

《水平可渗透反应墙与原位注入氧化耦合技术应用指南》（征求意见稿）编制说明

一、工作简况

本指南的编制任务来源于国家对土壤污染治理与地下水修复的政策要求，旨在为更好地实施水平可渗透反应墙与原位注入氧化耦合技术提供科学、规范的技术参考和应用指南。该技术的推广有助于提升环境修复工程的有效性和效率，促进相关领域的技术进步。

2021年10月，由青岛科技大学牵头的山东省重大科技创新工程“典型重点行业土壤污染监测、预警与修复技术集成及装备研发”（2021CXGC011206）正式获批。在项目的资助下，青岛科技大学联合中化环境修复（上海）有限公司、南开大学、中国矿业大学、山东拓普环境科技有限公司等单位联合攻关，完成了大型石化场地土壤-地下水复合污染协同修复的技术集成与示范，其中水平可渗透性反应墙（Permeable Reactive Barrier，简称PRB）与原位注入氧化耦合技术成功修复了5000m²土壤和地下水污染。该集成工艺和示范项目针对大型复杂石化场地土壤-地下水复合污染、难修复和成本高等问题，突破复合污染修复技术、材料与装备协同成套技术与方法，重点解决工程应用过程中所面临的处理效率低、能源消耗高、修复材料易失活、修复效果容易拖尾或反弹等难题，通过技术协同集成和场地工程示范，形成可复制和推广的绿色低碳大型污染场地协同修复技术体系。2024年10月，该集成工艺和示范项目成功通过了成果论证评价会，专家组对该项目成果给予高度评价，认为其总体技术达到国际领先水平，并建议尽快推广应用。

目前我国没有水平PRB与原位注入氧化耦合技术的应用指南，水平PRB与原位注入氧化耦合技术在应用过程中缺乏统一的技术规范和标准，导致修复效果参差不齐，甚至可能产生二次污染。因此，制定相关技术指南，能够为土壤-地下水污染治理提供标准化、系统化的操作流程与技术依据。同时制定指南的过程也能够促进两种技术的整合与创新，有助于引导行业内的研究方向和应用实践。为此尽快制定《水平可渗透反应墙与原位注入氧化耦合技术应用指南》

势在必行。

本指南以青岛科技大学和中化环境修复（上海）有限公司为主要起草单位，成立专门的指南制定工作组，负责技术指南的总体策划、内容编写和组织协调工作。南开大学、中国矿业大学、山东拓普环境科技有限公司、潍坊科技学院、江苏元堃稀土有限公司、斯坦德技术工程（青岛）有限公司、中化环境修复（山东）有限公司、安徽理工大学等是主要的参与单位，同时邀请国内外知名的研究机构或高校、土壤-地下水修复相关企业和协会参与技术支持与咨询，为指南的制定提供最新的研究成果、案例分析和实践经验。

本指南的主要起草人包括：匡少平、孟庆强、刘伟健、任贝、陈希磊、李绍华、王梦梦、陈俊华、孙红文、冯秀娟、李建华、汪玉、张鹏、康妍、黄国富、孙玉焕、王发园、吴占超、刘帅。

二、制定标准的必要性和意义

我国石油化工行业的快速发展导致地下水受到严重污染，地下水污染的治理修复和风险管控工作迫在眉睫。水平 PRB 和原位精准靶向注入氧化技术是当前地下水污染治理领域中重要的两种原位修复手段，将这两种技术结合应用，能够充分发挥各自优势，在提升处理效率、降低治理成本、缩短治理周期等方面，达到更优的治理效果。但水平 PRB 与原位注入氧化耦合技术在应用过程中缺乏统一的技术规范和标准，导致修复效果参差不齐，甚至可能产生二次污染。因此，制定相关技术指南，能够为地下水污染治理提供标准化、系统化的操作流程与技术依据。同时制定指南的过程也能够促进两种技术的整合与创新，有助于引导行业内的研究方向和应用实践。

在实际应用中，《水平可渗透反应墙与原位注入氧化耦合技术应用指南》的实施涉及多个环节，包括现场评估、设计施工、监测评估等。不同行业、不同地区的应用实践可能存在差异，制定技术指南可以建立标准化流程，保证各项工作的规范性与一致性，提高修复质量与效率。同时，安全性是地下水污染治理中的重点，指南的制定过程需要充分考虑相关的环境、健康和安全标准，通过风险评估、应急预案等措施，确保技术实施的安全性和有效性。随着环保意识的增强，各国对地下水污染治理的立法和政策日趋严格。《水平可渗透反应墙与原位注入氧化耦合技术应用指南》的制定，为相关政策法规的形成提供了科

学依据和技术支撑，促使政策制定者能够更好地理解、采纳和实施高效的地下水污染治理技术，从而推动环保法律法规的完善与实施。

本指南旨在为水平 PRB 与原位注入氧化耦合技术的应用提供全面、系统的指导，推动环境治理技术的标准化和规范化，为健康的生态环境贡献力量

三、主要工作过程

3.1 主要起草单位和协作单位

（1）主要起草单位

青岛科技大学和中化环境修复（上海）有限公司：为本指南的牵头单位，在土壤-地下水修复领域具有丰富的研究经验和技術积累，负责整体框架的设计与内容的统筹。同时为本指南的技术方法提供学术支持，并参与相关实验和数据验证，提供相关的地质环境研究资料。

（2）协作单位

南开大学、中国矿业大学、安徽理工大学等合作高校参与土壤-地下水修复技术的研究和评估，为指南的科学性提供支持。

山东拓普环境科技有限公司、江苏元堃稀土有限公司、斯坦德技术工程（青岛）有限公司、中化环境修复（山东）有限公司等合作企业：负责提供土壤-地下水场地修复的实践经验和相关案例的数据支持，协助收集实际应用中的案例与反馈信息，确保指南的适用性和可操作性。

3.2 工作过程说明

（1）2023 年 1 月-2023 年 3 月：前期调研与需求分析

在指南编制的初期，调研小组对国内外已实施的水平 PRB 和原位注入氧化技术进行全面的文献回顾，并收集和分析相关标准和规范，了解国际先进标准和技术应用现状。

召开面对面和线上座谈会，广泛征求起草单位与协作单位专家的意见，确定指南的编制目标与范围。

（2）2023 年 4 月-2023 年 6 月：起草策划

组建由行业专家、企业代表和科研人员组成的起草小组，确定指南的框架结构，包括地块条件调查、技术经济性评估、工程设计、工程施工、工程运行监测、工程效果评估及后期环境监管与维护等技术内容等章节。明确指南的适

