPL），反应会限制在氧化剂溶液/非水相液体（NAPL）界面处。如LNAPL（轻质非水相液体）层过厚，宜利用其它技术进行清除。
土壤均一性	非均质土壤中易形成快速通道，无法使药剂接触全部处理区域，均质土壤更有利于药剂的均匀分布。
土壤渗透性	高渗透性土壤宜使用原位化学氧化/还原技术。低渗透性土壤宜采用长效药剂（如高锰酸盐、过硫酸盐），减轻污染物浓度反弹。
地下水水位	该技术通常需要一定的压力以进行药剂注入，若地下水水位过低，则系统很难达到所需的压力。但当地面有封盖时，即使地下水水位较低也可以进行药剂投加。
pH 和缓冲容量	pH 和缓冲容量会影响药剂的活性，药剂在适宜的 pH 条件下才能发挥最佳的化学反应效果，但应考虑土壤中金属溶出的影响。
地下基础设施	应规避地下基础设施（如电缆、管道等）。

6 土壤污染单项修复技术

6.1 植物-微生物联合修复技术

6.1.1 植物-微生物联合修复技术是在进行土壤污染修复过程中，同时利用两种及以上的植物和微生物去除土壤污染物的方式。

6.1.2 植物-微生物联合修复技术适用于大部分河网地区村镇地区的有机物、重金属污染场地。具有原位修复条件的地块，土壤的污染物浓度不超过 GB36600、GB15618 规定限值的 2 倍的，宜采用植物-微生物联合修复技术进行处理。

6.1.3 技术应用时应跟踪植物、微生物生长情况并及时补充营养物质，并按照植株生长量收割植物，一般不少于 2 次/年。

6.1.4 化学性质不稳定的污染物，如可交换态六价铬、碱性环境下的三价砷、三价铋等，宜进行预处理后再采用植物-微生物联合修复技术进行处理。

6.1.5 植物-微生物联合修复技术指标与适用范围可参考表 7。

表7 植物-微生物联合修复技术指标与适用范围

指标类型	技术指标	适用范围
土壤理化性质	气体渗透率	应大于 0.1 达西。
	含水率	宜为（15~20）%。
	pH	宜为 7.0 左右。
	温度	宜为（25~35）℃，不超过 40℃。
	营养物	应当有适宜浓度的碳源、氮源和无机盐等营养物质，并对缺乏的营养物质进行补充。
污染物特性	浓度	不宜超过 GB36600、GB15618 规定限值的 2 倍。
	污染物类型	污染物应当较为稳定，易反应、易降解的游离性污染物应当先行通过稳定化处理后再进行植物-微生物联合修复。

6.2 异位土壤淋洗技术

6.2.1 异位土壤淋洗技术是将受污染的土壤从发生污染的原位置挖掘或抽提出来，搬运或转移到其他场

所，再将可促进土壤污染物溶解或迁移的化学溶剂注入受污染土壤中的方式，使污染物从土壤中溶解、分离出来进行处理。

6.2.2 异位土壤淋洗技术适用于难以进行原位修复的村镇地区地块，以及面积小、污染重，且土壤水力传导系数大于 10 cm/s 的多空隙、易渗透的土壤（如沙土、砂砾土壤）。

6.2.3 异位土壤淋洗技术适用于处理重金属及半挥发性、难挥发性有机污染物，不宜用于土壤细粒（粘/粉粒）含量高于 25% 的土壤。

6.2.4 淋滤液中的上清液可回用于淋洗土壤，洗脱出来的重金属应进行资源化回收或安全处置。

6.2.5 异位土壤淋洗技术指标与控制要则可参考表 8。

表 8 异位土壤淋洗技术指标与控制要则

技术指标	控制要则
土质	适用于质地松散、渗透率高的土壤、沙砾等，对于黏土需要进行干燥打散、掺混等预处理，且处理时间长，应当慎用。
处理规模	适用于污染重、面积小的土壤治理。针对污染较重、处理量较小时宜采用柱淋洗技术，处理量较大时宜采用堆积淋洗技术。
温度	淋洗温度范围宜在（20~35）℃，最高温度不宜超过 40℃，在堆积淋洗的过程中应对堆积土壤的温度进行测定，确保堆积核心温度在适宜温度范围内。
透气	a) 使用柱淋洗技术，添加菌种进行厌氧过程时，空隙率应≤0.4。添加菌种进行好氧过程时，应提高淋洗柱的空隙率≥0.5，必要时可对淋洗液进行曝气处理。 b) 使用堆积淋洗技术，添加菌种进行厌氧过程时，空隙率宜控制在 0.2~0.45。添加菌种进行好氧过程时，空隙率宜≥0.55。
pH	生物反应和化学反应的 pH 应结合具体工况确定。

