

陕西省自然科学奖公示信息

(2025年度)

一、项目基本情况

项目名称	生态脆弱石油开采区污染土壤的靶向生物修复技术原理
主要完成人	吴蔓莉，李炜，叶茜琼，吴佳烁，张晓辉
主要完成单位	西安建筑科技大学，中国石油长庆油田分公司

二、提名意见（适用于提名单位）

提 名 者	陕西省教育厅	提名等级	<input type="checkbox"/> 一等奖 <input checked="" type="checkbox"/> 二等奖
<p>提名意见：</p> <p>油田区土壤污染和生态环境破坏是我国目前亟需解决的重大生态环境问题之一。成果围绕陕北生态脆弱区石油开采带来的土壤污染和生态环境破坏问题开展系列研究，阐明了陕北油田区土壤污染情况和微生物种群演化特征，建立了多类型碳源迭代筛选特异性功能降解菌的新方法，揭示了菌源衍生地与降解菌活性之间的相关关系，完善了降解菌接种生物强化修复技术原理；建立了基于 Biolog 技术原理的降解菌活性测定方法，提高了降解菌活性检测的灵敏度，探明了不同组分石油烃的差异性代谢机制；探明了石油烃生物降解的转化路径及毒性消减原理，阐明了“堆肥负载降解菌去除难降解组分烃、营养盐滴灌去除易降解组分烃”的分阶强化生物修复技术原理，提出了非匀质分散型污染场地生物修复的最优策略。研究成果为定向驯化和强化功能菌提供核心理论依据，对于解决生态脆弱区污染治理过程中的生态环境瓶颈问题提供了创新性理论，对保障生态脆弱区生态安全、推动绿色低碳发展具有重要意义，项目研究“典型生态脆弱区石油烃污染生物修复技术原理”符合陕西省科学技术奖评选标准，推荐申报陕西省自然科学二等奖。</p> <p>说明：省科学技术奖一、二等奖项目，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。项目组与提名单位沟通后，做出提名等级意见；提名项目提交后，提名等级建议不得变更。</p>			

三、项目简介

(限 2 页)

位于我国黄河中上游的陕北油气田区是中国石油工业的发祥地，中国陆上第一口油井就诞生在这里。近些年来，陕北油气开采对于国家的经济建设与发展起到重要支撑作用，但随之也带来了严重的污染问题。成果围绕黄土高原生态脆弱区石油开采带来的土壤石油污染问题开展研究，主要成果包括：(1)建立了碳源迭代筛选适合当地气候条件的石油烃降解菌新方法，完善了降解菌接种生物强化修复原理；(2)完善了功能降解菌活性测定新技术，揭示了石油烃不同组分的差异性代谢机制；(3)构建了“营养盐滴灌去除易降解组分烃，堆肥负载降解菌去除难降解组分烃”的分阶生物修复技术原理，提出了场地工程化修复最优策略；(4)探明了微生物降解石油烃的降解转化路径，揭示了生物降解石油烃毒性消减原理。研究发表与石油污染土壤修复相关的论文 60 余篇，相关研究成果获得“**Eni-Advanced Environmental Solutions**”提名奖(“**Novel Application for the Remediation of Degrade and/or Contaminated Soil**”，2023 年度)、陕西省高等学校科学技术二等奖(黄河中上游油田区土壤石油烃污染机制及生物修复技术原理”，2024 年)、第十四届环境科技友好竞赛二等奖(“陕北生态脆弱区石油污染情况调查及生物可行性研究”，2019 年)、第十七届全国环境科技友好竞赛西北赛区一等奖(“滴灌‘除油’石油开采区分散型非匀质污染土壤修复新模式”，2022 年)。论文成果荣获“2024 中国知网高被引学者 TOP5%”。并受邀在第三届全国土壤修复大会上作题为“石油污染场地组分烃的当量生态毒性风险及生物修复技术”学术报告(2023 年 11 月 8 号)。

研究发表与石油污染土壤修复相关的论文 52 篇，本成果中列出的 5 篇代表性论文均为与陕北石油开采区土壤修复相关的 SCI 论文，5 篇论文的总他引次数为 697 次(2024 年 3 月前检索结果)。

(一)、揭示了外源氮生物刺激修复石油污染土壤的作用机制。(附件 1-论文 1: International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 107:158~164. [附件 1](#)-论文 3: Chemosphere, 2019, 237:124456.)

