

附件 1

# 污染地块风险管控技术指南 —阻隔技术（试行）

（征求意见稿）

二〇一七年十一月

## 概 要

阻隔技术是指通过铺设阻隔层阻断土壤介质中污染物迁移扩散的途径,使污染介质与周围环境隔离,避免污染物与人体接触和随降水或地下水迁移进而对人体和周围环境造成危害的技术。阻隔系统主要有几方面的功能:(1)阻断污染土壤与人体的直接接触;(2)阻止受污染地下水迁移扩散;(3)阻断污染土壤或污染地下水挥发出的气体扩散。阻隔仅能切断暴露路径,限制污染羽迁移,但不能彻底去除污染物质或降低污染地块上的污染物浓度,不是真正的修复技术,因此,阻隔技术尽管可以单独用于污染地块的风险管控,也经常需要与其他修复技术结合使用才能达到修复目标。

阻隔技术包括水平阻隔和垂直阻隔两大类,水平阻隔相对简单,垂直阻隔可分成取代法、挖掘法、注射法等基本类型。对于阻隔技术的应用,应基于污染地块风险三要素的分析,以及设定的风险管控目标,判断其适用性,同时还要考虑其与其他技术经济成本的比较情况。阻隔技术实施的工作程序包括设计、施工和监测维护等内容。设计阶段需考虑工程建设、阻隔材料选择、主要暴露途径和使用寿命等因素;施工阶段的质量非常重要,直接关系到阻隔措施的效果,因此应做好质量控制与质量保证,确保阻隔措施完全按照设计说明实施;同时,阻隔措施需要开展常规监测,证明阻隔系统达到设计目标的最初性能,并确保在地块开发后阻隔效果得以持续;此外,阻隔措施需要进行长期维护,如果定期监测结果表明阻隔措施未能达到预期效果,应及时进行修理或更换。

本指南分别对阻隔技术的主要技术环节提出了一般性的原则和要求,即设计、施工、监测与维护。同时,针对阻隔技术常用的三种情形:(1)阻断表层土壤的直接接触;(2)阻止受污染地下水迁移扩散;(3)阻断周围或室内空气暴露。分别对每种情形下阻隔技术的设计、施工、监测与维护等主要技术环节提出了进一步的细化要求。

# 目 录

前言.....	6
1 适用范围.....	6
2 术语和定义.....	6
3 规范性引用文件.....	7
4 阻隔技术概况.....	8
4.1 阻隔技术的原理与优缺点.....	8
4.2 阻隔技术的主要类型及适用性.....	8
5 阻隔措施设计的总体要求.....	9
5.1 技术准备.....	9
5.2 阻隔技术设计要点及注意事项.....	10
5.3 切断暴露途径.....	10
5.4 设计寿命.....	12
5.5 设计说明.....	12
6 阻隔措施的施工.....	13
7 阻隔措施的监测与维护.....	13
7.1 监测要求.....	13
7.2 定期监测.....	13
7.3 维护.....	13
7.4 阻隔效果的评价.....	14
8 针对污染土壤阻隔的设计施工及维护.....	14
8.1 简介.....	14
8.2 风险管控目标及现有技术.....	14
8.3 设计与建设注意事项.....	14
8.4 性能监测.....	19
8.5 维护和操作事项.....	20
9 针对地下水污染阻隔的设计施工及维护.....	21
9.1 简介.....	21
9.2 风险管控目标及现有技术.....	21
9.3 设计与建设注意事项.....	22
9.4 性能监测和维护.....	28
10 对土壤或地下水室内蒸汽入侵阻隔的设计施工及维护.....	29
10.1 简介.....	29
10.2 风险管控目标及现有技术.....	29
10.3 设计与建设注意事项.....	30
10.4 性能监测.....	34
10.5 维护和操作事项.....	35
11 制度控制（活动和使用限制）.....	36
11.1 活动和使用限制的必要性.....	36
11.2 活动和使用限制的目的.....	36
11.3 活动和使用限制的类型.....	36
12 二次污染防治技术要求与措施.....	36
附录 1.....	38

## 前 言

为贯彻落实《土壤污染防治行动计划》和《污染地块土壤环境管理办法（试行）》（环境保护部令第42号），指导和规范阻隔技术在污染地块风险管控中的应用，制定本指南。

### 1 适用范围

阻隔技术主要有几方面的功能：（1）阻断污染土壤与受体的直接接触；（2）阻止受污染地下水迁移扩散；（3）阻断污染土壤或污染地下水挥发出的气体扩散。阻隔技术适用于以下情形：

- （1）污染地块土壤、地下水或其他环境介质中关注污染物的浓度超过相关标准或风险水平超过可接受水平；
- （2）地块上存在关注污染物的潜在完整暴露途径；
- （3）与其他措施相比，阻隔技术适用且更经济有效。

阻隔仅能切断暴露路径，限制污染羽迁移，但不能彻底去除污染物质或降低地块上的污染物浓度，不是真正的修复技术。因此，阻隔技术尽管可以单独用于污染地块风险管控，也经常需要与其他修复技术结合使用才能达到修复目标。

## 2 术语和定义

### 2.1 疑似污染地块

指从事过有色金属冶炼、石油加工、化工、焦化、电镀、制革等行业生产经营活动，以及从事过危险废物贮存、利用、处置活动的用地。

### 2.2 污染地块

按照国家技术规范确认超过有关土壤环境标准的疑似污染地块，称为污染地块。

### 2.3 阻隔技术

采用阻隔、堵截、覆盖等工程措施，控制污染物迁移或阻断污染物暴露途径，使污染介质与周围环境隔离，避免污染物与人体接触和随降水或地下水迁移进而对人体和周围环境造成危害，降低和消除地块污染物对人体健康和环境的风险的技术。

## 2.4 垂直阻隔技术

阻隔层采用竖向布置的形式，阻断污染介质向周边环境的迁移输送的阻隔技术。包括土-膨润土隔离墙、高压喷射灌浆墙、搅拌桩墙、搅喷桩墙、水泥帷幕灌注浆墙、土工膜墙、渗透反应墙等技术。

## 2.5 水平隔离层技术

阻隔层采用水平敷设布置的形式，阻断污染介质向周边环境的迁移输送的阻隔技术。包括混凝土水平阻隔、粘土水平阻隔、柔性水平阻隔等技术。

## 2.6 受体

一般指地块及其周边环境中可能受到污染物影响的人群或生物类群，也可泛指地块周边受影响的功能水体（如地表水、地下水等）和自然及人文景观（区域）等（如居民区、商业区、学校、医院、引用水源保护区等公共场所）。

## 2.7 暴露途径

地块土壤和浅层地下水中污染物迁移到达和暴露于人体的方式，如经口摄入、皮肤接触、呼吸吸入等。

## 2.8 蒸汽入侵

表层以下污染土壤和地下水中的挥发性化学污染物经建筑物地基的开口处（例如裂缝或地下室）迁移至上方所覆盖建筑物的室内空气环境中。

## 2.9 制度控制

也称作活动和使用限制。是指限制人类活动类型或活动区域，减少或阻止人群对地块污染物的暴露，杜绝和防范污染地块可能带来的风险和危害，从而达到利用管理手段对污染地块的潜在风险进行控制的目的。

## 3 规范性引用文件

本指南引用下列文件或其中的条款。凡是不注明日期的引用文件，其最新版本适用于本指南。

GB15618	土壤环境质量标准
GB 3838	地表水环境质量标准
GB 18599	一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准
HJ 25.1	场地环境调查技术导则

HJ/25.2 场地环境监测技术导则

HJ/25.4 污染场地土壤修复技术导则

## 4 阻隔技术概况

### 4.1 阻隔技术的原理与优缺点

阻隔为施工于污染介质周围的地下沟渠、地墙或地膜所组成的垂直阻隔系统，有时也与地面生态覆盖系统结合。阻隔系统主要有几方面的功能：（1）阻断污染土壤与人的直接接触；（2）阻止受污染地下水迁移扩散；（3）阻断污染土壤或污染地下水挥发出的气体扩散。早期阻隔技术主要用于防止建设工程外侧土壤坍塌或外围地下水渗入基坑，钢板桩是世界各地普遍采用的阻隔技术。

表 1 阻隔技术的优缺点

优点	缺点
1. 可防止污染物横向或侧向移动扩散。 2. 可改变局部的地下水流模式。 3. 阻止及避免污染土壤与地下水相互接触。 4. 可阻隔污染并保护邻近区域。 5. 常用于出水量大或污染来源复杂的地区。 6. 降低水力传导系数。 7. 可有效缩短治理修复周期。	1. 非处理方式。 2. 设置费用高。 3. 适用于小地块。 4. 有潜在渗漏及移动风险。

### 4.2 阻隔技术的主要类型及适用性

阻隔技术包括水平阻隔和垂直阻隔两大类。水平阻隔相对简单，这里不再分类。垂直阻隔可分成取代法、挖掘法、注射法等基本类型。各类型特点及适用性见表 2。

1. 取代法：把阻隔系统施工于地下而地面不受大的干扰。其中，钢板桩(steel sheet piling) 是最常用的一种方法。

2. 挖掘法：将土壤挖出，然后用阻隔材料代替原有土壤，即建置一低渗透性的垂直阻隔系统，将其插入土壤甚至更深的透水层。例如，交叉桩法(secant piling) 是由一系列连锁相邻的桩构成完整的墙；浅层截水墙(shallow cut-off wall) 的建造过程是先用切割机挖出一个足够深的狭槽，然后插入地膜，再用压实的黏土填充；泥浆沟渠(slurry trench) 的建造过程是先挖一条沟渠，然后用不同材质混合的泥浆（如皂土—水泥混合，有时还加入挖出的土壤进行混合）进行填充，形成不同形式的泥浆沟渠，如黏土阻隔系统、皂土—水泥阻隔系统、膜阻隔系统

和混凝土横隔墙等。

3. 注射法：向土壤中注入一定的材料，填充土壤的空隙、孔隙和裂隙，以降低土壤渗透性的过程。注射法形成的垂直阻隔系统包括化学灌浆阻隔、深层土壤混合（通常是皂土和水泥混合）技术、喷射灌浆和喷射混合灌浆等。