6.3 固化稳定化技术

6.3.1 固化稳定化技术是通过降低土壤中污染物的活性、毒性和迁移能力，使其以相对稳定的物理化学状态存在的方式，实现污染物无害化或者降低其对生态系统危害性的风险。

6.3.2 固化稳定化技术既能原位修复，也能异位修复。所形成的结合体毒性降低，稳定性增强，可以处理多种重金属和部分有机污染物，经处理的污染土壤有利于后续处置。

6.3.3 固化稳定化技术适用于金属类、腐蚀性无机物以及砷化合物等无机污染物；游离能力强、易扩散、不稳定的污染物，应采取预处理。

a) 铁负载生物炭材料适用于砷、镉等重金属污染物的去除；

b) 掺铁羟基磷灰石材料适用于重金属镉的去除。

6.3.4 固化稳定化技术指标与控制要则可参考表 9。

表 9 固化稳定化技术指标与控制要则

技术指标	控制要则
材料粒径	如需对固化稳定化后的材料进行回收，则材料粒径应大于 1 mm。
防止污染扩散	对于易扩散的污染物，应当考虑防止污染扩散。进行异位修复时，开挖深度应大于渗透深度，必要时应进行取样检测。进行原位修复时，应对土壤进行深耕，确保材料覆盖范围大于整个处理周期所能达到的最大扩散深度。
土壤理化环境	当采用的材料为改性活性炭、改性沸石等含有化学官能团的改性材料时，应考虑土壤理化环境指标可能的不利影响。

6.4 异位热处理法

6.4.1 异位热处理法是通过工程措施将污染土壤从地块挖掘出来，采用加热处理将挥发性有机污染物从

污染土壤中挥发去除的方式。

6.4.2 异位热处理法适用于挥发性有机物的污染和加热后分解产生无害物质的有机物污染的处理。

6.4.3 异位热处理法的加热温度应较污染物挥发温度或解吸温度高 20 °C 以上。

6.4.4 异位热处理法可采用回转式、螺旋式等不同的加热方法。

6.4.5 土壤含水量大于 20% 时，应考虑热处理中土壤蒸发的水分造成的影响。

6.4.6 应设置尾气收集处理装置，挥发性有机物的残留应符合 GB36600、GB15618 规定。

6.5 阴燃法

6.5.1 阴燃法是以热值较高的有机污染物为能源，通过向污染土层中注入空气，在低能状态下点火引起污染物的慢性自持燃烧，利用污染物自身的燃烧热能引发周边污染区域的持续燃烧，达到去除污染的方式。