用范围、技术要求、试验方法、检验规则等核心内容，对水平 PRB 和原位注入氧化耦合技术修复设备系统调试的关键技术参数、操作流程和安全要求进行了详细规定

制定工作计划，划定主要的工作任务及时间节点，确保各个环节的有效推进。

（3）2023 年 7 月-2023 年 10 月：技术内容的编写与验证

技术方案的编写：由各个专业小组负责根据调研结果，编写各自负责章节的技术内容。比如，水文地质组负责反应墙布局及设计原则，化学组负责化学氧化过程及反应材料选用等。具体开展了一系列的小试和中试，确定 PRB 填料和化学氧化剂投加量、水力停留时间、反应墙厚度等参数。

学术咨询与评审：通过征求专家意见，对初稿进行多轮评审和修改，确保内容的科学性和前沿性。

（4）2023 年 11 月-2024 年 2 月：实践案例的收集与分析

收集多类应用实例，通过现场考察、数据分析等方式，验证技术的有效性。同时，将成功案例整理纳入指南，作为实际操作的参考。

与各级环保部门进行合作，收集地方实际应用中的问题和反馈，形成基于实际的改进建议。

（5）2024 年 3 月-2024 年 6 月：标准的初稿形成

整合各章节内容，形成初稿。在此过程中，确保语言的规范性和技术细节的准确性。

进行内部审查，确保指南内容完整并符合编制目的。

（6）2024 年 7 月-2024 年 10 月：征求意见与修改

发布初稿后，面向社会各界征求意见，通过线上平台创建反馈渠道，收集来自学术界、行业及用户的建议和意见，进行进一步修改。

针对反馈意见，组织专家会议讨论，决定修改方案以增强指南的适用性和科学性。

四、制定标准的原则和依据

4.1 制定标准的依据

国家和地方环境保护法律法规（例如《中华人民共和国环境保护法》和

《地下水污染防治法》)明确规定了污染治理的基本原则和要求,这些法律为水平 PRB 与原位注入氧化耦合技术的应用提供了法律依据,确保在实施这些技术时遵循环保的基本要求。

与国家、行业标准紧密衔接,引用的 GB8978-1996、HJ/T164-2004、DZ/T0148 和 HJ25.6 等一系列标准、技术规范和技术导则,作为技术体系的重要支撑,保证石油化工有限公司污染地《水平可渗透反应墙与原位注入氧化耦合技术应用指南》的科学性和规范性。本技术指南中地块条件调查、技术经济评估、工程设计、工程施工、工程运行监测、工程效果评估及后期环境监管与维护等环节的要求均遵循或高于国家、行业标准,有助于推动整体修复技术水平提升,实现石油化工有限公司污染地下水治理的规范化和标准化。同时,本技术指南与《地下水污染可渗透反应格栅技术指南(试行)》(2022年5月)保持一致性和协调性,以确保技术要求的连贯性和适用性。

总之,石油化工有限公司污染地下水《水平可渗透反应墙与原位注入氧化耦合技术应用指南》的制定旨在强化法律、法规的实施,补充和完善国家和行业标准,细化相关技术要求,推动地下水修复工作的有效开展。

4.2 制定标准的基本原则

(1) 科学性原则:依据最新的科学研究和技术进展,确保所采用的技术和方法具有严谨的科学基础和实用性。这要求参考国内外前沿的研究成果及标准,结合实地应用案例,确保所提出的指导原则具有可行性和有效性。

(2) 规范性原则:根据地下水修复和风险管控法律法规要求,采用程序化、系统化的方式规范 PRB 的反应介质选择、工程设计、工程施工、运行状况监测、效果评估、后期环境监管、工程关闭等过程,保证 PRB 工作过程的科学性和客观性。

(3) 可行性原则:根据污染地块的水文地质条件、污染程度和范围、受体与周边环境情况,通过实验室小试、现场中试、模拟分析等确定关键设计参数,确保 PRB 工程切实可行。强调所提出的技术方案和方法应具有明确的操作步骤和技术指标,使得用户能够在实际应用中容易理解和实施,确保技术的推广与应用得到保障。

(4) 系统性原则:强调指南在内容编排和结构设计上的系统性,确保各个

部分相互联系、协调发展。技术方案、施工方法、监测评估等内容应形成一个完整的体系，以便于理解和应用。

(5) 适应性原则：考虑到不同地区、不同污染类型和不同项目规模的差异，制定的指南应具有较高的适应性，能够根据具体情况进行调整和优化，以满足不同环境下的需求。

(6) 可持续性与安全性原则：在技术选择和实施过程中，注重环境保护和资源的可持续利用，尽量采用环保材料和可再生资源，以减少对生态环境的负面影响。工程设计及施工时，要确保工程实施安全，应防止对施工人员、周边人群健康和生态受体产生危害。

附录：主要引用的规范性文件

GB 8978-1996 污水综合排放标准

GB 12523-2011 建筑施工场界环境噪声排放标准

GB 16297-1996 大气污染物综合排放标准

GB/T 31962-2015 污水排入城镇下水道水质标准

GB 50034-2013 建筑照明设计标准

GB 50052-2016 供配电系统设计规范

GB 50055-2011 通用用电设备配电设计规范

GB 50058-2014 爆炸危险环境电力装置设计规范

GB/T 50062-2008 电装置的继电保护和自动装置设计规范

GBJ 65-1983 工业及民用电力装置的接地设计规范

GBZ 1-2010 工业企业设计卫生标准

GBZ 2.1-2007 工作场所有害因素职业接触限值第1部分：化学有害因素

GBZ 2.2-2007 工作场所有害因素职业接触限值第2部分：物理因素

DZ/T 0148-2014 水文水井地质钻探规程

HG/T 20715-2020 工业污染场地竖向阻隔技术规范

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 25.5-2018 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则

