

自然资源科学技术奖推荐书

(科技进步奖)

(2024 年度)

一、成果基本情况

专业评审组

中国地质学会

成果编号

成果名称	名称	土壤地下水有机污染原位微扰动探测技术与应用		
	公布名	土壤地下水有机污染原位微扰动探测技术与应用		
主要完成人	张敏、蔡五田、韩占涛、刘成龙、张树才、白雪山、徐铁兵、张泽鹏、骆乾坤、杨帅、张巍、宁卓、何泽、田西昭、蔡静怡			
主要完成单位	中国地质科学院水文地质环境地质研究所、中国地质调查局水文地质环境地质调查中心、中石化安全工程研究院有限公司、生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心、中国地震局地质研究所、河北省地质环境监测院、河北省生态环境科学研究院、合肥工业大学、苏州观复环境科技有限公司			
推荐单位 (盖章)	中国地质科学院水文地质环境地质研究所			
学科分类 名称	1	1705064 水文地质学	代码	1705064
	2	6101030 环境地学	代码	6101030
	3		代码	
所属国民经济行业	科学研究、技术服务和地质勘查业			
任务来源	A1 国家科技支撑计划, B 部委计划			
具体计划、基金名称、项目名称和编号: A1: 国家重点研发计划课题“石化场地污染土壤环境风险评价与预警研究”(成果号: 250189, 2018YFC1803302, 564 万)、国家“水专项”子课题“京津冀重点区域地下水污染过程识别方法”(2018ZX07109-001, 200 万); B: 国家地质调查项目“典型污染场地土壤与地下水调查技术与评价研究”(1212010634606, 547 万)、“土壤与地下水污染场地调查与修复技术方法研究”(1212011220985, 900 万)、“建设用地土壤与地下水污染风险评价示范研究”(1212010913014, 200 万); “典型重金属污染含水层水质修复技术示范”(12120115047901, 500 万)				
授权发明专利(项)	28	授权的其他知识产权(项)	7	
项目起止时间	起始: 2006 年 01 月 01 日	完成: 2021 年 05 月 27 日		
推荐单位推荐等级	一等奖或二等奖			

二、推荐意见

推荐单位	中国地质科学院水文地质环境地质研究所		
通讯地址	河北省石家庄市新华区中华北大街 268 号	邮政编码	050061
联系人	王东	联系电话	13473771176
电子邮箱	ihegkejichu@163.com	传 真	0311-67598661

推荐意见：

土壤地下水有机污染原位微扰动探测技术构建基于包气带-饱水带“污染-生物-水文地球化学”多场耦合诊断理论，融合建立以氦气吸收异常（物理表征）、挥发物质富集（化学标识）、代谢气体释放（降解信号）及基因响应标记（微生物证据）为核心的污染源羽四维反向追踪模型，研创原位微扰动检测技术装备（0.7m 孔深/3cm 孔径/0.01m² 创面/20min 直读），单点降本 80%，攻克传统钻井取样模式安全风险、效率低下、成本高昂等方面的技术瓶颈，实现地下百米污染非侵入精准圈定。

应用方面，贯通“理论-技术-应用-转化”全链条。依托国家重大专项、国家重点研发计划等 20 余项课题，历时近 20 年理论-技术迭代，通过技术嫁接策略构建“微扰筛查-钻探验证”双轨制工作流程，革新传统单一钻井取样模式，在京津冀、长江经济带等 8 个国家级试验区/试点验证，并在 2024 年中央资金支持的 14 个化工园区（金山、枣庄、深泽、济宁、唐山 9 个、蓝星、吉林）规模化推广，推行点位筛查数量达十万级，预估节约综合成本逾十亿元。

该技术体系获专利 30 余项，发表论著百余篇，主导编制《污染场地土壤和地下水调查与风险评价规范》（DD2014-06）、《唐山市在产企业土壤与地下水有机污染微扰动调查技术要求》，促成《土壤地下水微扰动勘查技术规程》（DZ20258585）立项，填补规范空白。实现监测从“实验室滞后分析”向“原位实时诊断”跨越升级，技术创新、标准重构及行业推动价值重大，建议授予科技进步一等奖。

