

化工场地复合污染绿色修复管控技术规程
增溶/曝气强化多相抽提（征求意见稿）

编制说明

江苏省生态环境技术研究院有限公司

2026 年 10 月

目 次

- 一、工作简况：包括任务来源、协作单位、主要工作过程、起草组成员及其所做的主要工作等；
- 二、标准编制原则和确定标准主要内容（如技术指标、参数、公式、性能要求、试验方法、检验规则等）的论据；标准修订项目还应当列出新、旧标准水平的对比；
- 三、主要试验（或验证）的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效果；
- 四、标准涉及的相关知识产权说明；
- 五、采用国际标准的程度与水平的简要说明，与现行有关法律法规和强制性标准的关系；
- 六、重大意见分歧的处理经过；
- 七、其他应予说明的事项。

一、工作简况

（一）任务来源

为贯彻《中华人民共和国生态环境法典》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，指导化工场地复合污染多相抽提技术的设计、施工和运行，编制《化工场地复合污染绿色修复管控技术规程增溶/曝气强化多相抽提》（以下简称规程）。

本文件提供了化工场地复合污染增溶/曝气强化多相抽提绿色修复技术的设计、施工和运行的指导和建议，给出了工艺设计、工艺设备和材料、监测与过程控制、工程施工及运维等阶段中与需考虑要点有关的信息。

本文件为中国土壤学会归口管理的团体标准项目，由中国土壤学会批准立项，江苏省生态环境技术研究院有限公司、上海大学和上海市环境科学研究院3家单位提出，计划于2027年1月完成。本标准的任务来源于国家重点研发计划项目“长三角精细化工园区场地复合污染协同修复技术集成及示范”（2023YFC3709600）。

（二）协作单位

1、牵头单位

江苏省生态环境技术研究院有限公司，组织实施标准起草工作及各起草单位之间的协调工作。

2、参加单位

上海大学、上海市环境科学研究院。

（三）主要工作过程

本项目严格按照《中国土壤学会团体标准制修订工作流程》推进，各阶段工作如下：

1、前期调研与标准草案编制阶段（2025年10月）

主编单位组织召开了《化工场地复合污染绿色修复管控技术规

程 增溶/曝气强化多相抽提》编制启动会，组建编制工作组，明确分工、技术路线、资料收集清单及编制进度计划。并调研了与污染场地多相抽提修复技术相关的标准规范、技术导则、工程应用案例等内容，结合编制团队的研究与实践确定本规程的适用范围和编制内容。

2、立项申请与评估阶段（2025 年 11 月-2026 年 6 月）

2025 年 11 月，中国土壤学会团体标准工作管理委员会接收编制组提交的《化工场地复合污染绿色修复管控技术规程 增溶/曝气强化多相抽提》立项申请表，经专家立项评审论证，认可本标准具备行业必要性、技术创新性、工程实用性，同意立项，2025 年 11 月 24 日学会官网发布立项公告，2026 年 6 月获得立项批复。

3、标准征求意见稿编制阶段（2026 年 7 月—2026 年 8 月）

编制组根据立项评审专家意见进一步修改完善标准草案，补充示范工程试验数据支撑，于 2026 年 8 月完成征求意见稿初稿撰写工作。

4、公开征求意见与修改完善阶段（2026 年 9 月-11 月）

2026 年 9 月，编制组结合征求意见稿完成标准文本修订，同步完善本编制说明，整合示范工程试验验证、技术经济对比数据，形成完整征求意见稿及配套编制说明。2026 年 10 月-11 月，编制组针对公开征求的相关意见进行修改与完善。

（四）起草工作组成员及分工

起草工作组成员：曲常胜、王超、马迅、王栋、丁亮、夏威夷、周俊、李辉、相明辉、杨洁、朱清禾、孙玉超、王贺、张柔嘉、刁文钦、王雯冉。

任务分工：

江苏省生态环境技术研究院有限公司（牵头）：统筹标准立项、进度与报审；开展场地工程调研；编写标准主体文本、编制说明，

组织专家评审与意见处理。

上海大学：开展多相抽提工艺优化及附录 A 的编制。

上海市环境科学研究院：开展增溶脱氟材料性能测试及附录 E 的编制。

二、标准编制原则和确定标准主要内容（如技术指标、参数、公式、性能要求、试验方法、检验规则等）的论据

（一）编制原则

1、技术联合兼容原则

化工场地污染具有污染物组分复杂、空间分布多层级的典型特征，单一修复或管控技术往往存在适用局限，难以兼顾治理效果、工程成本与环境安全。为此本规程确立技术联合兼容原则，强调各类修复与管控技术之间协同适配、兼容联用。在技术方案设计阶段，需结合场地多组分、多层级污染特点，科学组合物化修复、生物修复、风险管控等技术手段，规避不同工艺之间的相互冲突，减少治理功能重叠；在保障修复管控工程安全与治理效果的基础上，优化工艺组合以提升污染治理效率，降低工程能耗，减少二次污染风险，最终实现多技术耦合模式下的绿色协同修复与管控。

2、全生命周期原则

化工场地复合污染修复管控不是阶段性施工任务，而是贯穿场地调查、方案设计、施工实施、运维管控、验收及后期监测的系统性工程。因此本规程提出全生命周期原则，要求对修复管控全过程开展连续数据监测、动态研判与综合效果评估。在工程实施各环节统筹兼顾治理成效、资源消耗、碳排放、生态影响及长期稳定性，改变重施工、轻长期运维的传统治理思路，实现场地修复管控效果全过程可控，推动工程绿色效益最大化。

3、绿色低碳原则

本标准编制严格遵循绿色低碳、生态友好的核心原则，立足污染场地修复全生命周期管控要求，统筹增溶曝气强化工艺的修复效能、资源消耗与环境影响，杜绝高能耗、高损耗、二次污染的粗放式修复模式。标准针对工艺核心环节明确绿色管控要求，优先倡导低毒、可生物降解、无二次污染的环保型增溶药剂，严格限制持久性、生物累积性、环境危害性较强的化学药剂使用，从源头降低药剂残留对土壤、地下水生态的潜在负面影响。

