

《有机污染场地土壤生物修复技术规范 生物助剂使用（征求意见稿）》编制说明

《有机污染场地土壤生物修复技术规范 生物助剂使用》编制组

二零二四年一月

**项目名称：**有机污染场地土壤生物修复技术规范 生物助剂使用

**承担单位：**华南理工大学

珠海元育生物科技有限公司

南开大学

德源生物工程科技（吉林）有限公司

宝利恒（天津）生物科技有限公司

北京建筑大学

**编制组主要成员：**任源、肖奕博、夏文杰、陈国涛、袁梦、杨大春、付春辉、  
崔堂兵、罗立新、武利园

## 目录

1. 任务来源.....	1
2. 标准制定的必要性分析.....	1
3. 工作过程.....	2
4. 国内外相关标准研究.....	3
5. 同类工程现状调研.....	4
5.1.技术应用概述.....	4
5.2.技术原理.....	4
5.3.技术流程.....	5
5.4.技术适用性.....	6
5.5.技术应用现状.....	6
6. 主要技术内容及说明.....	7
6.1.使用范围.....	7
6.2.规范性引用文件.....	7
6.3.术语及定义.....	7
6.4.总体要求.....	8
6.4.1.一般规定.....	8
6.4.2.工程构成.....	8
6.4.3.助剂的选择与施用原则.....	8
6.5.工艺设计.....	8
6.5.1.一般规定.....	8
6.5.2.工艺流程.....	9
6.5.3.工艺设计要求.....	9
6.5.3.1.助剂的分类与功能.....	9
6.5.3.2.助剂类型的选择.....	9
6.5.3.3.助剂性能要求.....	9
6.5.3.4.实施过程.....	9
6.5.3.5.实施技术要求.....	11
6.5.3.6.修复过程监测指标.....	11
6.5.4.二次污染防治.....	11
6.5.5.施用后监测与后期管理.....	11

7. 规范实施的环境效益与技术经济分析.....	12
7.1. 环境与社会效益.....	12
7.2. 技术经济分析.....	12
8. 本规范的实施建议 .....	12

## 1. 任务来源

本规范根据“环境友好型解吸助剂及小分子生物刺激剂研发”（2020YFC1808803）课题任务指标，由华南理工大学作为项目承担单位，珠海元育生物科技有限公司、南开大学、德源生物工程科技（吉林）有限公司、宝利恒（天津）生物科技有限公司、北京建筑大学作为项目协作单位，联合承担《有机污染场地土壤生物修复技术规范 生物助剂使用》标准项目的编制工作。

## 2. 标准制定的必要性分析

近年来，城市建设开发市场急剧膨胀，城市土地资源日趋紧缺，大批污染型化工企业外迁后留下了大量污染地块，多年的生产活动对土壤及地下水造成不同程度的环境污染，对未来土地使用者存在健康风险。据调查，目前我国有 50 多万块城市用地土壤和地下水受到不同程度的污染，有机物污染约为 45%，重金属污染约为 30%，复合污染约占 25%，即是涉及有机物污染的占 70%。

针对污染土壤的修复治理，原环境保护部对此极为重视，2004 年发布了《关于切实做好企业搬迁过程中环境污染防治工作的通知》（环办〔2004〕47 号）。通知规定“所有产生危险废物的工业企业、实验室和生产经营危险废物的单位，在结束原有生产经营活动、改变原土地使用性质时，必须经具有省级以上质量认证资格的环境监测部门对原址土地进行监测分析，报送省级以上环境保护部门审查，并依据监测评估报告确定土壤功能修复实施方案。当地政府环境保护部门负责土壤功能修复工作的监督管理。”

2008 年原环境保护部发布了《关于加强土壤污染防治工作的意见》，明确将污染地块土壤环境保护监督管理列入土壤污染防治的重点领域，并将开展污染土壤修复与综合治理试点示范作为强化土壤污染防治工作的重要措施。2016 年发布的《土壤污染防治行动计划》及 2019 年颁布的《土壤污染防治法》对污染地块的风险管控、修复提出了具体要求和相关法律保障。

