

陕西省科学技术进步奖公示信息

(2025年度)

一、项目基本情况

| | |
|--------|----------------------------|
| 项目名称 | 重度石油污染土壤直接氧化技术及机制研究 |
| 主要完成人 | 徐金兰，代佳楠，刘传禹，段昭毅，艾庆元，闫满静 |
| 主要完成单位 | 西安建筑科技大学，西安市西郊市政设施养护管理有限公司 |

二、提名意见（适用于单位提名）

| | | | |
|-------|--------|------|---|
| 提 名 者 | 陕西省教育厅 | 提名等级 | <input type="checkbox"/> 一等奖 <input type="checkbox"/> 二等奖 <input checked="" type="checkbox"/> 三等奖 |
|-------|--------|------|---|

提名意见：

申请人在国家自然科学基金的资助下，针对重度石油污染土壤开展固相铁 Fenton 原位直接氧化技术及机制研究，具有重要的学术意义和实用价值。项目的特色之处在于：

（1）通过预先注入溶解性铁 (Fe^{2+}) 进入重度石油污染土壤固相体系中，研究结果表明稳态羟基自由基的生成速率大幅提高，可以直接氧化石油烃，显著提高了重度石油污染土壤中的石油烃去除率；

（2）在此基础上，制备出原位固相铁，可以在土壤固相催化 H_2O_2 多次直接氧化石油烃，进一步提高重度石油污染土壤中石油烃的去除效率；

（3）揭示了固相铁催化 H_2O_2 能够直接氧化污染土壤中石油的机理：固相铁中结合能较高的 FeOOH 通过 -C-O-C 键与土壤中疏水性类富里酸和类腐殖酸有机质交联在一起形成吸油固相铁，产生的羟基自由基多次直接就近氧化石油烃；

（4）发现直接氧化后不仅可以保持氨氮、DOC 等营养物质和土著石油菌的高度匹配，激活优势杆菌和假单胞菌，促进了土壤中重度污染石油的高效持续生物降解，大幅缩短生物修复周期，实现了微生物经济高效地修复重度石油污染土壤。

克服了原有 Fenton 间接氧化技术修复重度石油污染土壤效率低的问题，提高重度石油污染中石油烃的氧化效率，实现经济高效修复应用。研究内容恰当，研究目标明确，重点突出，创新性强。

成果材料齐全科学、规范，无知识产权纠纷，人员排序无异议，符合陕西省科学技术进步奖提名条件。

提名该项目为陕西省科学技术进步奖三等奖

说明：省科学技术进步奖一、二、三等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖，“提名二等奖”的评审落选项目不再降格参评三等奖。项目组与提名单位沟通后，做出提名等级意见；提名项目正式提交后，提名等级建议不得变更。

软科学标准计量科普类项目请勾选“二等奖”或者“三等奖”。

三、项目简介

(限 2 页)

目前,我国勘探、开发的油田和油气田共 400 多个,约有油井 100 万眼(例如大庆油田有油井 24374 眼),分布在全国 25 个省市和自治区,油田的主要工作范围近 20 万 km^2 ,覆盖地区面积达 32 万 km^2 ,约占国土总面积的 3%。据不完全统计,我国每年有 20%-30%的油井退役,石油污染土壤面积达 20 万 km^2 ,且污染面积逐年扩大。落地油产生后得不到及时处理,产生重度石油污染土壤,加之长期暴露及物理、化学、生物反应等作用,石油与土壤结合得更紧密,呈吸附态分配到土壤有机物中。土壤中吸附石油具有修复难、残留时间长、易迁移进入地表水和地下水易于富集等特点,对水体和生态环境造成极其严重的危害,给污染地区的生态、作物以及人类健康带来严重的负面影响。我国重度石油污染土壤面积大,涉及区域广、修复困难、危害大,是亟待解决的重大环境问题,有效修复重度石油污染土壤也是世界各国面临的重大难题,研究探索科学有效地修复方法及机制具有重要的意义。

