

**《有机污染场地土壤生物修复技术规范
微生物菌剂使用》（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 微生物菌剂使用》编制组

二〇二四年二月

项目名称：有机污染场地土壤生物修复技术规范 微生物菌剂使用

承担单位：清华大学

北京建筑大学

中国科学院微生物研究所

上海康恒环境股份有限公司

清华大学苏州环境创新研究院

编制组主要成员：王慧、高大文、李德峰、王欢、韩建均、林子雨、张作涛、
龚小强、王镒翔、李明。

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	3
3.1 项目组成立	3
3.2 开题报告与初稿	3
3.3 立项论证	3
3.4 征求意见稿起草	3
4. 国内相关标准研究	3
5. 芳烃-石油烃类污染土壤菌剂修复工程调研	4
5.1 技术应用概述	4
5.2 应用案例	5
5.3 存在的主要问题	6
6. 主要内容制订说明	8
6.1 适用范围	8
6.2 编制范围说明	8
6.3 规范性引用文件	8
6.4 术语和定义	9
6.5 总体要求	10
6.6 微生物菌剂应用流程	11
7. 规范实施的环境社会效益与技术经济分析	17
7.1 环境与社会效益	17
7.2 技术经济分析	18
8. 重大意见分歧的处理经过和依据	18
9. 本标准的实施建议	18

《有机污染场地土壤生物修复技术规范 微生物菌剂使用》 (征求意见稿) 编制说明

1. 任务来源

本标准编制来源于国家重点研发计划课题“典型有机污染场地高效降解微生物菌剂/酶制剂研发”提出编制典型有机污染场地生物修复菌剂修复技术规范的任务。清华大学承担《有机污染场地土壤生物修复技术规范 微生物菌剂使用》的编制工作。

2. 标准制定的必要性分析

当前，石油烃和芳烃污染场地修复问题引起了世界范围关注。在国内，随着我国工业化的进程，工业污染场地越来越多，基于环保部对 22 个省市 200 多个工业污染场地调查发现，石油化工、农药化工、机械加工场地是有机污染物检出率最高的三类工业污染场地，其中石油烃和芳烃类为主要的污染物。石油污染物具有组分复杂，难于降解，易于在植物中富集等特点。为增强对土壤中石油烃和芳烃污染的风险控制，生态环境部将石油烃和芳烃列为土壤中重要的污染物并设定了严格的控制范围。2016 年，我国颁布了《土壤污染防治行动计划》，土壤污染防治相关标准和技术规范得以不断完善。2018 年最新颁布的《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018)制定了基于对人体健康是否有害的土壤污染风险筛选值，使土壤环境质量评估工作步入了一个崭新的阶段。其中对 C10~C40 的石油烃，苯，甲苯，乙苯以及邻二甲苯等苯系物以及萘，苯并[a]蒽以及苯并[a]芘等多环芳烃的管制值和筛选值进行了严格的限定。近年来我国修复石油烃和芳烃污染的技术主要包括化学氧化/还原、热脱附、固化/稳定化以及抽出等。然而相对于这些技术，生物修复法由于其成本低、无二次污染、操作简单的优点，能将污染物最终转化为无害的产物，可以同时运用于土壤和地下水修复，是一种经济、绿色清洁、最具前景的修复技术，尤其对于中低浓度的石油烃和芳烃污染的土壤修复。微生物法修复污染土壤中直接影响修复效率的是修复功能菌的修复效率，然而到目前为止，土壤中芳烃和石油烃类修复菌剂

的选育仅仅是基于微生物在液态培养基对污染物的降解或脱毒作用能力，而没有考虑到菌剂的扩培和制备，菌剂投加实际土壤后的存活能力和降解活性。因此需要提出一套微生物菌剂应用于石油烃、芳烃污染土壤生物修复的技术方法，对芳烃、石油烃污染场地土壤生物修复菌剂应用技术的规范化、标准化进一步完善，以便进一步准确地实施生物菌剂强化修复，以及能够更有效地评估菌剂强化技术效果，为有机污染土壤生物修复实际场地应用奠定一定基础。

我国关于石油烃、芳烃污染场地微生物修复技术指南部分存在一定的研究空缺，通过项目自主研发和遴选相结合，结合相关法律法规，形成石油烃、芳烃污染场地微生物修复治理技术指南，为生态环境保护方面、特别是土壤污染防治领域的修订制度、更新数据、知识管理和决策支持提供有效帮助。本规范的制定，符合新的场地污染土壤修复工程技术规范要求，有利于真正规范和进一步推进我国场地土壤生物修复技术工作，为有机污染土壤生物修复提供参考和指导。