2023 年 6 月，环保部就《关于促进土壤污染绿色低碳风险管控和修复的指导意见（征求意见稿）》公开征求意见，提出坚持精准治污、科学治污、依法治污，积极借鉴国际先进经验，鼓励先行先试，聚焦突出问题和薄弱环节，探索形成可复制、可推广的绿色低碳修复典型经验和案例。加强绿色低碳修复实践应用，

提升土壤污染防治的环境效益、经济效益和社会效益，促进高质量发展。

针对有机污染场地，具有绿色、低碳、安全和长效的特点的微生物修复技术是贯彻落实以上法律法规要求的最适用技术。相比各种物理、化学修复技术，微生物修复技术操作简便、费用低、环境友好，但生物可利用性差、土著或外加降解微生物活性低成为限制其普遍应用的瓶颈。添加环境友好的解吸/助溶剂和专性生物刺激剂，能够增加微生物与污染物的接触、提高生物降解效率，是提高修复效率的优选策略。基于此，研发污染场地生物修复工程技术中针对典型有机物的低成本快速解吸/脱附剂，以及场地中能够降解有机物的土著微生物的活性的生物刺激剂，及该两类修复助剂耦合的应用规范，在我国现阶段仍有大量场地修复任务的强烈技术需求背景下，具有显著的经济和社会效益。

为贯彻落实以上法律法规的要求，指导建设用地土壤污染生物修复中的助剂使用，加快污染地块的修复，保障人体健康、保护生态环境，制定本规范。本规范的制定，符合我国新的环境标准体系要求，有利于真正规范和进一步推进我国场地修复技术工作，有利于突破污染土壤再利用发展的环境制约，有利于对污染土壤的有效治理和监督管理，有利于绿色低碳技术的推广应用，可实现经济、社会和环境效益的“三同时”，同时保证了政府管理的规范化及科学化。

本规范的编制期望能够解决目前场地修复企业对生物修复技术和材料的渴求，提供有机物污染场地土壤修复助剂应用的解决方案，有助于促进我国生物表面活性剂结构合成/发酵/分离提取/纯化、生物刺激剂的发酵合成等相关生物化工产业的发展，提高场地/土壤污染修复企业的应用技术含量，加快污染场地的“绿色”修复，为城市土地的有效再利用和保障广大人民健康的生活工作环境创造良好的条件。

### 3. 工作过程

#### (1) 项目组成立

2021年10月，项目立项，签订任务书。

#### (2) 开题报告与草案编制

2021年11月-2023年8月，编制单位分别调研了加拿大、美国、英国、丹麦、澳大利亚、新西兰、印度、中国台湾、香港等国家和地区的石油、多环芳烃、烃类等污染场地的污染土壤原位/异位修复导则，结合编制单位在前期助剂使用

方面的经验，完成《有机污染场地土壤生物修复技术规范 助剂使用》（草案）编制工作。

### （3）立项论证及征求意见稿起草

2023年8月18日-2024年1月9日，项目召开并通过《有机污染场地土壤生物修复技术规范 生物助剂使用》（草案）立项论证会，会后就与会专家提出的问题和建议继续开展调研及文本修改，形成《有机污染场地土壤生物修复技术规范 生物助剂使用》（征求意见稿）。

### （4）征求意见稿修改

2024年1月10日，项目召开《有机污染场地土壤生物修复技术规范 生物助剂使用》（征求意见稿）技术审查会，会后根据专家意见对文本进行了进一步修改，形成最新版本的《有机污染场地土壤生物修复技术规范 生物助剂使用》（征求意见稿）。

## 4. 国内外相关标准研究

污染场地修复标准的研究是污染场地修复效果检验和评价的基础，而对于污染场地修复标准的制定研究却远远落后于其修复技术的研究。因此，标准的不完善是目前污染场地修复效果检验和评价的瓶颈。