HJ 25.6-2019 污染地块地下水修复和风险管控技术导则

HJ 494-2009 水质采样技术指导

HJ 2015-2012 水污染治理工程技术导则

HJ/T 91-2002 地表水和污水监测技术规范

HJ/T 55-2000 大气污染物无组织排放监测技术导则

HJ/T 164-2004 地下水环境监测技术规范

HJ/T 166-2004 土壤环境监测技术规范

HJ/T 373-2007 固定污染源监测质量保证与质量控制技术规范

HJ/T 397-2007 固定源废气监测技术规范

劳动防护用品配备标准（试行）（国经贸安全〔2000〕189号）

地下水污染可渗透反应格栅技术指南（试行）（环办土壤〔2022〕16号）

关于印发《地下水环境状况调查评价工作指南》等4项技术文件的通知
（环办土壤函〔2019〕770号）

五、主要条款的说明

5.1 工作内容及流程

5.1.1 编制依据

《水平可渗透反应墙与原位注入氧化耦合技术应用指南》工作内容及流程的编制主要依据 HJ 25.1-2019、HJ 25.2-2019、HJ 25.3-2019、HJ 25.5-2018、HJ 25.6-2019、《地下水污染可渗透反应格栅技术指南（试行）》和《关于印发〈地下水环境状况调查评价工作指南〉等4项技术文件的通知》等，结合山东省重大创新工程“典型重点行业土壤污染监测、预警与修复技术集成及装备研发”（2021CXGC011206）形成的绿色低碳大型污染场地协同修复技术体系和示范工程，广泛征求相关领域专家意见，确定了地块条件调查、技术经济评估、工程设计、工程施工、工程运行监测、工程效果评估和后期环境监管与维护等系统工作内容及流程，有助于实现石油化工污染地下水治理的规范化和标准化。具体包括以下几个方面：

政策法规：遵循国家和地方关于环境保护、土壤修复以及污染治理的相关法律法规。

技术标准：参考行业内相关的技术标准和规范，如生态环境部发布的相关

修复技术标准、美国环保署（EPA）以及国际标准化组织（ISO）的相关标准和指南。

科研成果：依托于已有的科研成果和文献资料，整合国内外在水平可渗透反应墙和原位注入技术方面的研究进展和应用案例。

工程实践：结合实际工程案例，分析总结工程实施中的经验和教训，提出具有可操作性的工作流程和技术要求。

专家意见：广泛征求相关领域专家和工程师的意见，确保指南的科学性和合理性，并提高其在实际应用中的可行性。

用户需求：考虑到工程实施单位和相关利益方的需求，设计出适用于不同场景的应用指南，以便于实际操作。

持续改进：依据工程实施过程中的反馈信息，持续更新和完善指南内容，确保其适应性和前瞻性。

5.1.2 工作内容

（1）地块环境调查：获取污染地块水文地质特征、水文地球化学特征和地下水中污染物分布特征等的信息。对地块概念模型进行更新。

（2）技术经济评估：根据污染物特征、水文地质条件和工程施工条件，结合实验室小试、现场中试和模拟分析等，从技术成熟度、适用条件、效果、时间和环境风险等方面开展技术适用性评价。评估施工前所需的费用、材料成本、施工费用和运行维护成本，判断经济可行性。综合分析技术与经济可行性，评估水平 PRB 与原位注入氧化耦合技术的工程应用适宜性。

（3）工程设计：根据地块的污染特征、水文地质条件和修复目标，结合 PRB 反应填料和氧化剂的选择结果，进行工程设计，制定技术路线，确定 PRB 填料和氧化剂的类型、位置和尺寸、工艺参数以及监测井的数量和布局等。

（4）工程施工：包括抽出井和原位注入井建设、反应墙构筑以及 PRB 填料和氧化剂注入等。

（5）工程运行监测：监测污染地块地下水的地球化学特征、污染羽的捕获情况和水力性能评估等。

（6）工程效果评估：评估污染物去除效果是否达到预定目标、工程性能是否达到设计标准以及修复工程对周围环境的影响。对项目的投资成本与治理效

果进行对比，评估经济效益。

(7) 后期环境监管与维护：根据地块修复工程实施情况及工程效果评估结论，提出后期环境监管要求和维护措施。

5.2 地块条件调查

5.2.1 目的及依据

地块条件调查的目的是获取污染地块水文地质特征、水文地球化学特征和地下水中污染物分布特征等的信息。根据收集的地块资料，分析地块地质与水文地质条件、地下水污染特征、受体与周边环境情况等，对地块环境调查和风险评估阶段构建的地块概念模型进行更新，重点关注地下水污染羽的分布和变化。

指南依据 HJ 25.1-2019、HJ 25.2-2019、HJ 25.3-2019 规定了环境调查和风险评估的技术规范，依据 HJ 25.6-2019 确定地下水修复和风险管控目标及范围等资料。通过核查地块已有水文地质条件、地下水污染特征等资料和现场踏勘情况，重点核实污染地块基本情况、水文地质条件、受体与周边环境情况、土壤与地下水污染特征等。此外，要进行针对地下水情况的野外抽水试验、微水试验、示踪试验等，主要目的为确定地下水的流向、流速、影响半径等。对取样岩芯进行土工试验，主要用于测定常规土工参数，主要包括土壤性质、塑限、液限、水平渗透系数、垂直渗透系数等。

修复实施过程中，应综合判断污染地块现有资料是否满足开展水平 PRB 与原位注入氧化耦合修复的技术经济评估要求，资料需求见表 1。若现有资料不满足要求，可按照 HJ 25.1-2019、HJ 25.2-2019、HJ 25.3-2019 和 HJ 610-2016 等要求获取相关数据。

表 1 指南中地块调查的资料需求

数据需求	描述
地下水污染资料	污染羽的位置与范围（水平和垂向）
	污染源范围（水平和垂向），污染物排放历史
	污染物及其降解产物的化学组分，浓度水平，本底浓度，是否存在非水溶相等
	污染物性质，包括溶解度、密度、水溶性、土-水分配系数、可降解性等
地质与水文地质资料	地层与岩性特征，包括含水层及隔水层岩性组成、厚度、非均质性、渗透率等
	地层的工程地质特征，岩土体的物理力学性质等
	地下水流场及系统边界条件，包括流速、流向、含水层及隔水层埋深（需考虑季节变化）、补径排条件、边界条件等
	地下水渗流特征，包括水流机制（裂隙流或孔隙流）、优势通道、渗透系数等
	地下水地球化学特征，包括阳离子： Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等；阴离子： Cl^{-} 、 HCO_3^{-} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} 等；pH、氧化还原电位（Eh）、溶解氧（DO）等
	降雨、蒸发、地表水径流等气象水文条件等
	潮汐或海洋环境的地球化学影响
地块条件资料	现有或拟建的地面及地下基础设施
	周边地表水或洪涝风险
	地下水开发利用可能对地下水系统产生的影响
	土地利用、规划，土地使用或生态限制等
	潜在的健康和环境安全考虑
敏感受体	受体的位置和距离，包括含水层、抽水井、地表水体(河流、湖库和泉等)、其他依赖地下水的生态系统