声明：本单位遵守《自然资源科学技术奖章程（暂行）》规定，承诺遵守评审工作纪律，对申报材料真实性和准确性负责，确认不存在任何违反国家保密法律法规或侵犯他人知识产权的情形，以及其他依规不得推荐的情况。如产生争议，将承担相应的调查核实责任，并积极配合处理。如有材料虚假或违纪行为，愿承担相应责任。

法人代表签名：

推荐单位（公章）

年 月 日

三、成果简介

一、立项背景

针对高敏感区、高约束区和应急场景下传统钻探技术存在的安全风险高、效率低等问题，团队践行“近自然修复”理念，历经 20 年攻关，成功研发土壤地下水有机污染原位微扰动探测技术（Micro-perturbation Probing Technology, MPT）体系，为国土安全利用与生态保护提供核心技术支撑。

二、研究目标

聚焦安全兼容、快速判定与成本控制三大核心问题，突破传统钻井技术限制，构建“非侵入式、现场直读”原位微扰动探测体系，实现百米深度污染源精准定位与动态追踪，推动行业标准革新，支撑水土污染防治与生态修复。

三、主要创新成果

（1）理论突破：创立污染源羽四维反向追踪模型，融合氦气异常、挥发物富集、代谢气体释放及基因标记等诊断指标，攻克非侵入式精准圈定技术难题。

（2）装备创新：研制微型勘查装备（**Shallow Micro-invasive Automated Rapid Analysis and Targeted Testing, SMART**, 重 3kg），实现 0.7 米微创介入，单点检测提速至 20 分钟/次，日检测能力达 24 点，较传统技术效率提升 700%。

（3）流程革新：建立“微扰筛查-钻探验证”双轨模式，实验室测试样本需求降低 80%，综合成本缩减超 80%。

（4）标准引领：牵头编制首部行业技术规程《土壤地下水微扰动勘查技术规程》，覆盖工业、农业、城市等多元场景，填补国内外技术标准空白。

四、应用情况

完成京津冀、长江经济带等 8 个国家级试验区实证检验，实现中石化、中石油等 20 余个在产企业场地规模化应用，推广至 2024 年中央资金支持的 14 个化工园区（2025 年实施），保障 2 个水源地 20 万居民用水安全。

五、社会经济效益

成本节约：累计预节省综合成本约 10 亿元，单案例最高节约 1 亿元。

生态效益：杜绝二次污染风险，助推“双碳”目标绿色发展。

行业影响：引领地下污染监测从“实验室滞后分析”向“原位实时诊断”跨越，贡献全球自然资源治理中国方案。

本成果突破“安全可控—快速响应—空间适应—降本增效”四维能力，为国土空间生态修复提供核心技术支撑，相关技术指标与规范已纳入行业标准体系。

五、客观评价

1. 理论创新性评价

国际上首次构建了多场耦合诊断理论体系，突破了传统水文地球化学理论的单一维度局限，为微扰动技术研发奠定了原创性理论基础，其创新性体现在以下三方面：

(1) 饱水带氧化还原分带动态耦合机制及其理论框架

创新提出“渗流场-生物场协同调控”理论框架，首次揭示电子受体代谢优先级 ($O_2 > NO_3^- > Fe^{3+} > SO_4^{2-}$) 受微生物介导的氧化还原带动态迁移的调控。通过建立微生物生长动力学与溶质运移的耦合模型，阐明功能基因丰度（如 *dsrB*、*mcrA*）与电子受体代谢速率的响应机制，实现氧化还原界面迁移速率的精准预测。该理论在《Journal of Cleaner Production》(IF=7) 一区 TOP 期刊发表论文 2 篇（论著附件 2-1、2-2），被国际同行评价为“重新定义了污染场地氧化还原分带的动态演化认知”（证明附件 6-1），推动传统静态分带理论向动态竞争机制升级。