重度污染土壤中石油解析困难、生物不可获得,目前常规生物、物理修复技术往往不能奏效,需要采用预氧化后综合处理技术。常规技术中 H_2O_2 和 Fe^{2+} 组成的 Fenton 试剂便宜易得,工程应用性强。但是,重度石油污染土壤中石油长时间以吸附态形式分配到固相有机物中,释放非常缓慢。而水相中羟基自由基反应速度快,寿命极短,在石油解析进入水相之前就已经消失,致使氧化率较低,这是目前 MF-ISCO 技术修复重度石油污染土壤需要解决的难题。目前常用的外加溶解铁、络合铁等催化 H_2O_2 反应产生的活性基均存在于水相,很难突破水相活性基寿命短、在固相石油解析进入水相之前消耗殆尽的技术局限。

依据土壤中天然高分子有机物交联酸可以结合溶解铁进入固相形成土壤固相铁的特点,进行催化 H_2O_2 在固相产生活性基直接氧化石油的研究。土壤固相铁无须混合,自然均匀地分布在吸附态石油的附近,可催化 H_2O_2 在固相产生大量活性基,石油无须解析直接在固相被氧化去除,从根本上解决了水相活性基寿命短、在石油解析进入水相之前消耗殆尽、石油氧化率低的技术局限,能大幅度提高土壤中石油的氧化效果。为此,本研究通过制备土壤固相铁,采用能谱、红外及 XPS 分析固相铁的结构特征,进行了土壤固相铁直接氧化石油的试验,确定了土壤固相铁直接氧化石油的控制条件;分析体系水相和固相活性基的特性、石油氧化规律的相关关系,阐明了土壤固相铁直接氧化吸附石油的机制;确定了高效氧化石油的控制条件,揭示了固相铁多次直接氧化石油的机制;最后开发了直接氧化联合生物技术持续修复石油烃的方法,实现经济高效应用。

此外,通过三种不同 Fenton 体系的实验对比,发现固相铁直接氧化 Fenton 体系中稳态羟基自由基的生成速率大幅提高,可以直接氧化石油烃,重度污染土壤中的石油烃去除率高达 70.84%,是传统间接 Fenton 氧化去除率(33.46%)的 2 倍。

将该技术应用于陕北定边县长庆油田石油污染土壤的原位修复,在总石油烃浓度为 20000

mg/kg 的重污染条件下，通过原位固相铁催化直接氧化 4 天之后，总石油烃去除率最高为 82.42%，其中长链烃 C24 - C30，中链烃 C17 - C23 和短链烃 C11 - C16 的去除率分别达到 89.06%，73.74% 和 85.26%，土壤中总石油烃浓度可降至 4500 mg/kg 之下，满足《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准》的要求，且运行简单成本低廉。本研究团队开发了适用于油田污染土壤的经济快速修复技术——原位固相铁催化氧化。且该技术在陕西宝鸡，临潼，铜川等地也进行原位石油污染土壤的高级氧化和氧化后高效微生物修复，每吨石油污染土壤节约成本约为 2400 元，实现了重度石油污染土壤的经济高效修复，为石油污染土壤修复奠定了良好工程应用技术基础。

本项目共发表论文 33 余篇，授权国家发明专利 4 项，6 篇代表作均为 SCI 论文，代表作他引百余次。研究成果得到了国内外同行专家的高度评价：中国科学院大学刘媛教授，西南交通大学牟世琦教授，中国环境科学研究院学者魏坤浩，上海交通大学教授 Molamahmood Hamed Vafaei，意大利综合性大学的 Renan C. Testolin¹ 等多位国内外权威学者所发表的论文中多次和成段引用，为解决我国重度石油污染土壤的修复难题提供了新的研究思路和技术支持。

四、客观评价

（限 2 页。围绕创新性、应用效益和经济社会价值进行客观、真实、准确评价。填写的评价意见要有客观依据，主要包括与国内外相关技术的比较，国家相关部门正式作出的技术检测报告、验收意见、鉴定结论，国内外重要科技奖励，国内外同行在重要学术刊物、学术专著和重要国际学术会议公开发表的学术性评价意见等，可在附件中提供证明材料。非公开资料（如私人信函等）不能作为评价依据。）