同时，结合增溶曝气、真空抽提耦合工艺的运行特性，优化曝气供氧、负压抽提、药剂投加的运行逻辑，摒弃传统工艺持续高负荷运行的模式，通过精准量化药剂用量、曝气风量、抽提负压等核心参数，有效减少化学药剂浪费、设备能耗损耗，最大限度降低修复工程对场地原生生态环境的扰动，实现高效修复与源头减排的有机统一。

4、安全实用原则

本标准坚持全过程分级风险管控逻辑。针对增溶工艺所用表面活性剂等化学药剂，明确储存、转运、配比加注、废液回流的防火、防渗、防腐蚀、防人员接触伤害要求，划定药剂独立堆放区域、配置防护器具与泄漏收集设施，严控药剂混用产生有毒有害副产物风险；针对高压曝气系统、真空多相抽提成套设备，规范管路耐压等级、密封防渗措施、压力过载保护装置设置，防止管路爆管、气体泄漏、负压伤人等安全事故。

同时本标准立足国内有机污染场地水文地质条件、现有工程装备水平、行业施工能力制定技术条款，突出工艺经济性、可操作性、普适性。所有设备参数、施工工序、监测频次、运维管控方式均依托大量实际修复工程案例提炼，简化冗余复杂检测与操作流程，在满足修复效果、安全管控前提下优化现场台账、取样监测、运行调控的实操步骤，明确便于施工人员现场快速执行的量化控制区间，

降低一线运维操作难度。

5、动态优化原则

本标准坚持动态优化、因地制宜的技术原则，充分适配有机污染场地水文地质条件、污染赋存特征的差异性与动态变化性，摒弃固定化、一刀切的工艺技术参数与施工模式。不同污染场地的土层结构、渗透系数、地下水水力条件、污染物类型、污染浓度、污染深度存在显著差异，且在增溶药剂扩散、曝气氧化脱附、多相抽提治理的全过程中，土壤与地下水污染物含量、地层孔隙结构、水气分布状态会持续动态变化。

基于此，本标准不设定固化的工艺参数阈值，而是建立基于场地实测数据的动态调控机制，根据场地勘察结果、前期小试试验数据、实时监测数据，针对性优化布井方案、药剂配伍浓度、曝气强度、抽提负压、运行周期等核心工艺参数，确保工艺方案始终适配场地实时污染状况与地质条件。同时建立三系统联动稳态运行与动态调参，根据污染浓度、昼夜温差变化、特殊地层与工况等，针对性的动态优化工艺。

（二）确定标准主要内容的论据

1、适用范围

本标准的适用范围限定在化工场地增溶/曝气强化多相抽提修复工程的设计、施工、运维及监测。同时，也明确了其限制条件，例如对于渗透性极低的黏性土层在应用本技术时需进行可行性论证。确定该范围的论据如下：化工场地主要赋存苯系物、卤代烃、石油烃等典型有机污染物，污染物常以溶解态、吸附态及非水相液体形式富集，与增溶洗脱、曝气脱附、多相抽提耦合修复机理高度适配，且相关工程应用成熟、数据积累充分，可为标准条款制定提供坚实的理论与工程支撑。鉴于该工艺依赖介质孔隙传质与多相流体运移实现污染去除，极低渗透黏性土层孔隙连通性弱、传质阻力高，易

出现药剂扩散不均、曝气利用效率低、修复效果不稳定等问题，难以直接采用常规工艺参数实施治理，因此本标准明确此类场地应用前需开展可行性论证，科学界定技术适用边界，保障修复工程科学、可控、高效实施。

2、标准的规范性引用文件

本标准引用了 GB 36600-2028（土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准（试行））、GB/T 14848-2017（地下水质量标准）、GB 8978-1996（污水综合排放标准）、GB 13271-2014（锅炉大气污染物排放标准）、GB 16297-1996（大气污染物综合排放标准）、GB/T 20801.1-2015（压力管道规范 第1部分：工业管道）、GB 50275-2010（风机、压缩机、泵安装工程施工及验收规范）、GB 50296-2014（管井技术规范）及 HG/T 20717-2020（污染场地岩土工程勘察标准）等标准。主要依据在于：标准涉及的参数试验（真空度、流量测试、抽水试验、注气试验、增溶剂注入试验）、增溶曝气强化多相抽提工艺设计、设备与材料、施工及运维、监测与过程控制等技术环节，均有成熟的国家、行业、地方或团体标准可依。通过规范性引用，既避免了重复规定，又保证了标准的技术权威性与协调性，使本规程与现行标准体系实现无缝衔接。

3、标准的术语和定义

本标准针对性界定“化工场地”、“复合污染”、“绿色修复管控”、“强化多相抽提”、“增溶强化”和“曝气强化”等六项核心术语，主要依据技术原理特征、工程应用场景及行业标准体系协调统一原则确定。其中，明确“化工场地”定义，主要参考 GB36600-2018《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》、《污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附》（HJ 1165），旨在精准划定本标准适用场景与典型污染赋存形态，区分化工有机污染场地与普通建设用地的污染特征差异，保证标准适用对象边界清晰、靶向明确。规范“多相抽

提”基础术语，主要参考 T/CAEPI 26-2020《污染地块强化多相抽提技术指南》，统一核心工艺的技术内涵与作业范畴，保障与现有修复标准体系衔接一致。针对本标准特色创新技术体系，进一步细分并界定“增溶强化”、“曝气强化”及“强化多相抽提”术语，清晰区分常规多相抽提与增溶、曝气耦合强化工艺的技术差异，明确两类强化手段的作用机理、技术特征与增效逻辑，解决目前行业对强化型多相抽提工艺术语表述模糊、概念混用、内涵界定不清的问题。