6.5.2 阴燃法适用于处理石油烃、煤焦油、杂酚油、矿物油和溶剂在内的液体有机污染物，尤其是碳氢污染物的土壤修复。

6.5.3 采用阴燃法时土壤含水率应不超过 35%。

6.5.4 应根据污染物种类、土壤含水量以及污染物含量，对通气量进行调整，保证燃烧反应能够自持，必要时可添加燃料或助燃剂。

6.5.5 应先进行小试确定土壤通气能力，再结合污染深度确定通气点深度和分布，阴燃反应深度应大于污染深度。

6.5.6 反应未能达到修复效果或标准时，宜进行异位修复，并设置防扩散装置和尾气收集处理装置。

7 水土污染一体化修复程序与技术选择

7.1 水土污染一体化修复技术工作程序

7.1.1 水土污染一体化修复技术可按现场勘探、确定总体方案、技术选择、工程实施、运行维护和监测分析与效果评价的步骤执行，如图 1 所示。

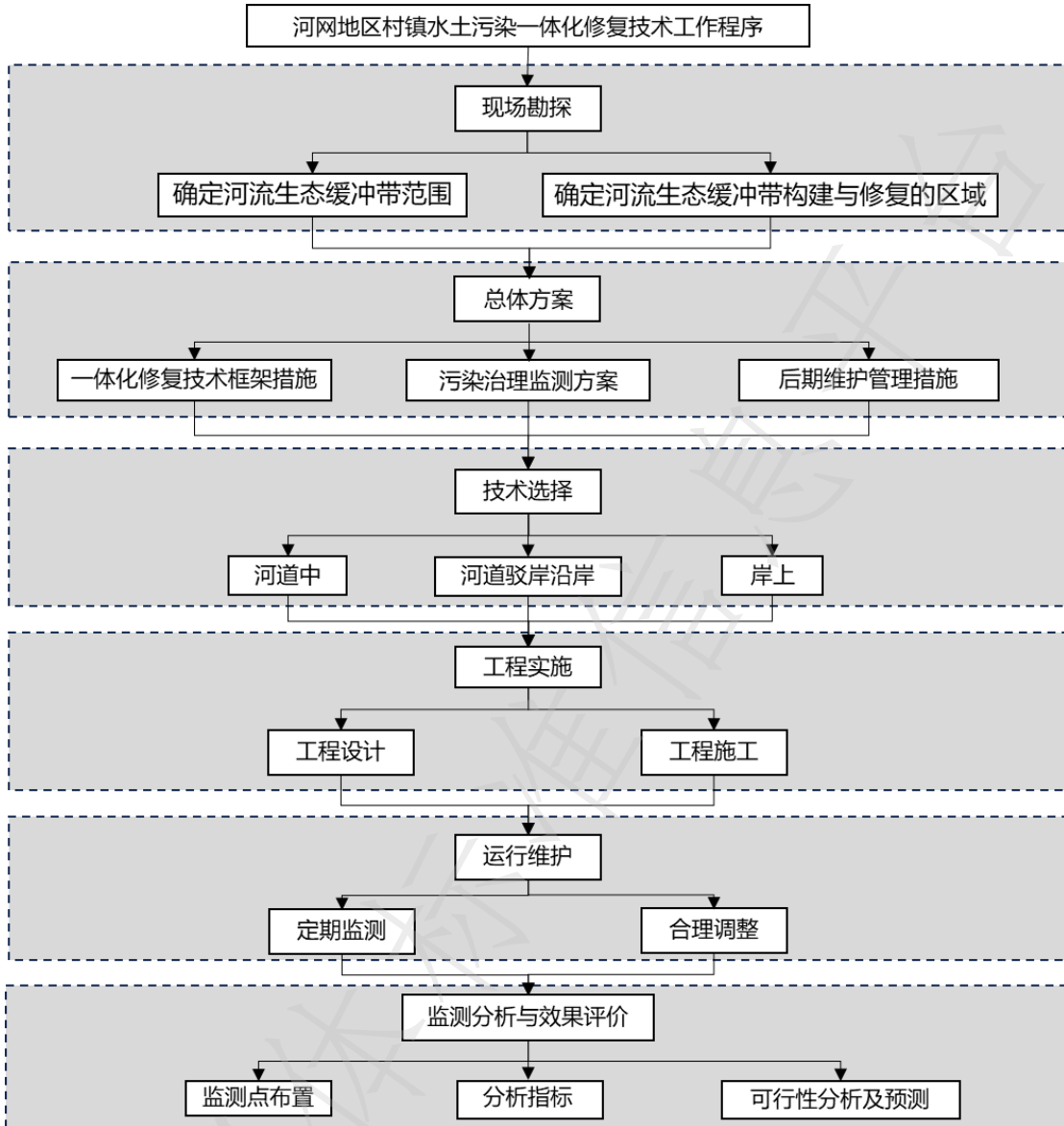


图 1 水土一体化修复技术程序

7.1.2 现场勘探

实施应根据现场条件，通过现场踏勘开展河流生态缓冲带范围确定工作，应对河流岸线、河流两岸（含河流多年平均最低水位线到最高水位线，以及多年平均最高水位线以上 500 m 范围内）土地利用情况、土壤类型、地形坡度进行现场调查核实，背景调查方法可参考 HJ/T 166。开展河流生态缓冲带构建与修复的区域，应对河岸带植被、水生生物及基底情况进行调查。

7.1.3 总体方案设计

应根据河流周边踏勘调查情况，设计物理修复、化学修复、生境改善和植物修复的污染一体化修复技术框架措施，并提出详细的污染治理监测方案和后期维护管理措施。

7.1.4 技术选择

水土污染一体化修复技术实施应包括下列内容，相关示例见附录 A。

- a) 河道中可设置生态浮床、种植沉水植物、沿岸种植挺水植物或其他地表水修复技术。
- b) 河道驳岸沿岸可设置生态驳岸，包括铺设碎石、环境功能材料或种植植物。

c) 岸上可应用土壤淋滤设备、可渗透反应墙或其他土壤、地下水修复技术，并设置地下水水质监测井，技术可行性评估可参考 HJ 25.4。

7.1.5 工程实施

a) 制定水土一体化修复技术方案要确保工程实施安全，水土一体化修复技术工程施工和运行过程中，应防止对施工人员、周边人群健康以及生态环境产生危害和二次污染。

b) 根据确定的修复技术方案，开展修复工程的设计及施工。工程设计一般包括初步设计和施工图设计；工程施工包括施工准备、施工过程和环境管理与二次污染防治等。

7.1.6 运行维护

a) 在场地修复过程中，应定期监测修复技术的处理效果，并检测是否有毒性更大的污染物产生，在充分论证的条件下可合理调整方案。

b) 污染场地中挖掘出的污染土壤和抽取出的地下水需转移到场外处理的，其挖掘、运输、储存和处置应符合国家、场地所在地和处理场所所在地的 HJ 964 等环境保护法律法规要求。

c) 在污染现场采用原位或异位处理技术时，应采取避免挖掘及修复过程中扬尘和挥发性物质的无组织排放，妥善处理挖掘及修复过程中产生的废渣和废水，并应尽量减少噪声污染。