本项目研究了多种 Fenton 体系对重度性石油的去除效果后，开发出的固相铁能够直接氧化石油，不仅解决了现有重度污染石油氧化效率低的技术瓶颈，而且技术简单、易操作。土壤固相铁无须混合，就可自然均匀地分布在石油的附近，催化 H_2O_2 可在固相产生大量活性基，石油无须解析，直接在固相被氧化去除。直接氧化技术从根本上解决了水相活性基寿命短、重度污染石油氧化率低的技术局限，为解决我国重度石油污染土壤的修复难题提供了新的研究思路和技术支持。

（1）揭示了重度石油污染土壤中直接氧化石油烃的机理。

首次揭示了固相直接氧化石油的机理，发现土壤有机质和 FeOOH 结合形成的固相铁，固相铁可以催化 H_2O_2 在土壤固相产生大量 $\cdot\text{OH}$ ，石油在固相就可以被直接氧化去除，不需要解析到水相，并不受水相 $\cdot\text{OH}$ 存在时间短的限制。弥补了国内外现有 Fenton 间接氧化技术受水相 $\cdot\text{OH}$ 存在时间短的限制缺陷。

国内外学者在公开科学期刊上的评价：

学者 Yuan Liu 于 2024 年在国际知名期刊 “*Geochimica et Cosmochimica Acta* (IF = 5.0)” 中名为 Molecular transformation of petroleum compounds by hydroxyl radicals produced upon oxidation of reduced nontronite” (2024, 371: 31-51) 的研究中，引用本团队的文章[代表性论文 1, 附件 1-3]说明在烷烃去除率与 $\cdot\text{OH}$ 自由基息息相关。产生的 $\cdot\text{OH}$ 越多，直接氧化条件下，对石油烃的去除效率越好，特别是正构烷烃；

学者 Shiqi Mu 于 2023 年在环境领域知名期刊 “*Science of the Total Environment* (IF=8.0)” 的 “Fenton oxidation system for treating petroleum-contaminated solid waste: Advances and prospects” (2023, 893: 164793) 一文中，通过本团队[代表性论文 3]的处理技术 (10%w/w; 48h; Iron content: $4639 \pm 232\text{mg/kg}$; $\text{H}_2\text{O}_2=900\text{mM}$; $\text{pH}=7.2$)，以及修复效果 (TPHs: $\text{S1}=50\%$; $\text{S2}=64\%$)，肯定了固相铁直接氧化石油烃的研究工作；

学者 Kunhao Wei 于 2022 年在国际顶级期刊 “*Journal of Hazardous Materials* (IF=11.3)” 的 “Recent progress on in-situ chemical oxidation for the remediation of petroleum contaminated soil and groundwater” (2022, 432: 128738) 一文中，引用[代表性论文 1, 附件 1-3]中通过直接氧化减少水相的 $\cdot\text{OH}$ 消耗，证明固相铁确实可以催化大量羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$) 产生，从而达到更好

地直接氧化去除石油烃的效果；

(2) 揭示了重度石油污染土壤多次直接氧化石油烃的机制

首次揭示了吸油铁催化 H_2O_2 产生的羟基自由基能立刻用于氧化石油的多次直接氧化机制，大幅度提高了羟基自由基的利用率，弥补了国内外现有 Fenton 技术羟基自由基利用率低的缺陷。揭示了吸油固相铁内部具有疏水性类富里酸和类腐殖酸与 FeOOH 相结合的特殊结构，具有这种结构的吸油固相铁不仅可以在固相多次产生高瞬时强度的 $\cdot\text{OH}$ ，产生的 $\cdot\text{OH}$ 还能立刻氧化土壤附近吸附的大量石油，大幅度提高了 $\cdot\text{OH}$ 的利用率。

学者 Kun-Hao Wei 于 2022 年在国际顶级期刊 “Journal of Hazardous Materials (IF=11.3)” 的 “Recent progress on in-situ chemical oxidation for the remediation of petroleum contaminated soil and groundwater” (2022, 432: 128738) 一文中，引用[代表性论文 2，附件 7-1]来说明在铁-油界面附近产生的 $\cdot\text{OH}$ ，多次直接氧化土壤中的石油，缩短了 $\cdot\text{OH}$ 在典型 Fenton 反应过程中与油分子之间的距离，再次证明固相铁可以直接氧化去除重度污染土壤中石油烃。