3. 工作过程

3.1 项目组成立

2020年11月，项目立项，签订任务书。

3.2 开题报告与初稿

2021年~2023年，编制单位分别调研了美国、日本、欧洲等地区的土壤有机污染生物修复相关制度、技术进展及相关工程案例，结合编制单位前期在北京、山东、新疆等污染场地试点工程经验，完成《有机污染场地土壤生物修复技术规范 微生物菌剂使用》（草案）编制工作。

3.3 立项论证

2023年8月，召开并通过《有机污染场地土壤生物修复技术规范 微生物菌剂使用》（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，完成《有机污染场地土壤生物修复技术规范 微生物菌剂使用》（草案）修改工作。

3.4 征求意见稿起草

2024年1月10日，中国环境科学学会组织召开《有机污染场地土壤生物修复技术规范 微生物菌剂使用》（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 微生物菌剂使用（征求意见稿）》。

4. 国内相关标准研究

针对芳烃、石油烃类污染土壤生物修复，国外在这方面起步较早，在1992年美国国家环保局就针对微生物土壤修复技术，制定一系列相关标准，主要为US EPA和美国海军工程服务中心等研究所编制的相关文件；然而我国缺乏关于污染土壤微生物修复的行业和团体标准，有关微生物法土壤修复的行业、团体标准有《微生物法修复化工污染土壤技术规范》、《石油污染土壤微生物修复技术规范》等。本标准采纳了部分以上标准的修复技术以及其它文献内的修复技术。本标准增加了菌剂产品治理以及技术路程控制等方面的内容。

本标准为首次制定，与本行业现有的其它标准协调配套，没有冲突。

5. 芳烃-石油烃类污染土壤菌剂修复工程调研

5.1 技术应用概述

广义的生物修复，是指一切利用生物为主体的土壤或地下水污染治理技术，包括利用植物、动物或微生物吸收、降解、转化土壤和地下水中的污染物，使污染物的浓度降低到可接受的水平，或将有毒有害的污染物转化为无毒无害的物质也包括将污染物固定或稳定，以减少其向周边环境的扩散。狭义的生物修复是通过具有降解功能的细菌、酵母菌、真菌等微生物的作用，使环境介质中的污染物得以去除或使污染物无害化的过程。石油烃、芳烃污染土壤的生物修复技术一般可以分为两类，原位修复技术和异位修复技术。二者的区别在于是否需要将污染土壤进行移位和运输。原位修复一般采用土著微生物，经过培养和驯化，并通过添加营养物质、电子受体、提高含氧率、含水率等人为干预手段强化修复水平。异位修复则往往需要添加外源微生物并结合人为手段对转移污染土壤进行修复。原位修复包括：生物通风、生物刺激、生物强化、生物喷射、生物啜食等。生物通风是一种强迫氧化的微生物降解方法，其目的是创造好氧条件来促进原位生物降解。生物刺激是指向石油染的土壤中投加石油降解菌生长所需的 N、P 等营养元素以及 H₂O₂、O₂ 等电子受体，将土壤中的 C：N：P 调整至适合微生物修复的比例，刺激微生物的生长来达到增加土著微生物生物量，从而达到加速降解石油污染物的目的。生物强化技术是通过投加一种或几种具备高效石油降解能力的菌株至污染土壤中，从而加快土壤中石油的去除。其核心是投加的菌体需具备高活性和环境竞争力。生物喷射与生物通风类似，起主要去除作用的是微生物的降解，但不同的是生物喷射几乎不能靠污染物的挥发达到去除目的，而是通过饱和区内高的含氧率降解部分有机物。这项技术已经被应用于土壤中苯系物的修复。生物啜食是利用微生物修复饱和区有机污染物的一种原位修复技术。这种方法通过将污染的地下水抽出并加入氧气、营养物质、降解微生物、表面活性剂等，刺激土著微生物降解石油类有机污染物，再回灌到受污染的土壤以达到生物降解的目的。此方法可以用来减少溶解在地下水以及潜水面之上的毛细上升区中的石油类有机污染物。异位修复包括：生物堆法、生物反应器、预制床修复法。生物堆

法会将污染土壤堆放至一处，通过通入气体、添加调理剂、投加营养成分、控制含水率等方法提高土壤中好氧微生物的降解作用。生物反应器是将受污染的土壤挖掘出来和水混合搅拌成泥浆，并接种微生物进行修复的方法。预制床修复法是通过搭建不渗漏的土壤放置平台，铺以沙子、石子，再将污染土壤置于平台上，添加营养物质、水分或表面活性剂并定期翻动以维持微生物生长。