d) 在应用一体化修复技术过程中，现场施工人员应采取适当的防护措施，必要时穿戴防护面具和防护服。对进出污染场地的人员和车辆需要进行严格管理，防止污染土壤被带出场外，避免污染物的扩散。

e) 对修复设施进行定期维护并更换相关修复材料，防止填充材料失效影响修复效果，导致污染扩散。被替换的材料应进行集中处置，严禁乱堆乱放。

f) 对于污染物富集的植物、修复材料、水溶液或土壤，应进行回收处理和统一管理。

7.1.7 监测分析与效果评价

地表水监测点布置应覆盖工程实施的“上游、中游和下游”点位，土壤和地下水监测点布置宜按照工程实施区域“前、中、后”一线和地下水“补给、径流、排泄”一线的交叉布置法进行布置，保证水土污染修复监测网的完整、有效，检测点位布置可按照图 2 所示，并应符合下列规定：

a) 监测点布置应包括地表水、地下水、土壤采样点和采样计划设置。土壤宜进行钻孔土样、丰平枯水期表层土采样监测。地下水宜进行月度采样、自动监测（地下水水位、电导率、温度）。地表水宜进行月度采样、流量监测、大气降雨量监测。

b) 分析指标应包含并不限于：土壤钻孔土样全分析，每季度土样 pH 和特征污染物分析。地下水抽水试验确定渗透系数 K、入渗试验确定入渗系数、特征污染物浓度、pH 等。地表水 pH、特征污染物浓度、流量、大气降雨量。

c) 可行性分析及预测。根据监测数据建立交互带溶质迁移模型，模拟预测、评价不同工况条件下水土污染修复情况。

修复效果评价时污染物指标需符合 GB 3838、GB/T 14848、GB 36600 和 GB 15618 中规定限值。

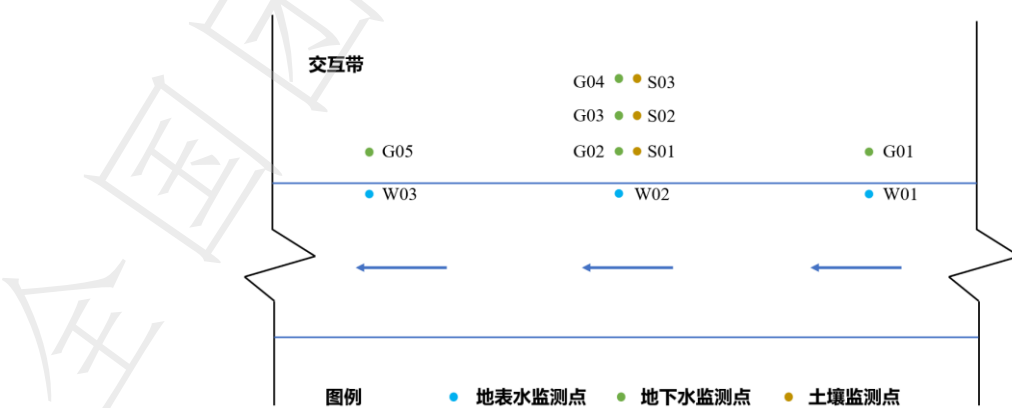


图 2 河流-地下水交互带水土一体化修复监测点布置图

7.2 水土污染一体化修复技术选择基本规定

7.2.1 一体化修复技术的选择应统筹场地差异、景观价值和成本投入等因素，结合技术应用模式，采用

综合方法分析比选。

7.2.2 一体化修复技术的选择应确保污染场地的修复效果满足土地利用方式的标准要求，选择可以降低污染物毒性、含量和迁移性的较为成熟的修复技术，避免二次污染。

7.2.3 在前期进行小试实验和中试实验时，应充分调查需处理污染场地的特征，因地制宜地选择试验参数和工艺组合。

7.2.4 场地修复技术选取与衔接应考虑水土环境中污染物迁移转化的基本途径、污染物质的迁移和转化过程。（详见附录 B）

7.2.5 在一体化修复技术开发过程，针对不同村镇、不同污染状况，需要对地表水、地下水和土壤单项修复技术进行比选。（详见附录 C）

7.2.6 一体化修复技术的选择除应符合本文件外，还应符合国家现行有关标准的规定。

附录 A
(资料性)
水土污染一体化修复技术实施示例

图 A.1 所示为河道受污染后导致的地表水和地下水污染场地及修复技术应用段工程实施示意图，针对污染区的一体化修复技术框架模式包括：工程实施侧对岸的地下水监测井 1 处（1#井），工程实施侧的 2 处地下井，技术应用段右侧河道沿岸设置 1 处渗透性反应墙（PRB）。地表水水质较差时，应采用生态浮床和生态驳岸技术治理，其引起的地下水污染宜采用可渗透反应墙治理。地下水水质较差时，应通过潜水泵（2#井）将地下水送至生态驳岸修复，并利用可渗透反应墙进一步修复；为了维持地下水水位，宜将地表水输送至处理站处理后，通过淋滤设备及地下井（3#井）注入土壤。污染场地白塔中心河和长吉树下河在修复 6 月后，地表水可达Ⅲ类水质标准（GB 3838），地下水可达Ⅱ类水质标准（GBT 14848），无土壤污染风险。