5.2.2 地块概念模型应包括的信息

(1) 地质与水文地质条件

地层分布及岩性、地质构造、地下水类型、含水层系统结构。地下水分布条件、地下水流场、地下水动态变化特征、地下水补径排条件等。

地形地貌、环境条件：关注地块的地形地貌、建筑物或公共设施、高架线、地块地下管线分布、构筑物分布、周边敏感目标等。

水文地质特征：关注地块地质条件（包括地层岩性、地质构造、渗透性能）、地下水含水层、隔水层（弱透水层）的岩性、埋深、厚度、结构及物性参数，地下水水位埋深与标高、地下水补给、径流和排泄条件、水力性质（地下水流速和方向、水力梯度等）、水文地质参数（如孔隙度、渗透性、含水层介质的总有机碳含量等）、水动力弥散系数等。

地下水理化特征：关注地下水的 pH、溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP)、温度、主要离子浓度(K^{+} 、 Na^{+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^{-} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} 、

NO₂⁻等)、地下水中微生物群落特征等参数。

(2) 地下水污染特征

污染源、目标污染物浓度、污染范围、污染物迁移途径、非水溶性有机物的分布情况等。

(3) 受体与周边环境情况

结合地块地下水使用功能和地块规划，分析污染地下水与受体的相对位置关系、受体的关键暴露途径等。

5.3 技术经济评估

依据 HJ 25.6-2019 和《地下水污染可渗透反应格栅技术指南(试行)》，指南中规定了水平 PRB 与原位注入氧化耦合修复的技术经济评估操作规范。主要根据污染物特征、水文地质条件和工程施工条件，结合实验室小试、现场中试和模拟分析等，从技术成熟度、适用条件、效果、时间和环境风险等方面开展技术适用性评价。可通过对比水平 PRB 与原位注入氧化耦合技术与同条件下其他修复技术或组合修复技术，从修复技术的成熟度、修复效果可达性、修复成本、修复周期、二次污染产生等进行衡量。

实验室小规模试验应专注于初步筛选水平 PRB 与原位注入氧化耦合技术中的关键环节和重要参数，制定小试方案，采集污染地下水及含水层介质。根据试验结果，确定最佳工艺参数和可能产生的二次污染物。中试实验依据水平 PRB 与原位注入氧化耦合修复技术的特点，结合地块条件、环境与水文地质条件、污染物的类型及其空间分布特征等因素，选择适当的单元进行中试，获取设计和施工所需的工程参数。

评估施工前所需的费用、材料成本、施工费用和运行维护成本，判断经济可行性。综合分析技术与经济可行性，评估水平 PRB 与原位注入氧化耦合技术的工程应用适宜性。

5.4 工程设计

指南中工程设计的编制总体遵循 HJ 25.4-2019、HJ 25.5-2018 和 HJ 25.6-2019 的规定，根据地块的污染特征、水文地质条件和修复目标，结合 PRB 反应填料和氧化剂的选择结果，进行工程设计，制定技术路线，确定 PRB 填料和氧化剂的类型、位置和尺寸、工艺参数以及监测井的数量和布局等。

5.4.1 水平 PRB 与原位注入氧化耦合技术原理

- (1) 通过建设分布于污染羽范围的抽水井对污染地下水进行抽提；
- (2) 通过水平 PRB 装置对污染水进行氧化治理，通过水力停留控制、药剂投加氧化等处理污染地下水；
- (3) 将氧化合格的地下水通过注入井回灌地下水污染羽区域，降低污染浓度、促进地下水流动，与抽水井区域形成循环流场；
- (4) 对局部污染较重的区域，通过氧化剂原位注入的方式源头降低污染程度、削减污染物总量。

5.4.2 水平 PRB 工程设计

水平 PRB 工程设计总体应遵循 HJ 25.5-2018 和 HJ 25.6-2019 的相关规定，并根据地块的污染特征、水文地质特性及修复目标，结合反应介质的选择结果或现场中试的成果，确定 PRB 的工程设计方案。关键步骤包括地下水数值模拟、反应格栅厚度设计和地球化学特征评估等，其核心是在其整个使用寿命内捕获污染物羽流，并对污染羽进行修复以达到修复目标。PRB 填料是设计环节的重要单元，指南中详细规定了 PRB 填料的筛选步骤。

5.4.2.1 PRB 填料遵循的筛选原则如下：

- (1) 反应高效性。首选污染物反应速率常数大的反应介质，同时，反应介质应对污染物具有较高的选择性和较大的反应容量。
- (2) 导水适宜性。反应介质的粒径应保证反应格栅的孔隙度和渗透系数大于含水层介质，确保 PRB 具有水力截获污染羽的能力。
- (3) 安全稳定性。反应介质的物理及工程性质稳定，具有合适的渗透性，能够维持较长的反应时间。反应介质应环保安全，反应过程中不应产生有毒有害副产物。
- (4) 经济可行性。反应介质来源广泛，当不同反应介质对污染物去除效率差别不大时，可优选价格低廉的反应介质。

5.4.2.2 PRB 填料筛选的方法包括：

- (1) 初步筛选：根据目标污染物的特性、地块的水文地质条件和水化学特征，查阅国内外相关文献和成功案例。同时，可合成、改性或复配新型材料，以确定备选的反应介质。

(2) 批量实验筛选：对初步确定的备选反应介质进行批量实验，以评估其去除目标污染物的性能。批量实验包括等温反应实验和反应动力学实验。等温实验能提供反应介质对污染物的处理容量，而动力学实验则用于测定去除反应的速率。通过这些实验，选择反应容量较大且反应速率较快的介质。

(3) 柱实验筛选：批量实验未考虑地块的水文地质条件和介质渗透性，因此直接用于地下水流条件可能有偏差。需通过柱实验进一步确认反应介质的去除性能和渗透性，以选定合适的材料。

5.4.2.3 PRB 中反应介质去除污染物的机理主要包括吸附、沉淀、氧化、还原和生物降解等。根据地块地下水的污染特征，初步筛选合适的 PRB 填料。典型污染物适用的 PRB 填料见表 2。

表 2 典型污染物的适用 PRB 填料

目标污染物	反应填料
三氯乙烯、四氯乙烯、氯乙烯	零价铁、活性炭、改性沸石
苯酚	活性炭、改性沸石
硝基苯	零价铁
PCB、PAHs、DDE、DDT、DDD	活性炭、零价铁
镍、铜、锌、汞、铬	零价铁、石灰岩、活性氧化铝
铵根离子	零价铁、锯屑、木屑、堆肥、聚苯乙烯、小麦秸秆
磷酸根离子	零价铁、氧化铁、泥炭、砂、石灰石
硫酸根离子	零价铁、氧化铁、泥炭、砂、石灰石
氯离子	零价铁、活性炭