因此应用生物菌剂修复有机污染土壤是一种可持续利用、绿色、可达到较低成本且比较有效的有机污染土壤生物修复技术。芳烃和石油烃类修复菌剂技术的应用瓶颈是微生物菌剂选育仅仅是基于微生物在液态培养基对污染物的降解或脱毒作用能力，而没有考虑到菌剂的扩培与制备以及菌剂投加实际土壤后的存活能力和降解活性等，提出一套微生物菌剂应用于石油烃、芳烃污染土壤生物修复的技术方法标准，可以促进对芳烃、石油烃污染场地土壤生物修复菌剂技术应用。

5.2 应用案例

国内外已做过土壤菌剂修复工程文献案例 5~6 个。针对芳烃、石油烃类污染土壤生物修复，国外在这方面起步较早，在 1992 年美国国家环保局就针对微生物土壤修复技术，制定一系列研究计划，目前已有大量成功的修复案例(如表 5.1)，主要应用于多环芳烃 (PAHs)、石油烃类 (TPH)、氯代溶剂类等有机污染场地土壤修复，且均取得了较好的修复效果，修复成本低廉。在许多情况下，往往采用复合型污染降解菌剂实施修复(如表 5.2)，一些具有特殊生存能力的微生物菌剂物种在共同接种时可以提高菌剂整体的持久性，污染物去除效果普遍可达到 75%~95%左右，处理周期 3 个月至 2 年不等，处理成本 35 美元/吨~120 美元/吨土壤。

表 5.1 菌剂/制剂修复技术在国外的部分应用

序号	场地名称	污染物	规模
1	加拿大魁北克水利局 PAHs 污染场地修复	多环芳烃	9000t
2	南澳大利亚某燃料油污染场地	石油	2000 m ³
3	北青衣土壤净化工程	石油烃	65000 m ³
4	竹篇湾财利船厂土壤修复	石油烃	57000 m ³
5	加拿大某油田污染区修复	氯代溶剂	22000 t
6	英国 Scunthorpe 地区污染土壤修复	石油烃+多环	1500 m ³

		芳烃	
--	--	----	--

表 5.2 有机污染土壤中用于复合污染生物强化的生物菌剂

微生物 复合菌剂	污染物	文献
Rhodococcus sp., Acinetobacter sp., Pseudomonas sp.	PAHs 芴、菲、 芘)	Yu et al. (2005)
Bacillus subtilis DM-04, Pseudomonas aeruginosa M and NM	石油烃	Das and Mukherjee (2007)
Mycobacterium fortuitum, Bacillus cereus, Microbacterium sp., Gordonia polyisoprenivorans, Microbacteriaceae bacterium, Fusarium oxysporum	PAHs (蒽、 菲、芘)	Jacques et al. (2008)
Rhizopus sp., Penicillium funiculosum, Aspergillus sydowii	石油烃	Mancera-López et al. (2008)
Bacillus strains B1F, B5A and B3G, Chromobacterium sp. 4015, Enterobacter agglomerans sp. B1A	Mixture of PAHs (萘, 菲, 蒽, 芘, 二苯并[a]蒽, 苯并[a]芘)	Silva et al. (2009b)

国内该技术研究起步晚，有关微生物法土壤修复的行业、团体标准有《微生物法修复化工污染土壤技术规范》、《石油污染土壤微生物修复技术规范》等。近年来，由于菌剂生物技术修复成本相对低廉，相关配套设施已能够成套化生产制造，在国内已广泛应用于石油烃、多环芳烃等易生物降解污染土壤的修复，技术成熟。但在苯并(a)花、二苯并(a,h)蒽等多环芳烃类及苯胺类有机污染场地能够成功应用的案例仍很少。本规范采纳了部分以上标准的修复技术以及其它文献内的修复技术。本规范增加了菌剂产品治理以及技术路程控制等方面的内容。

5.3 存在的主要问题

我国虽然已有采用生物菌剂/制剂技术修复污染土壤的工程实例，但至今未制定该技术的技术规范，多根据修复单位的经验开展修复工作。造成一方面，因

菌剂选择、培育与扩大培养的方面技术缺失，影响修复效果，另一方面因现场实施技术规范缺失导致修复单位在进行污染土壤的修复过程中出现设计、施工考虑不周全以及运行过程监测评价等缺乏详细可行的方案等因素，使最终项目的修复效果不理想，实际的修复周期远长于设计的周期，修复成本也随着增加。