4. 其他方法：包括电动力学阻隔技术、地面冰冻、化学阻隔和生物阻隔等。其中，电动力学阻隔技术是指通过控制电荷形成对污染物迁移进行阻隔的系统。地面冰冻也可以形成垂直阻隔系统，用于控制土壤中污染物的迁移。目前，生物阻隔方法也在发展当中。

表 2 不同类型垂直阻隔系统的特点及适用性

类型	举例	适用性	特征
取代法	钢板桩 震动波墙 膜墙	大多数土壤类型，但大石头、岩石或大量废弃物存在或许会影响施工	低 pH 土壤一般对苯和甲苯等污染物具有抗性；钢板桩的地方也需要结构上或机械上的支持
挖掘法	横切堆积墙 浅层切断墙 喷射灌浆 泥浆沟渠 混凝土横隔墙	大多数土壤和岩石类型	应用广泛；需要对阻隔系统的损坏进行处置
注射法	水泥或化学灌浆 喷射灌浆 喷射混合	最好是粒状土壤或破碎的岩石，而黏土或废弃物效果较差	/
其他	地面冰冻 电动力学 生物阻隔 化学阻隔	地面冰冻只在一定颗粒大小的土壤（主要是砂土）上有过成功的实例	在国外受到广泛重视

## 5 阻隔措施设计的总体要求

### 5.1 技术准备

首先应通过地块地调查，查明受污染环境介质的性质、程度和范围，确定当前或未来土地用途下潜在的完整暴露途径。

#### 5.1.1 受污染的环境介质

为评价阻隔技术在项目地块上的可行性，应当充分表征受污染环境介质的特征及范围，明确污染物迁移途径及敏感受体，建立地块概念模型。对受污染的环

境介质的描述，除了对污染状况的描述外，还应包括包气带土壤及含水层土壤的性质（如土壤类型、粒径）、地下水单元的特征（例如水力传导率、含水层厚度、孔隙度）等。

### 5.1.2 潜在的完整暴露途径

通过建立地块概念模型，确定项目地块的潜在的完整暴露途径。包括：（1）划定受污染环境介质的区域；（2）明确污染物迁移的机理和过程；（3）确定潜在的人类受体及风险特征。

### 5.1.3 确定风险管控目标

阻隔技术的主要原理是切断暴露途径，因此风险管控的目标应基于地块污染状况及暴露途径的分析而确定。

## 5.2 阻隔技术设计要点及注意事项

设计垂直阻隔系统时应考虑：（1）施工所需的深度；（2）可接受的完整性程度（如初始有效性）；（3）拟安装的阻隔系统与当地环境的兼容性。阻隔系统的类型选取主要应基于既定的风险管控目标和需要切断的暴露途径，确定选用垂直阻隔系统、水平阻隔系统（如地面覆盖系统）等。

垂直阻隔系统主体设计指标主要取决于希望达到的阻止污染物迁移的能力与稳定性，因此需要考虑以下因素：（1）污染物迁移的驱动力和潜势；（2）阻止污染物迁移扩散的能力；（3）系统的设计寿命。其中，驱动污染物迁移的潜势包括：（1）流体静力学作用，即因水压差异产生的迁移；（2）电动力学作用，即由电动势差引起的污染物迁移；（3）化学作用，即由污染物浓度或其他物质浓度不同引起的污染物迁移；（4）热力学作用，即由水温梯度引起的污染物迁移；（5）渗透作用，即由渗透压差异引起的污染物迁移。阻隔成效与以上作用密切相关。

阻隔材料的选择，关键指标是其渗透性。大多数情况下，阻隔材料或阻隔系统与当地环境介质之间需要存在渗透性差异。其次，阻隔材料或阻隔系统的吸附性能也是一个关键的因素。此外，在水分变化引起土壤变干或土壤再饱和条件下阻隔系统的自我修复特性也相当重要。

## 5.3 切断暴露途径

阻隔措施的目的在于通过切断暴露途径，消除或降低关注污染物的暴露水

平。通过实施阻隔，可以达到：（1）阻止与受污染环境介质的直接接触（例如皮肤接触）；（2）阻止关注污染物从受污染环境介质向暴露点的不同位置、不同环境介质或者二者兼有的迁移（例如，从土壤向空气挥发的化学气体）。根据选用的阻隔系统类型不同，一种阻隔措施可以切断一个或多个暴露途径。

本指南重点介绍了切断三种主要暴露途径的阻隔措施：（1）阻断表层土壤的直接接触；（2）防止受污染地下水迁移扩散；（3）阻断深层土壤或地下水中挥发性有机污染物进入周围或室内空气。

### 5.3.1 阻断表层土壤的直接接触

如果表层土壤受到污染，人类可能通过偶然的摄入、皮肤直接接触或吸入颗粒物的方式接触污染土壤。受污染土壤颗粒可能通过风蚀、园林绿化的浅层开挖、施工或维护活动释放到空气中。主要途径有：（1）直接接触受污染土壤；（2）风力驱使土壤颗粒进入空气。阻断直接接触表层受污染土壤的技术案例包括以下几种情形：沥青路面、混凝土路面、柔性膜衬垫、清洁土壤覆盖、植被覆盖和石子覆盖等。

### 5.3.2 阻止受污染地下水迁移扩散

在地下水受到污染的地块，实施阻隔可以阻止受污染地下水的迁移扩散。在有已有建筑物存在的地块，还可以阻止受污染地下水对地下建筑或设施造成破坏。防止受污染地下水迁移扩散的阻隔措施包括：渗流屏障、拦截井或沟渠、泥浆墙和可渗透性反应墙。阻止受污染地下水对地下建筑或设施造成破坏的阻隔措施包括密封设施线、基础或设施接缝等。

### 5.3.3 阻断深层土壤或地下水中挥发性有机污染物进入周围或室内空气

污染地块如开发成居住用地，深层土壤或地下水中挥发性有机污染物挥发产生有毒有害蒸汽进入周围或室内空气，人体可能会通过呼吸暴露途径吸入从土壤或地下水中挥发出来的污染物。通过实施阻隔措施，设置气体屏障可以阻断环境或室内空气中的污染物暴露。气体屏障能够阻止：（1）气体从受污染土壤或地下水中迁移到周围空气中；（2）气体从地下室、地基、坑、地下管线、地下走廊等路径进入室内空气。用于控制吸入周围或室内空气的措施包括：封闭气体进入路

径、设置被动气体屏障、建立增压系统和主动土壤减压措施等。

## 5.4 设计寿命

阻隔系统设计的运行和维护时间应不小于：（1）预测的不可接受风险的持续时间；（2）预计的地块或特定土地利用结构的持续时间。决定设计寿命的其他因素还有建筑材料性能、成本效益分析和政策相关要求等。

## 5.5 设计说明

设计说明应明确设计、施工、监测和维护的一般标准，应提供足够的细节以确保阻隔措施达到既定的性能标准。

### （1）设计的基本资料

设计说明应提供地块现状及未来土地利用的基本信息。

### （2）有效范围和边界确定

应说明阻隔措施的物理边界。标记边界的材料可以使用土工织物、水平塑料栅栏、水平金属网、网格状的警示胶带或其他惰性材料。也可以在边界处张贴标记，记录阻隔措施施工位置和施工细节，必要时可提供图纸作为参考。

### （3）设计组件

应当对阻隔措施的所有组成部分进行详细说明，包括每个部件的设计、施工、运行和维护说明等。

### （4）尺寸和材料规格

应当说明每个设计部件的尺寸规格、材料强度、耐久性、耐腐蚀性和化学相容性等。

### （5）处理系统

如果阻隔系统涉及主动的处理措施，如土壤气体或地下水处理系统，设计说明中应明确相关设计、设备和操作流程。如果处理系统在污染地块开发或再开发前已经存在，除非可以证明阻隔措施能更有效地阻止受污染环境介质的暴露。否则应当继续保持土壤气体或地下水处理系统的运行，确定不用后再行拆除。

### （6）施工说明

阻隔措施的施工说明应指定安装方法和安装过程中的质量控制或质量保证措施。安装前应当对准备安装阻隔系统的相应区域进行清理，如地表覆盖物的清除和平整等。

### (7) 资料准备

施工过程中应做好与施工情况一致的图纸或其他书面记录，以记录阻隔措施实施的详细情况。

### (8) 监测与维护

设计说明中应当说明阻隔措施的运行与维护要求、监测方法和监测频次，以确保达到最佳的阻隔效果。应包括：①整个阻隔措施运行期间监测频次的变化；②在监测与维护期间获得的数据或信息的基础上，对监测频次进行评价和必要调整，如遇突发事件（例如洪水和地震）应进行非常规检查以核实系统性能。

## 6 阻隔措施的施工

阻隔措施的施工质量非常重要，直接关系到阻隔措施的效果。施工过程应提出质量控制与质量保证计划，落实各个环节的质量控制与质量保证措施，确保阻隔措施完全按照设计说明实施。

## 7 阻隔措施的监测与维护

### 7.1 监测要求

阻隔系统需要长期运行，因此需要开展跟踪监测，证明阻隔系统达到设计目标的最初性能，并确保阻隔系统在污染地块开发后效果得以持续。

### 7.2 定期监测

为了评估阻隔措施的运行状况和主要性能，需制定定期监测计划，包括：视觉检查、物理测量、采样和测试。监测的种类与频次取决于阻隔系统的类型。有些情况下，主动控制可能会比被动控制措施需要更频繁的监测和详细检查。阻隔效果监测要求如表 3。

表 3 阻隔效果监测要求

项目	标准
地下水水质	地下水下游至少设置 3 口监测井
地下水水位	阻隔系统内外设置水压计

### 7.3 维护

阻隔系统需要长期运行，因此需要对系统进行长期维护。如果定期监测结果表明阻隔措施未能达到预期效果，就需要进行修理或更换，如更换表层土壤、密封沥青裂缝、植被类型和表层覆盖材料等。

## 7.4 阻隔效果的评价

阻隔措施的效果应当在定期监测结果的基础上进行评价。如果阻隔措施未能达到预期效果，需要调整风险管控技术，或调整风险管控目标及地块开发计划。

# 8 针对污染土壤阻隔的设计施工及维护

## 8.1 简介

阻隔措施可以减少或消除表层、深层土壤中关注污染物暴露产生的环境风险。针对污染土壤的阻隔主要阻断皮肤直接接触、偶然摄入污染土壤或吸入污染土壤颗粒物等暴露途径，目的在于控制表层土壤扬尘和控制残留污染物向地下水迁移。