向污染场地施入低剂量外源氮可有效去除易降解组分烃，并且能更好保持场地微生态环境的稳定性和多样性。在对生态脆弱区石油污染场地进行工程化修复时，通过施用低剂量营养盐进行生物刺激修复可获得更稳定的修复效果。

(二)、探究了土著微生物对不同组分烃的差异性利用机制，建立了 **Biolog** 降解菌活性测定方法，提高了降解菌活性检测的灵敏度。(附件 1-论文 2: Chemosphere, 2017, 169:124~130. [附件 1](#)-论文 4: Environmental Pollution, 2017, 223:657~664.)

分别以总石油烃（total petroleum hydrocarbon, TPH）、烷烃（Alkanes）和多环芳烃（polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs）为碳源底物，以 Biolog (MT2)微孔板为载体，利用 Biolog 检测仪建立了石油烃降解功能菌活性测定方法。与传统的 MPN 检测方法比较，Biolog—MT2 法具有更高的准确度和灵敏度。

（三）、建立了碳源迭代筛选石油烃降解菌的新方法，完善了降解菌接种生物强化修复原理。（[附件1](#)-论文 5: Environmental Pollution, 2013, 178:152~158.）

建立了利用“碳源迭代”代替传统的“单一碳源”驯化筛选石油烃降解功能菌的新方法。利用 MYE 和 LB 2 种不同培养基从 3 个菌源地筛选出 6 组多环芳烃降解菌群。结果表明，不同培养基在支持多环芳烃降解菌生长方面具有不同的选择性，用于生物修复的接种体应来自与从原污染地筛选获得的菌株或非常相似的附近土壤。

（四）、建立了“营养盐滴灌去除易降解组分烃，堆肥负载降解菌去除难降解组分烃”的分阶强化生物修复技术。（[附件1](#)-论文 2: Chemosphere, 2017, 169:124~130.）

为改善在寒冷地区接种的降解菌活性低所致的降解效率差的问题，针对油田开采区土壤石油污染的分散性和非匀质性，利用滴灌技术少量多次的向污染土壤中喷洒营养盐去除易降解组分烃，利用有机肥作为培育基质扩大培养降解菌并向污染地接种，对难降解多环芳烃组分的去除效率提高 2 倍。“营养盐滴灌—堆肥负载功能菌强化修复”耦合技术改善了在寒冷干旱地区的修复效率，保证了土壤微生态环境的稳定和平衡。

（五）、探明了生物降解石油烃的转化路径，解析了生物修复石油烃毒性消减原理。（[附件1](#)-论文 3: Chemosphere, 2019, 237:124456.）

矿化（Mineralization）、同化（Assimilation）和腐殖化（Humification）是土壤中石油烃通过生物修复解毒的主要途径，利用稳定同位素技术探究了生物修复过程中石油烃的转化途径及土壤有机碳稳定性。研究发现，大部分石油烃（84.7%—88.5%）被矿化为二氧化碳和水得以去除。生物刺激修复过程中石油烃的转化途径为“同化”→矿化→腐殖化”，修复过程中土壤有机碳（SOC）的稳定性降低，这归因于微生物活性的增强和难降解碳氢化合物的矿化去除，生物刺激修复使得土壤放线菌和厚壁菌门显著增加。

四、客观评价

【限2页。围绕科学发现点的原创性、公认度和科学价值进行客观、真实、准确评价。填写的评价内容要有客观依据，主要包括国内外同行在重要学术刊物（专著）和重要国际学术会议等公开发表的学术性评价意见，国内外重要科技奖励等，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。】