综上所述，为给相关修复单位对生物菌剂/制剂修复有机污染土壤进行菌剂选择、培育、施工及过程评价方案设计提供技术参考，规范该技术在实际实施过程中的各个操作环节，非常有必要综合国内外已有的工程技术经验，编制相应的菌剂应用技术规范，以指导相关企业更好的运用本项技术进行污染土壤的修复。

6. 主要内容制订说明

6.1 适用范围

本标准规定了微生物法修复有机污染场地土壤微生物菌剂的术语和定义、总体要求和应用流程，同时规定了微生物菌剂的选择、制备、工程参数和辅助药剂选择的技术要求，以及微生物菌剂在土壤修复应用中扩大培养、施工与调试、过程监测与评估的技术要求，为场地土壤生物菌剂修复提供技术指导。为场地土壤生物菌剂修复提供技术指导。

本标准适用于我国芳烃类污染、石油烃污染以及芳烃-石油烃复合污染等有机污染场地土壤的生物修复中的微生物菌剂使用。

6.2 编制范围说明

本技术规程的具体内容包括：范围、规范性引用文件、土壤修复微生物菌剂的术语和定义、芳烃石油烃类污染修复菌剂的筛选、菌剂的应用设计（包括菌剂的扩培、辅助药剂的选择以及微生物菌剂工程参数设计）、微生物菌剂的工程施用以及菌剂应用过程检测等内容。特别是针对芳烃类污染，石油烃污染和石油烃-芳烃复合污染场景下微生物降解菌剂的产品质量要求与菌剂应用规范。

本技术规范适用于有机污染场地，尤其是芳烃类污染，石油烃污染以及石油烃-芳烃复合污染场地，包括石油化工、矿业、采油区、污水灌溉区、农药化工、机械加工等场地。

6.3 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 36600-2018 土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准（试行）

GB 18597-2023 危险废物贮存污染控制标准

HJ/T 415-2008 环保用微生物菌剂环境安全评价导则

HJ 2035-2013 固体废物处理处置工程技术导则

HJ 805-2016 土壤和沉积物 多环芳烃的测定 气相色谱-质谱法

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
HJ 25.1-2019 建设用地土壤污染状况调查技术导则
HJ 25.2-2019 建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则
HJ 25.3-2019 建设用地土壤污染风险评估技术导则
HJ 25.4-2019 建设用地土壤修复技术导则
HJ 1283-2023 污染土壤修复工程技术规范生物堆
ISO 16703:2011 土壤中石油烃（C10~C40）含量的测定 气相色谱法

6.4 术语和定义

1 总石油烃 total petroleum hydrocarbon, TPH

依据《污染场地术语》(HJ 682—2014)，本文件将其定义为“在原油中发现的含有碳氢化合物组成的混合物，由是多种烃类(正烷烃、支链烷烃、环烷烃、芳烃)和少量其他有机物，如硫化物、氮化物、环烷酸类等组成的混合物”。

2 芳烃 aromatic hydrocarbon

依据《污染场地术语》(HJ 682—2014)，本文件将其定义为“具有芳香性的烃，一般指分子中含有苯环的化合物，包括苯系物和多环芳烃，其中苯，甲苯，乙苯以及二甲苯等统称为苯系物，由两个或两个以上苯环以两个邻位碳原子(即一边)相连形成的化合物统称为多环芳烃”。

3 微生物菌剂 microbial agents

依据 2021 年全国科学技术名词审定委员会审定公布的《化工名词（六）生物化工》，本文件将其定义为“目标微生物(有效功能菌)经过筛选扩培制备后制成的活菌制剂。这种菌剂在适宜环境条件下通过自身生长代谢活动以及其它辅助菌种或载体协同作用下，使场地环境中有机污染物降解成为低分子化合物或完全分解为二氧化碳和水”。

4 外源微生物菌剂 exogenous microbial agent

参考 2021 年全国科学技术名词审定委员会审定公布的《化工名词（六）生物化工》，本文件将其定义为“由一种或多种从非本土污染环境，通过人工选育所获得的微生物菌种（株），经过加工制成活菌制剂，可直接应用于适当环境条件下的土壤生物修复”。