## 8.2 风险管控目标及现有技术

对于污染土壤来说，阻隔措施主要通过阻断以下暴露途径降低或消除人体健康风险：（1）防止人体与污染土壤的直接接触；（2）防止污染土壤的偶然摄入；（3）防止土壤颗粒物以扬尘形式进入空气。典型的阻隔措施应具备结构要素或厚度要素，或二者同时具备。结构要素主要依赖其固有的物理强度使人体与污染土壤的直接接触最小化，其类型有沥青路面、混凝土路面、建筑板及其他地基类型。厚度要素主要依赖材料的厚度、深度或体积特征减少人体与污染土壤的直接接触，主要类型有压实的粘土、绿化措施及清洁土壤等。目前相关文献中提到的污染土壤阻隔措施也称之为工程屏障、工程覆盖等，其中工程屏障指沥青、混凝土等结构元素，工程覆盖指厚度元素。

## 8.3 设计与建设注意事项

### 8.3.1 简介

除了阻隔系统设计与建设的一般技术要求，污染土壤阻隔措施的设计与建设还应考虑土地的最终利用类型如污染地块再开发利用为停车场、公园、道路等情形，阻隔系统应与开发建设合理衔接。

### 8.3.2 设计的基础信息

阻隔措施的设计首先需要对污染地块的表层土进行特征描述。设计所需的基础信息包括地块特征（如土壤类型、现有建筑物、地形地貌等）及土壤关注污染

物的浓度与性质等。地块调查应该描述土壤污染的水平及垂直分布范围。需考虑阻隔材料与关注污染物的化学相容性，选择合适的阻隔措施材料类型，确保控制措施安装后不易发生降解或不良反应。

### 8.3.3 有效区域与边界定义

地表阻隔措施的范围应当完全覆盖关注污染物浓度超过可接受风险值水平的区域。在边界确定时要考虑取样点的数量、数据变化性以及需要实施风险管控的范围。

### 8.3.4 设计组成

表层污染土壤的阻隔措施在某种程度上是一种建筑物。与建筑物的物理要素一样，阻隔措施的设计主要需考虑：①结构完整性的最小化；②合理的设计寿命；③适度维护。在设计过程中可能使用多种阻隔措施阻止多个暴露途径。比如某污染地块中暴露途径除了皮肤直接接触土壤外，还存在土壤扬尘的吸入，就需要混凝土地板、弹性膜衬层、地下气体收集系统或者土壤覆盖层结合使用以减少或消除两条暴露途径带来的风险。常见的阻隔措施如下。

#### （1）沥青路面、沥青屏障或沥青混凝土

沥青是成层铺设并利用专门建筑设备进行混合的分级砂卵石与液体沥青的混合物。沥青可分厚层（大于 5cm）和薄层（2.5-5cm）。厚层沥青可直接铺设在自然地面上。薄层沥青一般需铺设在更为粗糙的粒料层之上。

#### （2）混凝土路面

混凝土是分级砂卵石与水泥液体的混合物。混凝土通常用于建造水泥板或道路，一般铺设在厚度为几厘米的砂子或碎石层上。通常加入铁丝网、钢筋或其他掺合料防止初期固化及后期塑性收缩、干燥收缩、热裂解等造成的裂缝。表面混凝土板应加入空气吸附添加剂以减少严寒及霜冻天气造成的表面腐蚀。

#### （3）弹性膜衬层（FML）

FML 是一种渗透性较差、厚度较小的可阻止气体和液体迁移的人工合成膜。FML 可以从加工材料的卷轴上直接铺设或喷洒在半柔性层上以达到固化目的。FML 以碳氢化合物为基础、具有广泛的化学兼容性。广泛应用的 FML 包括 PVC(聚氯乙烯)、PCE(聚乙烯)，HDPE(高密度聚乙烯)等。FML 卷轴式铺设需要特殊的缝合设备来密封边缘，而喷洒式 FML 能形成无缝膜衬层。FLM 卷轴式铺

设的厚度较为一致，任何一种铺设方式都需要经验丰富的施工人员进行操作。由于 FML 本身无结构强度，通常与一种结构元素联合使用。另外在 FML 上还应铺设一层能抵抗紫外线辐射的覆盖层。

#### (4) 清洁土覆盖层

清洁土覆盖层由高渗透性的砂砾石与低渗透性的粘土组成。在阻隔措施设计阶段应该进行渗透性评估。覆盖层厚度主要取决于阻隔措施的预期目的，如果风险管控目的主要是减少皮肤接触或直接摄入土壤污染物，覆盖层的厚度应该达到业主、孩子、园丁等很难进行手挖的程度，土层材料不必进行分级。通常在阻隔措施的顶层增加可减少腐蚀的覆盖层，此层的土壤称之为顶层土，顶层土中应富含可促进植物生长的天然有机质。

#### (5) 石头覆盖

石头覆盖是一种由小型石料或回用混凝土组成的隔离皮肤直接接触污染土壤的被动控制方式。这种方式适用于干旱条件下阻止污染物的暴露和腐蚀。

### 8.3.5 规模和材料规格

表层阻隔可以设置厚度为 0.6-0.9m 的土层，或者设置一种结构元素（沥青或混凝）。另外，阻隔措施不能存在过多的开口或非均质性物质。

#### (1) 规模

表 4 介绍了表层土壤阻隔措施的规模要求及一般设计注意事项。

#### (2) 土壤性质

采用的土壤性质需考虑土地再开发利用计划。用于景观美化的顶层土能提供有利于植物生长的覆盖层，若覆盖层成分为未分类的干净土及石头，则该覆盖层可维持阻隔结构的稳定性并限制污染接触。

#### (3) 土壤层厚

与污染土壤接触的土层厚度一般设定为 91.4cm，这是因为与沥青或混凝土相比，土壤相对容易移动或穿透。对于石油类碳氢化合物来说，小于 91.4cm 厚度的土壤层就能有效减少土壤蒸汽的挥发。部分管理机构认为小于等于 76.2cm 的土壤厚度也可以接受。设计元素的最小结构完整性必须加以考虑，比如 5cm 厚的混凝板能有效减少直接接触带来的风险，但如果作为结构单元来考虑就不能保证其有效性。因此在考虑预期使用、设计寿命及有效维护时，要求混凝土厚度

至少为 7.6cm。

#### (4) 其他注意事项

在选择阻隔措施时需要考虑的其他事项包括：下覆层（垃圾堆、软土）带来的控制层沉降、地震条件、冰冻深度、径流和腐蚀控制、坡度较大（大于 1/3）、与有毒下覆材料的兼容性和下覆材料散发的气体管理。

表 4 受污染土壤阻隔措施的一般设计注意事项

阻隔措施	暴露途径			达到控制目标需要的厚度 B	备注
	直接接触	蒸汽吸入	由土壤向地下水渗透		
1.沥青	P	S	S	2.5-6.7cm 沥青层,下层为 10-15cm 的基底层;或 10-15cm 全深度沥青	需要充足的底基层
2.混凝土	P	S	S	7.6-10cm 混凝土层,下层为 10-15cm 基底层	需要充足的基层
3.弹性膜衬层 FLM	S	P	P	FML 衬层与结构单元结合	必须与结构单元结合
4.土壤覆盖层					
粘土	P	P	P	45.7-91.4cm	低渗透性 (小于等于 1E-06cm/s)
未分级干净土	P	S	—	45.7-91.4cm	土壤由粘土-砂土组成 (渗透性 1E-03~1E-06cm/s)
未分级干净土	P	P	S	91.5-152.4cm	土壤由粘土-砂土组成 (渗透性 1E-03~1E-06cm/s)
植物生长层	P	S	—	45.7-91.4cm	土壤可能含有机表层土
植物生长层	P	P	S	91.4-152.4cm	土壤可能含有机表层土
石头覆盖层	P	—	—	45.7-91.4cm	一般孔隙度较大,渗透性较好的材料 (<1E-03cm/s)

注: P 表示主要控制目标, S 表示次要控制目标, —表示无合适的控制措施; B 所列数值表示在设计、规范限制前提下的规模。

### 8.3.6 处理系统

部分阻隔措施如植物修复或湿地处理系统可用来处理残留污染组分，这些处理系统需要进行专门的设计。

### 8.3.7 施工规范

施工规范可直接指导地表及地下工程控制措施建设，建设的工业标准可以验证其结构质量。影响阻隔措施有效性的关键因素包括路基预备、两种不同屏障或覆盖层间的连接。

#### (1) 路基预备要求

阻隔措施等级必须能够支持设计元素。在进行阻隔措施前，要进行地块清理及植物清除。路基面要划分到建设要求的等级界限内，等级划分时要考虑是否存在污染土壤以避免污染扩散，对于软、湿路基来说要加强路基强度，并注意监测凹陷现象；如果软、湿路基凹陷现象严重，则需要移除、替代或压实湿软部分。

#### (2) 两种不同控制措施的联合使用

为保证两个元素间的充分衔接，必须充分考虑两种不同控制措施的连接问题。例如，在某污染地块沥青和混凝土控制措施相邻区域，为保证沥青形成一个稳定的、直线特征，必须首先铺设混凝土层；为减少潜在腐蚀性及维护事项，要增加土壤覆盖层或者土壤屏障；播种、铺草皮或其他种植都有助于减少表面侵蚀以及维护活动。阻隔区域与相邻区域间的逐步过渡要纳入建设过程，如超过阻隔覆盖区域的地表要逐步回降至原高程。

### 8.3.8 文件材料

用户需要提交竣工图或者与建设记录相符的图件。文件包括：阻隔措施建设前后的地面坡度、阻隔措施照片、沥青和混凝土物理性质试验、阻隔措施的位置与面积等。在未来土地使用权发生变化时，污染地块阻隔措施的建设与维护相关情况应当同时通知新的土地使用者。

## 8.4 性能监测

在控制措施设计寿命的整个阶段都要维护其完整性，因此需要定期进行监测与维护，并将其作为土壤阻隔设施性能评价的重要资料。

## 8.5 维护和操作事项

土壤阻隔措施的例行检查是常规维护计划的重要内容。例如，阻隔措施交接处容易产生较大裂缝或缺口，使得其预期性能大打折扣，这种情况下就需要对阻隔系统进行维护，如使用与阻隔措施相容的联合封口机来修复裂缝或缺口。弹性膜衬层的完整性是保证控制措施性能的重要因素，因此破损的弹性膜衬层要及时更换。

