

《原位热处理耦合微生物修复技术指南》编制说明

一、工作简况

1.1 任务来源

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国土壤污染防治法》等法律法规，防治环境污染，改善生态环境质量，在减污降碳的双重目标下，提高修复效率、降低能耗与成本，提出并规范原位热处理耦合微生物修复技术工程建设和运行，编制《原位热处理耦合微生物修复技术指南(试行)(征求意见稿)》(以下简称指南)。本指南规定了污染场地原位热处理耦合微生物修复工程的设计、施工、调试和运行维护等技术要求。

本文件由中国土壤学会团体标准工作管理委员会提出并归口。

1.2 协作单位及起草组成员分工

本指南参编单位包括：中国科学院南京土壤研究所、森特士兴集团股份有限公司、中科鼎实环境工程有限公司和北京市科学技术研究院资源环境研究所。

宋昕为本指南编制的负责人，对指南进行整体把控和指导，推进指南的编制工作；王晴主要负责编写工作，杨宗帅和张转霞协助；尹立普、李彦希、闫松、杨苏才、叶渊和杨勇对本指南的技术参数等提供实验和现场论证。

1.3 主要工作过程

2023年1月，主编单位组织召开了《污染场地原位热处理耦合微生物修复技术指南》编制启动会，成立本指南编制小组。

2023年2月~8月，编制组调研总结了污染场地原位热处理和微生物修复技术相关的标准规范、技术导则要求和典型工程应用案例等，并结合编制团队已开展的相关研究，确定了本指南编制的适用范围、编制内容、工作进度等内容。随后经过多次讨论和反复修改，并于2023年8月完成了《污染场地原位热处理耦合微生物修复技术指南》的初稿。

2023年9月，编制组向中国土壤学会团体标准工作管理委员会提交了《污染场地原位热处理耦合微生物修复技术指南》立项申请表。随后中国土壤学会团体标准工作管理委员会组织召开了原位热处理耦合修复技术系列团体标准立项

评审会。申请单位对指南立项的背景、意义、可行性、主要技术内容、创新点等进行了汇报。与会专家经过质询与讨论，一致同意《污染场地原位热处理耦合微生物修复技术指南》立项。

2023年10-12月，编制组根据立项专家的意见和建议逐条修改，并开展了多次内部讨论会，对各技术要点进行逐步完善。随后，编制组再次将修改后的《污染场地原位热处理耦合微生物修复技术指南》通过信函形式发给专家进行审阅。经过为期一个月的再次修改完善后，形成了《污染场地原位热处理耦合微生物修复技术指南》（征求意见稿）。

二、标准编制原则与编制内容

2.1 标准编制原则

本指南的制定工作本着规范性、合理性、可操作性和适用性的原则。

首先，本指南严格按照 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》的规则起草，确保编制程序、格式内容等规范。本指南作为国家和行业标准/指南的必要补充，符合有关法律法规的要求，并在突出原位热处理耦合微生物修复技术特点的同时，做好与现行相关标准/指南的衔接工作。其次，通过调研国内外污染场地原位热修复、微生物修复技术相关案例、标准/指南说明，并结合编制组已开展的原位热处理耦合修复示范验证过程中获得的相关指标和参数，提出原位热处理耦合微生物修复技术的要求，使指南内容及指标更加符合实际运用情况。此外，根据我国污染场地治理修复全过程管理实际情况，以保护人体健康和生态环境为出发点，通过定量和定性相结合的方式开展本指南制定，提出具有可操作性的实施流程。

2.2 标准编制内容

2.2.1 适用范围

本指南阐释了原位热处理耦合生物修复的工艺路线、技术要点，主要对原位热处理耦合生物修复技术的工艺设计、工程建设和运行管理等关键过程起到规范化作用，提供可操作和实施的指导意义。

本指南适用于单一或者复合有机污染场地，可以指导污染土壤和地下水原位

热处理耦合微生物修复方案设计和修复工程的建设与运行管理等,可作为方案制定、施工运行及维护的技术依据,同时为管理人员提供指导依据。

2.2.2 技术原理

原位热处理耦合微生物修复技术是指采用热水注入、电阻加热等方式对土壤及地下水进行加热,使地下环境温度提高并维持在 30~45°C,随后通过注入井注入生物修复添加剂(为微生物提供足够的碳源/共代谢基质/还原条件等),提高污染物的生物有效性、微生物的活性及代谢速率,促进污染物的生物降解,从而提高修复效率、缩短修复周期。

污染场地原位热处理耦合微生物修复技术是对原位热处理和生物修复技术进行耦合,实现优势互补。一方面避免了传统热处理所需的高温,极大地降低了能耗和成本。另一方面微生物修复更加经济、绿色、环境友好。此外,通过精准控制加热和生物修复添加剂的注入,达到温度场和添加剂的有效分布。原位热处理耦合生物修复技术具有突破单一修复技术的瓶颈问题,与传统原位热修复技术相比大大降低能耗和碳排放的综合优势,是一种低能耗、高效的实用原位修复技术,更加绿色可持续。