目前加拿大、美国、丹麦、新西兰、澳大利亚等发达国家都已经发布污染场地相关的标准。其中，加拿大和美国的技术导则主要侧重于对具体修复技术的阐述，如加拿大颁布的《场地修复技术：参考手册》重点阐述了原位处理土壤和地下水、处理抽提的地下水、溢出气体处理、原位控制土壤和地下水和异位处理挖掘的材料五类修复技术；另外还有《石油污染场地修复技术导则》和《市政废物处置场石油污染土壤的处理和处置导则》。美国新泽西州的《污染土壤修复导则》主要阐述了挖掘、污染土壤处理技术、土壤再利用、限制和控制暴露四类修复技术；另外还颁布有《石油污染土壤修复技术导则》等。而丹麦则侧重于土壤修复过程，《污染场地修复导则》将土壤修复过程分为初始调研、场地调查、风险评估、土壤、空气和地下水质量标准、报告、设计、修复措施和操作和评估八个阶段，其中对修复措施并没有过多阐明。我国台湾地区发布实施了《土壤及地下水污染修复法》并配套有《场地环境调查和修复技术规范》，但基本上是对美国相关规范的直接转换。香港特别行政区政府根据香港自身经济发展和地域特点，颁

布了《受污染土地勘察及修复指引》，主要适用于曾用作加油站、船厂及车辆维修/拆卸工厂场地的调查和修复。

国内对于有机物污染的场地土壤生物修复的助剂使用规范几乎没有。

## 5. 同类工程现状调研

### 5.1. 技术应用概述

生物修复是指通过微生物的作用清除土壤、地下水和固体废弃物中的污染物，或是使污染物无害化的过程。生物修复按所利用的生物种类，可分为微生物修复、植物修复；按被修复的污染环境，可分为土壤生物修复、水体生物修复、大气生物修复；按修复的实施方法，可分为原位生物修复、异位生物修复；按是否人工干预，可分为自然生物修复和人工生物修复。

有机污染场地的生物修复瓶颈在于污染物的水溶性差、易于吸附在土壤颗粒表面、分子结构妨碍微生物的作用。添加增强有机污染物溶解度的生物表面活性剂和提高土著微生物活性的刺激剂等助剂，是环境友好、成本较低且比较有效的污染场地修复处理技术。

### 5.2. 技术原理

凡是在低浓度下吸附于体系的两相界面上，改变界面性质，并显著降低界面能（表面张力），改变界面状态，从而产生润湿与反润湿、乳化与破乳、起泡与消泡，以及在较高浓度下产生增溶的物质称为表面活性剂。生物表面活性剂包括许多不同的种类，依据他们的结构特征和微生物来源可分为糖脂、脂肽和脂蛋白、脂肪酸和磷脂、中性脂以及聚合物表面活性剂。生物刺激剂是指能够刺激土壤中土著微生物降解有机物的天然或合成物质，主要成分为有机酸、多糖、氨基酸等，以及能提供营养或改善土壤理化性质的氮磷钾肥等。

有机污染场地生物修复助剂的工作原理包括：

**污染物解吸：**进入土壤环境的有机物由于高毒性、不易降解性、持久性，严重影响了土壤质量。有机物渗透性强、对土壤黏附作用明显，涉及到油水固气四相界面，表面活性剂的介导是将疏水有机污染物从土壤固体颗粒界面剥离下来的重要方法。目前在场地修复技术中可采用化学或生物表面活性剂作为异位修复的



淋洗剂,或作为解吸助剂以提高污染物的溶解度,加速污染物从土壤颗粒的脱附,增强与降解微生物的接触,有利于污染物的生物降解。

生物降解刺激:当污染物从土壤颗粒表面脱附后,在生物表面活性剂的作用下,其生物可利用性增强,可利用土壤中的土著微生物对污染物的降解功能,将可生物降解的目标污染物降解,降低其毒性,直至完全矿化为水和二氧化碳。但在长期被污染物胁迫的环境下,土壤/场地中的大多数微生物均处于“活的但不可培养”(Viable but non-culturable, VBNC)态,其可能的机理是对外界恶劣环境的防御和细胞损伤的减缓,添加具有共代谢基质、种内/种间信号分子、营养物质等功能的刺激剂能够突破其生长、代谢平衡,提高目标污染物的降解率和降解效率。