油田区土壤污染和生态环境破坏是我国目前亟需解决的重大生态环境问题之一。成果围绕陕北高原区石油开采带来的土壤污染问题开展系列研究。在陕北油田区土壤污染状况调查、土壤石油烃污染机制及土壤靶向修复技术原理方面取得了一系列重要成果。研究成果获得了国内外同行的高度评价。成果完成人吴蔓莉受邀在第三届全国土壤修复大会上作题为“石油污染场地组分烃的当量生态毒性风险及生物修复技术”学术报告。论文成果荣获“2024 中国知网高被引学者 TOP5%”。成果获得2023 年度 Eni-Advanced Environmental Solutions 奖（“Novel Application for the Remediation of Degrade and/or Contaminated soil”）、陕西省高等学校科学技术二等奖（“黄河中上游油田区土壤石油烃污染机制及生物修复技术原理”，2024 年）、第十四届环境科技友好竞赛二等奖（“陕北生态脆弱区石油污染情况调查及生物可行性研究”，2019 年）、第十七届全国环境科技友好竞赛西北赛区一等奖（“滴灌‘除油’石油开采区分散型非匀质污染土壤修复新模式”，2022 年）。此外，国内外同行在他们发表的高水平论文中，也对我们的成果进行了多次引用和评价。其中的一些代表性引用和评价包括：

（一）、发表在“International Biodeterioration & Biodegradation (2016,107:158~164)”上的论文，他引次数:238 次。揭示了加入外源氮进行生物刺激修复对石油烃的去除作用机制。与接种降解菌进行生物强化修复相比，生物刺激修复能更好的保持菌群结构的稳定性和多样性。外源菌接种会抑制土壤土著菌群的生长，使得土著菌群的多样性和稳定性显著降低，进而影响土壤微生态系统的功能和作用。论文的观点得到了同行的肯定。国家杰青获得者、中国科学院生态环境科学研究中心贺纪正教授 (Chemosphere,2017,172:286-293) 对我们的成果进行了评价：“Wu et al. (2016) compared bioaugmentation using Acinetobacter SZ-1 strain and biostimulation using (NH₄)₂SO₄ and KH₂PO₄ in a petroleum-contaminated soil. It was found that the dissipation of total petroleum hydrocarbons (TPH) and the amounts of cultivable TPH-, alkane-, and PAH-degrading microorganisms were higher for biostimulation than for bioaugmentation. Therefore, it is essential to identify the substrates which could be added into oils to promote the degradation of PAHs through the bioremediation pathway.”。美国犹他州普罗沃杨百翰大学化学工程系的著名教

授 Mohammad-Saeed Safdari 对我们的研究成果进行了评述 “Wu et al., also has studied bioaugmentation (inoculation of Acinetobacter) and biostimulation (addition of nutrients nitrogen and phosphorus) of petroleum-hydrocarbon contaminated soil. They observed that bioaugmentation and biostimulation both contribute to higher TPH degradation (Journal of Hazardous Materials, 2018, 342: 270-278) .”。

(二)、发表在 “Chemosphere (2017,169:124~130)和 “Environmental Pollution (2017, 223:657~664) 上的研究论文, 以 Biolog (MT2)微孔板为载体, 以总石油烃 (Total petroleum hydrocarbon, TPH)、烷烃 (Alkanes) 和多环芳烃 (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 为碳源底物, 利用 Biolog 分析仪作为检测终端, 建立了 3 种石油烃降解功能菌的活性测定方法。揭示了总石油烃、烷烃降解菌活性与其降解效率正向相关的规律。论文的他引次数分别为 154 次。匈牙利塞格大学生物技术系教授 Rakhely Gabor 在其论文 “Journal of Hazardous Materials,2021, 417:125996) 中利用我们构建的方法检测了功能菌活性: Aerobic heterotrophic bacterial counts (AHBs) were determined using a modified version of the method reported by Wu et al. (2017).”。西北农林科技大学谷洁教授在其论文 (Journal of Hazardous Materials,2021,410,124869) 中引用了我们的观点, “Activities of enzymes in soils reflect the metabolic activities of microbes, and they play important roles in the process of hydrocarbon biodegradation (Wu et al., 2017).”。