5.4.2.4 反应动力学和停留时间测定

确定反应介质后，通过柱实验测定反应介质对目标污染物的反应动力学和停留时间，为工程设计提供 PRB 厚度等关键参数。PRB 填料试验，可根据污染物浓度、污染羽等进行实验室内小试试验，目的是确定填料种类和计算击穿时间、预估填料厚度和服役寿命，如有条件建议进行现场中试级别验证。

先通过静态小试确定填料对污染物的去除率、填料的用量、反应可能产生的副产物等，再通过动态小试确定填料的最佳配比、颗粒级配、渗透系数等。得出填料对地块污染物降解反应的半衰期、水力性能、寿命等参数。PRB 填料的渗透系数宜为含水层渗透系数的 2 倍以上。

(1) 柱实验设计

柱实验可评估不同水动力条件下反应介质去除污染物的作用与效果，其水

动力条件需根据地块水文地质特征设计相应流速、流量等参数。柱实验装置在上、下及侧壁设有取样口。柱中填充反应介质，利用蠕动泵从柱的下部注入污染地下水，从上部流出，根据实验要求设定流速。柱体可选用玻璃、特氟龙和不锈钢等材料，柱体材料不能与污染物发生反应。在装填柱子时，可将混合好的反应介质分层装填，确保装填相同体积的反应介质的质量一致。在反应介质的底部和顶部可铺设石英砂，以保证柱体中水流稳定。

实验期间，应记录地下水流入量、流出量、侧壁取样孔及进出水口处的污染物浓度、Eh、pH 等指标。一般实验前期每注入 1-2 个孔隙体积 (PV) 的污染地下水后取样，后期每注入 5-10 PV 的污染地下水后取样，分析测试污染物的浓度，直到出水口污染物的浓度与进水口浓度接近。

(2) 反应半衰期计算

通过柱实验获得污染物浓度随时间变化的曲线，建立反应介质与污染物的反应动力学方程，确定污染物的反应速率常数 (k) 和反应半衰期 ($t_{1/2}$)，计算公式如下：

$$C = C_0 e^{-kt}$$

$$t_{1/2} = (\ln 2)/k = 0.693/k$$

式中： C — t 时刻出水口的污染物浓度，mg/L；

C_0 —进水口污染物的初始浓度，mg/L；

k —反应速率常数， h^{-1} ；

t —水流过反应介质的时间，h；

$t_{1/2}$ —反应半衰期，h。

(3) 停留时间

污染物所需要的停留时间 (t_R) 计算公式如下：

$$t_R = \ln (C_s/C_0) / k$$

式中： t_R —污染物的停留时间，h；

C_s —污染物修复或风险管控的目标浓度，mg/L；

C_0 —污染物的初始浓度，mg/L；

k —反应速率常数， h^{-1} 。

(4) 反应介质的渗透系数 ($K_{介}$)

实验室中可通过柱实验模拟，利用达西定律，估算出 $K_{\text{介质}}$ 的值，计算公式如下：

$$K_{\text{介质}} = V \times L / (A \times t \times h)$$

式中： $K_{\text{介质}}$ —反应介质的渗透系数，m/d；

V —时间 t 内出水体积， m^3 ；

L —实验柱上两个测点间的距离，m；

A —实验柱过水断面面积， m^2 ；

t —水流过介质的时间，d；

h —两个测点间水头差，m。

(5) 反应介质的有效孔隙度 (n_e) 和容重 (B)

有效孔隙度 (n_e) 通过实验柱饱水后在重力作用下充分疏干排出水的体积与饱水反应介质总体积（实验柱过水断面面积乘以饱水段长度）之比计算。当获取地下水实际流速后，需要通过反应介质的 n_e 来估算 PRB 的污染物流量。

容重 (B) 为单位体积内干燥后的反应介质的重量，通过实验柱中反应介质的装填重量与柱体积之比计算获得，单位为 kg/m^3 。通过容重 (B) 可初步估算 PRB 所需装填反应介质的质量。

(6) 反应介质寿命

反应介质寿命为柱实验出水口污染物浓度稳定达到或低于修复或风险管控目标值时所能持续的时间。反应介质寿命可通过理论计算和模拟试验两种方法获得。

理论计算：

$$N = (Q_2 \times W) / Q_1$$

式中： N —反应介质的理论寿命，a；

Q_1 —每年流过单位反应介质的污染物总量， kg/a 。根据实际地块地下水污染物浓度、流量计算；

Q_2 —单位反应介质对污染物的最大去除量， kg/kg ；以实际的地下水为反应体系，用等温吸附和吸附动力学试验获得；

W —反应介质的添加量，kg。

理论计算没有考虑地下水温度变化、化学组分变化、微生物堵塞等实际情

况，是实验条件下获得的理想数据，理论寿命一般比实际结果偏高。

(7) 模拟试验

参照柱实验设计方法，设置 PRB 运行模拟柱实验。通常模拟试验设置的流速大于现场实际的地下水流速，或者试验浓度高于地块地下水中污染物浓度，以便在短时间内达到模拟 PRB 长期运行的效果。但若设置的地下水流速过快或者污染物浓度过高，可能会导致测定的反应介质寿命结果偏低。

5.4.2.5 反应墙厚度设计

反应墙的厚度等于反应格栅中沿地下水流动方向的实际流速、污染物的停留时间以及安全系数的乘积，可以使用以下公式进行计算。

$$b = V_x \times t_R \times SF \quad V_x = K_{\text{介质}} \times I/n_e$$

式中： b 为 PRB 的厚度，m；

V_x 为通过 PRB 的地下水实际流速，m/d；

t_R 为污染物的停留时间，d；

SF 为安全系数（无量纲）；

$K_{\text{介质}}$ 为反应介质的渗透系数，m/d；

I 为水力梯度，无量纲；

n_e 为反应介质的有效孔隙度，无量纲。

5.4.3 原位注入氧化工程设计

5.4.3.1 化学氧化药剂的选择

不同场地，其土壤和地下水中的污染物类型和质量存在差异，不同药剂适用的污染物类型不同，常用的氧化剂包括双氧水、芬顿试剂、过硫酸钠、高锰酸钾、臭氧等。首先，根据地块地下水污染物类型和质量特征初步筛选氧化剂类型，然后通过针对性的小试、中试实验，并考虑场地建设条件，确定最终使用的氧化剂的类型。