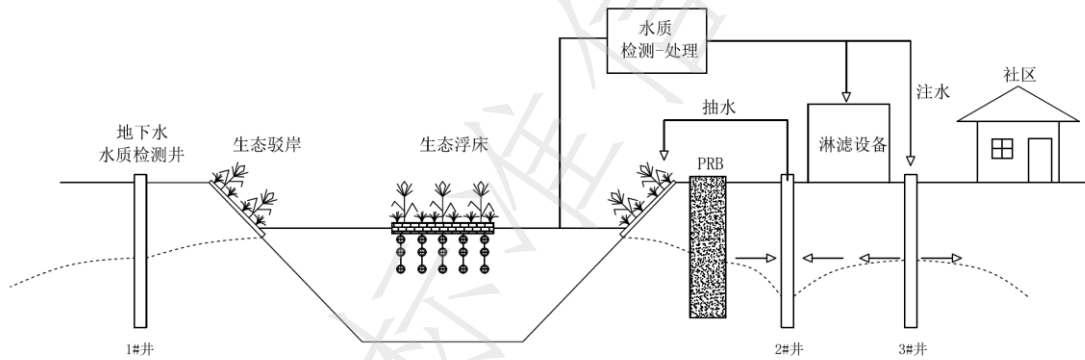


图 A.1 技术应用段工程实施示意图

附录 B

(资料性)

水土污染一体化修复技术原理及特点

B.1 污染物迁移转化的基本途径

污染物在环境中所发生的空间位移及其所引起的富集、分散和消失的过程称为污染物的迁移。而污染物的转化是指污染物在环境中通过物理、化学和生物的作用改变存在形态或转变为另一类物质的过程。污染物的迁移和转化常常相伴进行。污染物由污染源进入其它圈层或在某个圈层中迁移转化所经历的途径和过程称之为污染物迁移转化途径。在自然界中由于污染源的种类是非常繁多的，图 B.1 简略地显示了污染物在环境各圈层中的迁移情况。工业产生的废渣、废水、废气。农业活动的农药、化肥等。人类生活产生的固体垃圾、污水、废气等等，这些污染物蒸发进入大气圈，通过扩散和被气流搬运而迁移，并通过光化学氧化或催化氧化反应而转化。也可通过溶解态进入水圈随水流动或通过吸附于悬浮物而传输，同时污染物可通过氧化还原、络合水解和生物降解等作用发生转化。生物通过吸收、分布、转化以及吞食等方式使污染物在其体内或生物圈中进行迁移转化。

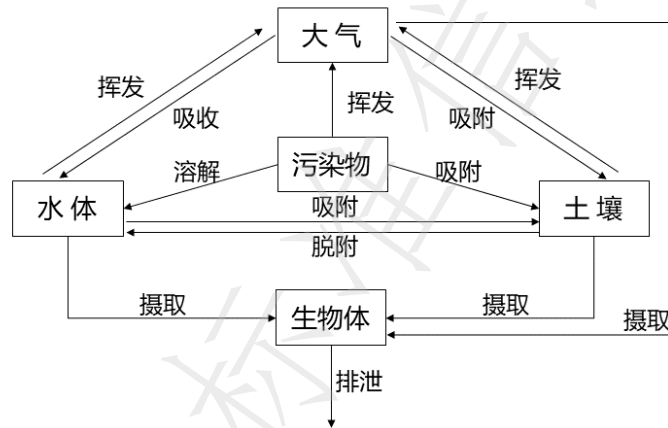


图 B.1 污染物在环境中的迁移路径

B.2 污染物在河流-地下水系统中运移的影响因素

水力梯度和浓度梯度是污染物运移的驱动力。在河流—地下水系统中影响污染物运移的因素主要有自然因素和人为因素。自然因素包括地形、水文地质因素、气候等三方面，影响着污染物在河流与地下水系统中的运移方向和强度。人为因素是通过人类活动影响污染物的来源、运移方向和强度。

(1) 地形因素

地形因素控制着河流与地下水的转化关系，从而影响着污染物的主运移方向。天然情况下，河流上游河谷深切呈“V”字形，河流排泄地下水，污染物的主运移方向由地下水向河流。河流的中上游含水层厚度较大，河流非完整切割含水层，一般河流补给地下水或随丰枯水期河流与地下水关系处于交替变化之中，污染物的主运移方向也随水流方向而改变。下游地区地形平坦，河谷开阔，除地上悬河外，一般是地下水补给河流，污染物的主运移方向也由地下水向河流。