土壤阻隔措施维护活动要遵守职业安全与健康管理部门及相关地块风险管理要求。地块巡视员和建设工人是安全维护工作的重点。表 5 总结了监测频率及典型维护活动。

**表 5 污染土壤阻隔措施的性能监测与维护**

覆盖层类型	典型设计寿命 A	监测频率 B	纠偏限度	典型维护活动
1. 沥青	10-15 年	一年一次	宽裂缝或广泛的裂纹分布	裂缝闭合修复
2. 混凝土	20-30 年	两年一次	宽裂缝；结合处裂开	更换密封剂、水泥浆或裂缝修补
3.弹性膜衬层 FLM	50-100 年 C	一年一次	FML 上层土壤扰动；结构元素分级沉降	更换土壤、破损 FML；纠正引起等级沉降的条件
4. 土壤覆盖层				
粘土	20 年 D	半年一次	腐蚀严重	修复裂缝或腐蚀凹槽
未分级干净土	20 年 D	半年一次	腐蚀严重	修复裂缝或腐蚀凹槽
未分级干净土	20 年 D	半年一次	腐蚀严重	修复裂缝或腐蚀凹槽
植物生长土	20 年 D	半年一次	腐蚀严重，植物生长缓慢	修复裂缝或腐蚀凹槽；重新评估植物类型并重植
石头覆盖层	15 年 D	半年一次	沉降造成裂口或部分地方覆盖层稀疏或下覆土层分级沉降	添加填充物质

注：A 典型设计寿命包括例行常规检查及维护活动；实际设计寿命要大于此值。

B 监测频率、纠偏限度要与实际地点、气候、土地后续利用及土地未来使用程度相关。

CFML 的设定寿命为 30 年，因此可预计最少 50 年的设计寿命。

D 尽管石头覆盖层的设计周期为 50 年，但其维护寿命大约为 15 年。

## 9 针对地下水污染阻隔的设计施工及维护

### 9.1 简介

受污染地下水如果不采取风险管控措施，污染物会逐渐迁移、扩散。当水位上升或者地下水通过地基渗入时，受污染地下水还会对土地、现有建筑、新建筑产生影响。如果地下水位持续较高，建筑开挖活动可能也会接触污染地下水。当地下水进入地下结构、雨水滞留池或其他设施中，污染地下水可能被人接触到如偶然摄入或直接接触。受污染地下水还会造成财产损失（如地下水污染物造成光缆线路破坏）。本章将介绍几种有效减缓污染地下水迁移扩散以及对地下建筑及设施造成影响的技术。

### 9.2 风险管控目标及现有技术

#### 9.2.1 预期目标

采取有效的阻隔措施可避免受污染地下水迁移扩散或进入地下结构、雨水滞留池或其他设施中。

#### 9.2.2 现有技术

可用技术包括：①在建筑物或其他设施中设置屏障或密封；②在地下水含水层中设置拦截器或截留系统。本章重点介绍的阻隔措施包括渗流屏障、密封公用线路、拦截墙或沟渠、泥浆墙以及可渗透反应墙（PRB）。

##### （1）渗流屏障

非渗透幕墙或土工或粘土衬垫 GCL 可以防止污染地下水渗滤到地基中。无论是否受到污染，地下水或雨水径流通过地基墙的渗漏对建筑物地基会造成很大的影响，渗漏原因包括：坡度、高梯度滞水、持续洪水。

##### （2）密封公用线路

使用不同的液体或膜密封剂封闭可导出污染地下水、雨水等的公用线路、沟渠或拱顶室。公用线路如路基电线及通信线路（电缆、电话、网络等）一般密封在金属或混凝土拱顶室中，以防止土壤、地下水渗透；电力拱顶室如路基变压器拱顶室一般都是浇筑混凝土地板、钢筋混凝土或混凝土砌块墙、混凝土或钢筋天花板并至少有一个出口的封闭房子。在长期降雨、土壤腐蚀或污染物（降解线路或拱顶室）作用下，上述建筑可能发生倒塌，甚至会将污染地下水或雨水导向附

近建筑或地下拱顶室中。

### （3）拦截墙或沟渠

在潜在风险受体的上游设置永久地下水修复井或沟渠，对污染地下水进行截留。地下水修复井是利用抽水法截留关注污染物，而沟渠法是将污染地下水导流到无风险受体的区域。

### （4）泥浆墙

泥浆墙是指在污染羽周围挖掘后回填后，由惰性、渗透性较差物质构成的深、窄墙体。泥浆墙作为拦截屏障，限制污染地下水迁移或将污染地下水流途径偏离建筑物地基。通常情况下泥浆墙开挖至非渗透基岩层中，泥浆一般是在中心工厂混合，然后通过水泥搅拌车运到地块，或者在现场混合。

### （5）可渗透反应墙（PRB）

PRB 是一种被动的原位污染地下水修复技术，可以转移或容纳污染地下水。通过开挖回填具有生物或有机反应性的渗透或半渗透反应介质，使得 PRB 中的微生物、氧化性或还原性物质能降解地下水中的有机污染物。另外，添加其他介质或添加剂也可提高 PRB 效率。

## 9.3 设计与建设注意事项

### 9.3.1 设计基本信息

为评估可用的污染地下水控制技术，首先需要了解地块特征、环境介质中关注污染物浓度及其性质等基本信息。地块特征可采用适当的修复调查方法进行描述。选择及设计污染地下水风险控制措施需要的信息如下：

#### （1）场区浅层地层

首先要详细调查地块土壤、地下水含水单元情况等，包括土壤剖面、基岩地质分析、土壤渗透性试验、水力传导系数及地下水水位波动情况（监测降雨或潮汐对地下水水位标高及水流的影响）。地块的地理物理特征会影响渗滤屏障的类型及有效性。

#### （2）关注目标污染物

需要调查土壤或地下水中关注污染物类型及其浓度，保证建筑材料不会发生降解或不良反应。地块调查应该描述地下水或土壤中污染物分布情况。

### (3) 中试试验

中试试验有助于渗滤墙或其他技术设计，以保证建筑材料能达到预期目的，并对控制措施性能加以评估。另外如果必要的话，中试试验结束后装置可以全部去除以恢复初始地块条件。

#### 9.3.2 设计概况

对目前可用技术（如渗滤墙、封闭公用线路、截留墙及沟渠、泥浆墙和 PRB）进行阐述，并介绍了每种技术的可用性及与污染地下水风险控制措施相关信息。

#### 9.3.3 渗滤屏障

##### (1) 有效区域及边界定义

渗滤屏障可以接触建筑物低于水准面的部分及其他潜在风险受体，污染地下水在通过屏障截面时才发挥其控制效率。竣工图、建设相关的图纸、渗滤屏障位置及建设相关的描述记录都有助于定义有效边界，同时需要标记地块下存在泥浆墙。

##### (2) 设计组成、规模、材料及安装要求

渗滤屏障由非渗透墙或膜组成，将污染地下水导流绕过建筑物水准面下部。考虑到天气原因或潮汐对地下水流影响，渗透屏障通常低于建筑物地基。渗透屏障还可以与前面提到的技术结合使用以提高控制效率，如果根据 ASTM 或其他工程标准安装，渗滤屏障至少可运行十年；同样还可以结合排水沟、沟渠等其他技术加快污染地下水导流。渗滤屏障类型（安装方法、结构组成及屏障规模）因地而异。目前可用的渗滤屏障包括：

a) 幕墙—幕墙包括各种固体、填埋材料，如耐腐蚀钢板或预制混粘土/膨润土平板。反应屏障也可以幕墙的方式进行原位浇筑，这种类型的反应屏障只能沿直线安装，并且距建筑物要足够远且无建筑施工活动。

b) 膜—单层防水膜的安装需要一层非渗透膜的粘附以防止污染地下水入侵。这层膜类似于用于控制垃圾填埋场渗滤液的土工合成膜衬层（丁基合成橡胶、乙烯丙烯二烯 EPDM），用强力防水胶水将这层膜一般粘附在地基墙的外面，其运行时间可达几十年。

##### (3) 处理系统

渗滤屏障运行中不必收集和处理污染地下水。

### 9.3.4 密封公用线路

#### (1) 有效区域及边界定义

密封公用线路对拱顶室、管道或其他公用导水管极为有效。竣工图纸、与建设记录相关的图件或描述密封处位置设计条件的记录有助于判定有效区域。

#### (2) 设计组成、规模及材料要求

沟渠密封剂必须抵抗地下水流腐蚀，并且尽量密封所有孔隙以免污染地下水或雨水渗漏，比如用于沟渠鞍的膨润土必须要填充管线上所有孔隙；密封材料不能与地下水或雨水径流中的关注污染物发生不良反应；密封剂渗透性较差不能防止地下水或雨水渗入公用导水管中；沟渠可能被非渗透膜包围如 EPDM 或丁基衬垫被粘土或其他低渗透土壤包围。

#### (3) 处理系统

密封公用通道不需要进行污染地下水的收集和处理。

#### (4) 安装要求

管道或公用沟渠一般使用非渗透材料进行回填，防止污染地下水影响管线。用于公用线路密封的技术之一是沟渠塞，沟渠塞是一种可定间隔设置在沟渠中的永久性或暂时性屏障，当沟渠坡度超过某一数值或者需要开放某一段沟渠时，这种方法极为有效。沟渠塞有以下两种安装形式。

a) 沟渠隔断器。它涉及到半渗透回填材料的布置，半渗透材料能预防由地下水水平运动带来的沟渠腐蚀。暂时替代物如土护堤、干草捆或沙袋等可用于公用线路的安装或维修，安装简单并易于拆除。非渗透材料如粘土、混凝土或膨润土泥浆可用作永久性耐蚀屏障，还可以稳定建筑结构，防止下沉。沟渠隔断器还可以安装在某些需要隔离水的特殊区域（需要脱水）。

b) 沟渠鞍。沟渠鞍的安装方式与 a) 类似，它是一种非渗透结构，可防止地下水渗漏。沟渠鞍一般由膨润土或粘土泥浆组成，密封性良好。

### 9.3.5 截留墙及沟渠

#### (1) 有效区域及边界定义

截留井及沟渠通常对可原位或异位迁移影响潜在风险受体的特定区域污染地下水有效。竣工图及与工程建设相关的图纸有助于判断井或沟渠的安装。

#### (2) 设计组成

截留井的设置要包含最大范围内的污染羽，通常情况下单个截留井或截留井组可用于原位或异位修复；截留沟渠（不管开放或封闭）是用来截住线性、非渗透沟渠中的污染地下水，截留沟渠将地下水导流绕过位于含水层单元的地块或者将地下水导向修复系统如渗透反应墙。