4、标准的总体工作流程

本标准规定了增溶/曝气强化多相抽提依次实施的六个技术步骤：工作流程包括技术适用性评估、场地条件精细刻画、工艺设计、主要工艺设备与材料、工程施工及运维和监测与过程控制等内容。确定该工作流程的论据如下：一是契合 HJ 25.4、HJ 25.6 等国家地块修复导则规定的污染场地修复全生命周期逻辑，遵循“先研判可行性、再摸清场地底数、后开展设计建设、全过程管控运行”的技术路线；二是立足增溶/曝气强化多相抽提复合技术机理，该技术融合药剂增溶、地下曝气、真空多相抽提多重单元，需先通过适用性评估筛选不适宜地块，依托精细刻画构建三维污染水文地质模型支撑工艺参数选型，再统一规范设备材料选型标准、落实施工运维管控，依靠动态监测闭环调整运行参数，六步骤前后制约、缺一不可；三是结合国内大量 NAPL 有机污染场地修复工程实践与现有多相抽提专项标准编制经验，兼顾技术落地实操性、工程质量可控性与修复效果可验证性，完整覆盖前期研判、方案设计、物资配套、现场实施、长期运维、动态调控全链条，形成闭环管理体系，解决当前同类技术缺乏标准化完整作业程序、各环节衔接缺失导致修复不达标的行业痛点，同时匹配标准化文件编制通则要求，实现技术流程条理化、规范化、可落地执行。

5、标准工作流程主要内容

1) 技术适用性评估

本节文本所设定的关键量化指标与配置原则，是基于国内外成熟工程实践与理论计算明确提出的，旨在确保增溶曝气强化多相抽提系统科学高效运行。渗透系数指标($10^{-5} \sim 10^{-3} \text{cm/s}$ 、 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{cm/s}$)参考美国陆军工程兵团的 MPE 工程手册(EM1110-1-4010、EM200-1-19)和美国环境保护署(EPA542-R-99-004)的技术指南，在多个实际调研项目与国际研究中被验证为 MPE 高效抽提的可行阈值。

2) 工艺设计

工艺设计章节中工艺参数设计是制定污染场地修复方案的重要环节。增溶/曝气强化多相抽提修复工程中，最为关键的技术参数包括“最佳真空度、最佳气体流量、抽水影响半径、注气影响半径、增溶剂注入影响半径、增溶剂选择和井群设计”等。参考了《Presumptive Remedy: Supplemental Bulletin Multi-Phase Extraction (MPE) Technology for VOCs in Soil and Groundwater EPA 540-F-97-004 (United States Environmental Protection Agency, United States Air Force Air Combat Command)》(推定性修复措施：补充公告多相抽提技术用于处理土壤与地下水中的挥发性有机化合物(美国环境保护署、美国空军空中作战司令部))(EPA 540-F-97-004)和《Engineering and Design: Multi-Phase Extraction EM 1110-1-4010 (Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers)》(工程与设计：多相抽提(美国陆军工程兵团))(EM1110-1-4010)等国内外指南，调研了增溶/曝气多相抽提相关文献，并结合编制单位开展的增溶/曝气多相抽提修复技术参数实验室研究、中试应用和工程示范，制定了相关参数的范围及计算方式。

3) 主要工艺设备与材料

主要工艺设备和材料章节主要参考了《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》(HJ 25.6-2019)、《原位气相抽提技术规范》

(T/CSES XX-202X)和《供水管井技术规范》(GB 50296),并结合了编制单位自主研发通过多模块有机组合实现多技术高效集成,研制形成集“精准给药-水力循环-多相抽提-智能监控”于一体的多功能精细化土壤-地下水原位协同修复成套装备在示范工程运行中涉及的系统构成和各单元组成要点等。

4) 工程施工及运维

施工及运维的核心参考《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》(HJ 25.6-2019)。明确了修复工程从设计、施工、运行到监测、验收的全过程管理要求,是施工及运维章节编写的顶层指导和核心依据。地上设备与管道安装主要参考《现场设备、工业管道焊接工程施工规范》(GB 50236),《风机、压缩机、泵安装工程施工及验收规范》(GB 50275)和《电气装置安装工程 低压电器施工及验收规范》(GB 50254)等电气系列规范。运维阶段关注系统的稳定运行、效果监测和过程记录。主要参考《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》(HJ 25.6-2019),明确要求对修复系统的运行参数(如抽提流量、真空度、药剂投加速率等)和修复效果(如地下水水质、土壤气体浓度)进行持续监测和记录。

5) 监测与过程控制

监测与过程控制章节分别从系统设计、系统启动和系统运行等方面提出了增溶/曝气强化多相抽提的监测方案。在《有机污染地块修复技术规范 多相抽提》(T/ACEF 113-2023)所要求的工艺参数的基础上,增加了过程实时监测内容,即对地下水目标污染物浓度、管道废气浓度、曝气压力、增溶注入压力、抽提流量、地下水溶解氧等常规水质参数进行实时监测。对系统参数进行优化调整,提高修复效率。

三、主要试验(或验证)的分析、综述报告,技术经济论证,预期的经济效果

(一) 主要试验(或验证)的分析

1、中试试验概况

选择江苏某化工场地作为实施试验案例, 试验范围为 20m×30m×20m (长×宽×深、中试修复深度至微承压水层), 开展增溶/曝气多相抽提中试。本次中试工程先进行参数试验后开展多项抽提中试。参数试验包括: 抽水试验(确定抽水影响半径)、注气试验(确定曝气影响半径)和真空度试验(确定最佳真空度、最佳流量)等。中试分两阶段修复浅层和深层地下水。

2、水文地质条件

(1) 地层岩性

示范场地揭露的土层划分为 6 大层, 从上而下依次为: ①-1 层杂填土(厚度 1.20 m); ①-2 层素填土(厚度 0.5~3.10 m); ②层粉质黏土(厚度 0.90~3.10 m); ③层淤泥质粉质黏土(厚度 3~5.80 m); ④-1 层粉土夹粉质黏土(厚度 9.70~15.8 m); ④-2 层粉质黏土(厚度 1.10~6 m); ④-3 层粉土夹粉质黏土(厚度 3.3~8.90 m)。