2.2.3 工艺流程

原位热处理耦合微生物修复技术工艺流程如图 1 所示,包括场地污染情况调查与分析(包括污染、地球化学参数、微生物群落和功能基因等),修复方案设计、现场小规模中试及技术可行性分析,场地建设,场地运行和维护、采样监测和效果评估。首先对场地进行水文地质、地球化学参数、基线污染物及微生物指标调查,整体评估修复区域土壤和地下水的污染状况与原位热处理耦合微生物修复技术的适用性。其次进行实施方案设计,结合前期调查,并根据污染场地水文地质条件、污染特征等,选择合适的加热方式和生物修复添加剂,明确加热温度、生物修复添加剂注入速率等关键技术参数,并开展小规模中试,验证修复技术可行性并根据中试结果确定关键修复技术参数。然后进行场地建设,主要对加热单元、注入单元、抽提单元(可选)、废水废气处理单元、监测与控制单元等进行现场施工建设,并同时安装其他所需修复设备。随后进行运行和维护,采用所需的加热方式对现场进行加热以及生物修复添加剂的注入,并通过对关键技术参数如温度、注入速率、注入压力及水质参数等进

行全过程监测分析，反馈调节各阶段运行状态。最后定期对土壤和地下水进行采样，分析评估原位修复效果。若未达到修复目标则继续修复，达到修复目标即停止修复。

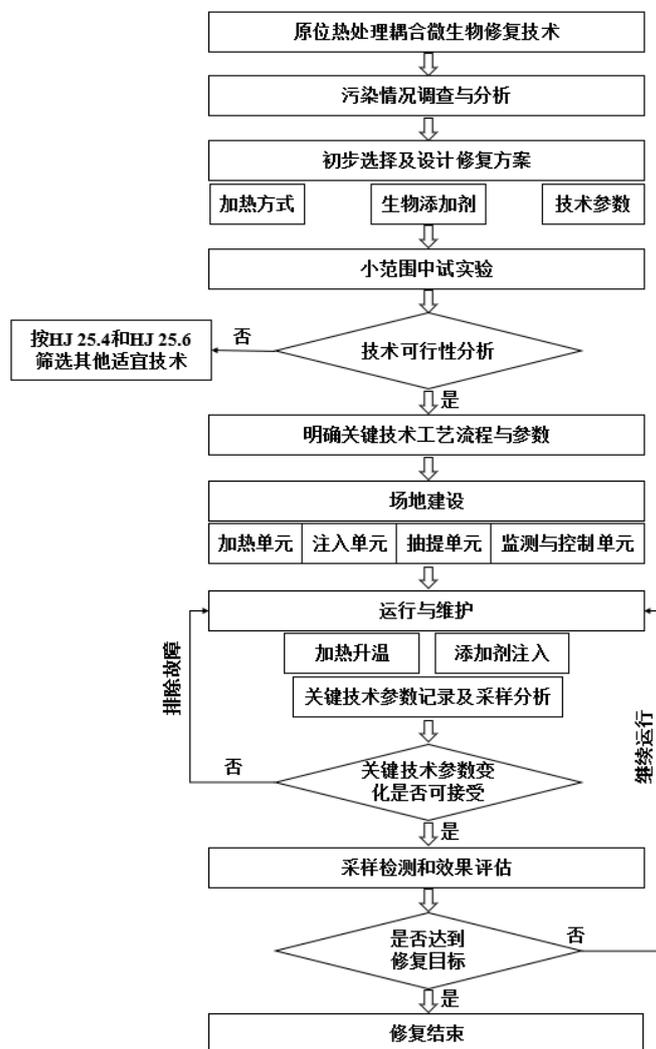


图 1 原位热处理耦合生物修复技术工艺流程

2.2.4 主要技术要点说明

原位热处理耦合微生物修复技术可根据污染场地实际情况进行灵活开展：采用原位电阻加热（ERH）、热传导加热（TCH）或热水注入对目标污染区域的土壤及地下水进行加热，当地下环境温度提高到 30~45℃ 时注入生物修复添加剂。此外，采用 REH、TCH 或蒸汽抽提开展原位热处理修复同时，在加热区域的周边即温度为 30~45℃ 区域注入生物修复添加剂，开展原位热处理耦合微生物修复。

工艺节点：原位热处理耦合微生物修复技术主要包括加热和生物修复添加剂

注入关键工艺节点。加热节点判定条件为主体加热区域冷点温度和加热边缘冷点温度均达到 30°C~45°C, 此时认为土壤整体温度达到要求, 可进入下一工艺阶段。在生物修复添加剂注入阶段, 计算单井的日注入量及累计注入量, 根据该数据实时调整单井注入量大小, 确保每口注入井的总注入量基本一致。当添加剂注入总量及单井注入量达到设计要求, 且地下水中总有机碳、电导率、pH、氧化还原电位以及添加剂浓度变化情况和分布范围等达到设计要求, 此时认为添加剂注入达到要求。

