

2022 年度河北省科学技术进步奖提名项目公示内容

项目名称	复杂化工场地土壤-地下水协同修复关键技术耦合与应用
完成单位	煜环环境科技有限公司、中国环境科学研究院、天津大学、河北省生态环境科学研究院、河北科技大学
提名单位	石家庄高新技术产业开发区管委会

一、项目简介

化工制造行业污染地块土壤和地下水污染问题严重，其中河北省内化工场地数量占全省土壤污染风险管控及修复名录比例高达 55 %。以煜环环境科技有限公司、中国环境科学研究院、天津大学等组成的研发团队，开展近 10 年的基础研究和联合攻关，通过机理研究、模型构建、试验分析和工程应用，开发了一系列具有自主知识产权的精准靶向修复药剂、高效传质专用修复设备和智能优化控制工艺，经第三方鉴定处于国际领先水平。

1. 研发了能高效产生自由基的新型活化过氧化氢和过硫酸盐的络合态铁和铁基生物炭等材料。该材料克服了 Cr(VI)和 TCE 氧化还原竞争反应，实现 Cr⁶⁺还原和 TCE 降解同步处理，污染物降解率可达 91.5 % 以上；开发了可长效固化稳定化土壤重金属的纳米铁基负载分子筛的硅酸盐材料，土壤 NaHCO₃ 提取态 As 去除率达到了 85 %，抗压强度达到了 4.2 MPa，突破了化工复合污染场地土壤有机物降解和重金属固化稳定化技术瓶颈。

2. 开发了用于非均质场地的药剂高效混合和精准靶向传输技术与装备，通过原位和异位相结合方式，研制了立轴行星式-高低速结合搅拌技术与装备，混合后土壤与修复材料混合均匀程度差异系数不高于 15 %；研发了原位精准直推式喷射注入技术和周期性水力循环井设备，结合水动力循环智能反馈实时控制系统，形成原位抽注一体化的智能化水力循环过程，解决了复杂化工场地修复中药剂传输问题。

3. 提出了基于风险-成本两级管控的水力循环过程优化控制系统，构建了随机多相多场耦合地下水污染物传输模拟模型。通过逐步寻优智能优化算法，对污染场地的钻孔数据与实时监测数据分析，获取了修复成本与风险两级目标管控下的最优工艺运行条件，实现了修复材料和氧化工艺的动态精准控制，解决了化工污染场地土壤-地下水修复成本高、周期长、缺乏精准调控的难题。

4. 创建了针对不同类型污染场地的“因地选药、因污选药”的新型修复策略，并成功实施了技术的修复示范与推广应用。该项目整体技术成果已成功应用于 20 余项复合有机和重金属污染的化工场地修复工程，累计修复土方量约 37.3 万立方米，修复地下水方量约 4.3 万立方米；总计新增销售额 6.79 亿元，新增利润 8242.61

万元，多个场地修复后期均已用于开发房地产项目，产生间接经济效益 10 亿元以上。

本项技术成果获授权澳大利亚专利 1 件、中国发明专利 23 件、实用新型专利 19 件，软件著作权 7 件；发表研究论文 39 篇（其中 SCI 论文 24 篇），出版工业园区水污染防治技术专著 1 部，核心成果纳入生态环境部发布的首批“国家生态环境技术成果库”，推广应用前景广阔。

二、主要完成单位及创新推广贡献

煜环环境科技有限公司

作为本项目主持单位，依托企业工程项目需求，与科研院所和高校建立了产学研合作平台，为项目的完成提供了人力、物力和野外条件、财务管理、后勤保障等，为该项成果的取得提供了有力支撑。主要创新贡献有：（1）与中国环境科学研究院和天津大学签订合作协议，联合研发了以多自由基-还原氧化-稳定化耦合处理为核心的多种复合修复材料，共同形成多项发明专利和 SCI 文章；（2）牵头完成河北省中央引导地方科技发展专项《复合污染场地土壤和地下水协同修复技术集成及工程示范研究》，为本项目研发提供支撑，开发了可长效固化稳定化土壤重金属的纳米铁基负载分子筛的硅酸盐材料，研制了用于非均质场地的药剂高效混合和精准靶向传输技术与装备，与河北生态环境科学研究院、河北科技大学共同形成的技术成果获得河北省科学技术厅科技成果登记证书；（3）将项目整体技术应用并推广在 20 余项化工污染场地土壤和地下水修复工程，实现技术创新与成果转化，示范工程得到了国内环保行业的高度评价，为项目整体技术的应用推广起到了关键的推进作用。