5 土著微生物菌剂 indigenous microbial agent

参考 2021 年全国科学技术名词审定委员会审定公布的《化工名词（六）生物化工》，本文件将其定义为“由一种或多种从受污染土壤本土环境中原位分离纯化，通过人工选育所获得的微生物菌种(株)，经过加工制成活菌制品菌剂，能在适宜环境条件下通过自身生长代谢活动以及其它辅助菌种或载体协同作用下使场地环境中有机污染物降解成为低分子化合物或完全分解为二氧化碳和水”。

6 菌剂有效性评价 effectiveness evaluation of agents

参考《环保用微生物菌剂环境安全评价准则》(HJ/T 415—2008)，本文件将其定义为“对微生物菌剂进行分析、测定和评估其去除土壤污染物的能力、环境适应能力、环境安全性、稳定性，包括菌剂产品应用后对土壤目标污染物降解的功效，在土壤中的繁殖能力、恢复土壤性状等”。

7 辅助试剂 adjuvant

参考 2013 年科学出版社的《土壤学大辞典》本文件将其定义为“满足土壤降解菌的需要，提高土壤微生物代谢活性，进而提高修复效率的药剂。包括提高污染物溶解度的助溶剂，提高微生物活性的营养物、电子受体以及共代谢基质等，利于微生物附着生长的载体物质以及调节土壤性质的调理剂等”。

6.5 总体要求

6.5.1 一般规定

6.5.1.1 微生物菌剂的应用应按照国家相关标准规范进行，遵循绿色低碳、因地制宜与系统治理原则和绿色可持续修复理念，具备可行性、有效性和工程适用性，实现减污降碳协同增效。

6.5.1.2 微生物菌剂的选择、制备和应用方式应根据场地污染特征、修复目标值、生物地球化学条件、水文地质条件、现场试验结果等因素确定。

6.5.1.3 应对微生物菌剂应用过程中所产生的废气、废水、固体废物及其他污染物进行治理，并达到国家、地方和相关行业排放标准要求。

6.5.1.4 微生物菌剂环境安全评价应符合 HJ/T415 的规定。

6.5.1.5 应在微生物菌剂投加部位就近建立独立的菌剂存储区，在区域内明显的位置张贴警示标志、微生物菌剂用途和注意事项等说明，并设置专人管理。

6.5.2 应用过程构成

6.5.2.1 微生物菌剂的应用过程包括：菌剂筛选、菌剂的应用设计和菌剂的工程

施用。

6.5.2.2 菌剂的筛选包括外源菌剂筛选和土著降解菌剂的筛选、菌剂的鉴定与制备、菌剂的可行性与安全性评价。菌剂的筛选、评价应通过小试和中试实验验证菌剂施用可行性和污染物降解有效性。