(2) 包气带-饱水带碳流重构的微生物代谢驱动机制

首次发现包气带-饱水带界面存在“烃降解-固碳”双功能微生物群落，揭示微生物介导的碳流空间分异规律。通过宏基因组学技术，构建了‘有机碳矿化-无机碳固定’的代谢路径，首次实现碳循环闭环；结合 $\delta^{13}C$ 同位素示踪技术，系统阐明微生物代谢驱动的碳流重构机制（如碳源再分配、通量变异）。成果在《Environmental Pollution》(IF=6)《Environmental Research》(IF=7)《Journal of Environmental Chemical Engineering》(IF=4) 等 TOP 期刊发表论文 4 篇（论著附件 2-3 至 2-6，证明附件 6-1），为水土界面碳循环研究开辟新视角。

(3) 污染源羽物理-化学-生物-降解四维反向追踪模型

首创“物理场-化学场-生物场-降解场”四维耦合多参数联合反演模型。该模型突破传统单一信源参数局限，实现污染源羽三维空间定位精度提升量级，在国家首批地下水污染防治试验区建设案例中展示其工程应用价值—形成《在产企业土壤和地下水微扰动调查技术模式》（应用附件 4-1），推动污染源羽解析从经验判断向定量反演跨越。

2. 技术突破性评价

本成果研发的 MPT 技术体系在核心参数上全面超越国际同类技术，实现污染探测技术的代际跨越，《中国自然资源报》‘地质科技创新成果转化进行时’专栏整版篇幅报道（证明附件 6-2，证明附件 6-3），“水文地质学”公众号、“生态修复网”等行业权威平台纷纷转载（证明附件 6-4）。

(1) **微创介入技术突破：**介入孔深从传统钻井的 $\geq 6m$ 压缩至 $0.7m$ （降幅 88.3%），孔径从 $\geq 10cm$ 缩减至 $3cm$ （降幅 70%），作业创面从 $\geq 1m^2$ 降至 $0.01m^2$ （降幅 99%）。对比美国 EPA 推荐的 Direct Push 技术（孔深 $\geq 3m$ 、孔径 $5cm$ ），本技术扰动体积减少 96.5。

(2) **原位快检技术革新：**集成高灵敏度传感器与生物快检芯片，单点检测时间从传统实验室分析的 ≥ 7 天缩短至 20 分钟，效率提升 504 倍。对比德国 Bruker EM640 Pro 等国际主流设备（单点检测 ≥ 2 小时），检测速度提升 6 倍，重量减轻 92%（ $3kg$ vs $38kg$ ）。

(3) 多维互证算法创新：构建“经验值-背景值”双阈值校验算法，在某焦化厂应用中，实现污染识别精度由米级至亚米级提升，空间分辨率密度提高 5 倍，污染源定位误差减少 55.3%，漏检风险降低 80%（算法见说明文件 5-1、5-2）。

3. 流程重构价值评价

构建“筛查-验证”双轨制工作流程，在调查效率与成本控制方面取得革命性突破，发布地方标准《唐山市在产企业土壤与地下水有机污染微扰动调查技术要求》（标准附件 3-8），行业权威媒体《中国环境报》（证明附件 6-5）攻坚栏大篇幅报道，澎湃新闻、新浪财经等新媒体纷纷转载（证明附件 6-4）。

(1) 效率跃升：通过并行双轨制（筛查轨单日 24 点、验证轨单日 8 点），将传统单线流程（单日 ≤ 3 点）效率提升 10.7 倍。在唐山首钢京唐焦化厂验证中（应用附件 4-1、4-2、4-3），调查周期从 6 个月压缩至 21 天，单点位成本从 12.8 万元降至 2.1 万元（降幅 83.6%）。对比荷兰 Deltares 的 Triad 方法（效率提升约 3 倍），本流程具有显著优势。

(2) 资源优化：靶向验证使钻探取样量减少 75%，实验室分析成本降低 89%。通过动态调度模型，高风险区布点密度从 50m \times 50m 加密至 5m \times 5m，数据覆盖率提升 100 倍。

(3) 安全可控：二次污染风险指数（R 值）从传统钻井的 0.35 降至 0.02，地层破坏率在生态敏感区 $\leq 3\%$ （传统方法 $> 25\%$ ）。防爆型设备（Ex IIB 认证）在化工园区应用实现零安全事故，较传统设备事故率降低 100%。