中国环境科学研究院

负责项目关键技术修复材料和科学试验等工作，研究期间前后投入硕士和博士研究生 10 余名。研究揭示了多种化学氧化体系高效产生自由基及其修复场地污染土壤的原理，突破了国内长期缺乏土壤复杂体系自由基表征手段的技术瓶颈，丰富和发展了土壤污染与修复领域的理论和方法。与第一完成单位煜环环境科技有限公司合作研发了能高效产生自由基的新型活化过氧化氢的络合态铁和铁基负载生物炭修复材料，并将修复药剂与工程实践相结合，建立了难氧化有机污染场地原位还原靶向注射修复方法，共同申报并授权多项发明专利。

天津大学

负责项目关键技术试验、开发水力循环智能反馈实时控制等工作。在多项国家级、省部级和与第一完成单位煜环环境科技有限公司横向课题的支持下，开展了近 10 年的长期研究，与第一完成单位共同成立了“天津大学·煜环环境 土壤和地下水修复技术联合研究中心”：（1）利用第一完成单位承接工程场地，科学阐释了多硫酸盐化学氧化体系的土壤和地下水环境的过程，研发了零价铁-生物炭-过硫酸盐的药剂梯次强化活化体系；（2）构建了地下水污染物传输模型，研发了基于大数据水力循环智能优化控制系统，指导提升了治理修复效果；（3）为本项目药剂研发过程的实验室小试提供国家级实验室平台。

河北省生态环境科学研究院

河北省生态环境科学研究院与第一完成单位煜环环境科技有限公司合作多项省级课题项目，牵头撰写了河北省地方标准《建设用地土壤污染风险筛选值》，申报并验收完成了河北省科技计划项目中央引导地方科技发展专项《复合污染场地土壤和地下水协同修复技术集成及工程示范研究》，在项目研究中重点负责项目方案和设备研发的技术指导，攻克了土壤修复过程中修复装备防腐和耐高温两大关键技术难题，提出了注入修复设备采用梅花形布点方式，实现了水力循环作用下的影响半径在修复区域内的全范围覆盖。

河北科技大学

河北科技大学参与第一完成单位煜环环境科技有限公司主持的河北省科技计划项目《铬污染土壤综合修复技术集成与工程示范》和《复合污染场地土壤和地下水协同修复技术集成及工程示范研究》，参与研发了可长效固化稳定化土壤重金属的纳米铁基负载分子筛的硅酸盐材料，并共同形成了多项授权发明专利和国内核心期刊文章。

三、应用情况及效益情况

通过技术创新与成果转化，本项目研发的技术依托所承接的工程项目共计 20 余项，涵盖了河北、天津、四川、浙江、广东、广西、甘肃等 8 个省份，共获得 2 项重点生态环境保护实用技术和示范工程，其中核心技术成果纳入生态环境部发布的首批“国家生态环境技术成果库”，彰显了本项技术在土壤和地下水修复领域技术创新的过硬实力。通过广西博世科环保科技股份有限公司、北京北方节

能环保有限公司、河北棕达环境科技有限公司等全国和省内一流领军企业推广，累计修复土方量约 37.3 万立方米，修复地下水方量约 4.3 万立方米，所有治理修复的场地全部达到了相应的验收标准，同时总体修复效果满足国家的标准导则要求；累计新增销售额 6.79 亿元，新增利润 8242.61 万元，多个场地修复后期均已用于开发房地产项目，产生间接经济效益 10 亿元以上。

四、主要知识产权和标准规范等目录

序号	知识产权（标准）类别	知识产权（标准）名称	国家（地区）	授权号（标准编号）	授权（发布）日期	证书号（发布部门）	权利人（标准起草人）	发明人（标准起草人）	发明专利（标准）有效状态	是否包含河北省完单位/完人
1	发明专利	一种针对浅层土壤原位搅拌修复设备	中国	ZL202110217772.0	2022.06.28	5267970	煜环境科技有限公司	佟雪娇, 胡大海, 陈盟, 赵倩云, 袁彦辉, 王天磊, 刘津玉	有效	是
2	发明专利	一种注入井修复及方法	中国	ZL20211039289.4	2022.05.13	5154160	煜环境科技有限公司	佟雪娇, 张美灵, 秦致富, 孙广银, 胡大海, 宋庆赞, 陈盟	有效	是
3	发明专利	一种阶梯型重金属污染土壤稳定化修复方法	中国	ZL201810648747.6	2020.09.08	3979257	煜环境科技有限公司	刘星海, 佟雪娇, 张驰, 赵森, 赖冬麟, 牛苏会, 吕晓丽, 狄花君	有效	是