6.5.2.3 菌剂的应用设计包括菌剂的扩大培养、辅助药剂筛选和工程参数设计。

6.5.2.4 菌剂制品可作为修复工程菌剂，进行工程施用，可通过原位注入、浅层喷淋搅拌、生物堆、泥浆反应等技术，进行原位、异位修复。

6.6 微生物菌剂应用流程

有机污染场地土壤生物修复技术中微生物菌剂使用流程主要由微生物菌剂筛选、菌剂应用设计以及菌剂工程施用三部分组成（图 6.1）。

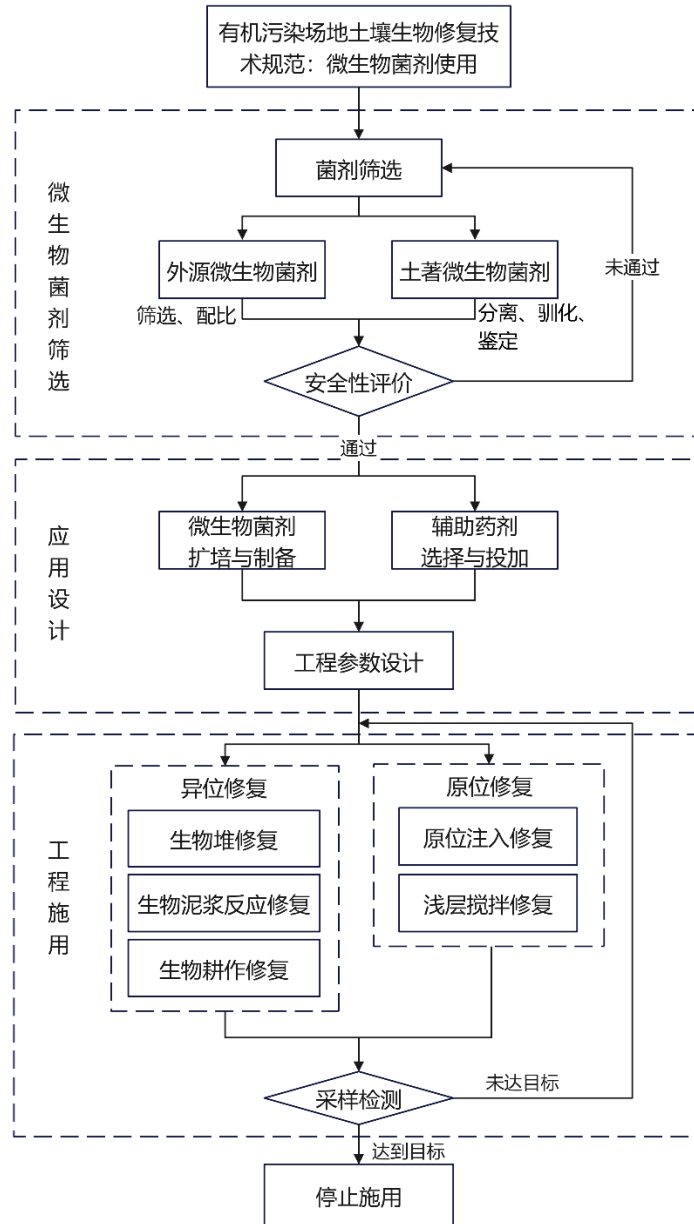


图 6.1 微生物菌剂应用流程图

6.6.1 微生物菌剂筛选

(1) 本规范中选用的微生物菌剂根据其来源不同可以分为外源微生物菌剂和土著微生物菌剂。其中外源菌剂需通过应用到土壤修复后，对目标污染物的降解效果来筛选，土著微生物菌剂需从污染场地土壤筛选，筛选后需测定其对目标污染物的效果以及进行菌种鉴定。

(2) 参考《农用微生物菌剂》(GB20287—2006)内有效微生物菌剂的指标以及国内外文献资料，本规范制订了芳烃，石油烃以及混合污染场地降解菌剂的产品要求(见表6.1)。

表 6.1 产品要求

项目	菌剂类型	
	液体	固体
有效活菌数 (cells) / (亿/g 或亿 /L) \geq	1.0	1.0
霉菌杂菌数/ (个/g 或个/mL) \leq	3.0×10^6	3.0×10^6
杂菌率/ (%) \leq	10	30
水分/ (%) \leq	—	20.0
细度/ (%) \geq	—	80
生长 pH	5.0~8.0	5.0~8.0
活菌的有效期/ 月 \geq	3	6
芳烃、石油烃去 除率 (%)	实验室评估条件下, 1 个月内对目标污染物降解率达到 50%以上降解速率可接受; 修复周期内场地污染土壤修复达标。	

(3) 国家环保总局发布了《环保用微生物菌剂环境安全评价导则》(HJ/T 415), 需对筛选制备得到的微生物菌剂进行安全性评估, 应委托具有 CMA 资质单位开具针对菌剂的致病性和生态毒性影响进行评估。

6.6.2 微生物菌剂应用设计

微生物菌剂的应用应该包括菌剂的扩培和制备, 辅助药剂的选择以及工程参数的确定。其中菌剂扩培的接种量应根据菌种特性以及修复工程需要来确定, 扩培过程中菌剂放大量每次宜为已有菌剂量的 10 倍~20 倍, 扩培倍数过低, 不能满足生产需求, 扩培倍数过高, 可能导致菌株老化, 影响产品质量。若修复过程需要菌剂量较大, 可进行多次放大培养。菌剂扩培需考虑到适宜微生物生长所需的温度、湿度、pH 值以及溶解氧等参数。同时为实际需要, 菌剂的微生物含量应大于 10^9 CFU/mL, 生长周期控制在 5-10 天。为了保持菌剂的修复效果, 应定期对菌剂扩培过程中菌种纯度进行检测和控制, 确保修复菌种为优势菌。

基于本规范中微生物修复的目标为芳烃类、石油烃以及复合污染, 因此辅助药剂的选择范围为营养药剂、表面活性剂以及电子受体和共代谢物质, 基于已有文献报道和经验, 常用的辅助药剂如表 6.2 所示。

(1) 营养药剂的选择基于待修复场地土壤的营养状况, 可通过文献中报道的直接投加法、循环投加法以及控制缓释法补充缺乏的营养药剂。

(2) 表面活性剂的投加类型和投加量应通过小试和中试来确定，根据已有文献，其投加量宜为 0.1%~1%，基于对环境的影响，当促进效果相同时，建议首先使用生物合成表面活性剂，其投加方式可采用文献中报道的直接投加法和循环投加法。