表 1-1 场地地层渗透系数

序号	土质	分层土样特征描述	土层厚度 (m)	平均厚 度(m)	层底埋深 (m)
①-1	杂填土	杂色, 以碎石等建筑垃圾为主, 充填少量黏性土, 成分及密实度不均匀, 结构性差, 局部场地分布。	1.20	/	1.05
①-2	素填土	浅灰黄色、浅灰色均有出现, 可~软塑黏性土为主, 混杂少量碎石, 偶见植物根茎, 成分及密实度不均匀, 结构性差。	0.5~3.10	2.16	0.5~3.10
②	粉质黏土	浅灰~浅灰黄色, 软塑, 局部可塑, 切面稍有光泽, 干强度及韧性中等。该层局部场地出现。	0.90~3.10	1.81	2.70~4.30
③	淤泥质粉质粘	浅灰色, 流塑, 局部为粉质黏土, 偶见少量腐植质。无摇振反应, 韧性中等,	3~5.80	4.38	6~9.50

序号	土质	分层土样特征描述	土层厚度 (m)	平均厚度 (m)	层底埋深 (m)
	土	干强度中等。该层遍布场地。			
④-1	粉土 夹粉质黏土	浅灰色为主，局部灰黄色，湿，稍密~中密，局部含白色碎螺壳，夹薄层粉质黏土(单层厚度 2~15m，含量 5~35%之间)，具水平层理。摇振反应明显，韧性及干强度低。该层遍布场地。	9.70~15.8	11.5	16~23
④-2	粉质黏土	灰色，饱和，软塑，含云母碎片。无摇振反应，稍有光泽，韧性及干强度中等。个别钻孔揭露该层。	1.10~6	4.56	20.1~27
④-3	粉土 夹粉质黏土	灰黄色，饱和，稍密~中密，少见贝壳碎屑、云母碎片，局部夹薄层粉质黏土，单层厚度 2~15m，含量 5~25%之间，具水平层理。摇振反应明显，韧性及干强度低。个别钻孔揭露该层。	3.30~8.90	6.10	27.10~29.00

(2) 地下水赋存情况

1) 潜水：分布于①-1 杂填土、①-2 素填土、②层粉质黏土、③层淤泥质粉质黏土中，层底标高-7.24~-3.29m，平均-5.20m；层底埋深 6.00~9.50m，平均 7.68m。稳定水位埋深为 0.57~1.60m，年变化幅度 1~2m。

2) 微承压水：主要分布于④-1 层粉土夹粉质黏土中。厚度 9.70~15.80m，平均 11.50m；层底标高-20.08~-13.29m，平均-16.70m；层底埋深 16.00~23.00m，平均 19.18m。稳定水位埋深为 0.21~1.52m，年变化幅度 0.5~1.5m。

(3) 地层渗透性

各地层室内试验渗透系数见下表。

表 1-2 各层渗透系数统计表

层号	土层名称	室内试验		渗透系数 建议值 K(cm/s)	透水性 评价
		垂直渗透系 数 Kv (cm/s)	水平渗透系 数 Kh (cm/s)		
①-1	杂填土	/	/	1.50×10^{-2}	强透水
①-2	素填土	1.17×10^{-5}	1.56×10^{-5}	1.56×10^{-5}	弱透水
②	粉质黏土	2.02×10^{-5}	2.96×10^{-5}	2.96×10^{-5}	弱透水
③	淤泥质粉质黏 土	1.08×10^{-5}	1.46×10^{-5}	1.46×10^{-5}	弱透水
④-1	粉土夹粉质黏 土	1.95×10^{-4}	2.62×10^{-4}	2.62×10^{-4}	弱透水
④-2	粉质黏土	3.13×10^{-6}	4.15×10^{-6}	4.15×10^{-6}	微透水
④-3	粉土夹粉质黏 土	8.70×10^{-5}	9.60×10^{-5}	9.60×10^{-5}	弱透水

3、土水污染情况

中试区域污染物主要为 1,2-二氯乙烷和 1,2-二氯丙烷，超标浓度见下。

表 1-3 地下水污染情况

污染深度	污染物	单位	检出浓度	超标倍数
潜水层	1,2-二氯乙烷	μg/L	34900	871.5
	1,2-二氯丙烷	μg/L	5260	86.67
微承压水	1,2-二氯乙烷	μg/L	3940	97.5

4、设计方案

1) 增溶曝气一体化功能井结构设计

增溶曝气一体化功能井结构（用于示范试验区多相抽提、曝气强化、注气）多功能井的井径 Φ280mm，井深 8m，PE 管，井壁管的直径为 Φ140mm。潜水开筛范围 1.5~7.0m，最后 1m 设沉淀管。微承压水监测井井深 21m，UPVC 管，管径 Φ140mm，9-20m 开筛，最后 1m 设沉淀管成井后将预装管材插入预装套管井孔中，过滤管与井壁之间填砾料（1~2cm），砾料之上填膨润土，填至与地面 20cm 处，上部用水泥混凝土封填出地面建设井台，做好标识。微承压水