4	发明专利	一种有机污染场地土壤、地下水修复材料及方法	中国	ZL201711294049.2	2020.09.08	3977813	煜环境科技有限公司、刘俐	冯爱茜, 赵彩云, 佟雪娇, 周蕾, 张军, 刘星海, 赖冬麟	有效	是
5	发明专利	一种难氧化有机污染场地原位靶向修复方法	中国	ZL202110074642.6	2021.01.20	4741346	中国环境科学研究院、刘俐	赖冬麟, 颜湘华, 孟静娟, 张军, 刘俐, 王恒钦, 刘星海,	有效	是
6	已发表论文	Adsorption behaviors and mechanisms of antibiotic norfloxacin on degradable and nondegradable microplastics	荷兰	10.1016/j.scitotenv.2021.151042	2022.02.10	Science of The Total Environment	天津大学、煜环境科技有限公司	赵林, 杨永奎, 赖冬麟	其他有效的知识产权	是
7	发明专利	一种土壤修复用筛分破碎斗	中国	ZL201811415860.6	2020.09.01	3967174	煜环境科技有限公司	佟雪娇, 张优, 赖冬麟, 周蕾, 乔萌, 孟庆来	有效	是
8	发明专利	土壤破碎及修复混合设备	中国	ZL20210140406.5	2021.10.19	4740034	煜环境科技有限公司、中国科学院工程研究所	陈辉霞, 赖冬麟, 董玉明, 乔萌, 刘宏辉, 段跃伟, 黄涛, 郝辉锋, 徐红彬	有效	是

9	已发布地方标准	建设用地土壤污染风险筛选值	中国	DB13/T5216-2020	2020.08.18	ICS 13.030.99	河北省生态环境科学研究院、煜环环境科技有限公司、河北省环境监测院	徐铁兵, 周友亚, 赵俊梅, 陈雨, 佟雪娇, 马跃涛, 孙玉艳, 刘星海, 王宏亮	其他有效的知识产权	是
10	发明专利	一种应用于刺激性气味场地的修复方法	中国	ZL201810460389.6	2020.05.22	3809235	煜环环境科技有限公司	赖冬麟, 赵彩云, 金奇, 张玉荣, 冯爱茜, 王恒钦, 张华	有效	是
五、主要完成人情况										
排名	姓名	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目技术创造性贡献	曾获科学技术奖励情况				
1	佟雪娇	高级工程师	煜环环境科技有限公司	煜环环境科技有限公司	项目支撑省级科研课题第一负责人, 对项目提出总体技术路线、研究内容与实施方案设计与实施方案设计; 对科技创新点 1、2 和 3 做出创新性贡献, 多项专利和文章完成人。	2019 年度中国石油和化学工业联合会科技进步一等奖; 2021 年度中国环境保护协会环境技术进步二等奖;				

						2021年度中国土壤学会科学技术一等奖
2	杨永奎	副教授	天津大学	天津大学	项目主要完成人，负责研发过硫酸盐的络合态铁氧化材料和地下水污染物传输模型，对项目科技创新点1和3做出创造性贡献。	2021年度环境保护产业协会环境技术进步二等奖
3	刘俐	教授	中国环境科学研究院	中国环境科学研究院	项目修复药剂研发的负责人，提出了研发药剂设计思路，并对项目科技创新点1做出创造性贡献，多项专利、文章的发明完成人和权力人。	2018年度中国环境科学学会环境保护科学技术二等奖； 2021年度环境保护产业协会环境技术进步二等奖
4	何理	教授	天津大学	天津大学	项目主要完成人，负责研发基于风险-成本两级管控的水力循环过程优化控制系统，对创新点3水力循环智能优化控制系统做出创新贡献。	2019年度中国石油和化学工业联合会科技进步一等奖； 2021年度环境保护产业协会环境技术进步二等奖； 2021年度中国土壤学会科学技术一等奖
5	徐铁兵	高级工程师	河北省生态	河北省生	项目主要完成	2019年度

		师	环境科学研究院	态环境科学研究院	人，负责制定建设用地土壤污染物风险控制标准，同时对项目科技创新点2非水相液体污染物修复装备做出创造性贡献。	中国石油和化学工业联合会科技进步一等奖；2021年度中国环境保护协会环境技术进步二等奖
6	金奇	高级工程师	煜环环境科技有限公司	煜环环境科技有限公司	项目成果转化应用的负责人，组织完成多项修复技术、工艺、装备的应用推广，对创新3异味土壤控制做出创新贡献。	无
7	张优	高级工程师	煜环环境科技有限公司	煜环环境科技有限公司	项目主要完成人，负责修复药剂高效混合筛分设备、修复施工工艺的研发和改进，对项目科技创新点2作出了重要贡献，相关专利的发明人。	2021年度中国土壤学会科学技术一等奖
8	牛建瑞	副教授	河北科技大学	河北科技大学	项目主要完成人，负责重金属铬污染修复药剂研发和应用，对项目科技创新点1作出了重要贡献。	无
9	刘星海	高级工程师	煜环环境科技有限公司	煜环环境科技有限公司	项目主要完成人，负责研发新型活化过氧化氢和纳米铁基负载分子筛的硅酸盐材料，对科技创新点1做出了重要贡献，	2019年度中国石油和化学工业联合会科技进步一等奖