### （3）材料选择

建筑材料必须与关注污染物相容，且满足当地规范准则的相关要求。

### （4）处理系统

污染地下水的收集及处理是截留井系统的组成部分。污染地下水在重力作用下，并不能避开潜在风险受体，这种情况下截留沟渠就涉及到污染地下水修复工作。除了抽水管和收集管外，也可去除地下水中的关注污染物（汽提法、颗粒状活性炭吸附等）并通过排水口排泄。

### （5）安装事项

对于截留井来说，安装事项包括井的数量及位置，钻井方法、井深、筛孔间隔、井屏及套管材料、直径，筛孔大小、钻井流程及表面处理等。对于截留沟渠来说，其安装事项包括开挖方法、规模（长度、宽度、深度）、回填物质及颗粒大小。对于上述二者来说，安装信息包括抽水泵大小、类型、连接、安装深度及收集管材料及测试。

### （6）泥浆墙

a) 有效区域及边界定义。泥浆墙可以接触建筑物低于水准面的部分及其他潜在风险受体，污染地下水在通过截面时才发挥其控制效率。竣工图、建设相关的图纸有助于定义有效边界。需要标记地块下存在泥浆墙。泥浆墙主要针对位于非承压含水层中污染地下水的水流控制，不适用于承压含水层或基岩。基岩裂缝使得污染地下水垂直迁移，从而污染深层地下水。

b) 设计组成。泥浆墙是开挖一条窄小沟渠，并将非渗透泥浆，如开挖土与膨润土的混合物进行回填。如果泥浆墙包含整个污染羽，就需要在泥浆墙中设置一个或多个地下水修复井，一定数量的恢复井可用来维持内部的水力梯度，减少泥浆墙内部的水力堆积并避免关注污染物穿过泥浆墙。

c) 规模、材料要求。泥浆材料至少要降低 10-15cm 才能放置在沟渠中。泥浆的相对渗透率大约为  $1E-05\text{cm/s}$ ，固化后的无侧限抗压强度 UCS 至少为

103.4kPa。

①渗透率。硅酸盐水泥含量越高，泥浆混合物的渗透性就越大，在加水形成沉陷的过程中，孔隙大小也随混凝土收缩-膨胀势能的增大而增大。其他物质的添加能够降低泥浆渗透性，但是会增大运行成本。泥浆墙应该成层放置在渗透性较小的基底中，避免形成支路（地下水沿着高渗透性土壤迁移并绕开泥浆墙）。

②无侧限抗压强度 UCS。混凝土含量越高其 UCS 值也越大，但是高含量混凝土也会降低泥浆墙的弹性，在冲击或剪切负荷作用下会产生裂缝。

d) 处理系统。如果泥浆墙中设置一个或多个恢复井，需要收集并处理污染地下水。

e) 安装要求。在安装过程中，需要确定泥浆墙的安装深度和规模大小。另外还需要对回填材料的渗透性及 UCS 进行现场试验。泥浆墙建筑方法包括以下几种。

①土壤-膨润土墙 SB。SB 墙回填材料是开挖土壤与混凝土的混合物，其低渗透性主要来自开挖土壤中的天然粘土及膨润土。SB 墙中膨润土含量与天然粘土含量成反比，其渗透性可达到  $1E-06\text{cm/s}\sim 1E-07\text{cm/s}$ 。这种墙成本较低，开挖土可被充分利用。

②混凝土-膨润土墙 CB。CB 墙是硅酸盐混凝土与膨润土的混合物，形成一种类似粘土的泥浆，其渗透性大小与混凝土、膨润土及混合物中粉煤灰含量成正比，同时要低于 SB 墙的渗透性。由于地块条件限制或无法得到合适的用于 SB 墙的膨润土材料时，可采用 CB 墙。CB 墙同样适用于高渗透性、局部松散的地块。CB 墙能填补砂层或卵石层土壤中的大部分孔隙，从而阻断污染地下水迁移。

③土壤-混凝土-膨润土墙 SCB。SCB 墙是最近发展泥浆墙技术，结合了 SB 和 CB 墙的工程特点，目的是实现较小的渗透性及较大的强度，其建设过程与 SB 墙类似，将混凝土加入到土壤-膨润土的混合物中以提高墙体强度及弹性。一般其渗透性为  $1E-06\text{cm/s}$ ，UCS 强度为 1379kPa。

④塑性混凝土分界墙 PCC。塑性混凝土是强度稍小、含有少量膨润土的混凝土，塑性混凝土能快速膨胀从而防止土壤沟渠及墙体底部积聚沉积物的坍塌。PCC 墙是利用砂土或粉煤灰对相互连接的面板进行施工，使连接处密封良好。

⑤深层土混合墙 DSM。DSM 分界墙是混凝土和膨润土的混合物，其强度与

渗透性与 SCB 墙类似。但是考虑到水泥浆的施工性，DSM 泥浆要以液体方式建设而非固体。

### 9.3.6 可渗透反应墙

#### (1) 有效区域及边界定义

PRB 墙通常在整个受污染地下水横截面有效，可能会接触建筑物的部分地下基础或其他潜在的接受体。图纸记录、施工记录或其他描述性记录可记录 PRB 墙的位置、建筑细节。

#### (2) 部件设计

PRB 墙通过可渗透材料或半渗透性材料回填到沟渠中，使回填材料与地下水中的关注污染物反应，达到移除或降解挥发性有机物、半挥发性有机物或重金属的目的。

#### (3) 尺寸和材料说明

建筑 PRB 墙的基质取决于需要处理的关注污染物，基质包括混有铁屑的土壤、泥煤苔、氧化/还原材料、络合剂、零价粘接材料、颗粒活性炭（活性炭）或生物反应泥浆。沟渠的宽度或深度根据受污染地下水关注污染物的浓度及安装寿命要求确定，一般高体积的基质不一定能保证较长的 PRB 的寿命。

#### (4) 处理系统

PRB 是一个处理系统，受污染地下水从 PRB 墙的地下水流向上游进入 PRB，处理后的地下水通过 PRB 墙则从下游流出。

#### (5) 安装说明

按照如下提供的内容考虑 PRB 的安装。

埋入式安装—埋入式安装时一次性的 PRB 安装方式：在沟渠中回填化学或生物反应材料，在极端的条件下考虑工程性能，否则沟渠中不再补充或替换新的回填材料。

替换式安装—替换式安装也称“盒式安装”，设施包括类似割缝槽或拦截井装置，将反应基插入盒内处理受污染地下水。

漏斗和门安装—漏斗和门装置包括一个不透水阻隔墙（如泥浆墙）和一些选定的门，使受污染地下水通过“漏斗”被动修复。泥浆墙必须经过渗透测试证明是不渗透的，或使用专业的细菌或高碳飞灰进一步降低其渗透性，以确保没有受污

染地下水从门的旁路通过。

## 9.4 性能监测和维护

### 9.4.1 渗流阻隔

一次性安装的渗透阻隔墙不需要操作和维护，每个类型的渗透阻隔墙需要考虑的问题如下。

(1) 帷幕墙。通过监测设置在帷幕墙地下水流向上游及下游的监测井水位，来监测帷幕墙的性能。在设计阶段，需根据监测的地下水水位等值线，确定地下水流向连续远离已确定的潜在受体和任何新的受体。

(2) 膜。加入膜安装在下面，需要进行检查。如果临近建筑的开挖导致膜破坏，则需要维修或更换。

### 9.4.2 装置密封线

地上任何装置密封线都应该检查评价密封的连续性及其完整性，如果安装的有泄露检查传感器，应该检查传感器的运转是否正确。

### 9.4.3 收集井和沟渠

如果安装的有泵和处理系统，其运转应该定期检查。定期收集并分析地下水样品，评价系统运转效果及是否需要继续运行。为了维持地下水收集率可以补建收集井。

### 9.4.4 泥浆墙

监测泥浆墙上、下游的地下水监测井的地下水水位评价泥浆墙的效果。在设计阶段，需根据监测的地下水水位等值线，确定地下水流向连续远离已确定的潜在受体和任何新的受体。如果安装的有泵和处理系统，应该定期检查其运行。定期收集分析地下水样品评价系统运转效果及是否需要继续运行。为了维持地下水收集率可以补建收集井。

### 9.4.5 渗透反应墙（PRB）

如果受污染地下水要求采用 PRB（即被动修复地下水中低维护和高效率的修复方法）进行原位修复，无需考虑地上设施、主动泵和相关的处理费用。盒式 PRB 的设施更换需要适度的运行、管理成本，同时截止阀和管道的连接也增加

了技术的成本。漏斗和门装置必须进行彻底测试确保防渗墙的不渗透性。未受污染的地下水从门旁通过，门内为需要修复的污染地下水，这些都需要远期规划及工程研究。

## 10 对土壤或地下水室内蒸汽入侵阻隔的设计施工及维护

### 10.1 简介

污染土壤、地下水中的有毒有害气体挥发至室内空气导致的健康风险得到越来越多的关注。本章介绍了防止污染土壤和地下水中气体挥发至室内空气的阻隔措施。

### 10.2 风险管控目标及现有技术

#### 10.2.1 控制目标

污染地块上，室内关注污染物气体浓度超过可接受的风险值时，一般具有以下特征：①关注污染物气体必须接近建筑物地基；②存在至少一条进气通道；③存在驱动力使得关注污染物气体进入通道中。一种有效的阻隔措施要能除去上述一种或多种途径，才能防止关注污染物气体进入建筑物内或使关注污染物气体浓度降低到可接受水平。

#### 10.2.2 可用技术

降低室内关注污染物气体浓度的方法主要分为两类：防止关注污染物气体进入建筑物和除去已经进入到室内的关注污染物气体。大多数情况下前者是最佳方法。

##### (1) 进气预防

防止关注污染物气体进入室内的技术包括：①密封土壤气体进气通道；②设置被动的气体屏障；③建筑增压系统（减少或逆转气体进入的驱动力）；④土壤减压系统，能在气体进入建筑物前进行有效稀释或驱散。土壤减压系统包括地下平板减压方法、块墙/干墙减压方法等。除了上述方法，直接抽气是防止关注污染物进入的有效方法，抽气产生的负压能将土壤中气体去除。