由于生物表面活性剂和生物刺激剂均由微生物发酵得到,这类助剂在应用过程中环境友好、绿色、低碳,长期存留也无损土壤的健康,是我国污染土壤/地块修复助剂的发展、应用方向。

### 5.3. 技术流程

有机污染场地原位生物修复助剂的使用流程包括对拟修复场地的钻井,通过注入设备向土壤的污染区域注入生物表面活性剂和土著微生物活力刺激剂,使得助剂在地下扩散,与土壤中的污染物接触,通过脱附解吸和生物降解作用,使土壤中的污染物转化为无毒或相对毒性较小的物质,从而有效降低土壤中的污染物的方法。典型的原位生物修复工程的助剂加入的工程结构示意图如下:

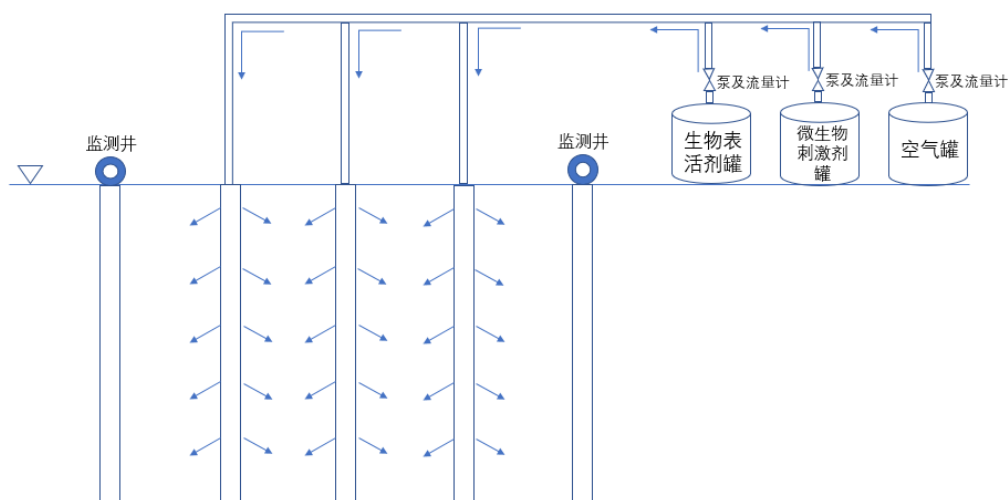


图 1 典型原位生物修复助剂加入示意图

有机污染场地的异位修复生物修复助剂的使用流程包括复配助剂的混合及稀释、使用修复一体机将助剂与污染土壤拌合、建设及运行生物堆、生物耕作或生物反应器系统。由刺激剂激活土壤中对目标污染物有降解能力的土著微生物，提高污染物的降解率和降解效率。典型的生物堆修复过程中助剂加入的工程结构示意图如下：