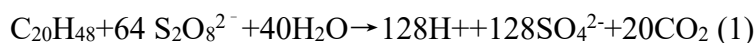
如果场地内存在非水相液体(NAPL)，由于溶液中的氧化剂只能和溶解相中的污染物反应，因此反应会限制在氧化剂溶液/非水相液体(NAPL)界面处。如果 LNAPL(轻质非水相液体)层过厚，建议 LNAPL 修复区结合或利用其它技术进行清除

5.4.3.2 化学氧化药剂的投加

药剂的用量由污染物药剂消耗量、土壤药剂消耗量、还原性金属的药剂消耗量等因素决定。原位注入化学氧化试验，可利用环境调查数据对地块内不同污染程度的地下水进行取样，在实验室内进行氧化药剂的种类和投加比例试验，考虑到实际地块环境条件，建议对药剂投加比例在实际应用中适量放大，如有条件建议进行现场中试级别验证。

以示范项目石油烃污染土壤为例，计算过硫酸盐的理论剂量。示范项目使用碳基负载型铁剂催化剂，氧化剂使用过硫酸钠，现场用水为自来水。

根据 Ranc 等提出的方法计算过硫酸盐的理论剂量。假设土壤中的石油烃完全被过硫酸盐氧化为 CO_2 和 H_2O ，选择 $\text{C}_{20}\text{H}_{48}$ 作为石油烃代表性物质，得到式(1)中 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}:\text{C}_{20}\text{H}_{48}$ 的化学计量摩尔比(SMR)为 64:1。根据式(2)计算出石油烃的化学计量氧化剂需求量(SOD)。考虑到土壤和地下水有机质和矿物质对氧化剂的损耗，设置适当的药剂放大倍数。



$$\text{SOD} = \text{SMR} \times (c \times 10^{-3}) / M \quad (2)$$

式中： SOD ：石油烃的化学计量氧化剂需求量(mmol/g)；

SMR ：氧化剂/石油烃的化学摩尔比(mol/mol)；

c ：被处理的土壤/地下水中石油烃的含量(mg/kg)；

M ：石油烃的摩尔质量(g/mol)(代表物质的分子质量)。

药剂投加量根据以上反应式及污染地下水中污染物的量计算。

调试过程中药剂投加的调整根据进出水在线 DO 监测表征，污染物处理效果数据通过取样检测获取。

5.5 工程施工

据经验及前期实验确定的填料以及药剂对污染物的降解效果，选择适用的填料及药剂再结合中试试验，确定水平 PRB 填料类型、结构及药剂注入浓度、注入量和注入速率。通过初步调查的点位土壤与地下水污染信息，对土壤污染情况和地下水监测井污染情况总结，根据地下水流向拟定污染羽分布方向和范围在污染羽上游和下游方向分别建设抽出井、原位注入井，确定注入井（孔）位置和数量，调试并连接水平 PRB 系统，建立水平 PRB 与原位注入氧化耦合技术处理系统。

工程的施工应符合国家和行业相应专项工程施工规范、施工程序及管理文件的要求。施工中采用的工程技术文件、承包合同文件对施工质量验收的要求不得低于国家相关专项工程规范的规定。施工应按设计文件和施工图纸的规定进行，工程变更应取得设计单位确认并出具设计变更文件后再进行施工。

示范项目的水平 PRB 设备共计 2 套，设备系统进场后，安装于 2 口抽出井之间，用于处理抽出污染地下水，处理后通过泵和管线将合格水或加药水注入地下。设备如表 3 所示。

表 3 水平 PRB 设备清单

序号	名称	规格	单位	数量
1	装置本体箱 PP	2000x1000x1500	台	2
2	撬装钢架	台	2	
3	预过滤器	布袋式，玻璃钢 10 微米	台	2
4	潜水泵	SDP40， 6m ³ ， H:12m	台	4
5	源水潜水泵	SDP50， Q:9m ³ ， H:23m	台	2
6	加药计量泵	AS-B23	台	2
7	自吸泵	JETS1100G2	台	2
8	加药箱	200L	个	2
9	布水器	Φ800	个	2
10	磁棒	200*25*25 8000 高斯	块	8
11	磁棒固定架	个	2	
12	填料箱外箱	SS304 950*950*1000	个	2
13	填料托盘	SS304	个	10
14	填料托盘筛网	SS304 10 目 1.2mx30m	卷	1
15	电控箱	户外防护型（双门）	个	2
15.1	触摸屏	个	2	
15.2	PLC	台	2	
15.3	变频器	2.2Kw	台	2
15.4	变频器	1.1Kw	台	4
15.5	低压电器	批	2	
16	pH 计	PH-5015	个	4
17	溶解氧计（荧光法）	SUP-DC2000-7017	个	4
18	液位计（投入式）	MIK-P260S， 2 米量程	个	4
19	电磁流量计	LDG-SUP-DN40	台	2
20	管道混合器	UPVC	个	2
21	加药软管	HDPE Φ10	米	3
22	加药泵接头	PP	个	2
23	加药泵止回阀	PP	个	2

设备系统的连接包括抽出井内潜水泵至水平 PRB 设备进水口的管道和阀门安装连接，水平 PRB 设备出水口与离心泵连接，通过阀门和管道分别连接至注入井。

设备系统调试采用清水循环试验，主要检查泵、管道、阀门等连接的可靠性、设备机电运行的安全性等，不对污染物去除做设备系统调试。

5.6 工程运行监测

进行污染土壤和地下水修复过程监测以及修复后的监测。主要包括对污染物浓度、pH、氧化还原电位等参数进行监测和现场环境监测，如果污染物浓度出现反弹，可能需要进行补充注入。水平 PRB 与原位注入氧化耦合技术处理系统搭建成功后，通过日常巡查、监测等方式掌握其运行情况。

监测井一般布设在系统上游、下游、两侧及系统内部。在系统上游可设置 1 个或多个监测井，监测系统进水浓度。在系统下游布设 1 个或多个监测井，监测系统对污染物的处理效果。在系统两侧各布设 1 个或多个监测井，监测系统对污染羽的截获情况。在系统中可设置 1 个或多个监测井，主要监测污染物在系统中是否存在穿透或越流、是否产生对环境有害的副产物等。

指南中系统运行状况监测方法等参考《地下水污染可透反应格栅技术指南(试行)》中的第 7.3 节。监测频率为 1 次/季度，应确保每个季度可进行 1 次污染物浓度、地下水流速、地球化学组分等指标的监测。