(2) 水文地质因素

包括河水与地下水水位、含水层介质和结构、河床形态及沉积层透水性等。河水位与地下水水位之差使地下水流并非按区域均匀分布，水流量随距离呈指数式或非线性下降。含水介质的岩性、各向异性也影响着水流的分布及流量。河床的形态及非均质性影响着河流渗漏模式及渗漏量。这些因素影响着水流强度也就同时影响着污染物的运移强度。

(3) 气候因素

河流基流量就是地下水的主要排泄。而当降水较多时，由河水排泄地下水转变为河水补给地下水。在洪水季节，河水向河岸渗漏补给含水层，河水渗漏量的大小取决于洪水持续时间、地形以及河床的渗

透能力。河流随气候的变化同样也影响着水质的运移方向和强度。在枯水季节，不仅河流量减少了，河水对污染物的稀释和净化功能也降低了，随着地下水开采量的增加，污染物不断地向远处扩散。

(4) 人为因素

人类生产生活活动包括引水筑渠、傍河取水、废水排放、农业灌溉等，不仅改变了地下水流场，削弱了河流与地下水的连通性，改变了水量交换过程，而且也造成了水质污染。河流与地下水的流场是一个复杂系统，影响污染物在该系统中运移的因素很多，各因素之间又相互影响。本次研究选取了影响污染物在河流—地下水系统中运移的主要因素：含水层介质、结构、河床形态、河水位、开采水位。

B.3 污染物在河流-地下水系统中的行为特征

污染物在河流—地下水系统（包气带和含水层）迁移过程中，将与周围的环境介质发生各种复杂的物理和化学、生物作用，产生不同的环境效应。物理作用主要包括机械过滤及稀释作用，它们主要产生净化效应。化学作用主要包括吸附、挥发、水解、光解、溶解、沉淀、络合、多组分溶质的反应等。生物作用主要包括微生物降解。

机械过滤作用:包气带土壤被称为天然的物理、化学和生物“过滤器”，污染物往往在包气带及含水层中被过滤。机械过滤作用主要是取决于介质的性质和污染颗粒的大小。在松散地层里，颗粒越细，过滤效果越好。在坚硬岩石裂隙地层里，其过滤效果一般不如松散地层好，裂隙越大，过滤效果越差。过滤可以去除水体中的部分悬浮物，其次是细菌。此外，一些组分的沉积物以及有机物、粘土絮凝剂也可被去除。

稀释作用:水中的污染物在水及自身力的作用下迅速扩散，并随着分布范围的扩大，浓度相应降低，但其化学组成和化学性质不变，因此，并不意味着污染物的去除。稀释作用包括对流和弥散作用。对流决定了污染物的运动方向和速率，弥散使污染物产生转移，而实际上对流与弥散总是联系在一起，不可分割的，只是为了研究方便起见，才把他们区分开来。对流是指污染质点在含水层中以地下水平均实际流速传播的现象，水动力弥散是指在多孔介质中，当存在两种或两种以上可溶混的流体时，在流体运动作用下发生过渡带，并使浓度趋于平均化，这种现象称为多孔介质中的水动力弥散现象。实际上，污染物在含水层中运移时，一般都会发生弥散现象。水动力弥散过程主要是分子扩散与机械弥散相结合的结果。

分子扩散:主要是物理化学作用的结果，它是浓度不均一引起的物质运动现象，浓度梯度使高浓度处的物质向低浓度处运移，以求浓度趋于均匀。分子扩散不仅在静止液体中存在，而且在运动状态下同样存在，既有沿运动方向的纵向扩散，也有垂直运动方向的横向扩散。在多孔介质中，扩散作用进行的很慢。如果浓度梯度不是很大，这种弥散将是非常的缓慢。因此，如果迁移的距离不大或者要求预报的时间较小，则在计算预报污染物的分布时，可以不考虑分子扩散。

机械弥散:当污染物质点在孔隙介质中运动时，由于流体粘滞性和固体颗粒的存在，使得流场中各点运动速度的大小和方向都不相同。结果溶质的运移超出了用平均流速所预计的范围。机械弥散是一个不可逆的过程，为了运算方便，在数学上可以用类似于 Fick 定律的数学表达式来描述它。

吸附作用:吸附是固体表面反应的一种普遍现象。由于胶体颗粒表面的电荷不均衡性而使其带负电荷或正电荷，从而具有吸附溶液中阳离子或阴离子的能力。污染物在含水层中运移时，由于介质的吸附，使某些污染物数量减少，因此吸附对于污染物的迁移起到了重要的控制作用。这方面的作用主要有以下几种：