(3) 电子供体和共代谢基质的选择应基于场地土壤的理化性质确定，一般浅层土壤可通过平整，翻刨以及犁作等方式补充氧气以促进生物修复，对于深层土壤的石油烃/芳烃降解，可通过添加氧气或硝酸盐等促进生物修复。基于已有文献报道和经验，当场地土壤污染物浓度过高或降解菌含量过低导致降解速率较慢时，可选择本规范中择自文献的共代谢基质来促进修复效果。

表 6.2 土壤原位生物修复工程中常用的添加剂

生物降解类型	典型污染物	典型的添加剂
好氧氧化	石油烃；芳烃	空气，氧气，双氧水，二氧化镁(氧化剂)，麦秸以及啤酒厂残渣等有机营养，磷酸盐，铵盐以及钾盐等
厌氧氧化	石油烃；芳烃	硝酸盐，碳酸盐，麦秸以及啤酒厂残渣等有机营养，磷酸盐，铵盐以及钾盐等
共代谢氧化	石油烃；芳烃	乙酸盐，丙酸盐，柠檬酸盐，苹果酸盐，葡萄糖，木糖，甘露醇，甲醇，谷氨酸，异亮氨酸，甲硫氨酸，色氨酸，苯甲酸盐，香芹酮，二戊烯以及甲基异丙苯等

根据已有文献和经验，微生物菌剂的工程应用参数应基于修复的场地土壤的孔隙度、湿度、渗透系数、有机质含量、电子受体/供体含量和土著微生物群落组成等。

参照 HJ25.4-2019 选择原位或异位修复模式。土壤渗透系数 $>6.0 \times 10^{-4}$ cm/s、石油烃浓度 $<5\%$ 时，可进行原位修复，石油烃浓度 $>5\%$ 时建议采用异位修复。对应原位或异位修复菌剂可有效降解目标污染物时的营养条件和环境理化条件即为工程施用时应满足的基本参数。

工程施用时所需的菌剂的种类和辅助药剂的配置应基于现场进行的小试模拟或中试实验来确定。

菌剂原位和异位修复工程应用应考虑修复场地土壤的温度、pH、盐度、氮源、磷源等参数，参数的具体数值可通过正交或单因素试验确定。

参考文献和经验,生物修复场地有机污染土壤时可混合添加多种降解菌以促进降解的效率,或者将降解菌与其它本土功能菌株(土壤改良菌、产表面活性剂菌)结合应用于有机污染场地土壤以提高修复效率,根据配伍菌群的污染物降解率调整营养物投加配比和环境条件参数。

6.6.3 微生物菌剂工程施用

6.6.3.1 菌剂修复原位应用

不同场地土壤,芳烃和石油烃的浓度以及空间分布不同,因此应调研需修复土壤的芳烃、石油烃污染浓度和空间分布等信息来确定使用浅层搅拌或原位注入等修复方式。

参照国内外工程经验,浅层搅拌修复前需进行土壤预处理,对修复区土壤进行人工或机械混匀,混匀深度控制在修复范围内,尽可能打碎其中的土块,去除大石块。

原位注入修复前应尽可能通过补充调查明确污染范围,在污染集中点位设置微生物菌剂注入井。

(1) 浅层搅拌修复

参考国内外工程经验,浅层搅拌修复可采用表面喷淋法进行菌剂施用投加,且喷淋应均匀以保证菌剂均匀的分布于污染土壤内,且需保证喷淋后修复土壤无大面积积水和菌液外流,根据文献报道和经验,喷淋后需保证降解菌的数量不少于 10^7 CFU/kg 修复土壤能够保持较好的修复效果。为更好的生物修复石油烃和芳烃污染场地土壤,修复开始时可根据原土壤营养组成,加入部分辅助药剂以调节场地营养元素以促进微生物的代谢,并需在修复过程中保持土壤相对湿度为 40%~60%且定时补充辅助药剂以维持微生物的高活性。

(2) 原位注入修复

参考文献及国内外工程经验,当污染物存在于场地土壤的深处时,可利用原位注入菌剂等方式进行生物修复,原位注入修复可采用注入井泵送法进行菌剂施用投加。注入井的间距的布设(一般 1~2 m)需根据场地土壤的渗透系数以及修复周期来确定。原位注入修复时,可将降解菌和辅助药剂同时泵入,在修复过程中,可定期注入菌剂以保持场地土壤的有效活菌数,对于降解菌数的测定需不低于一周一次。