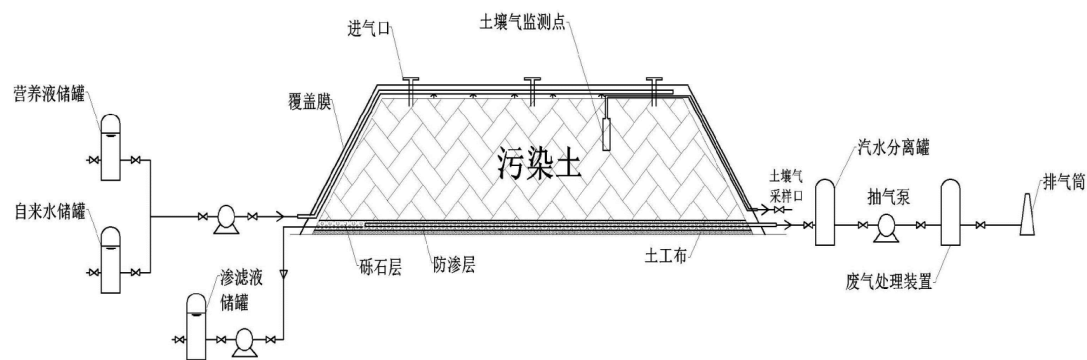


图 2 生物堆堆体示意图

#### 5.4. 技术适用性

本规范主要适用有机物污染的场地土壤修复。

#### 5.5. 技术应用现状

国内暂未有成熟的有机物污染场地的生物修复助剂应用工程。

课题组研发的助剂已经在浙江台州荣丰化工厂（原位生物修复，主要污染物是卤代烃）和山东淄博博汇化工园区（异位生物堆修复，主要污染物是石油烃和多环芳烃）场地土壤修复中得到成功应用。修复后石油烃、卤代烃、多环芳烃的土壤中污染物的浓度低于《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）（GB36600-2018）》的筛选值，且比对照点提高修复效率 30%以上，显示在不同类型污染场地的生物修复中，助剂均发挥了良好的作用。

目前还需要在更大规模、更多不同类型复合污染的场地中进行验证，通过合理设置注入/喷洒方式，来实现低成本、高效的污染物原位或异位生物去除。

## 6. 主要技术内容及说明

### 6.1. 使用范围

规定了本规范的主要内容、适用主体及对象，明确了规范对污染场地生物修复助剂使用的全过程技术指导作用。

### 6.2. 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标准必不可少的条款：

GB 8978 污水综合排放标准

GB 36600 土壤环境质量-建设用地土壤污染风险管控标准

HJ 25.1 建设用地土壤污染状况调查技术导则

HJ 25.2 建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则

HJ 25.3 建设用地土壤污染风险评估技术导则

HJ 25.4 污染场地土壤修复技术导则

HJ25.5 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则

HJ 682 建设用地土壤风险管控和修复术语

HJ 1283 污染土壤修复工程技术规范 生物堆

HG/T 20719 微生物法修复化工污染土壤技术规范

DB11/T 783 污染场地修复验收技术规范

根据规范编制的项目背景，本规范也借鉴了编制单位前期小试、中试及实际工程规模实践工作中积累的一些经验。

### 6.3. 术语及定义

规范直接引用《建设用地土壤污染风险管控和修复术语》（HJ682-2019）、《污染场地土壤修复技术导则》（HJ 25.4-2019）、《污染土壤修复工程技术规范 生物堆》（HJ 1283-2023）相关术语的基础上，补充了与本规范相关的定义，便于规范条文的理解。

## 6.4. 总体要求

### 6.4.1. 一般规定

本规范规定了生物修复中助剂使用的术语和定义、总体要求、助剂分类与选择、助剂施用设计、助剂实施过程、二次污染防治、施用后监测，适用于生物修复助剂施用从业者进行实际操作的技术指导。

### 6.4.2. 工程构成

在充分考虑国内污染场地生物修复行业背景，结合广泛的调研和工程实践基础上，提出了原位生物修复助剂注入工程的三大构成：注入罐（井）控制系统、助剂反应区、监测系统。异位生物修复助剂注入工程包括土壤破碎、土壤修复一体机、土壤堆体/翻耕系统/生物反应器、抽气系统、营养水分调配系统、渗滤液收集处理系统、监测系统等。