##### (2) 室内关注污染物去除

去除室内关注污染物的方法有①室内通风；②室内空气清洁（吸附剂、气体洗涤器、光触媒氧化等）。

### 10.2.3 可用技术性能

很多情况下，需要去除 99.95% 的关注污染物才能达到可接受风险值水平。对于目前可用的去除技术来说，上述目标很难达到。经验表明，采用封闭进气通道的方法很难去除超过 80% 以上的关注污染物，去除率一般仅为 30%-90%；室内加热通风技术去除率一般不超过 75%；建筑物底板加压和土壤减压能使关注污染物气体浓度大幅度下降，保持整个建筑物处于正压状态，但并不能有效防止关注污染物的进入，对位于地基以上的区域加压（较难操作）能有效防止关注污染物气体进入。

（1）如果必须实现关注污染物去除率超过 80%，可以采用土壤减压系统方法。土壤减压是迄今为止已得到证实的最有效的室内关注污染物去除方法，其去除机制包括：① 逆转驱动力方向，使空气由室内向土壤运动；② 稀释土壤气体中关注污染物的浓度。本章重点介绍了土壤减压系统设计、施工、监测及维护事项。

（2）如果关注污染物去除率较低就可以达到风险管控目标，可以考虑其他技术，如室内热通风、封闭进气通道或土壤通气等。对于新建筑物来说，可使用被动屏障法；对于存在土壤暴露的狭小空间的建筑物，可采用子膜降压系统。

## 10.3 设计与建设注意事项

### 10.3.1 设计概况

设计参照 5.2 一般规定进行。

### 10.3.2 设计基本信息

降低室内空气污染的方法有很多种，其选择受很多因素影响，包括：① 关注污染物的起始浓度及去除目标值；② 建筑物是旧建筑物还是新建筑物；③ 系统性能的预期目标；④ 建筑物的设计和结构特征。设计过程中需要考虑以下几个方面的因素。

#### （1）进气通道

为评估阻断各种气体入侵技术的有效性，首先需要明确土壤气体可能的进气通道。因为不管对于旧建筑还是新建筑物来说，想要设计出最优的控制方案，就必须了解气体入侵的原理。

a) 压力差。含有关注污染物的土壤气体能通过建筑物与土壤间的任何缝隙

进入建筑物内部，因为通常建筑物内部的压力要稍小于土壤周围的压力，在压力差的作用下土壤气体能迁移到建筑物内部。

b) 扩散。扩散是气体侵入的第二个作用机制，如果土壤气是关注污染物的唯一来源，那么室内关注污染物稳定状态下的浓度取决于进气速率与室内通风或其他作用（如吸附或化学反应等）速率间的平衡。

c) 地下水。如果住户用水来自单井或小社区水井，水中关注污染物的挥发使得室内也可能存在关注污染物气体。本章节相关内容假定建筑物内的用水并没有受到污染。

d) 其他来源。包括消费品、建筑材料、清洁产品、汽车车库、割草机以及储存的化学品等。上述来源释放出的关注污染物会使得室内关注污染物气体浓度测定更加困难，本章暂不考虑这些来源，仅考虑来自污染土壤或地下水中关注污染物的去除及预防。

## （2）驱动力

除了识别土壤气进气通道，还要明确驱使土壤气体向室内流动的驱动力特征，包括天气原因、建筑物设计特征以及居住者活动等。

a) 效应。室内与建筑物外部间温度变化引起的压力差会驱动空气流向建筑物内。室外低温是室内负压的重要原因，暖空气易向上运动并通过高处结构（楼上窗户或渗入顶部阁楼）向室外流动。为补充室内暖空气损失，室外空气及土壤气会通过低处结构的门窗及建筑物框架和地基墙间的缝隙进入室内，进入室内的冷空气会慢慢变热，然后再慢慢上升至高处结构并向外迁移，而冷空气继续补充，不断循环上述过程。一个封闭房子的外形可以想象为一根烟囱，不论什么时候只要室内温度较高，空气就会通过烟囱向外流动，因此这一过程也称之为热堆效应。除了室内外温度差，风是另一个与天气相关的、驱动气体流动的因素。沿着屋顶和建筑物的顺风面形成了一个低压区，根据空气入侵途径不同（屋顶或顺风面），房屋部分区域压力慢慢下降。

b) 建筑物设计效应。室内火炉加热会使空气产生对流运动，从而使得室内热空气向室外流动，室外冷空气进入室内，因此在建筑设计时需要注意此类情况。如果把房屋的上部看做烟囱的盖子，那么楼层间的地板就可以看做烟囱中的气流调节器。正如建筑物顶部外壳的开口能允许热空气向外流动，楼层间地板开口也

能加速室内热空气的向上流动，从而加速了其最终迁移速率。地板开口可看做室内气流流动的支路，而不必经过气流调节器向上运动。因此如果关闭这些支路就能减缓热空气向外流动，从而室外冷空气的入侵流动也会随之减缓。

c) 建筑物地下结构会显著影响进气通道的数目和类型。地下结构主要分三类：①地下室，其底板低于水准面；②水准板，底板位于水准面上；③蠕动空间，底板高于水准面。实际建筑可能会结合三种不同的地下建筑结构。比如有些地下建筑包括地下室及水准板，或者水准板与蠕动空间结合。地下结构类型的划分有时会比较模糊，当建筑物的最低点上构建了一个低于水准面的地基墙，这种情况下该地下结构既具有地下室的特征，也具有水准板的特点。

d) 室内土壤关注污染物的浓度受很多因素影响，如土壤气中关注污染物浓度、土壤渗透性、房屋减压程度、进气通道类型及数量和室内通风速率等。尽管进气通道与具体的设计特征及建筑方法有关，但带有地下室的房屋与土壤接触面积较大，其进气通道也可能最多，因此可以预料有地下室的房屋其污染风险值较大。而蠕动空间并不向生活区域开放，因此在土壤和生活区域间存在一个通风良好、压力不变的缓冲区，所以对于带蠕动空间的房屋来说，污染风险大大降低。带水准板地基的房屋其污染风险处于两者之间。通常都是在现场观测上述三种模式，但很难达到理想的蠕动空间通风条件，所以有时候蠕动空间中关注污染物浓度要高于隔壁地下室中关注污染物浓度，同样的水准板中关注污染物浓度有时高于隔壁地下室中关注污染物浓度。

e) 住户活动效应。室内很多家用电器将空气驱赶到室外，从而造成建筑物形成低压状态。大多数建筑都有将室内空气排入室外的风扇如窗户、阁楼、抽油烟机 and 浴室排风扇等，衣服烘干机也是排气扇的一种，它可以将湿空气排入室外，甚至炉灶也对室内空气流动有影响，因为燃烧会消耗室内空气。

### (3) 已有建筑

对于已有建筑来说，在风险管控措施实施前，可进行相关测试，为措施选择与设计提供依据。测试手段主要有：

a) 视觉观察。视觉观察主要识别可能的土壤气体进气通道，驱动力的主要特征以及影响风险管控措施选择、设计的其他结构特征。

b) 气体运动。选择底板减压作为阻隔措施时，需要测量混凝土底板下的压

力场范围，测量结果可为底板通风管位置的选定、风扇容量及通风管直径等参数的确定提供大量信息。

c) 渗透速率，即自然渗透速率的测量（通过建筑外壳的有效渗透面积）。该值的测定有助于选择合适的风险管控措施提高通风速率。通风技术的有效性主要取决于系统安装的通气速率，通气速率的确定有助于判断土壤气是否是室内污染的唯一来源。

d) 压差。室内外压力差、室内两点间压力差或者土壤与室内间压力差的测量有助于判断测试中驱动力的大小，进而判断系统需要补充压力的地点。

#### (4) 新建筑

新建筑可在建设过程中分步实施多种措施控制关注污染物气体存在的风险。如果建筑物竣工后发现高浓度关注污染物气体，可以开展必要的监测以启动有效阻隔措施。与建筑物竣工后进行污染控制相比，在建设阶段分步实施控制可以节约 20%-40% 的成本，有效性也更高。如果监测到土壤气关注污染物高浓度水平，可以考虑以下控制方法。

a) 消除土壤气进气通道。为消除混凝土楼板裂缝对土壤气进气通道的影响，可采用含水量调节、增塑剂、密封地板和地基墙周围可能存在的缝隙、给中空的地基墙加盖等方法。

b) 避免热旁路。减少房屋降压及室内蒸汽入侵的方法包括：避免穿过房屋的热旁路、为某些燃烧器具准备外部空气供给装置、确保蠕动空间内足够多的通风孔。

c) 安装排气管。在建筑物建设阶段可以提出相关措施，以保证即使建筑物建成后关注污染物气体浓度仍然超标，也能及时处理，进行有效的底板虹吸。措施包括在地下板下面铺设 10cm 厚的干净碎岩层或在粒料中设置 30cm 长的 PVC 管，并加以封口等。

### 10.3.3 有效区域及边界确定

阻隔措施位置及建设方案的确定需要参考竣工图或与建设记录相关的图纸。为避免污染土壤被挖掘，污染土壤区域需要使用土工织物、水平塑料白围栏、水平链状警示带或其他惰性材料等进行边界划分。

### 10.3.4 设计组成、规模、材料规范及安装规范

阻隔措施设计的关键在于确定虹吸口数量及位置。对于一个特定地块，如果经过评估，认为土壤减压系统能有效降低土壤、地下水污染气体带来的风险，就需要开展设计确定机械组件大小，并判定虹吸口数量及位置。土壤减压系统的主要机械组件包括风扇、收集管以及警报装置。底板之间压力场范围的测量结果是确定虹吸口位置的最有效信息，如果底板之间通风较差，则需要较多数目的虹吸口。