1) 物理吸附作用：在孔隙介质中由于岩石颗粒具有表面能，可吸附阳离子，还会发生阳离子交换作用，使水中某些离子减少，而另一些离子增加。这种依靠静电引力使液态中的离子吸附在固态表面上的键联力比较弱，在一定条件下，固态表面所吸附的离子可被液态中的另一种离子所替换，是一种可逆反应。

2) 化学吸附作用：依靠化学键结合的，被介质吸附的离子进入胶体的结晶格架中，成为介质结晶格架的组成部分，它不可能再返回溶液中，从而使水中这些离子浓度减小，反应是不可逆的。

3) 生物吸附作用：微生物在地下水中的运移，一方面取决于微生物在地下水中生存时间的长短，

另一方面与岩石颗粒对其吸附性有关。由于岩石颗粒的表面能和静电力可以吸附大量的微生物，因此生物在地下水中运移过程浓度迅速降低，其迁移的距离一般不超过数百米。

吸附剂吸附能力可用吸附量表示。吸附量是指在一定的条件下吸附达到平衡后，单位质量吸附剂所吸附的吸附质的物质的量在一定的温度条件下，测定的吸附量与吸附物平衡浓度的关系曲线，称为吸附等温线，相应的数学方程式称为吸附等温式。

挥发作用：挥发是有机污染物从水中转移到土壤或大气中的一种常见过程，是有机污染物在土壤、水、大气环境要素各圈层间跨介质循环的主要环节之一。污染物从含水层中向大气挥发的速率会受到多种因素的影响，主要包括三方面：含水层性质：介质类型、含水层结构、含水量、孔隙度、有机质的含量等。污染物的性质：化学结构、浓度、污染物的蒸汽压、水溶解度、辛醇—水分配系数等。环境条件：温度、pH 值、空气湿度等。

水解作用：是有机污染物和水之间最重要的反应，也是许多有机污染物在水环境中消失的重要途径。有机污染物的水解速率与污染物的性质和环境的 pH 值关系最为密切。

生物作用：主要指的是微生物的降解。生物降解是指有机污染物在微生物的作用下，从大分子分解成为小分子，从有毒转变为无毒，最后变为 CO_2 、 H_2O 、 CH_4 等的过程，它是引起有机污染物分解的最主要的环境过程之一。水环境中有机物的生物降解依赖于微生物通过酶催化反应分解有机物。有机物的生物降解会导致污染物在含水层中的浓度不断降低。

附录 C
(资料性)

地表水、地下水和土壤修复技术比选

C.1 地表水修复技术比选可参考表 C.1

表 C.1 地表水修复技术比选表

技术名称	应用参考因素							应用优势/局限
	适用性	成熟度	可操作性	时间周期	二次污染	费用成本	公众认可度	
人工曝气	适用微藻、有机物	成熟，国内外均有较多工程案例	好，已掌握相关技术原理及参数	短	对环境影响较小	高	高	适用性广、设备简单、见效快/成本高
生态补水	适用重金属及有机污染物	成熟，国内外均有较多工程案例	好，已掌握相关技术原理及参数	短	影响下游水质和负荷	高	中等	见效快、技术可靠/适用范围窄、没有从根本上解决污染
化学修复技术	适用磷、重金属等	成熟，已成功应用	好，已掌握相关技术原理及参数	短	处理不当易引起二次污染	高	中等	见效快、技术可靠/工程量大，成本高。同时，污染物未能在水中彻底清除或利用，目前多不采用。
微生物强化技术	适用氮、磷、重金属等	成熟，国内外均有较多工程案例	好，掌握相关原理和技术参数	较长	若含有害微生物，会破坏水体原生生态系统	高	中等	工程量小/受限于微生物适应性和水体特点，效果不一。
氧化塘技术	适用于农村点源废水及农田面源治理。	技术成熟/国内应用较多	好，已掌握相关技术原理及参数	需要时间较长	无二次污染	较低	高	投资较少、无二次污染、具有统一和调和微生物及水生植物的功能，修复效果好
人工湿地处理	适用氮、磷、重金属等	技术成熟/国内应用较多	好，已掌握相关技术原理及参数	长期	位置选择不当或处理能力不满足实际需求时，	低	高	投资和运行成本低、处理效果稳定可靠/受气候条件影响较大、净化能力受作物生长

表 C.1 (第 2 页/共 2 页)

技术名称	应用参考因素							应用优势/局限
	适用性	成熟度	可操作性	时间周期	二次污染	费用成本	公众认可度	
技术			参数		会污染周围土壤和地下水			程度的影响大