### 6.4.3. 助剂的选择与施用原则

6.4.3.1 助剂的选择与施用应遵循绿色低碳、环境友好、安全长效、因地制宜与可行性原则。

6.4.3.2 应根据土壤修复方式、污染物种类、生物降解反应和传质过程等选择适宜的助剂种类与施用方式。

6.4.3.3 当微生物修复方式与其他土壤修复方式联合使用时，助剂的选择与施用还应考虑对其他修复方式的影响。

6.4.3.4 选择的助剂种类、配比以及施用方式应经过小试、中试验证。

6.4.3.5 助剂的配制与施用过程应采取必要的二次污染防治措施。

## 6.5. 工艺设计

### 6.5.1. 一般规定

本节规定了原位生物修复工程和异位生物修复系统工程中助剂注入方案及运行参数的确定依据和原则。

## 6.5.2. 工艺流程

生物修复助剂主要用于可生物降解的有机污染物污染场地土壤的修复，其工艺流程基于 5.2 所述的工作原理和 5.3 所述的技术流程设置。

## 6.5.3. 工艺设计要求

### 6.5.3.1. 助剂的分类与功能

助剂包括对有机物有解吸能力的生物表面活性剂，和能提高微生物降解有机物能力的生物刺激剂。

### 6.5.3.2. 助剂类型的选择

不同场地，其土壤中的污染物类型和质量存在差异，不同助剂适用的污染物类型不同，需针对不同污染物，首先进行助剂的初选，然后通过针对性的小试、中试实验，并考虑场地建设条件，确定最终使用的助剂的类型。

### 6.5.3.3. 助剂性能要求

本规范中的两种助剂分别为含以糖脂为主要成分等的生物表面活性剂，以及含有机酸、多糖、腐殖酸、大量/中量/微量元素复合刺激剂。需要测试的主要产品性能包括生物表面活性剂的临界胶束浓度、表面张力、接触角、增溶/乳化能力、解吸能力，以及生物刺激剂中的有机酸、多糖、氮磷钾、矿物质元素等的含量。两种助剂均需测试溶解度、毒性、生物降解度和 pH 值。

### 6.5.3.4. 实施过程

应用该技术之前，需通过实验室小试研究确定助剂的处理效果和投加量，并进行中试试验进一步确定和优化设计参数，确定注入点的水平和垂向有效影响半径、土壤结构分布、污染去除率、反应产物等。还可以通过建立场地概念模型、反应传质模型等方式指导系统设计和运行。

#### (1) 原位生物修复

据经验及前期实验确定的药剂对污染物的降解效果，选择适用的助剂及助剂添加浓度。再结合中试试验，确定注入浓度、注入量和注入速率，确定的注入井（孔）位置和数量，建立原位生物修复助剂注入系统。

修复系统由助剂制备/储存系统、助剂注入井（孔）、助剂注入系统（注入井注入或直推）、监测系统等组成。助剂注入系统包括：助剂储存罐、助剂注入泵、助剂混合设备、助剂流量计、压力表等。

助剂可采用注入方式投加，加料井可设置在高地势处，监测井建设在低地势处，充分利用重力作用促进助剂的分散，减少能耗。修复助剂通过注入井或直推注入设备注入到污染区，助剂的注入量、注入速率以及注入压力等相关参数通过相关资料、小试和中试实验获得。

注入井（孔）的分布、数量和深度根据污染区的大小、污染分布情况和污染程度进行设计，并通过数值模拟以及现场中试实验进行更新和确定，以保证注入井内注入的助剂和营养液能在 1 周内扩散到达污染区最远范围。期间要注意助剂和营养液的损耗，其中化学品的迁移时间和反应速率可以根据可处理性研究和泵试验估算，但必须经现场监测证实。

在注入井（孔）的周边及污染区的外围还应设计监测井。监测井应设置于注入井（孔）的周边及污染区的外围，如有地势差，则可设置在低地势处，以对污染区的污染物及助剂的分布和运移进行修复过程中及修复后的效果监测。

## （2）异位生物修复

异位生物修复系统可采用生物堆、生物耕作或生物反应器等方式进行修复。

对于生物堆修复，应先参照 HJ 1283 建设堆体，包括将液体助剂通过泵送系统及土壤修复一体机尾部喷淋装置，将其与污染土壤同时输出，达到固液充分混合的效果。

参照国内外工程经验，为确保新鲜空气能够从堆体顶部的气体进口沿堆体纵剖面进入堆体并被设置在堆体底部的抽气管网收集，堆体设置为下底面 5 m×10 m、高 2 m、边坡坡度 1:1 的棱台形。