井采用潜水泵为抽水设备，每口抽水井中分别放置一台潜水泵。并设置一个注入管道作为清水和药剂注入使用。抽注管道均为 32mm PVC 水管,具体结构设计如下。

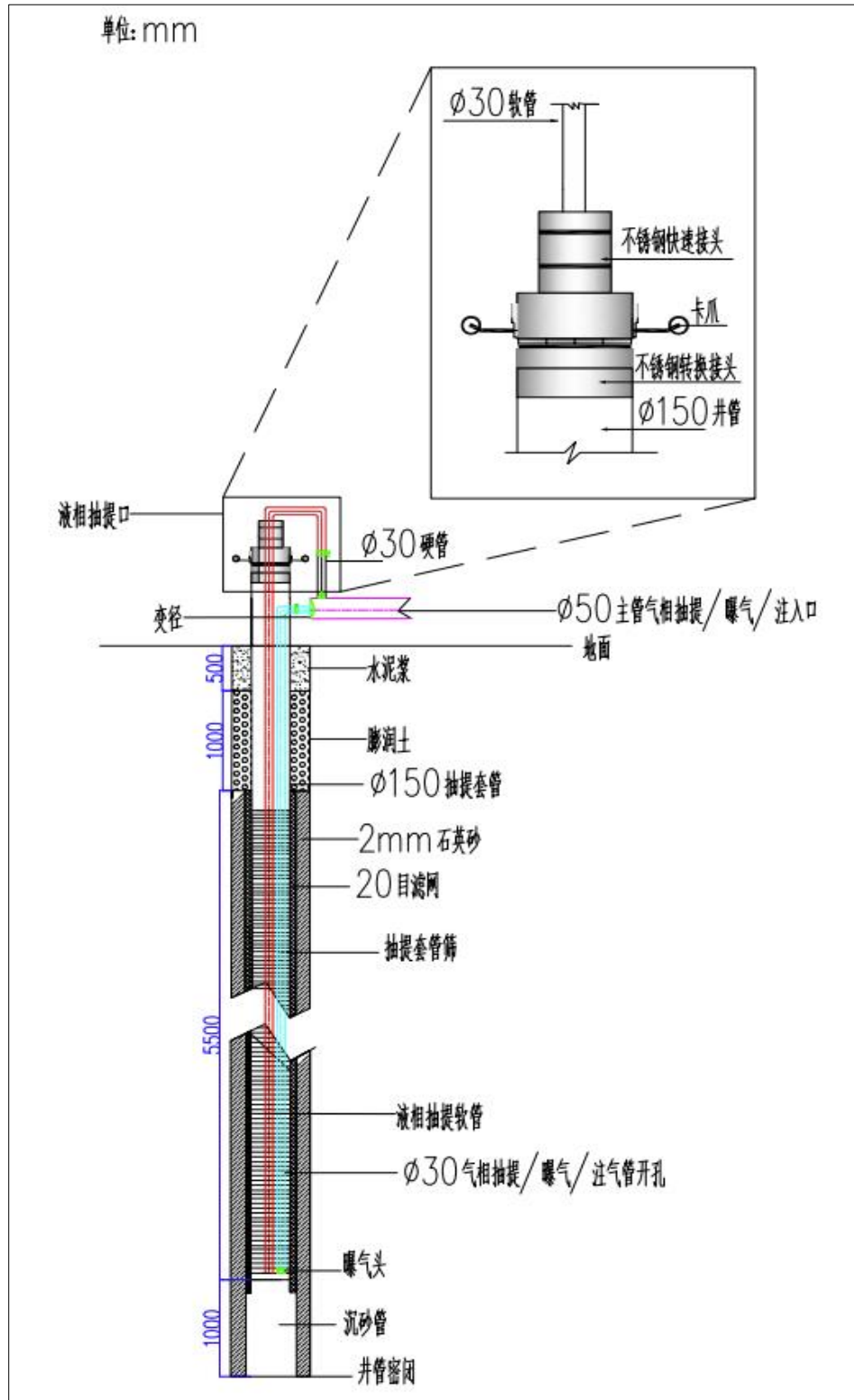


图 1-2 井结构设计

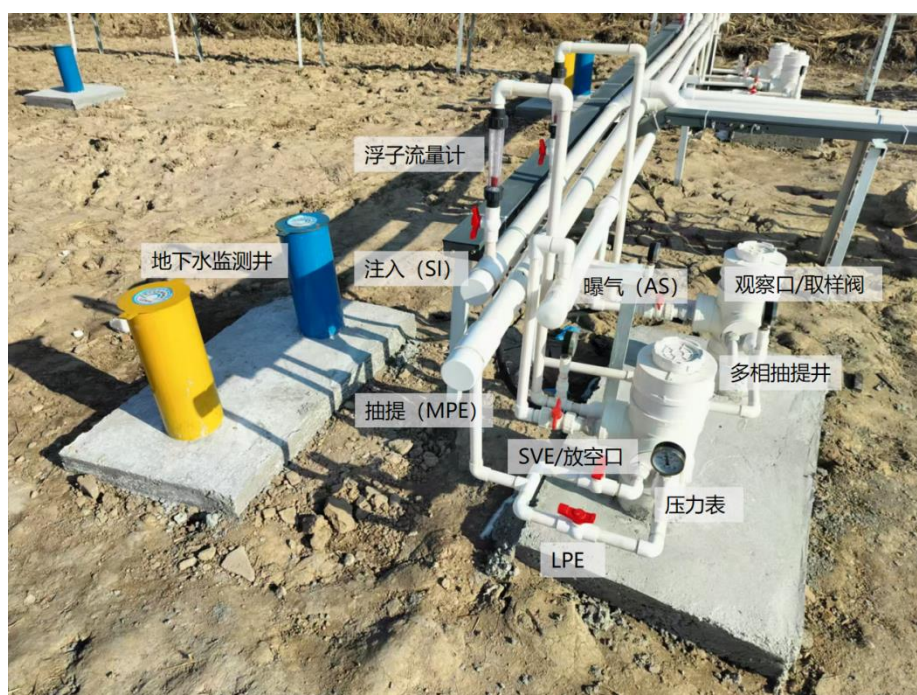


图 1-3 井结构现场照片

2) 方案设计

增溶/曝气强化多相抽提井位布设见下，总体修复运行监测分 2 个层次进行，即先进行潜水层后进行微承压水层，每层地下水修复又分为 3 个阶段，现将各阶段计划详细如下：