					并完成多项修复技术示范与推广，多项专利的发明人。	
10	赵林	教授	天津大学	天津大学	项目主要完成人，主要解决修复药剂在复杂水文地质条件下含水介质中污染物修复应用问题，指导实际污染地下水修复工程，提升治理修复效果。	2021年度中国环境保护产业协会环境技术进步二等奖

六、完成人合作关系说明

1、项目第一完成人佟雪娇、第六完成人金奇、第七完成人张优、第九完成人刘星海在煜环环境科技有限公司工作，依据工作成果共同申报多项专利、文章等知识产权，并完成项目工程应用示范和推广工作。

2、第二完成人杨永奎、第四完成人何理、第十完成人赵林在天津大学工作，并代表高校与煜环环境科技有限公司进行深入合作，共同成立“天津大学·煜环环境土壤和地下水修复技术联合研究中心”，依据合作成果申报发明专利并发表SCI论文，并获得多项省部级协会的奖励成果。

3、第三完成人刘俐在中国环境科学研究院工作，与煜环环境科技有限公司进行深入合作，共同完成《基于精准识别的有机污染场地分类强化协同修复技术与应用》项目获得2018年度中国环境科学学会环境保护科学技术二等奖，同时在项目合作过程中共同形成多项发明专利。

4、第五完成人徐铁兵在河北省生态环境科学研究院工作，与煜环环境科技有限公司共同完成本项目支撑科研课题《复合污染场地土壤和地下水协同修复技术集成及工程示范研究》，形成的技术成果获得河北省科学技术厅科技成果登记证书；并与项目第一完成人佟雪娇、第九完成人刘星海共同制定河北省第一项土壤污染环境管理标准《建设用地土壤污染风险筛选值》。

5、第八完成人牛建瑞在河北科技大学工作，对煜环环境科技有限公司承接河北省某铬污染场地进行技术指导，共同完成多项发明专利和核心期刊文章等知识产权。

6、所有完成人之间通过第一完成单位煜环环境科技有限公司的产学研合作平台，共同完成了《复杂化工场地土壤-地下水协同修复关键技术耦合与应用》项目，并委托中国环境科学学会进行了技术成果鉴定。

七、完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者	合作成果	合作时间	证明材料
1	共同发明人	佟雪娇（1）、刘俐（3）、刘星海（9）	一种有机污染场地土壤、地下水原位修复材料及其方法；一种难氧化有机污染场地原位还原靶向注射修复方法	2017-2021	专利证书
2	共同发明人	佟雪娇（1）、张优（7）	一种修复土壤用筛分破碎铲斗	2020	专利证书
3	产学研合作	佟雪娇（1）、何理（4）、徐铁兵（5）、张优（7）、刘星海（9）	有机污染场地水力循环复合还原-氧化修复技术、装备及应用；复合有机污染土壤与地下水原位修复及智能控制关键技术研究	2019-2021	鉴定证书、获奖证书
4	共同立项和制订标准规范	佟雪娇（1）、徐铁兵（5）、刘星海（9）	河北省地方标准：污染场地土壤控制筛选值；复合污染场地土壤和地下水协同修复技术集成及工程示范研究	2017-2021	地方标准、河北省科技计划项目验收证书
5	合著论文、产业合作	天津大学：杨永奎（2）、何理（4） 赵林（10），煜环	详见第四部分序号8；石化污染场地	2019-2022	期刊论文，技术开发合

		环境科技有限公司	修复工艺技术及设备研发；复合有机污染土壤与地下水原位修复及智能控制关键技术研究		同，获奖证书
6	共同发明人、合著论文	佟雪娇（1）、牛建瑞（8）	一种铬吸附剂及其制备方法和应用；石家庄某铬污染场地土壤现状调查与评价	2017	发明专利，期刊论文
7	产学研合作	佟雪娇（1）、杨永奎（2）、刘俐（3）、何理（4）、徐铁兵（5）、金奇（6）、张优（7）、牛建瑞（8）、刘星海（9）、赵林（10）	复杂化工场地土壤-地下水协同修复关键技术耦合与应用	2022	鉴定证书