运行状态调节: 各阶段运行过程中, 通过监测系统, 收集分析地层温度、地下水水质、水位、添加剂浓度等关键数据, 对相应系统运行参数进行及时调整, 以达到传热均匀、添加剂均匀扩散的状态。其中生物修复添加剂注入阶段, 根据生物添加剂的理化性质等条件, 通过定期对地下水的氧化还原电位、总有机碳、电导率、溶解氧等参数进行监测分析, 以便及时反映添加剂扩散在地下环境中的时空分布特征, 并根据监测结果及时调整添加剂注入量和注药频率, 维持生物修复添加剂的均匀分布和所需浓度。在注药阶段及停止注入后定期对地下水中的水质参数、水位、目标污染物含量等进行监测分析, 当地下水浓度达标后对土壤进行采样分析, 若有土壤样品污染超标则返回注药阶段。当土壤和地下水污染物浓度降低至验收标准后可开展验收, 并对整个系统的修复效果和能耗进行综合评估。

三、基础研究与经济效益分析

3.1 基础研究

在国家重点研发计划项目“复合机污染场地原位热处理耦合修复技术与装备” (2019YFC1805700) 课题 3“原位热处理-微生物绿色耦合修复技术与装备研发” (2019YFC1805703) 的支持下, 针对典型氯代烃、石油烃和多环芳烃复合有机污染场地, 阐明了原位热强化微生物耦合作用机制及其影响因素, 研发了原位热强化微生物耦合修复技术工艺, 研制了原位热水/电阻加热微生物耦合修复装备 2 套, 并分别在甘肃马岭和江苏苏化开展了原位热水/电阻加热微生物耦合修复规模化示范验证, 建立了原位热处理耦合修复技术与装备体系。在本项目的支撑下, 已发表第一标准 SCI 论文 10 篇、中文论文 9 篇, 申请发明专利 11 项, 掌握了关键理论基础和技术参数, 并积累了丰富的工程实施经验。此外, 编制团队梳理并总结了污染场地原位热处理和微生物修复技术相关的标准规范、技术导则要求和

典型工程应用案例等，为指南的编制奠定了基础。基于此，本指南给出了污染场地原位热处理耦合微生物修复技术工艺设计、工艺设备和材料、监测与过程控制、施工与调试、运行与维护、职业健康与劳动安全等阶段实施过程中的要点内容，为污染场地原位热处理耦合微生物修复技术及工程实施提供了指导和建议。

3.2 经济效益

随着我国社会经济的快速发展、城市化进程的加快，用地需求不断增加，土壤修复产业的规模越来越大。此外，我国相继颁布了《土壤污染防治行动计划》和《中华人民共和国土壤污染防治法》等相关法律法规，并且相关政策、技术、监管也在逐步提升，行业结构不断完善和调整，进一步加快了我国污染场地修复行业的发展。在政策的引导和各地政府的积极推进下，我国修复市场呈现良好发展的态势，未来千亿规模的空间有望加速释放。原位热处理耦合微生物修复技术经济有效、无二次污染，并且适用范围广、绿色可持续性，具有广泛的应用前景和市场。本指南的实施将能更好的使该技术进行推广和应用，从而节省了大量的人力、物力和财力，并将显著提升我国污染场地原位修复行业的技术，以及相关配套产品和装备产业化水平，推动土壤修复产业的发展，从而达到保护土地资源、恢复土地生态经济功能、提高土地利用率的的目的。随着土壤修复产业规模的扩大和节能减排政策的需求，本指南的应用将会持续地产生良好的经济效益。

四、标准涉及的相关知识产权说明

本技术指南版权归土壤学会所有，由土壤学会统一负责团体标准的出版和发行事宜。标准中涉及专利的问题按照国家相关规定处理。

五、与现行标准、法规的关系

本指南余相关标准及法律法规协调一致，没有冲突。国内现有相关标准及法律法规如下：

- (1) 《中华人民共和国土壤污染防治法》（2019年1月1日起实施）
- (2) 《中华人民共和国环境保护法》（2014年修订，2015年1月1日起施行）
- (3) 《土壤污染防治行动计划》（国发〔2016〕31号）
- (4) 《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）；

- (5) 《建设用地土壤污染状况调查 技术导则》（HJ25.1-2019）
- (6) 《建设用地土壤污染风险管控和修复 监测技术导则》（HJ25.2-2019）
- (7) 《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ25.3-2019）
- (8) 《建设用地土壤修复技术导则》（HJ25.4-2019）
- (9) 《污染场地挥发性有机物调查与风险评估技术导则》（DB11/T 1278-2015）
- (10) 《土壤环境检测技术规范》（HJ/T 166-2004）
- (11) 《地下水质量标准》（GB/T 14848-2017）
- (12) 《地下水环境监测技术规范》（HJ/T 164-2020）
- (13) 《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》（HJ 25.6-2019）
- (14) 《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）

生态环境部于 2021 年 4 月 30 日发布并实施的行业标准《污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附》（HJ 1165-2021）与本申请标准对于原位加热系统相关的内容有一定的关联，但该标准仅针对传统的高温原位热脱附技术制定，与本次申请标准从技术原理、主要机理、目标对象、经济生态效益等方面均有本质性的区别。

六、重大意见分歧的处理经过和依据

本指南无重大意见分歧。

七、其他应予说明的事项

无