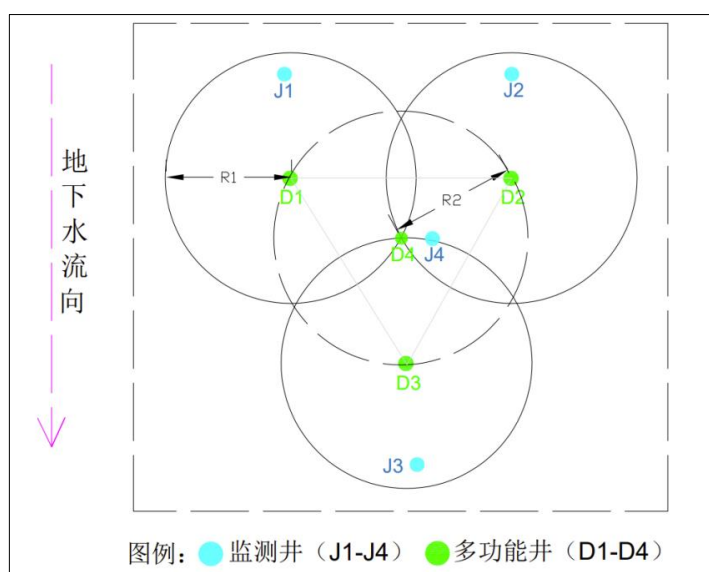


图 1-4 井位布设

A、自由相/高浓度溶解相处理

自由相处理阶段自调试结束后开始，多功能井 D1-D3 作为抽提井进行多相抽提，整个系统已抽提为主，运行至污染浓度不再明显降低（判定标准为抽提主管 PID 快筛监测），24 小时不间断运行，预计时间为 10 天。

B、包气带强化（SVE）

包气带强化阶段把多功能井 D1-D3 作为抽提井，D4 作为注气井开展修复。因土壤内的气体总量有限，在抽提一段时间后，土壤气体需要恢复。故第一阶段运行结束后开始间隔注气，多相抽提阶段。注气和多相抽提的切换时间为半个小时，整个系统 24 小时不间断运行，预计时间为 10 天。

C、饱水带强化

饱水带强化在第二阶段运行结束 2 天后开始，D1-D3 为曝气井，D4 为抽提井，整个系统已曝气为主。曝气和抽提同步进行，即通过注气井向饱水带注入空气，促进好氧生物降解。同时维持 MPE 抽提，将挥发的污染物和难降解产物排出。整个系统 24 小时不间断运行，预计时间为 10 天。

D、薄弱区域增溶强化

在曝气强化多相抽提效果不理想的区域，开展增溶注入及抽提。整个系统 24 小时不间断运行，预计时间为 10 天。

四个阶段总计实际运行时间为 40 天。

地上增溶强化多相抽提系统属于集成设备，该成套装备包括多相抽提系统（包括中央控制系统、多相分离系统以及污染物处理系统）、增溶注入系统（包括修复功能材料制备系统、修复剂泵送系统）以及水处理系统等，集“精准给药-多相抽提-智能监控”于一体。

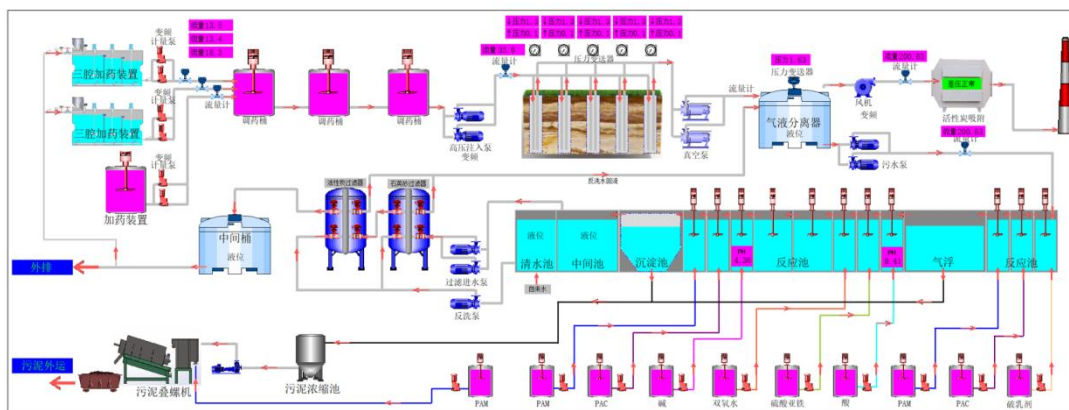


图 1-5 多相抽提成套设备

5、施工及运行方案

完成了场地平整作业施工，为示范顺利实施提供良好基础，开始进行多相抽提井建设工作以及设备集成安装，开展装备系统的试运行调试。并结合工程完成了分系统和全系统的联测、联调、联试，系统性能满足项目立项任务设计要求。多相抽提集成设备系统安装连接完毕后，进行中试运行，主要包括抽提系统中试运行和污水处理设备系统运行。运行周期为 40 日，每日设备运行 8 小时。