学者 Molamahmood Hamed Vafaei 2021 年在国际知名期刊 “Journal of Cleaner Production (IF=10.0)” 的 “Hydrogen peroxide decomposition into oxygen in different soils: Kinetic analysis, mechanism and implication in catalyzed hydrogen peroxide propagations” 一文中，引用[代表性论文 3，附件 7-2]来说明固相铁催化 H_2O_2 去除石油烃具备高效且修复时间短的优势。

(3) 开发直接氧化激活生物持续修复石油污染的技术

开发了直接氧化激活生物持续修复石油污染的技术，直接氧化后，重度污染土壤中石油各阶段的生物降解效果持续升高，实现了重度污染石油的高效持续生物降解，实现了微生物长期有效地修复石油污染土壤，从根本上解决了现有技术难以降解高浓度石油的限制。直接氧化后不仅可以保持氨氮、DOC 等营养物质和土著石油菌的高度匹配，激活优势杆菌和假单胞菌，促进了土壤中重度污染石油的高效持续生物降解，大幅缩短生物修复周期，实现了微生物经济高效地修复重度石油污染土壤。

学者 Renan C. Testolin 于 2021 年在国际前沿期刊 “Environmental Science and Pollution Research (IF=4.22)” 的 “Petroleum-contaminated soil: using sonolysis to improve mineralization and biodegradation potential of Fenton reaction and ozonolysis process” 一文中，引用[代表性论文 4，附件 7-3]表明生物降解效率受到多因素限制，进一步印证了直接氧化后可以保持氨氮、DOC 等营养物质和土著石油菌的高度匹配，因此能够促进重度污染土壤中石油的持续高效生物降解，实现了微生物长期有效地修复石油污染土壤。

五、应用情况

1. 应用情况（限 2 页）

主要应用单位情况

| 主要应用单位情况 | | | | | |
|----------|-------------------|------------------------|------------------------------|----------------------|-------|
| 序号 | 单位名称 | 应用的技术 | 应用对象及规模 | 应用起止时间 | 单位联系人 |
| 1 | 定边县冠博环保科技有限公司 | 原位高级氧化修复石油污染土壤技术 | 定边县石油污染土壤修复，总规模：5 吨 | 2019.12.20-2022.5.10 | 黄趾海 |
| 2 | 西安市西郊市政设施养护管理有限公司 | 原位高级氧化修复石油污染土壤技术 | 陕西省某地石油污染土壤修复，总规模：5 吨 | 2020.5.1-2022.5.1 | 闫满静 |
| 3 | 西安市西郊市政设施养护管理有限公司 | 原位高级氧化与微生物激活修复石油污染土壤技术 | 陕西省某地油泥土壤修复，总规模：6 吨 | 2020.5.1-2022.5.1 | 闫满静 |
| 4 | 定边县冠博环保科技有限公司 | 原位高级氧化与微生物激活修复石油污染土壤技术 | 定边县石油污染土壤修复，总规模：3 吨 | 2019.7.15-2021.11.30 | 黄趾海 |
| 5 | 西安美邦环保工程有限公司 | 原位高级氧化修复石油污染土壤技术 | 延安市吴起县石油污染土壤修复，总规模：3 吨 | 2020.1.15-2022.3.15 | 翁博 |
| 6 | 秦牧鑫丰（铜川）生物科技有限公司 | 原位高级氧化修复石油污染土壤技术 | 铜川市印台区周陵农业科技示范园土壤修复，总规模：20 亩 | 2019.4.18-2022.2.19 | 王道明 |
| 7 | 陕西新泓水艺环境科技有限公司 | 原位高级氧化修复石油污染土壤技术 | 宝鸡市某地石油污染土壤修复，总规模：10 吨 | 2020.3.15-2022.4.19 | 章若武 |