(三)、在 “Environmental Pollution (2013, 178: 152~158)” 上发表的论文揭示了 “在对石油污染土壤进行生物强化接种修复时, 用于生物修复的接种体应来自与从原污染地筛选获得的菌株或从非常相似的附近土壤获得的菌株”。该篇论文的他引次数为 91 次, 俄勒冈州立大学环境与分子毒理学系荣誉教授 Simonich Staci L.Massey 在其发表的论文 “Implications of Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soils for Human Health and Cancer Risk” (Environmental Science& Technology, 2017,51:9458~9468) 中引用并评价了我们的研究成果: “Wu et al. (2013) also found that bacterial consortia were more successful at degrading PAHs when they were inoculated into soils with similar characteristics to those they were originally isolated from compared with soils exhibiting unrelated characteristics.”。国家杰青获得者、中山大学栾天罡教授、同济大学冯雷雨副教授在他们发表的论文 “Environmental Science& Technology (2014,48:13917~13924)”、“Science of the Total Environment (2020,719: 137456)” 中对我们提出的降解菌筛选和接种方式给予了高度肯定。

五、代表性论文专著目录
(不超过 8 条, 其中代表性论文不超过 5 篇, 代表性专著不超过 3 部)

序号	论文专著 名称	刊名	作者	年卷页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表时间 (年月 日)	通讯作 者 (含 共同)	第一作 者 (含共 同)	国内作者	他 引 总 次 数	检索数 据库	知 识 产 权 是 否 归 国 内 所 有
1	Bioaugmentation and biostimulation of hydrocarbon degradation and the microbial community in a petroleum-contaminated soil	INTERNATIONAL BIODETERIORATION & BIODEGRADATION	Manli Wu, Warren A.Dick, Wei Li, Xiaochang Wang, Qian Yang, Tingting Wang, Limei Xu, Minghui Zhang, Liming Chen	2016 年 107 卷: 158-164 页	2015.12.1 2	Liming Chen	Manli Wu	吴蔓莉, 李炜, 王 晓昌, 杨 茜, 王婷 婷, 徐丽 梅, 张明 辉	238	Web of Science 核心合 集	是
2	Bioremediation of hydrocarbon degradation in a petroleum contaminated soil and microbial population and activity determination	CHEMOSPHERE	Manli Wu, Wei Li, Warren A.Dick, Xiqiong Ye, Kaili Chen, David Kost, Liming Chen.	2017 年 169 卷 : 124-130 页	2017.11.1 1	Liming Chen	Manli Wu	吴蔓莉, 李炜, 叶 茜琼, 陈 凯丽	154	Web of Science 核心合 集	是

3	Effect of bioaugmentation and biostimulation on hydrocarbon degradation and microbial community composition in petroleum-contaminated loessal soil.	CHEMOSPHERE	Manli Wu, Jialuo Wu, Xiaohui Zhang, Xiqiong Ye	2019 年 237 卷: 文章号 124456	2019.7.26	吴蔓莉	Manli Wu	吴蔓莉, 吴佳冻, 张晓辉, 叶茜琼	108	Web of Science 核心合集	是
4	Bacterial community shift and hydrocarbon transformation during bioremediation of short-term petroleum-contaminated soil	ENVIRONMENTAL POLLUTION	Manli Wu, Xiqiong Ye, Kaili Chen, Wei Li, Jing Yuan, Xin Jiang	2017 年 223 卷: 657-664 页	2017.2.10	吴蔓莉	Manli Wu	吴蔓莉, 叶茜琼, 陈凯丽, 李炜, 袁婧, 蒋欣	106	Web of Science 核心合集	是
5	Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by microbial consortia enriched from three soils using two different culture media.	ENVIRONMENTAL POLLUTION	Mani Wu, Liming Chen, Yongqiang Tian, Yi Ding, Warren A.Dick.	2013 年 178 卷: 152-158 页	2013.3.1	Warren A.Dick	Manli Wu	吴蔓莉, 田永强, 丁艺	91	Web of Science 核心合集	是
合 计											
补充说明 (视情填写):											