### 10.3.5 处理系统

处理系统一般不与土壤减压系统同时安装。对于入侵关注污染物来说，去除技术包括吸附剂、气体洗涤器或光触媒氧化等。

### 10.3.6 文件记录

整个控制措施系统需要加以记录以备将来维护查询。维修人员可以参考操作手册（包括竣工图或与措施建设相关的图纸）读取相关计量器或其他测量设备数据。

## 10.4 性能监测

### 10.4.1 安装后诊断试验

控制措施安装后要进行诊断测试以保证长期正常运行。诊断试验方法包括：

#### （1）视觉观察

观察控制措施是否安装正确。对于土壤减压系统来说，需要确认管口连接处是否紧密，通常可采用烟棍方法进行测试。烟棍能散发一小股烟气，烟气随空气流动，这样就可以检查管口连接处的密封情况。

#### （2）机械系统运行

对于土壤减压系统和热回收通风系统来说需要进行压力和流量测试。测量结果可显示不同控制措施的安装和运行过程中存在的问题。

#### （3）机械系统运行

如果安装了底板降压系统，需要进行地下板压力场测量。根据测量结果可以了解平板下的压力场变化。

#### (4) 流量测量

如果安装了土壤减压系统，需要测量火炉、热水器及其他燃烧设备的烟道流量，以保证减压系统不会导致室内低压从而影响其他燃烧设备的空气回流。

#### (5) 防火设施

检查防火设施的安装情况。

#### (6) 膜安装

检查膜安装是否正确，以及膜系统中的密封情况。

#### (7) 警报

确定警报装置安装及运行情况。

#### (8) 文件资料

确认系统资料是否标记完整，保证将来维护工作的正常进行。文件资料应明确标明计量器及警报系统等相关参数的含义。

### 10.4.2 关注污染物浓度

控制措施安装后，应连续监测几天关注污染物浓度以测试控制措施的有效性，随机取样的时间间隔不能太短。控制系统性能监测必须考虑地块背景，如除土壤气体外的室内关注污染物来源。关注污染物浓度的连续稳定下降证明控制系统性能稳定可靠，如果最初短期监测显示关注污染物浓度不断下降，那么就需要进行长期测量（直到冬季），验证控制措施在寒冷条件下的系统性能，然后每两年进行阶段性监测。

## 10.5 维护和操作事项

减压系统的主要机械组成是风扇和警报装置（检测风扇是否正常工作），要经常检查警报装置（连接到感应器上的灯与蜂音器）以确保风扇正常运转。但有时风扇可能在运行但是并不充分，尤其是在风扇利用电容器启动的时候。事实证明如果电容器发生损坏，有时风扇还可以持续运转一段时间，不过效率相对较低，其低效率通常是测量虹吸管的压力减少量或管中流速减少量。系统安装者要告知维护人员必要的维护事项及系统正常运行描述。常规维护事项包括以下步骤。

- (1) 检查警报装置（灯或蜂音器）是否正常启动；
- (2) 检查警报装置运行是否正常；
- (3) 检查风扇是否运行正常（感觉振动及发热，听轴承磨损）；

- (4) 检查流量或压力感应器是否运行正常；
- (5) 在水坑、地下板区域或地下室中注入示踪气体，并在系统出口进行监测；
- (6) 检查裂管及渗漏点；
- (7) 检查寒冷天气下系统运行情况，防止冰冻造成堵塞；
- (8) 检查系统排气口有无垃圾、蜘蛛网、鸟巢等。

## 11 制度控制（活动和使用限制）

### 11.1 活动和使用限制的必要性

有些污染地块为实现风险管控，除了阻隔措施，还可能需要进行活动和使用限制以减少或消除环境介质中关注污染物的暴露。尽管活动和使用限制可以单独作为风险管控措施使用，但大多数地块上，活动和使用限制仅作为阻隔措施的必要补充。

### 11.2 活动和使用限制的目的

为了通知地块未来使用者地块内有阻隔措施，确保阻隔措施的正确维护，在相关地块文件里需要备注制度控制等相关信息。

### 11.3 活动和使用限制的类型

活动和使用限制的类型包括：①国家或当地政府控制，如分区限制、建筑许可证、钻井禁令和警告；②法定的执法工具，如命令和许可证；③信息设施例如契约通知、地理信息系统、注册法案要求、转让法案要求；④根据事先的监管，批准建立阻隔措施保护或活动和使用限制（例如，土壤渗滤液控制系统或地表覆盖控制污染物通过土壤渗透到地下水的迁移）。

## 12 二次污染防治技术要求与措施

阻隔技术施工相对简单，产生二次污染的环节较少。可能产生二次污染的环节主要是设置有些类型的垂向阻隔系统时进行土壤开挖以及开挖产生的受污染土壤暂存和运输处置过程。

阻隔工程中进行开挖产生的受污染土壤，无论是在开挖过程还是在地块暂存过程中都可能会存在风险，因为可能发生污染土壤与人的皮肤接触、吸入颗粒物或气体以及污染物随地表径流迁移至地表水或周边其他敏感环境受体。因此，

需要做好有关二次污染防治。开挖作业过程中需要做好环境监测。开挖作业地块周边环境监测方式与频率如表 6 所示。

**表 6 开挖作业期间地块周边环境监测**

类别	项目	监测项目	监测地点	监测频率
地块环境	空气质量	总悬浮颗粒物	敏感点	每季 1 次
	施工噪音	Leq、Lmax	敏感点	每季 1 次
二次污染监控点	废水处理设备排放水质	pH 水温 悬浮固体 关注污染物	废水排放口	初期每 2 星期 1 次，稳定后每季度 1 次

减少二次污染的措施包括：

- (1) 对开挖污染土壤进行苫盖，防止扬尘。
- (2) 操作全程使用吸附剂、泵或其他设备以立即清理泼散物。
- (3) 地块周围设地面导水沟以控制地表径流。
- (4) 在地块下坡处构筑贮留池以阻隔受污染径流。

污染土壤暂存和处置的操作区，底部应铺设聚乙烯膜或黏土，并加设护路或筑堤。如果需使用临时蓄水池来储存排水，可采用厚黏土不透水层，并在蓄水池用完后挖除受污染土壤。在污染范围扩散到地下水层或可渗透非饱和区时，可使用合成不透水布系统。设备除污区地面应进行硬化处理，冲洗用水需要收集后集中处理。此外，阻隔工程施工中应保持工地及环境清洁，挖出的废土及废水经处理后应立即清理，四周排水沟底泥应定期清除与检测。

# 附录 1

## 表 1-1 阻隔措施适用性、设计需考虑的问题和监测要求

阻隔措施	是否主动	描述/暴露控制的方式	应用于		可能的监测和维护程序	设计需考虑的问题和设计说明
			新建筑	已存在的		
沥青公路	否	铺设一层热搅拌沥青隔离受污染土壤，避免直接接触。	√		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 开始：确定合适的安装方式。</li> <li>● 常规的监测&amp;维护：在周期性监测的基础上解决出现的问题，如修复裂缝、坑坑洼洼及其他性能退化需要修复的地方。</li> </ul>	有效面积及边缘定位：确定沥青的指定位置、范围和边缘定位。尺寸和材料说明：考虑使用（例如停车场、娱乐场）及类型、使用频率、车辆重量等确定稳定性及耐用性的要求。考虑配料厂的可行性及距离（例如：在冬季寒冷的天气是不可行的。）安装说明：准备好沥青铺设前所需的底层土壤并为雨水的排水系统平整地块；说明孔隙大小、可操作性以及压实厚度；对粘结剂和骨料进行详细说明，记录离开工厂的温度和安装温度。
水泥公路	否	铺设一层水泥混凝土隔离受污染土壤，避免直接接触。	√		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 开始：确定合适的安装方式。</li> <li>● 常规的监测&amp;维护：在周期性监测的基础上解决出现的问题，如修复裂缝、坑坑洼洼及其他性能退化需要修复的地方。</li> </ul>	有效面积及边缘定位：确定沥青的指定位置、范围和边缘定位。尺寸和材料说明：考虑使用（例如停车场、娱乐场）及类型、使用频率、车辆重量等确定稳定性及耐用性的要求。考虑配料厂的可行性及距离。安装说明：准备好混凝土铺设前所需的底层土壤，为雨水的排水系统平整地块；说明水泥的类型以及粗细骨料或混合物的选择；说明混凝土和基层的厚度、空气含量、坍落度和表面光洁度。

柔性衬层	否	在土壤保护层下面铺设一层柔性膜衬层。	√		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 开始:确定合适的安装方式。</li> <li>● 常规的监测&amp;维护:验证衬层的完整性和存在性;确认土壤保护层存在并具有良好的条件以及是否需要添加额外的受侵蚀土壤替代材料。</li> </ul>	<p>有效面积及边缘定位:确定柔性衬层的指定位置、范围和边缘定位。</p> <p>尺寸和材料说明:确定衬层的厚度、拉伸强度、耐撕裂、耐穿刺、耐冲击、是否抗紫外线以及与土壤污染物的兼容性。</p> <p>安装说明:指定可选的保护土层,包括厚度、土壤类型和压实要求。</p>
洁净土壤覆盖层	否	铺设一层洁净土壤,阻止与受污染土壤直接接触。	√	√	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 开始:确定合适的安装方式。</li> <li>● 常规的监测&amp;维护:定期验证完整性和存在性,检查侵蚀情况;确认是否需要添加额外的受侵蚀土壤替代材料。</li> </ul>	<p>有效面积及边缘定位:确定洁净土壤的指定位置、范围和边缘定位。</p> <p>尺寸和材料说明:暴雨径流排放的地块等级;考虑地块附近可用的适合土壤;确定土壤厚度以及是否允许侵蚀。</p> <p>安装要求:(例如:土块的尺寸,层厚);压实要求;土壤类型(例如粘土);最终的地形轮廓;指定地形测量的频率和位置。</p>
植被覆盖	否	铺设一层洁净土壤并种植植被,阻止与受化污染土壤直接接触。	√	√	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 开始:确定合适的安装方式。</li> <li>● 常规的监测&amp;维护:定期验证完整性和存在性,检查侵蚀情况或是否缺少植被;确认是否需要添加额外的受侵蚀土壤替代材料、再种植或进行必要的修剪和施肥。</li> </ul>	<p>设计的基本信息:考虑地块附近可利用的适合土壤,主要关注其水溶性或与化肥的相容性。</p> <p>有效面积及边缘定位:确定植被覆盖的指定位置、范围和边缘定位。</p> <p>安装说明:暴雨径流排放的地块坡度;考虑地块的特征是否支持健康的植被层(如地形、雨量、气候、害虫、及用关注污染物的兼容性。);指定安装要求(例如土块的尺寸、层厚、最终厚度);压实要求;植被类型、密度和种植类型(例如:种子或幼枝);施肥、割草和浇水要求。</p>