研究成果应用于油土油田化学修复工程：①定边县冠博环保科技有限公司提标长庆油田修复项目，以原位高级氧化修复石油污染土壤技术研究为基础，通过添加

固相铁激活氧化剂实现了油田油土高效氧化，提高了氧化剂对石油污染的去除能力，土壤中的石油烃明显降低，在不增加基建运行费用的基础上，有效提高了石油污染的去除效率。②陕西某地土壤修复工程，采用原位固相铁氧化技术修复 5 吨石油污染场地，固相铁氧化技术具有高效，消耗氧化剂少，成本低等优点，在修复期间，平均每亩污染场地可以节约 5230 元，极大的减少了项目投入，同时修复期间相比于其他修复方式维护更方便。②延安市吴起县石油污染土壤修复工程采用原位固相铁氧化技术在陕西延安修复 3 吨土，原位固相铁氧化技术对石油烃的去除量为 11630.29 mg/kg，而传统 Fenton 对石油烃的去除量仅为 6590mg/kg。此外，原位固相铁氧化技术相对于传统 Fenton 技术成本节约了 770 元/吨土。因此，原位固相铁氧化技术实现了石油污染土壤的高效修复，并且降低了修复成本。③铜川市印台区周陵农业科技示范园土壤修复工程采用了原为高级氧化修复石油污染土壤技术，在污染场地投加固相铁激活氧化剂共修复了石油污染土壤 20 亩，原位固相铁实现了对石油烃的定向氧化，降低了羟基自由基的土壤有机物的分配比，相对于传统芬顿技术提高了约 132.1%的去除量，可节约成本 5128 元/亩污染土壤。④宝鸡市某地石油污染土壤修复工程采用原位高级氧化技术，修复石油污染土壤共 10 吨，相比于自然降解大大缩短了修复时间，节约了技术和维护成本约 770 元/吨土。

研究成果应用于油土油田化学联合生物修复工程：①定边县冠博环保科技有限公司提标长庆油田修复项目同时还探究了原位激活油田油土微生物降解石油烃的生物修复技术，大幅降低了修复周期（约 200 天），成本节约了 2400 元/吨土，解决了石油污染土壤修复困难，修复时间久的技术难题，实现了降本增效的目标，处理系统高效稳定运行。②陕西某地油泥土壤修复，采用原位高级氧化与微生物激活修复石油污染土壤技术，修复含油浓度为 15549.36 mg/kg 的油泥 6 吨，每吨节约成本约为 720 元，固相铁技术不仅可以应用土壤，在含水油泥修复领域也有良好的应用前景。

六、主要知识产权和标准规范等目录（限 10 条）

| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权具体名称 | 国家（地区） | 授权号 | 授权日期 | 证书编号 | 权利人 | 发明人 |
|----|--------|--|--------|-------------------|------------|--------------------------------|----------|--|
| 1 | 专利 | 一种嗜油生物降解土壤中大量原油的方法及其激活剂 | 中国 | ZL202010652686.8 | 2022.2.22 | 4950170 | 西安建筑科技大学 | 徐金兰，郑园园，李修民，董晏良，田桂永 |
| 2 | 专利 | 一种能够促进固相直接降解吸附态石油烃的方法 | 中国 | ZL201510890415.5 | 2018.4.24 | 2899932 | 西安建筑科技大学 | 徐金兰，黄福娣，李修民，张海涵，樊新硕，张卉 |
| 3 | 论文 | Effective oxidation of crude oil in soils by consuming less hydroxyl radical with target iron | 中国 | 2020, 380: 122414 | 2020.1.15 | Chemical Engineering Journal | 西安建筑科技大学 | Jinlan Xu, Jie Wang, Cong Wang, Lu Li, Shaofeng Zhang |
| 4 | 论文 | Oriented oxidation of all alkanes in soils | 中国 | 2020,399:123078 | 2020.11.15 | Journal Of Hazardous Materials | 西安建筑科技大学 | Jinlan Xu, Peiqi Fan, Yanliang Dong, Lu Xu, Yuanyuan Zheng |
| 5 | 论文 | Efficiently dedicated oxidation of long-chain crude oil in the soil by inactive SOM-Fe | 中国 | 2019,375:121931 | 2019.11.1 | Chemical Engineering Journal | 西安建筑科技大学 | Jinlan Xu, Minghui Zhao, Rong Wang, Juan Du, Jie Wang, Qiuju Zhang |
| 6 | 论文 | Fast-stimulating bioremediation of macrocrude oil in soils using matching Fenton pre-oxidation | 中国 | 2020, 252:126622 | 2020.4.11 | Chemosphere | 西安建筑科技大学 | Jinlan Xu, Juan Du, Lu Li, Qiuju Zhang, Ziwei Chen |
| 7 | 论文 | Enhanced oriented oxidation of | 中国 | 2024, 12: 113619 | 2024.7.18 | Journal of Environment | 西安建筑科技大学 | Jinlan Xu, Huan Li, Manman |