六、主要完成人情况表

姓 名	吴蔓莉	排 名	1
行政职务	无		
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		
对本项目主要学术贡献： 对整个项目进行了整体规划、设计。完善了生态脆弱石油开采区土壤生态修复的理论和技 术。是 5 篇代表作的第一作者。荣获“2024 中国知网高被引学者 TOP5%”（附件 2）。 2023 年 度 Eni-Advanced Environmental Solutions 提名奖获得者（附件 3），2024 年陕西省高等学校科学 技术二等奖（附件 4）第一完成人。第十四届环境科技友好竞赛二等奖（附件 5）和第十七届全 国环境科技友好竞赛西北赛区一等奖（附件 6）的指导教师。受邀在第三届全国土壤修复大会上 作学术报告（附件 1）。			

姓 名	李炜	排 名	2
行政职务	无		
技术职称	工程师		
工作单位	安捷伦科技（中国）有限公司		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目主要学术贡献： 代表性论文 1,2,4 的主要完成人。揭示了外源氮生物刺激修复石油污染土壤的作用机制；探究了土著微生物对不同组分烃的差异性利用机制，建立了 Biolog 降解菌活性测定方法。建立了“营养盐滴灌去除易降解组分烃，堆肥负载降解菌去除难降解组分烃”的分阶强化生物修复技术。			

姓 名	叶茜琼	排 名	3
行政职务	无		
技术职称	助理工程师		
工作单位	西安市自来水有限公司		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目主要学术贡献：			
代表性论文 2,4 的主要完成人。探究了土著微生物对不同组分烃的差异性利用机制，建立了 Biolog 降解菌活性测定方法，提高了降解菌活性检测的灵敏度。建立了“营养盐滴灌去除易降解组分烃，堆肥负载降解菌去除难降解组分烃”的分阶强化生物修复技术。			

姓 名	吴佳烁	排 名	4
行政职务	无		
技术职称	工程师		
工作单位	中联西北工程设计研究院有限公司		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目主要学术贡献： 代表性论文 3 的主要完成人。揭示了外源氮生物刺激修复石油污染土壤的作用机制；探明了生物降解石油烃的转化路径，解析了生物修复石油烃毒性消减原理。			

姓 名	张晓辉	排 名	5
行政职务	无		
技术职称	高级工程师		
工作单位	中国石油长庆油田分公司		
完成单位	中国石油长庆油田分公司		
对本项目主要学术贡献： 代表性论文 3 的主要完成人。揭示了外源氮生物刺激修复石油污染土壤的作用机制；探明了生物降解石油烃的转化路径，解析了生物修复石油烃毒性消减原理。			

七、主要完成单位情况表

单位名称	西安建筑科技大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>是项目的牵头单位和核心技术发明单位。负责提供项目研究场地、人员、分析测试仪器设备以及项目管理等工作。具体学术贡献包括：</p> <p>揭示了外源氮生物刺激修复石油污染土壤的作用机制；探究了土著微生物对不同组分烃的差异性利用机制，建立了 Biolog 降解菌活性测定方法。建立了“营养盐滴灌去除易降解组分烃，堆肥负载降解菌去除难降解组分烃”的分阶强化生物修复技术。探明了生物降解石油烃的转化路径，解析了生物修复石油烃毒性消减原理。</p>	
单位名称	中国石油长庆油田分公司
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>石油开采区污染场地的现场调研，土壤样品收集、部分指标测定及原理分析。协助完成了外源氮生物刺激修复石油污染土壤的作用机理分析，解析了生物修复石油烃毒性消减原理。</p>	