C.2 地下水修复技术比选可参考表 C.2

表 C.2 地下水修复技术比选表

技术名称	应用参考因素								应用优势/局限
	适用性	成熟度	可操作性	时间周期	处理效率 (%)	二次污染	费用成本	公众认可度	
多相抽提技术	适用于渗透性较好、地下水水位变动较小的场地中易挥发、易流动的非水相液体	成熟, 国内外有较多案例	好, 已掌握相关原理和技术参数	较长	70~90	对环境影响较小	中高	高	适用污染范围大、埋藏深的污染场地具有优势, 初期的污染物去除率较高, 设备简单易安装, 不宜用于吸附能力较强的污染物, 以及渗透性较差或存在非水相液体的含水层。
异位生物修复技术	适用于可生物降解的半挥发性有机物、石油烃类物质、可生物降解的部分农药类物质、其他可生物降解污染物等。	较成熟, 国内外有案例	中, 技术参数需要调整	较短	70~95	对环境有一定影响	高	中高	周期较短, 修复效果的不确定性较低, 但修复费用相对较高, 且存在臭气、污泥等二次污染。
可渗透反应墙修复技术	碳氢化合物、氯代脂肪烃、氯代芳香烃、金属、非金属、硝酸盐、硫酸盐、放射性物质等	成熟, 国内外有较多案例	好, 掌握相关原理和技术参数	长期	70~90	对环境影响较	中等	高	可处理污染范围广/不适用于承压含水层, 不宜用于含水层深度超过 10 m 的非承压含水层, 对反应墙中沉淀和反应介质的更换、维护、监测要求较高。
原位空气	适用于可生物降解的挥发性/	较成熟,	中, 技术参数	较长	70~90	对环	低	中高	该技术受地层介质条件的限制较大, 在细

表 C.2 (第 2 页/共 2 页)

技术名称	应用参考因素								应用优势/局限
	适用性	成熟度	可操作性	时间周期	处理效率 (%)	二次污染	费用成本	公众认可度	
注入强化生物修复技术	半挥发性有机污染物、石油烃类物质、可生物降解的部分农药类物质等	国内外有案例	需要调整			境影响小			砂、粉砂等渗透性较低的介质中，气流形成的孔道极其有限，这使得气流难以和地下水中的污染物充分接触，造成低渗透区域的修复效果不理想。
原位化学氧化/还原技术	适用有机污染物	成熟，国内外有较多案例	好，已掌握相关技术原理及参数	较长，6~24个月	70~90	对环境的影响较小	中等	高	反应速度快，节约修复时间。二次污染可控。可与本地块污染土壤一同进行原位氧化/对于高污染土壤达标困难、需要关注氧化产物毒性

C.3 土壤修复技术比选可参考表 C.3

表 C.3 土壤修复技术比选表

技术名称	应用参考因素								应用优势/局限
	适用性	成熟度	可操作性	时间周期	处理效率 (%)	二次污染	费用成本	公众认可度	
固化稳定化技术	适用重金属污染	成熟，国内外均有较多工程案例	中，技术参数需要调整	短，如6-12个月	>90	污染不能彻底去除，需对土壤和地下水进行长期监测	中等	中等	适用性较强。原位异位均可使用/不能清除土壤中污染重金属，易再度活化
异位土壤淋洗技术	适用重金属	成熟，国内外均有较多工程案例	好，已掌握相关技术原理及参数	短，如6-12个月	>90	对环境的影响较小	较大	中等	适用范围广、见效快、处理容量大/对粘土和粉土中的污染物比较难于完全清洗滤出

表 C.3 (第 2 页/共 2 页)

技术名称	应用参考因素								应用优势/局限
	适用性	成熟度	可操作性	时间周期	处理效率 (%)	二次污染	费用成本	公众认可度	
及有机污染物									
阴燃法	适用有机污染物	成熟, 国内外均有较多工程案例	好, 已掌握相关技术原理及参数	中短, 约 6-12 个月	>90	对环境有影响, 需要监测尾气排放	中等	中高	较广谱、不适用于低污染土壤、需要严控二次污染
异位热处理技术	适用有机物	成熟, 国内外均有较多工程案例	好, 已掌握相关技术原理及参数	短, 0.5-3 年	>90	对环境有影响, 需要监测尾气排放	中高	较好	操作简单, 广谱, 去除效率高/系统复杂、需要严控二次污染、脱附后土壤基本失去肥力
生物修复技术	不完全适用	技术成熟/国内外有应用	中, 技术参数需要调整	较长	40~90	对环境影响较小	中高	中高	修复过程简单, 对环境的影响小, 操作简便/受各种环境因素的影响较大, 修复周期较长, 污染物浓度太高不适用、去除率低
生物修复技术	不完全适用	技术成熟/国内外有应用	中, 技术参数需要调整	较长	40~90	对环境影响较小	中高	中高	修复过程简单, 对环境的影响小, 操作简便/受各种环境因素的影响较大, 修复周期较长, 污染物浓度太高不适用、去除率低