| | | | | | | | | |
|----|----|---|----|------------------|------------|---------------------------|-------------------|--|
| | | medium and long chain alkanes by inactivating hydrophilic organics of soil organic matter | | | | ntal Chemical Engineering | | Wang, Zezhuang Cao, Jianan Dai, Mengzhen Gao, Chuanyu Liu |
| 8 | 专利 | 一种测量沥青厚度的装置 | 中国 | ZL202121272496.X | 2021.11.26 | 14845459 | 西安市西郊市政设施养护管理有限公司 | 段昭毅, 王召, 韩方洲, 雷蓬辉, 高晓军, 张杰, 闫满静, 陈杰, 成阳, 闫青青, 畅露, 李园, 刘胜 |
| 9 | 专利 | 一种用于取出封堵堵球的滑轮牵引仪 | 中国 | ZL201920461871.1 | 2019.12.17 | 9781763 | 西安市西郊市政设施养护管理有限公司 | 艾庆元, 闫满静, 季存辉, 高晓军, 雷蓬辉, 白森, 卜龙, 成武伟, 成阳, 陈杰, 畅露, 韩方洲 |
| 10 | 专利 | 一种临近地铁深基坑降水井清淤装置 | 中国 | ZL202222354753.5 | 2022.12.13 | 18004868 | 西安市西郊市政设施养护管理有限公司 | 闫满静, 高小军, 张杰, 薛凡, 王召, 畅露, 闫青青, 成阳, 刘胜, 丁波 |

七、主要完成人情况表

| | | | |
|---|----------|-----|---|
| 姓 名 | 徐金兰 | 排 名 | 1 |
| 行政职务 | / | | |
| 技术职称 | 教授 | | |
| 工作单位 | 西安建筑科技大学 | | |
| 完成单位 | 西安建筑科技大学 | | |
| 对本项目技术创造性贡献： 对本项目重要科学发现一，二，三，四做出了创造性贡献。是代表性论文 1-5 的作者，见附件 1-3，7-1 至 7-4。 发现固相铁直接氧化 Fenton 的体系中 H ₂ O ₂ 分解速率降低，稳态羟基自由基(·OH)生成速率提高，可以直接氧化石油烃，石油烃去除率明显提高（在此基础上的原位固相铁可以在土壤固相催化 H ₂ O ₂ 产生更多·OH，进一步提高石油烃去除率。揭示了固相铁催化 H ₂ O ₂ 直接氧化石油烃的机理。经过直接氧化后不仅可以保持氨氮、DOC 等营养物质和土著石油菌的高度匹配，激活优势杆菌和假单胞菌，促进了土壤中重度污染石油的高效持续生物降解，大幅缩短生物修复周期，实现了微生物经济高效地修复重度石油污染土壤。 | | | |

| | | | |
|---|----------|-----|---|
| 姓 名 | 代佳楠 | 排 名 | 2 |
| 行政职务 | 无 | | |
| 技术职称 | 无 | | |
| 工作单位 | 西安建筑科技大学 | | |
| 完成单位 | 西安建筑科技大学 | | |
| 对本项目技术创造性贡献： 对本项目重要科学发现三，四做出了创造性贡献，是代表性论文 5 的作者，见附件 7-4。 发现了重度石油污染土壤通过预氧化技术后，采取调控营养碳氮比来激活土壤中土著菌，影响微生物群落的演替，并最终影响石油烃的降解效率。揭示了石油烃去除效率与细菌丰度的正相关关系。表明激活土壤土著微生物群落是石油污染土壤中烷烃快速降解的主要原因。。 | | | |