6.6.3.2 菌剂修复异位应用

参考文献和国内外工程经验，异位的生物修复可采用生物堆和生物泥浆等方式，具体采用何种方式需根据场地条件、修复工期、土壤污染特征等综合判断。生物堆菌剂施用和修复过程应参照 HJ 1283 执行。

生物堆堆体运行期间需定期补水以保证其含水率适宜微生物代谢，堆体土壤中有效活菌数需控制不低于 10^7 CFU/kg，每月需监测 1~2 次堆体降解微生物数量，确保微生物群落稳定。

参考国内外工程经验，生物泥浆法可向反应进药装置直接投加微生物菌剂或配置菌液，在泥浆搅拌和堆置反应期间应监测反应温度、pH、含氧量、菌剂微生物密度等，确保菌剂处于有效反应环境。

6.6.4 监测和过程控制

(1) 工艺参数监测

在生物修复场地土壤有机污染过程中，应对土壤的常规理化性质、细菌总数等菌剂应用相关工艺参数进行监测，如 pH、粒径分布、密度、孔隙度、有机质含量、渗透系数等，参考经验和测定方法国标检测方法，检测项目和分析方法见表 9.1，分析测试应按照 GB 50021 执行。

表 6.3 监测项目和分析方法

序号	监测项目	分析方法	引用标准	备注
1	细菌总数	平板计数法	GB17378.7	
2	功能微生物总数	Q-PCR法	—	测定可降解目标污染物的微生物的总量
3	pH	pH 计	GB17378.4	
4	溶解氧	碘量法	GB17378.4	
5	总石油烃	分光光度法	HJ970-2018	
6	石油烃组分	气相色谱法	HJ 1021-2019	
7	多环芳烃	高效液相法	HJ 892-2017	萃取后测定不同种类多环芳烃的含量
8	其它芳烃类	气相质谱/液相质谱法	—	萃取后测定其它芳烃含量
9	次生代谢产物	气相质谱/液相质谱法	—	萃取后测定修复后次生代谢产物
10	总氮	过硫酸钾氧化法	GB12763.4	萃取后测定总氮

序号	监测项目	分析方法	引用标准	备注
11	氨氮, 亚硝氮, 硝氮	分光光度法	GB7479-87, GB 7493-87, HJ/T 346-2007	萃取后测定各组分含量
12	总磷	过硫酸钾氧化法	GB12763.4	萃取后测定总磷
13	含水率	烘干法	GB7172-1987	

(2) 过程控制

参考国内外工程经验, 在场地土壤生物修复过程中, 应对修复工程设备配备监测和自动控制系统, 自动控制系统参数监测与处理、装备配置要求等可参照 HJ 1283。对于难以自动监测的项目, 则应通过人工采集样品后进行人工测定。修复过程应合理调节菌剂, 辅助药剂以及修复区域的环境条件和修复设备工况参数等以使菌剂有效的作用于修复区域。

(2) 环境监测与二次污染防治

参照国内外修复工程经验, 微生物菌剂修复过程中应进行环境管理与二次污染防治, 环境管理与二次污染防治措施应参照 HJ 25.4。其次, 修复过程中产生的废水和废气也需要进行监测, 其监测布点和监测指标可参照 HJ 25.2 执行。修复过程中产生的菌剂包装袋等固体废物可按 HJ 2035、GB18597 等相关标准做好收集和分类管理。同时为监测修复过程对环境的影响, 应定期采用便携式分析仪器设备监测分析修复区及场界周边空气中的挥发性有机物。

7. 规范实施的环境社会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, 本标准能够指导有机污染场地生物原位及异位修复工程的菌剂筛选和使用, 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。

本标准的发布, 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，其中使用生物菌剂的成本可控制在 200 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. 重大意见分歧的处理经过和依据

目前暂无重大意见分歧，待正式征求意见后若有重大意见分歧再补充。

9. 本标准的实施建议

(1) 建议各级生态环境部门及相关监督管理部门在污染场地生物修复项目管理和日常环境监督管理等工作中积极采用本标准。

(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，特别是土地资源匮乏情况下技术手段与应用效果的提高。鉴于此，建议尽快将本标准发布实施。

(3) 本标准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》(HJ25.3-2019)、《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》(HJ25.5-2018)等污染地块相关标准相配套。

(4) 本标准为首次制订，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，标准的内容应不断得到完善、拓展、深入和更新，以适应环境标准制定工作要求。