图 1-6 多相抽提井建设

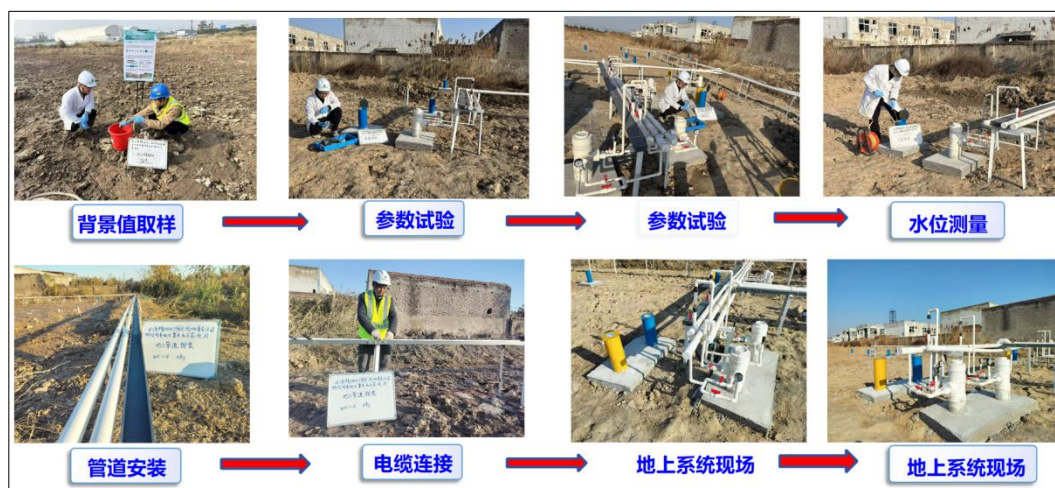


图 1-7 参数试验、系统安装及运行

6、修复效果分析

增溶曝气强化多相抽提技术对地下水中氯代烃污染物展现出显著的修复效果，但不同含水层、不同点位及目标污染物的去除效能存在明显差异。

对于 1,2-二氯乙烷，潜水层各监测井中试前浓度介于 364~56200 $\mu\text{g/L}$ ，中试后浓度降至 15.1~2820 $\mu\text{g/L}$ ，点位去除率分布在 52.75%~97.03%；高污染点位 J1-1、J4-1 去除率分别达到 97.03%、95.87%，说明增溶曝气耦合多相抽提对潜水层高浓度 1,2-二氯乙烷具备优异的降解抽提能力；J3-1 点位去除效果相对偏弱，推测受局部地层渗透性不均、污染物赋存形态差异影响。微承压水层 1,2-二氯乙烷初始浓度 157.5~26000 $\mu\text{g/L}$ ，处理后为 45.8~2610 $\mu\text{g/L}$ ，有效点位去除率 71.55%-90.35%，总体修复效果良好；J3-2 点位中试后浓度不降反升，分析认为是曝气扰动引发含水层内部污染物迁移扩散，深部滞留相污染物被冲刷释放至监测井，造成监测浓度抬升，属于原位修复过程中典型的扰动释放现象。

目标污染物 1,2-二氯丙烷整体去除效果弱于 1,2-二氯乙烷。潜水层初始浓度 12.3~6020 $\mu\text{g/L}$ ，中试后 4.2~1930 $\mu\text{g/L}$ ，去除率区间 5.45%-67.94%，J3-1 去除率仅 5.45%，低浓度条件下修复效能显著受限。微承压水层中，J1-2、J2-2 点位去除效果突出，去除率分别为

85.00%、96.27%；而 J3-2、J4-2 去除率仅 19.85%、24.09%，微承压含水层介质渗透性相对偏低，污染物传质阻力更大，限制了增溶剂与污染物的接触以及气相抽提的传质效率。

综合来看，增溶曝气强化多相抽提对高浓度氯代烃污染点位修复优势突出；受含水层介质渗透性、污染物初始浓度、污染物理化性质、NAPL 相赋存状态共同影响，低浓度点位、微承压含水层部分点位修复效能有所下降；原位曝气扰动会诱发部分区域污染物迁移释放，后续工程应用中需优化曝气时序、曝气强度与抽提匹配关系，抑制污染物迁移扩散，进一步提升低渗透地层中氯代烃的整体去除效率。

表 1-4 中试数据统计

含水层名称	潜水层				微承压水层			
井编号	J1-1	J2-1	J3-1	J4-1	J1-2	J2-2	J3-2	J4-2
污 染 物	1,2-二氯乙烷							
中试前(μg/L)	56200	15400	364	366	11700	26000	157.5	161
中试后(μg/L)	1670	2820	172	15.1	2610	2510	286	45.8
去除率(%)	97.03	81.69	52.75	95.87	77.69	90.35	/	71.55
污 染 物	1,2-二氯丙烷							
中试前(μg/L)	6020	1700	42.2	12.3	12700	1235	54.65	13.7
中试后(μg/L)	1930	902	39.9	4.2	1910	46.1	43.8	10.4
去除率(%)	67.94	46.94	5.45	65.85	85.00	96.27	19.85	24.09

（二）技术经济论证

增溶曝气强化多相抽提技术集成表面活性剂增溶、原位曝气、多相同步抽提工艺，一次性建设投资涵盖钻井成井、成套处理设备、管网自控系统及调试费用，药剂、能耗、维保、人工为核心运营支出。同规模修复条件下，该技术单位修复成本较原位化学氧化、异位开挖处置低；相比常规多相抽提虽药剂成本提升，但依托数值模拟优化井位、注药与曝气参数，可削减药剂用量及设备能耗，全生命周期综合造价可控，成本优势量化显著。

从时间经济效益层面，增溶与曝气耦合作用可将土壤、地下水氯代烃去除率稳定提升，修复周期相比传统多相抽提缩短，以 6~12

个月标准修复周期为例，可减少近半数项目资金占用时长，加速地块达标流转；工艺全程原位实施，可省去大面积土方开挖、转运、填埋处置费用，系统分离产生的游离油相资源化回收率高，同步完成土壤、地下水、土壤气三相污染物协同治理，大幅提升地块再开发增值收益。

工程选用环境可降解增溶药剂，场地二次污染风险较低，修复完成后长期监测管控投入减少，大幅降低环保合规附加成本；技术可在3~12个月内消除场地有机污染健康风险，盘活污染地块，助力区域存量土地开发利用。综合造价、修复效率、环境风险、开发时效四项指标对比，该技术综合投入产出比高出同类工艺，技术成熟、经济合理，针对挥发性、半挥发性有机污染场地具备优先选用与规模化工程推广的经济可行性。

（三）预期的经济效果

1、直接经济效益

1)降低总成本：虽然单位时间运行成本可能较高，但由于修复周期大幅缩短（通常可缩短30%~50%），项目的总成本往往低于长期运行的常规技术。

2)节约监测与维护费用：修复更彻底，可减少后期长期监测的年限和费用。

2、间接与衍生经济效益

1)盘活土地资产：加速场地再开发进程，使“毒地”变“宝地”，提前实现土地增值收益。这是最核心的经济驱动力。

2)带动产业发展：促进环保技术研发、装备制造和专业服务等产业链的发展。

3)减少环境负债：帮助企业清晰量化并解决历史遗留环境问题，改善资产负债表，提升融资能力。

四、标准涉及的相关知识产权说明

本标准不涉及相关专利及其他知识产权问题。所有引用的标准和文献均已注明出处，并尊重原作者的知识产权。

五、采用国际标准的程度与水平的简要说明，与现行有关法律法规和强制性标准的关系

（一）采用国际标准的程度与水平的简要说明

本标准在起草过程中，主要以国际标准为基础，结合国内标准中关于增溶曝气强化多相抽提研究进展进行适当调整和补充。采用的国际标准的程度与水平说明如下。

1、推定性修复措施：补充公告多相抽提技术用于处理土壤与地下水中的挥发性有机化合物 EPA 540-F-97-004（美国环境保护署、美国空军空中作战司令部）首次将 MPE 技术作为对传统土壤气相抽提（SVE）技术的增强手段，推荐用于处理土壤和地下水中 VOCs 的场地。本标准中关于 MPE 工艺系统类型和技术适用场景参考该文件内容分别进行分类与规定。