| | | | |
|--|----------|-----|---|
| 姓 名 | 刘传禹 | 排 名 | 3 |
| 行政职务 | 无 | | |
| 技术职称 | 无 | | |
| 工作单位 | 西安建筑科技大学 | | |
| 完成单位 | 西安建筑科技大学 | | |
| 对本项目技术创造性贡献： 对本项目重要科学发现一，三做出了创造性贡献，是代表性论文 5 的作者，见附件 7-4。 发现了预氧化技术可以为后续生物的生长繁衍提供营养来源，并且在预氧化之后添加营养能够影响微生物群落的演替，促进微生物表面活性剂生成，并最终影响石油烃的降解效率。 | | | |

| | | | |
|---|-------------------|-----|---|
| 姓 名 | 段昭毅 | 排 名 | 4 |
| 行政职务 | 党支部书记 | | |
| 技术职称 | 高级工程师(正高) | | |
| 工作单位 | 西安市西郊市政设施养护管理有限公司 | | |
| 完成单位 | 西安市西郊市政设施养护管理有限公司 | | |
| 对本项目技术创造性贡献： 对本项目重要科学发现四做出了创造性贡献，见附件 8-1。 提供了技术支持，资金支持。并且提供了某石油污染场地为项目中试提供了条件。发现了现场条件下固相铁技术同样具有可靠的石油烃氧化能力。但无法比拟实验室条件下对石油烃的氧化。 | | | |

| | | | |
|--|-------------------|-----|---|
| 姓 名 | 艾庆元 | 排 名 | 5 |
| 行政职务 | 副经理 | | |
| 技术职称 | 高级工程师(副高) | | |
| 工作单位 | 西安市西郊市政设施养护管理有限公司 | | |
| 完成单位 | 西安市西郊市政设施养护管理有限公司 | | |
| 对本项目技术创造性贡献： 对本项目重要科学发现四做出了创造性贡献，见附件 8-1。 提供了技术支持，同时发现在中试场地上进行预氧化同样可以为后续生物的生长繁衍提供营养来源。中试场地上的结果与实验室结果展现出一致性。但同样发现场地结果难以媲美实验室结果。 | | | |

| | | | |
|--|-------------------|-----|---|
| 姓 名 | 闫满静 | 排 名 | 6 |
| 行政职务 | 技术质量部部长 | | |
| 技术职称 | 高级工程师(副高) | | |
| 工作单位 | 西安市西郊市政设施养护管理有限公司 | | |
| 完成单位 | 西安市西郊市政设施养护管理有限公司 | | |
| 对本项目技术创造性贡献： 对本项目重要科学发现四做出了创造性贡献，见附件 8-1。 提供了技术支持，发现在中试场地进行预氧化能够改变微生物菌落，改变细菌丰度。这与实验室结果相匹配。并且还发现中试过程中固相铁技术和预氧化技术得实验结果与实验室结果相比存在平台期。 | | | |

八、主要完成单位情况表

| | |
|---|----------|
| 单位名称 | 西安建筑科技大学 |
| <p>对本项目科技创新和应用推广情况的贡献：</p> <p>本研究在西安建筑科技大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室、陕西省环境工程重点实验室的大力支持下，历经了 8 年时间开展了重度石油污染土壤直接氧化技术及机制研究，利用土壤中天然高分子有机物交联酸结合溶解铁进入固相形成固相铁的特点，开展 H_2O_2 在固相产生活性基直接氧化石油的研究，对重度石油污染土壤直接氧化机理进行深入研究并取得了一系列重大突破。</p> <p>（1）发现固相铁直接氧化 Fenton 体系中稳态羟基自由基的生成速率提高，可以直接氧化石油烃，对重度石油污染土壤中的石油烃去除有明显提高。</p> <p>（2）在此基础上，进一步研究发现了采用土壤有机质和 $FeOOH$ 结合后形成的原位固相铁可以快速多次催化 H_2O_2，并在土壤固相产生高瞬时强度的羟基自由基，可就近直接氧化石油烃，提高对重度石油污染土壤中石油烃的去除率，弥补了国内外现有 Fenton 间接氧化受水相自由基存在时间短的限制缺陷。</p> <p>（3）揭示了固相铁催化 H_2O_2 能够直接氧化污染土壤中吸附态石油的机理：固相铁中含有结合能较高的 $FeOOH$ 通过 $-C-O-C$ 键与土壤中疏水性类富里酸和类腐殖酸有机质交联在一起形成吸油固相铁，多次就近直接氧化石油烃。</p> <p>（4）经过 Fenton 直接氧化后不仅可以保持营养和土著石油菌的高度匹配，激活优势杆菌和假单胞菌，促进了土壤中重度污染石油的高效持续生物降解，大幅缩短生物修复周期，实现了微生物经济高效地修复重度石油污染土壤</p> | |