石毯	否	铺设一层小石子或再生的混凝土，阻止与受污染土壤直接接触。	√		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 开始：确定合适的安装方式。</li> <li>● 常规的监测&amp;维护：定期验证完整性及存在性；根据需要进行维修。</li> </ul>	<p>有效面积及边缘定位：确定石毯的指定位置、范围和边缘定位。</p> <p>尺寸和材料说明：确定石子的尺寸范围和组成，并判断是否可以加入再生混凝土（处理后含或不含钢筋）。</p> <p>安装说明：确定暴雨径流排放的地块坡度，若坡度大于 2:1（水平：垂直）或土壤易受侵蚀，则该区域通常认为是不可行的；确定石毯的厚度、垫层安装的序列、过滤层、石头和灌浆。</p>
密封土壤空气进入路径	否	密封气体进入点，阻止土壤气体侵入室内空气。	√	√	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 开始：确定合适的安装方式。</li> <li>● 常规的监测&amp;维护：定期检查是否存在由于结构变化产生的新开口、间隙或由于地基或土壤装置、物理接触、沉降和水引起的破坏，如有，需安装新的密封或进行必要的修补。</li> </ul>	<p>设计的基本信息：确定所有可能的气体进入点：坑、地漏、盲沟、无盖的空心墙、设施穿透、电气接线盒、板/墙体裂缝、空心墙开裂及其他。</p> <p>尺寸和材料说明：考虑填缝料和密封剂材料的兼容性（例如，聚氨酯嵌缝密封材料比硅水泥填缝剂效果更好），以及是否需要前处理或其他表面处理确保良好的附着力。</p> <p>安装说明：考虑安装材料（膜、防漏珠、流体密封剂或喷雾密封剂）；深层裂缝可能需要一个支撑杆；对于小裂缝，可以考虑采用硅或聚氨酯填缝剂，无收缩灌浆料；对于大裂缝，可以考虑硅填缝剂、喷涂泡沫、膨胀的聚氨酯泡沫或三分之二聚氨酯泡沫；对于空隙，可以考虑采用 HDPE、聚氯乙烯、PVC、聚乙烯膜或护墙板；对于设计开口（例如：设施的入口），考虑采用三分之二的聚氨酯、喷涂泡沫、聚氨酯流体或喷涂泡沫。</p>
被动其他阻隔墙	否	在建筑物基础下或上铺设柔性毯材料和/或涂层，阻止土壤气体进入室内空气。	√		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 开始：确定合适的安装方式并进行空气抽样监测确定衬层的有效性。</li> <li>● 常规的监测&amp;维护：空气抽样监测确定衬层的长期有效性。</li> </ul>	<p>有效面积及边缘定位：确定气体阻隔安装的位置（例如板下或基础上）和边缘定位。</p> <p>尺寸和材料说明：确定气体阻隔墙的厚度、拉伸强度、抗扯强度、耐穿刺、抗阻、是否覆盖耐紫外线和土壤中的污染物兼容，例如：柔性膜、金属箔、复合箔、聚乙烯、PVC、三元乙丙橡胶膜）或涂层（例如：油漆、半流体乳香、喷雾或热熔胶）。</p>

建筑物加压系统	是	保持室内空气压力比周围环境的压力高，阻止土壤气体进入室内空气。	√	√	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 开始：确定正确的安装方式和报警操作。</li> <li>● 常规的监测&amp;维护：检查并维修暖通组件；更换由设备制造商或使用条件要求更换的过滤器；维护和检测报警系统。</li> </ul>	设计的基本信息：考虑临近空间空气调节系统的潜在干扰及影响；考虑所需的每小时换气次数、通风体积，大概蒸汽浓度。 安装说明：确定暖通单元的尺寸，并确认其操作是连续还是受报警条件和进气系统影响的空气源。
主动土壤减压	是	采用鼓风机和收集管道、通风口系统，使污染土壤中的气体排放到大气。	√	√	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 开始：确定没有蒸汽进入建筑物，如果有报警系统，确定适当的报警操作。</li> <li>● 常规的监测&amp;维护：定期检查确定没有蒸汽进入建筑物；如果有报警系统，需进行定期维护和测试。</li> </ul>	设计的基本信息：考虑如何密封由建筑物破坏引起的建筑物和保护管道（例如，墙内或凹槽内）渗透。 尺寸和材料说明：确定泵的功率、管道尺寸、结构材料和终端装置的细节；确定吸点的数量及位置。 安装说明：确定管道的位置、深度和长度；确定吸气口单向阀的细节；确定管道的模板、标签或标记。
渗流阻隔	否	填满防渗介质的垂直阻隔沟渠安装在地下水暴露点水力梯度的上游，使地下水远离地下结构或设施。	√	√	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 开始：确定正确的安装方式。</li> <li>● 常规的监测&amp;维护：定期测量地下水静止水位以确定阻隔墙的长期有效性；定期收集和分析地下水样品，评价系统的持续需求。</li> </ul>	设计的基本信息：考虑地块特征包括地下水深度、地下水含水层厚度和连续性、水力梯度、水力传导系数、地下水流向、与暴露点的距离等；保证安装的阻隔墙使受污染地下水在暴露点周围或远离暴露点，不会影响到其他潜在受体；阻隔墙的深度能够用于减少或消除地下水对地下任何结构或设施的影响。 尺寸和材料说明：不渗透介质包括土工膜、合成的粘土衬层和膨润土泥浆。
密封装置层	否	密封装置层阻止受污染地下水进入。	√		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 开始：确定正确的安装方式。</li> <li>● 常规的监测&amp;维护：定期对装置进行密封层检查，如果密封层不能视觉检查，需要安装渗漏探测传感器。</li> </ul>	设计的基本信息：确定所有可能的地下水进入点：坑、地漏、盲沟、设施穿透、电气接线盒及其他；确定前处理或其他表面处理有良好的附着力。 尺寸和材料说明：选择兼容性好的填缝料密封剂，考虑有机硅或聚氨酯填缝料，喷涂泡沫或膨胀聚氨酯泡沫、三分之二聚氨酯泡沫、有机硅液体。 安装说明：安装方法包括密封珠、流体密封剂或喷涂密封剂。

拦截井	是	在潜在的暴露点上游安装一排垂直的或水平的地下水收集井，并配备泵，用于拦截和收集受污染地下水。	√	√	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 开始：确定正确的安装方式。</li> <li>● 常规的监测&amp;维护：定期检查泵和处理系统的运行；定期收集和分析地下水样品，评估系统的持续需求；为维持收集率补建井。</li> </ul>	<p>设计的基本信息：考虑地块的特征，包括地下水埋深、地下水含水层的厚度和连续性、水力梯度、水力传导系数、地下水流向、与暴露点的距离；对拦截受污染地下水的最低抽水率进行估算，并保证不能产生比减少或消除暴露风险更深的漏斗。</p> <p>尺寸和材料说明：确定井的直径、材料，收集管的开孔面积、割缝或孔的大小；确定渗透介质和过滤网的材料和粒径。</p> <p>处理系统：考虑收集到的地下水的处理需求（例如活性炭吸附）。</p> <p>安装说明：确定割缝管的埋深、井的数量和井径。</p> <p>常规考虑的问题：是否需要取得地下水的排放许可。</p>
拦截渠	是	在潜在暴露点的上游安装填满渗透介质和多孔管的垂直拦截渠，沿着拦截渠，在一处或多处设置配备有泵的水池，收集和清除受影响的地下水。	√	√	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 开始：确定正确的安装方式。</li> <li>● 常规的监测&amp;维护：定期检查泵和处理系统的运行；定期收集和分析地下水样品，评估系统的持续需求。</li> </ul>	<p>设计的基本信息：考虑地块特征，包括地下水埋深、含水层的厚度和连续性、水力梯度、水力传导系数、地下水流向，与暴露点的距离；对拦截受污染地下水的最低抽水率进行估算，并保证不能产生比减少或消除暴露风险更深的漏斗。</p> <p>尺寸和材料说明：确定井的直径、材料，收集管的开孔面积、割缝或孔的大小；确定渗透介质和过滤网的材料和粒径。</p> <p>处理系统：考虑收集到的地下水的处理需求（例如活性炭吸附）。</p> <p>许可和常规考虑的问题：是否需要取得地下水的排放许可。</p>

<p>泥浆墙</p>	<p>主动/被动</p>	<p>垂直沟渠中填满防渗材料，可以在泥浆墙中安装收集井。</p>	<p>√</p>	<p>√</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 开始：确定正确的安装方式。</li> <li>● 常规的监测&amp;维护：定期监测地下水水位；定期收集和分析地下水样品，评估系统的持续需求。</li> </ul>	<p>设计的基本信息：考虑地块特征，包括地下水埋深、含水层的厚度和连续性、水力梯度、水力传导系数、地下水流向、与暴露点的距离等。估算保持水力梯度的地下水的最低抽水率。</p> <p>尺寸和材料说明：确定沟渠的长度、宽度和深度；确定材料结构、过滤层特征；确定井的开孔面积、割缝或孔的尺寸。</p> <p>处理系统：考虑收集到的地下水的处理需求（例如活性炭吸附）。</p> <p>安装说明：确定泥浆墙的位置、防渗材料及安装程序；确定收集井的数量及位置。</p> <p>许可和常规考虑的问题：是否需要取得地下水的排放许可。</p>
<p>可渗透性反应墙(PRB)</p>	<p>否</p>	<p>垂直沟渠中填满可反应材料，用于降低或消除关注污染物。</p>	<p>√</p>	<p>√</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 开始：确定正确的安装方式。</li> <li>● 常规的监测&amp;维护：定期监测地下水水位；定期收集和分析地下水样品，评估系统的持续需求；如果需要，替换处理介质。</li> </ul>	<p>设计的基本信息：考虑地块特征，包括地下水埋深、含水层的厚度和连续性、水力梯度、水力传导系数，地下水流向、与暴露点的距离；确定处理或消除关注污染物的最佳反应介质。</p> <p>尺寸和材料说明：确定沟渠的长度、宽度和深度；确定反应介质。</p> <p>处理系统：考虑单一安装还是盒式安装。</p> <p>安装说明：确定 PRB 的位置、反应介质材料和安装程序。</p>