4. 标准引领性评价

促成《土壤地下水微扰动勘查技术规程》（DZ20258585）立项（标准附件 3-9、证明附件 6-），构建场景适配标准体系，填补如下空白。

(1) 参数体系创新：首次规定四维数据互证的技术路径与核心参数阈值，在应急场景中设定“污染响应时效 ≤ 20 分钟”强制性条款。

(2) 场景适配突破：高敏感区最严苛扰动控制标准（孔径 $\leq 3\text{cm}$ 、介入深度 $\leq 0.5\text{m}$ ）。

(3) 行业影响深远：推动行业从“实验室滞后分析”向“原位实时诊断”转型。

5. 经济社会效益评价

(1) 经济效益：累计在 8 个国家级试验区、20 个在产企业，在 2024 年 14 个化工园区实施，综合成本节约 10 亿元。

(2) 生态效益：通过微创技术减少地层破坏面积 98.5%，在 2 个水源地保护中杜绝污染物扩散风险，保障 20 万居民饮用水安全。

(3) 行业变革：推动我国污染场地调查效率从“月级”跨入“日级”，使百米深度污染探测成本从万元级降至千元级。

本成果通过理论-技术-标准-应用的全链条创新，系统性解决地下污染探测领域的安全、效率与精度难题，技术指标全面领先，经济社会效益显著，具有重大推广价值。

科技查新报告证实“微扰动探测技术：颠覆钻探成井传统调查方式，引领土壤和地下水管理变革”（证明附件 6-7）。

八、主要知识产权和标准规范等目录

知识产权（标准）类别	知识产权（标准）具体名称	国家（地区）	授权号（标准编号）	授权（标准发布）日期	证书编号（标准批准发布部门）	权利人（标准起草单位）	发明人（标准起草人）	发明专利（标准）有效状态
实用新型专利	一种土壤气体采样器及土壤气体探测装置	中国	ZL201621270177.4	2017-06-09	CN206235497U	中国地质大学（北京）	王广才，刘成龙，史浙明，王基华，张培仁	有效
发明专利	一种石油类污染含水层强化自然衰减修复方法	中国	ZL202110131867.0	2023-07-28	CN113880259B	中国地质科学院水文地质环境地质研究所	张敏；郭彩娟；史婵；宁卓	有效
发明专利	一种石油化工污染场地污染物自然降解能力评估方法	中国	ZL201811094732.6	2021-06-11	CN109283307B	中国地质科学院水文地质环境地质研究所	张敏；宁卓；蔡萍萍	有效
发明专利	一种地下水在线监测、代表性水样采集一体化自控装置	中国	ZL201711408003.9	2019-10-11	CN108196021B	中国地质科学院水文地质环境地质研究所	张敏；孙琳；郭彩娟；陈宗宇	有效

	置及其控制方法					究所		
发明专利	基于数理统计的基因定量微生物油气勘探方法	中国	ZL201610486091.3	2020-06-26	CN106126975B	中国地质科学院水文地质环境地质研究所	张敏；何泽；王翠玲	有效
发明专利	一种二维非均质含水介质物理模型的构建方法	中国	ZL202211044192.7	2024-11-26	CN115616188B	合肥工业大学	骆乾坤，张勇，童宝财，王子健，钱家忠，邓亚平，陈婷婷	有效
计算机软件著作权	基于替代模型与遗传算法的地下水污染源信息识别系统 V1.0	中国	2022SR1235717	2022-06-20	软著登字第10189916号	合肥工业大学	骆乾坤，刘猛，王子健，刘鑫，马海春	有效
标准	唐山市在产企业土壤与地下水有机污染微扰动调查技术	中国		2024-10-28	唐山市生态环境局	河北省地质环境监测院、中国地质	张敏、白雪山、韩占涛、徐铁兵	有效

	要求					科学院水文地质环境地质研究所等		
标准	土壤地下水微扰动勘查技术规程（初稿）中国	中国	DZ20258585	2026-02-11	中华人民共和国自然资源部	中国地质科学院水文地质环境地质研究所等	张敏、蔡五田、王广才等	无效
标准	污染场地土壤和地下水调查与风险评价规范	中国	DD2014-06	2014-07-01	中国地质调查局	中国地质调查局水文地质环境地质调查中心等	蔡五田、张敏等	有效