还可采用生物耕作或生物反应器的方式进行异位修复，包括污染土壤的破碎和土壤修复一体机，将土壤与助剂混合后进行生物耕作或生物反应器等运行。

异位修复的监测取样点设置在系统底部、垂向中间以及相邻抽气支管距离中心等修复薄弱区域。

#### 6.5.3.5. 实施技术要求

影响生物修复技术修复效果的关键技术参数包括：助剂类型、助剂投加量、助剂投加顺序、场地水文地质、土壤理化性质、新鲜空气通气量等。另外，根据经验首先对这些初始设计参数进行选择后，还需要进行实验室小试和中试试验，以对参数进行优化和确定，从而为实际修复提供依据。一般地，本标准建议土壤孔隙度应不小于 45%，含水率在 20-40%，有机质含量一般在 5%。可通过助剂加压注入设备、喷淋系统和养分添加系统来实现以上实施要求。

#### 6.5.3.6. 修复过程监测指标

根据调查阶段场地污染识别情况，生物堆土壤样品检测指标为：土壤基本理化性质、关注污染物的浓度、微生物数量、土壤酶活。

#### 6.5.4. 二次污染防治

在原位生物修复的助剂注入过程中，助剂及污染物可能从场地土壤中渗透进入地下水，尤其需要监测由于助剂的渗流作用带来污染物向地下水的转移。在生物堆或生物耕作修复中，渗滤液也有可能带有未完全降解的污染物，需集中收集后优先通过营养水分调配系统进行回灌利用。两种修复方式中注入的生物表面活性剂和生物刺激剂绿色安全，无需特别处理。

在场地修复过程中有可能有有害气体挥发或成井过程的扬尘，需要监测生物气中的关注污染物浓度。此外，助剂包装机现场施工工人的生活垃圾需安全妥善处理，由当地环卫部门统一外运做进一步处置。

#### 6.5.5. 施用后监测

修复过程和修复后需在采样井/点监测助剂的扩散范围监测土壤和地下水中目标污染物的浓度。

## 7. 规范实施的环境效益与技术经济分析

### 7.1. 环境与社会效益

根据广泛的调研和工程实践经验表明，本规范能够指导有机污染场地生物原位及异位修复工程的助剂使用，缩短场地修复所需时间，经修复后的场地满足修复标准，可进行再利用。

本规范的发布，有利于推进污染场地的生物修复工作，有利于保护自然资源和提高资源利用率，利于真正规范和进一步推进我国污染土壤的治理工作，有利于突破土壤修复后再利用行业发展的环境制约，有利于对土壤环境污染的有效治理和监督管理，可实现经济、社会和环境效益的“三同时”，促进社会和谐发展。

### 7.2. 技术经济分析

通过实验室的小试、修复场地的中试和大量的运行实践，科技部重点研发计划确定的整体修复成本在 300 元/方以内，其中使用生物修复助剂的成分可控制在 150 元/方以内。一般地，单位体积土壤的处理费用随修复场地面积的增加而减少。

## 8. 本规范的实施建议

(1) 建议各级环境保护部门及相关监督管理部门在污染场地修复项目管理和日常环境监督管理等工作中积极采用本技术规范，以加强对污染地块运行的监管，同时建议其他类型的土壤处理工程也可参考执行。

(2) 我国污染地块的整治工作，关系到国计民生而且目前形势依然严峻，特别是环保标准的提高、土地资源匮乏情况下。鉴于此，建议尽快将本规范发布实施。

(3) 本规范的实施应该与生态环境部颁布的《建设用地土壤污染状况调查技术导则》(HJ 25.1-2019)、《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)、《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3-2019)、《建设用地土壤修复技术导则》(HJ 25.4-2019)、《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则》(HJ 25.5-2018)、《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》(HJ 25.6-2019)等污染地块相关标准相配套。



(4) 本规范为首次制订，随着经济的发展和技术的进步，以及对环保技术研究的不断深入及实践经验的积累，规范的内容应不断得到完善、拓展、深入和更新，以适应环境标准制修订工作的要求，使其实用性和可操作性与时俱进，不断满足环境管理和地块修复工程建设需要。