完成人合作关系说明

本项目完成人共 5 人：吴蔓莉，李炜，叶茜琼，吴佳烁，张晓辉。所有项目人基于国家对生态脆弱油田区生态恢复的重大需求，依托国家自然科学基金项目“微生物原位修复石油污染土壤的石油经残留机制及去除方法研究，国家自然科学基金面上项目，21577109，2016.01.01~2019.12.31。”、“土壤体系中外源氮转化机制及石油烃生物降解强化原理，52070154，2021-01-01 至 2024-12-31”，形成了一个由“西安建筑科技大学（基础理论与新方法研究）”和“中国石油长庆油田分公司（污染场地现场调查和样品采集分析）”构成的合作团队。具体合作关系如下：

第一完成人：吴蔓莉（西安建筑科技大学）是项目的总负责人和总体方案设计者，作为牵头人完善了生态脆弱石油开采区土壤生态修复的理论和技術。是 5 篇代表作的第一作者。荣获“2024 中国知网高被引学者 TOP5%”（附件 2）。2023 年度 Eni-Advanced Environmental Solutions 提名奖获得者（附件 3），2024 年陕西省高等学校科学技术二等奖（附件 4）第一完成人。第十四届环境科技友好竞赛二等奖（附件 5）和第十七届全国环境科技友好竞赛西北赛区一等奖（附件 6）的指导教师。受邀在第三届全国土壤修复大会上作学术报告（附件 1）。

第二完成人：李炜，是第一完成人的 2014 级硕士研究生。代表性论文 1,2,4 的主要完成人，揭示了外源氮生物刺激修复石油污染土壤的作用机制；探究了土著微生物对不同组分烃的差异性利用机制，建立了 Biolog 降解菌活性测定方法。建立了“营养盐滴灌去除易降解组分烃，堆肥负载降解菌去除难降解组分烃”的分阶强化生物修复技术。

第三完成人：叶茜琼，是第一完成人的 2015 级硕士生。作为代表性论文 2,4 的主要完成人，建立了 Biolog 降解菌活性测定方法。建立了“营养盐滴灌去除易降解组分烃，堆肥负载降解菌去除难降解组分烃”的分阶强化生物修复技术。

第四完成人，吴佳烁，是第一完成人的 2017 级硕士生。作为代表性论文 3 的主要完成人，揭示了外源氮生物刺激修复石油污染土壤的作用机制，探明了生物降解石油烃的转化路径，解析了生物修复石油烃毒性消减原理。

第五完成人，张晓辉（中国石油长庆油田分公司），是产学研合作伙伴，负责协助石油污染场地的现场调查和样品采集工作，作为代表性论文 3 的主要完成人。协助进行了生物降解石油烃的转化路径的测定，解析了生物修复石油烃毒性消减原理。

所有完成人共同进行了项目的方案讨论、方法研究及成果整理，合作关系真实，合作内容充实而富有成效。

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	合作时间	合作成果	证明材料
1	论文发表	吴蔓莉/1,李炜/3	2015.12.12	代表性论文 1	附件 1-论文 1
2	论文发表	吴蔓莉/1,李炜/2,叶茜琼/4	2017.11.11	代表性论文 2	附件 1-论文 2
3	论文发表	吴蔓莉/1, 吴佳烁/2, 张晓辉/3	2019.07.26	代表性论文 4	附件 1-论文 3
4	论文发表	吴蔓莉/1, 叶茜琼/2, 李炜/4	2017.02.10	代表性论文 3	附件 1-论文 4
5	论文发表	吴蔓莉/1	2013.03.01	代表性论文 5	附件 1-论文 5
.....					
(不限条目)					