| | |
|---|-------------------|
| 单位名称 | 西安市西郊市政设施养护管理有限公司 |
| <p>对本项目科技创新和应用推广情况的贡献：</p> <p>本研究在西安市西郊市政设施养护管理有限公司得大力支持下，在实际石油烃污染场地上进行中试。西郊市政设施养护管理有限公司提供了实验转化技术的优秀平台，并为产学研合作提供了坚实的基础，为团队取得了现场实际工况下的宝贵实验数据。开展了污染场地现场重度石油污染土壤直接氧化技术的探索。</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 为实验室技术进行产业转化提供了宝贵的资源和平台； (2) 揭示了实际工况条件下，复杂环境因素对整体修复结果的影响； (3) 采用 Fenton 直接氧化技术在实际污染场地同样可以实现石油烃的去除，但是与实验室结果相比，仍存在差距。 (4) 野外复杂的环境条件，气候条件以及土壤质地对石油烃污染的 Fenton 去除均有影响。并且该影响不是单一的线性关系。多种因素交错共同展现出对石油烃去除的阻力。 | |

完成人合作关系说明

1. 第一完成人**徐金兰**，第二完成人**代佳楠**，第三完成人**刘传禹**：徐金兰作为项目负责人带领团队成员代佳楠，刘传禹致力于研究“重度石油污染土壤的固相铁 Fenton 氧化修复技术及机制基础研究”和“重度石油污染土壤 Fenton 定向氧化石油烃的修复技术及机制基础研究”。成立石油污染土壤修复创新团队，并发现固相铁直接氧化 Fenton 的体系中 H_2O_2 分解速率降低，稳态羟基自由基($\cdot\text{OH}$)生成速率提高，可以直接氧化石油烃，石油烃去除率明显提高。这为建立重度石油污染土壤直接氧化技术及研究机制提供了理论基础和实验基础。

2. 第四完成人**段昭毅**，第五完成人**艾庆元**，第六完成人**闫满静**：段昭毅，艾庆元和闫满静长期与徐金兰“石油污染土壤修复创新团队”成员合作，为团队成员提供现场实验场地。并在现场为实际工况下实验室成果转化提供支持。其与徐金兰团队有共同立项项目，为场地中试做出了重要贡献。他们研究发现实际工况条件下难以完全释放实验室固相铁技术和直接氧化石油烃技术的潜力。并且实际工况中存在实验修复平台期，需要在依据场地条件对技术参数进行修正。基本构建了场地修复效果与实验室效果关系。

3. **徐金兰**，**代佳楠**，**刘传禹**和**段昭毅**，**艾庆元**，**闫满静**共同合作推进产学研合作。徐金兰团队负责技术开发与调整，段昭毅，艾庆元，闫满静则负责技术推广与示范。双方通力合作成功实现了多处石油烃污染场地的中试应用并取得成功。

完成人合作关系情况汇总表

| 序号 | 合作方式 | 合作者/ 项目排名 | 合作起始时间 | 合作完成时间 | 合作成果 | 证明材料 |
|----|------|----------------------------------|----------|-----------|--|--------------|
| 1 | 论文合著 | 徐金兰 1/ 代佳楠 2/ | 2022.9.1 | 2025.7.1 | Enhanced oriented oxidation of medium and long chain alkanes by inactivating hydrophilic organics of soil organic matter | 其他附件 7-4 |
| 2 | 论文合著 | 徐金兰 1/ 刘传禹 3 | 2023.9.1 | 2025.7.1 | Enhanced oriented oxidation of medium and long chain alkanes by inactivating hydrophilic organics of soil organic matter | 其他附件 7-4 |
| 3 | 共同立项 | 徐金兰 1/ 段昭毅 4/ 艾庆元 5/ 闫满静 6 | 2023.6.1 | 2024.12.1 | 横向共同项目《市政工程水下作业操作规程》 | 其他附件共同立项 8-1 |