5.7 工程效果评估

指南参照 HJ 25.5-2018 和 HJ 25.6-2019 的要求，水平 PRB 与原位注入氧化耦合技术工程实施后，需在工程设施完工 1 年内开展效果评估。PRB 工程效果评估参考《地下水污染可渗透反应格栅技术指南（试行）》中的 8.1。

5.8 后期环境监管与维护

水平 PRB 与原位注入氧化耦合技术工程完成效果评估后，应按照 HJ 25.6-2019 完成的地块效果评估报告中提出的要求开展相应的后期环境监管及维护工作。

六、重大分歧意见的处理经过和依据

6.1 重大分歧意见的处理经过

在《水平可渗透反应墙与原位注入氧化耦合技术应用指南》的编制过程中，由于涉及技术方案、操作流程、环境评估等多个方面，存在一些重大分歧意见。以下是处理这些分歧意见的经过：

(1) 意见汇总

在编制各个章节的过程中，组织专家团队和相关单位对初稿进行审阅和讨论，收集了各方意见。分歧主要集中在修复材料选择、环保标准、监测方法等

方面。

针对识别出的重大分歧，专门成立了意见汇总小组，整理出所有反馈的意见与建议。

（2）专题讨论会议

针对重大分歧，召开了多次专题讨论会议，邀请相关领域的专家和参与单位代表，共同分析各个意见的合理性和可行性。

在会议中，鼓励各方畅所欲言，形成开放的讨论氛围，确保不同观点能够被充分表达和辩论。

（3）数据和案例分析

对于与技术选择和环保标准相关的分歧，通过分析现有的科研数据和成功案例，提供实证支持。例如，对于 PRB 反应介质的选择，收集实际应用的性能数据，与国际标准进行对比。

依靠由南开大学和相关研究机构提供的数据，验证不同技术方案的有效性。

（4）专家咨询与决策

针对依然存在较大分歧的技术问题，参考外部专家的意见，邀请行业内的权威专家进行咨询，并形成科学建议。

将专家意见作为重要的决策依据，在结合技术可行性和经济性评估后，确定最终方案。

（5）投票决策

针对无法达成一致的关键分歧，例如修复材料的使用规范或者具体的监测方法，采用投票方式进行决策，由与会的专家和单位代表进行表决选出多数意见的方案。

（6）形成共识

在上述程序后，针对重大的分歧意见进行总结，形成共识，并在最终的指南中明确记录相关的技术选择理由和争议的处理方式，确保透明性和记录完整性。

6.2 重大分歧意见的处理依据

（1）科学实证原则

在处理分歧意见时，遵循科学实证原则，以数据和研究成果为指引，确保

做出的决策基于可靠的数据支持。

(2) 法律法规遵循

确保在处理意见的过程中，始终遵循国家和地方的法律法规，特别是在环保要求和工程安全等方面，确保指南符合相关政策和标准。

(3) 行业标准与最佳实践

借鉴国内外的行业标准和最佳实践，尤其在出现技术选择和实施方法的意见分歧时，参考可靠的行业标准进行指导。

(4) 多方协商原则

本着充分尊重各方意见的原则，尽量通过协商与沟通来解决分歧，而不是简单的强制决策，力求形成广泛的共识。

(5) 动态修订机制

认识到技术和行业标准不断发展的特点，在制定过程中加入动态修订机制，保证今后对分歧意见的再次评估和更新。

通过上述方法和依据，对重大分歧意见进行了有效处理，确保了《水平可渗透反应墙与原位注入氧化耦合技术应用指南》的编制工作顺利推进，最终形成了一份科学、合理且具备较高专业性的技术指导文档。

七、采用国际标准的程度及水平的简要说明

7.1 国内外情况说明

PRB 技术在欧美国家的发展相对较早，尤其是在美国，作为地下水污染修复的重要技术，早在上世纪 90 年代便开始广泛应用。其主要应用于去除重金属、挥发性有机化合物（VOCs）、农药及其他有害物质。例如，加利福尼亚州和新泽西州的一些项目成功利用 PRB 进行地下水修复，取得了良好的效果。此外，欧洲一些国家，如德国和瑞士，也在旧工业区的污染治理中积极应用此技术。

国外的研究主要集中在 PRB 材料的选择、设计优化以及长期稳定性和反应动力学等方面。相关的操作手册和技术指南已经发布，如美国环保署（EPA）和国际水文地质学会（IAH）等机构均提供了有关 PRB 的技术文献和指南。美国 EPA 在其网站上提供了 PRB 的技术现状、案例研究及操作建议，为从业人员提供了宝贵的参考。

原位精准靶向注入氧化技术是近年来在欧美国家迅速发展的修复技术，特

别是在地下水治理方面。它通过精确注入氧化剂（如过氧化氢、次氯酸钠等）以降解和去除污染物，已被大量应用于工业污染、矿业污染和农业活动造成的土壤和水体污染。例如，许多美国和欧洲的项目成功实施了原位注入技术，取得了显著的降解效果，并对环境恢复起到了重要作用。

国外在原位精准靶向注入氧化技术方面有许多成熟的指南，如 EPA 发布的相关手册，详细介绍了技术实施的各个环节，包括现场评估、设计、实施和监测等。

国内 PRB 技术的引入和应用相对较晚，但近年来随着环保要求的加强，已经在一些地下水污染治理项目中开始试点。例如，某些城市的工业遗址治理项目中采用了 PRB 技术，对污染物的去除取得了初步成效。随着技术的发展，国内越来越多的研究机构和企业开始关注 PRB 的应用，并进行相关技术研发和实践探索。目前国内对 PRB 技术的标准化和规范化尚处于起步阶段，制定了《地下水污染可渗透反应格栅技术指南(试行)》(2022 年 5 月)，为地下水修复工程提供了基本的技术要求，但仍不完善，与国际先进水平相比，国内在技术规范、工程实践和效果评估等方面仍存在一定的差距。

国内对原位注入氧化技术的关注度和研究逐渐提升。近年来，一些科研机构和环保公司开始开展相关技术的研究，并在实际工程中进行了应用。例如，某些污水处理项目和土壤修复项目中引入了此技术，在一定程度上提高了处理效果。然而，国内对这一技术的规范化和推广仍然面临挑战，目前尚缺乏统一的技术标准和实施指南。亟需借鉴国际成熟的经验，结合我国具体情况，制定适合的技术指南。

目前国内外无水平 PRB 与原位注入氧化耦合技术的应用指南，亟需依据现有工程实践经验，加快制定《水平可渗透反应墙与原位注入氧化耦合技术应用指南》，为地下水污染治理提供标准化、系统化的操作流程与技术依据。