2、工程与设计：多相抽提 EM1110-1-4010（美国陆军工程兵团）包括单泵系统在抽提液体时受限于约 34 英尺水柱真空高度的物理极限，并提出通过双泵配置（分别抽提液体和气体）以克服深度限制，提高系统抽提效率。本标准中关于 MPE 工程设计与安装要求，如抽提井设计要求、材质要求、设备连接要求等参照该文件中的要求进行规定。

3、多相抽提技术：应用现状 EPA 542-R-99-004（美国环境保护署）全面汇总了 MPE 技术在 Superfund、RCRA 修正行动、地下储罐（UST）、国防部（DOD）和能源部（DOE）等多个联邦项目中的最新实践。本标准中关于强化多相抽提技术设计参照该文件 进行设计优化，同时本标准中关于 MPE 系统检测中的真空度、气液比、污染物相浓度等关键参数亦参照该文件的要求进行确定。

4、有害、有毒、放射性及危险废物修复技术的安全与健康方面

EM 1110-1-4007（美国陆军工程兵团）手册将 MPE 技术列入需进行健康与安全评估的 25 项典型处置技术之一，针对 MPE 运行中可能涉及的真空系统安全、电气设备选型提出了相关的建议。本标准中关于 MPE 系统的安全控制措施及二次污染防控规范参照该文件中对于 MPE 系统安全标准要求与环境风险管理框架进行制定。

（二）与现行有关法律法规和强制性标准的关系

本技术规范与有关法律、行政法规及相关标准之间的关系密切，主要体现在以下几个方面。

1、法律法规的遵循

本规范的制定严格遵守我国现行的环保法律法规，特别是《中华人民共和国生态环境法典》等法律，确保增溶/曝气强化多相抽提实施过程中符合国家对环境保护、污染防治和资源循环利用的法律要求。如水土污染和大气污染的控制方面，确保增溶/曝气强化多相抽提实施过程中不对水体、大气及土壤造成二次污染。本标准符合相关法律法规要求，目前在本领域暂无可直接参考的国家标准、行业标准和地方标准。

2、标准规范的借鉴

近年来，随着我国对地下水环境保护重视程度的不断提升，已陆续出台多部多相抽提修复污染地下水相关的技术指南与标准，初步形成了多层次、多技术类型的地下水修复标准体系。这些标准为各类修复工程提供了重要技术支撑，也反映出当前体系对系统性、集成化技术规范的迫切需求。现有标准体系主要呈现如下特点。

传统异位修复技术标准趋于成熟。以生态环境部发布的《污染地下水抽出-处理技术指南》（试行）及中关村中环地下水污染防控与修复产业联盟发布的《受污染地下水抽出-处理修复技术指南》（T/GIA 005-2020）为代表，对经典的抽出-处理技术进行了系统规范，涵盖了从污染羽控制、抽出系统设计、地表处理到运行监测的

全过程，为行业奠定了坚实基础。但是针对复杂污染场景条件应用较为局限，且仅适用于采用单一抽提技术开展地下水污染风险管控和修复的工程。

上海大学牵头编制的《有机污染地块修复技术规范 多相抽提》（T/ACEF 113-2023）规定了有机污染地块多相抽提修复的基本规定、多相抽提设计、强化多相抽提设计、监测与控制、施工与验收、运行与维护。未明确曝气强化多相抽提技术参数设计及应用规定。

东南大学牵头编制的《场地污染应急处置技术规范 多相抽提》（征求意见稿）规定了采用多相抽提技术进行场地污染应急处置的基本原则、工作程序、现场污染态势研判、处置方案制定、处置实施与监测、处置评价与终止等要求。适用于采用多相抽提技术的场地土壤及地下水污染应急或快速处置，未涵盖化工场地土壤及地下水全周期系统修复治理要求及相关参数。

本技术规范在制定过程中充分考虑了相关法律、法规、现有标准的不足，并在此基础上进行创新和补充，以确保增溶曝气强化多相抽提技术的安全、环保及高效实施。同时，该规范也在国际标准的基础上，结合国内的具体情况，填补了增溶曝气强化多相抽提应用领域的技术空白。

综上所述，本标准符合现行的法律法规要求。无与本标准有冲突、矛盾和相关的强制性（国家、行业、地方）标准，具备协调一致性。

六、重大意见分歧的处理过程

本规程无重大意见分歧。

七、其他应予说明的事项

1、本标准为首次制定，后续将根据国内增溶/曝气强化多相抽提工程实践积累、材料技术进步适时开展标准修订。

2、因工商登记变更，2026年8月18日牵头单位公司名称由原

江苏省环境工程技术有限公司变更为江苏省生态环境技术研究院有限公司，统一社会信用代码为：91320000MA22C9L494。本次变更仅为企业名称变更，不涉及公司主体资格的改变，不涉及经营范围的调整，变更前后公司为同一法律主体。名称变更前实施的民事法律行为，该公司具有法律约束力。人员团队、企业业绩、资质证书、知识产权、获奖荣誉等各项权利和成果不因企业名称变更而受影响。

（3）团标征求意见阶段，专家认为，系列标准内容同时包括修复技术和管控技术本，所以将团标名称《化工场地复合污染绿色修复技术规程 增溶/曝气强化多相抽提》修改为《化工场地复合污染绿色修复管控技术规程 增溶/曝气强化多相抽提》。