7.2 采用国际标准的程度及水平

在编制《水平可渗透反应墙与原位注入氧化耦合技术应用指南》的过程中，国际标准的采用程度及水平主要体现在以下几个方面：

（1）国际规范与标准的参考

遵循国际标准：在编制过程中，参考了多个国际标准，例如 ISO（国际标

准化组织)的环境管理标准、EPA(美国环保署)的土壤-地下水修复技术指南以及相关领域的最佳实践指南,这确保了各项技术和方法具有国际认可的基础。

(2) 技术框架的建立

基于国际最佳实践:指南依托于国际上已有的成功案例和研究成果,整合了不同地区和环境下的实践经验,以打造一个科学、合理的技术框架。

(3) 材料与方法选择

材料标准化:推荐使用符合国际标准的材料和化学试剂,确保其在性能和安全性方面达到国际水平,这为技术的实施和后期监测奠定了基础。

施工方法的国际化:制定施工方法时,参考了国际上通用的施工技术和操作标准,确保技术应用过程中的可操作性和有效性。

(4) 环境保护与安全管理

环境影响评估:依据国际环境影响评估标准(如OECD的环境指南)对项目进行环境风险评估,确保在技术实施过程中遵循可持续发展原则。

职业安全标准:安全性方面参考了国际劳动组织(ILO)针对施工和操作人员的标准,以保障项目实施过程中的工人健康和安

(5) 监测与评估体系

国际监测标准的应用:建立监测及评估体系时,借鉴了ISO 14001等国际标准,以保证修复效果的监控符合国际认可的评估标准,从而确保技术的长效性及稳定性。

通过将上述国际标准和规范融入《水平可渗透反应墙与原位注入氧化耦合技术应用指南》的编制过程,该指南不仅具备了科学性和可操作性,还提高了其在全球范围内的适用性和可靠性。

八、贯彻山东环境科学学会团体标准的要求和措施建议

8.1 技术力量

青岛科技大学、中化环境修复(上海)有限公司、南开大学、中国矿业大学、山东拓普环境科技有限公司、江苏元堃稀土有限公司、斯坦德技术工程(青岛)有限公司、中化环境修复(山东)有限公司、安徽理工大学等单位联合组建技术指南制定团队,团队成员长期从事石油化工污染土壤-地下水修复的基础理论和技术开发应用研究,取得了系列创新性成果,并应用于工程示范,

为指南的科学性和实用性提供有力保障。配备必要的实验室设施和现场试验条件，以进行水平可渗透反应墙与原位注入氧化耦合技术应用指南的基础研究、模型实验和现场验证，确保指南中技术参数和实施步骤的准确性。

8.2 经费保障

专项经费主要来源于山东省重大科技创新工程“典型重点行业土壤污染监测、预警与修复技术集成及装备研发”（2021CXGC011206），并积极争取申请相关政府部门的资金支持，确保指南的制定得到充分的经费保障。专项经费主要用于调研、咨询、基础研究、模型实验和现场验证等。

8.3 起草单位

以青岛科技大学和中化环境修复（上海）有限公司为主要起草单位，成立专门的指南制定工作组，负责技术指南的总体策划、内容编写和组织协调工作。

8.4 参加单位

南开大学、中国矿业大学、山东拓普环境科技有限公司、江苏元堃稀土有限公司、坦德技术工程（青岛）有限公司、中化环境修复（山东）有限公司、安徽理工大学等是主要的参与单位，同时邀请国内外知名的研究机构或高校、土壤-地下水修复相关企业和协会参与技术支持与咨询，为指南的制定提供最新的研究成果、案例分析和实践经验。

8.5 人员

组建由行业专家、技术骨干、企业代表等组成的指南制定团队，确保多学科人才汇聚，包括土壤-地下水科学、化学工程、环境工程、法学和政策研究等专业背景的人才，以便全面覆盖技术和政策两大领域。定期组织项目启动会议、专业培训和交流活动，提高参与人员的责任感和专业技能。建立与国际同行的交流机制，确保团队开阔视野，掌握最新的技术动态和发展方向。建立项目进展的定期评审机制，邀请行业专家对技术指南的制定过程进行评估和建议，及时调整和优化方案。

8.6 宣传和培训

与环境保护相关协会合作，通过组织培训、研讨会等形式，对相关企业和技术人员进行宣传和培训，提高行业对新标准的认知和执行力度。

通过以上保障措施，可以有效支持《水平可渗透反应墙与原位注入氧化耦

合技术应用指南》的制定，确保其科学性、实用性和适用性，从而为我国在地下水修复领域的发展提供有力支撑。这些措施不仅有助于项目的顺利实施，也促使行业标准化及规范化的进程，加速技术的推广与应用。

九、其他应予以说明的事项

9.1 特色与优势

(1) 综合治理思路：《水平可渗透反应墙与原位注入氧化耦合技术应用指南》强调水平 PRB 与原位注入氧化技术的耦合使用，鼓励使用多种技术联动，以应对复杂的地下水污染问题，能够有效提升地下水中污染物的去除率，提高修复效率。

(2) 案例分析：整合国内外成功案例，展示了技术的实际应用效果和经验教训，帮助专业人员从实践中获得启发。水平 PRB 与原位注入氧化耦合技术来源于山东省重大科技创新工程“典型重点行业土壤污染监测、预警与修复技术集成及装备研发”（2021CXGC011206），并成功应用于 5000m² 土壤和地下水污染的修复，其工程实践为本指南的制定提供了应用指导。

(3) 专业性强：指南深入探讨了水平 PRB 与原位注入氧化技术的理论基础与实践，借助最新研究进展，综合了多种修复材料和技术，为相关工作人员提供了系统的技术参考。

(4) 结构清晰：内容组织严谨，涵盖了从技术原理、设计与施工，到监测与评估的各个方面，使专业人员能够快速理解并应用相关技术。

(5) 可操作性：提供了详细的实施步骤及注意事项，增强了技术应用的可操作性，便于工程师和相关技术人员进行现场应用。

9.2 应用前景

《水平可渗透反应墙与原位注入氧化耦合技术应用指南》凭借其创新技术、综合性指导和实际应用案例，未来将成为地下水环境修复领域中的重要参考文献。该指南将国际标准和规范融入编制过程中，使该指南不仅具备了科学性和可操作性，还提高了其在全球范围内的适用性和可靠性，为该技术的国际化应用提供了机遇，促进国内外在技术经验和科研方面的交流与合作。