**致密砂岩油藏持续高效开发关键理论技术创新及应用**

**公示材料**

**一、项目名称**

致密砂岩油藏持续高效开发关键理论技术创新及应用

**二、提名者**

**陕西省教育厅**

**三、提名意见**

该项目在国家科技支撑、国家科技重大专项、国家自然科学基金、陕西省科技计划和油田科技攻关项目的持续资助下，通过理论方法和技术创新，经过十余年的研究与应用，揭示了制约致密砂岩油藏品质和开发效果的关键因素，建立了多尺度分类定量表征新方法，提高了优质储层预测精度；创新了复杂微纳米孔隙空间动态演化评价方法和流体分布的定量预测技术，确定了剩余油赋存范围；提出了有效降低水驱后微观剩余油的气驱提高采收率新方法，微观剩余油得到了高效动用；创新了清洁压裂液纳米改性方法，提高了压裂效果，形成宏观剩余油分类挖潜压裂新技术，实现了致密砂岩油藏评价、开发、挖潜改造和提高采收率的一体化。研究成果在延长油田、长庆油田规模推广应用，取得了显著的经济和社会效益。该项目授权发明专利20余项，软件著作权4项，出版专著5部，发表高水平学术论文近200篇。

**四、项目简介**

本项目属于油气藏评价、开发、挖潜改造和提高采收率跨学科结合的技术领域。

2020年我国原油对外依存度接近73%，随着国民经济不断发展，供需矛盾会更加突出。致密砂岩油藏具有巨大的开发潜力，已经成为我国油气增储上产的主体。鄂尔多斯盆地致密油储量丰富，但由于颗粒细、成岩压实作用强、物性差、溶蚀孔和微裂缝发育、孔隙喉道细小（且小孔喉所占比例很大），导致微观非均质性强，这些特点显著增加了致密砂岩油藏的评价和开发难度，尤其使得开发过程中的油水运动规律更加复杂、预测难度加大，制约着挖潜措施的合理选择，亟待高效经济的提高采收率方法。目前致密砂岩油藏持续高效开发方面存在如下突出问题：（1）制约致密砂岩油藏品质和开发效果的关键因素不清，宏观沉积成岩与微观孔隙结构、微米与纳米级孔隙结构之间的多尺度定量表征方法还未建立，导致优质储层预测效果不理想；（2）致密砂岩油藏开发过程中孔喉缝空间的变化规律认识不清，剩余油动态分布预测方法不成熟，赋存和有效动用的孔喉尺度范围不确定，导致流体分布的预测精度不高，挖潜改造和提高采收率技术的目标靶点不清、针对性不强；（3）不同提高采收率方法的微观作用机理及其适应性有待进一步研究，高效的气驱提高采收率方法还未形成；（4）挖潜改造未考虑开发过程中地应力、非均质性、孔隙压力和岩石力学采参数的动态变化，加之压裂液携砂、抗滤失及耐温性等问题突出，导致宏观剩余油动用效果不理想。为此，本项目提出油藏评价、开发、挖潜改造与提高采收率全过程的一体化思想，实现致密砂岩油藏分类评价、高效开发和有效动用。

在国家科技支撑、国家科技重大专项、国家自然科学基金、陕西省科技计划和油田科技攻关项目的持续资助下，通过理论、方法和技术创新，本项目揭示了制约致密砂岩油藏品质和开发效果的关键因素，实现了宏观~微观、微米~纳米尺度的定量表征，评价了开发过程中孔隙结构空间的变化和流体分布规律，确定了剩余油赋存的孔隙范围，提高了剩余油预测精度，在此基础上形成了有效降低微观剩余油含量的气驱提高采收率技术，针对性提出了宏观剩余油挖潜的压裂组合新模式，为致密砂岩油藏高效、科学开发提供了理论支撑和技术保障。主要创新点包括：

（1）建立了致密砂岩油藏跨尺度多参数分类定量表征新方法。创新了致密砂岩油藏成岩相的定量划分方法，定量表征了不同沉积和成岩作用改造下的微观孔隙结构变化规律，揭示了制约油藏品质和开发效果的关键因素，确定了关键制约参数，实现了从宏观到微观、从微米到纳米尺度的定量分类表征，提高了优质储层预测的准确率。

（2）创新了致密砂岩油藏开发过程孔喉缝空间变化的评价方法和流体分布的定量预测技术。基于核磁共振在线驱替技术，改进了*T*2谱与孔喉半径的转换方法，定量评价了致密砂岩油藏考虑应力敏感和流体冲刷影响的孔喉缝空间变化，确定了孔喉缝空间改变的尺度和程度，揭示了孔隙结构参数的变化规律；分类刻画了流体渗流通道类型、赋存形式和分布范围；充分考虑油气藏非均质性，基于分段多项式压力逼近的流线跟踪方法，实现了流体分布的实时预测，有效提高了预测精度，为挖潜改造和提高采收率方法选择提供了目标靶点。

（3）形成了致密砂岩油藏有效降低水驱后微观剩余油含量的气驱提高采收率新技术。基于实验方法创新和现场反馈数据，确定了不同注入方式、注入参数条件下的对驱油机理的影响机制，确定了最佳注入参数组合方式，驱油效率显著提高；定量评价CO2驱过程中水岩反应对孔隙结构的影响程度，揭示了储层伤害~改善的关键影响因素，优选了现场注入参数，为矿场试验奠定了基础。

（4）形成了致密砂岩油藏纵向和平面剩余油分类挖潜压裂新工艺。创新了清洁压裂液纳米改性方法，解决了传统清洁压裂液携砂、抗滤失及耐温性等难题；针对宏观剩余油分布，考虑地应力、井周应力、层间孔隙压力、岩石力学性质及非均质性等的影响，精细刻画了地应力变化剖面，确定了复杂缝网形成的关键因素，形成了压裂改造新模式，实现了剩余油的有效动用。

本项目核心技术授权发明专利20余项，软件著作权4项；出版专著5部，在Energy & Fuels、Journal of Petroleum Science and Engineering、石油勘探与开发、石油学报、石油与天然气地质等国内外知名期刊发表学术论文近200篇，被引合计5000余次，SCI单篇最高被引115次（超过100次的2篇），中文论文单篇最高被引328次，培养博士、硕士研究生100余人。

**五、客观评价**

1、验收意见

以韩大匡院士、罗平亚院士组成的专家组对“十一五”国家科技支撑计划课题“延长特低/超低渗透油藏注水开发方式优化研究”验收评价认为，本课题的创新点在于采用目前国内外先进的实验方法和手段，定量标定延长油田低（超低）渗透油藏影响渗流规律与注水开发效果的参数，针对延长油田建立了一套经济井网系统优化决策体系，对于延长油田实现经济有效开发、注水开发技术政策的制定、改善延长油田特低/超低渗透油藏注水开发效果具有重要的指导意义。

以中国石油天然气股份有限责任公司长庆油田分公司副总经理付金华为组长，组成的国家科技重大专项课题验收专家组对低渗透储层微观渗流特征表征技术进行了验收，一致认为，建立的储层微观表征技术在姬塬、板桥~合水地区长6、长8储层评价中得到了较好的应用效果，达到了预期目的。

2、同行专家评价

基于本项目研究成果发表的学术论文SCI单篇最高被引115次（2篇超过100次），中文最高被引328次（3篇超过100次），受到了中国科学院贾承造院士团队、中国石油大学（华东）长江学者（杰青）戴彩丽教授，操应长教授、姚军教授、卢双舫教授、范宜仁教授，中国石油大学（北京）岳湘安教授、柳广弟教授、王贵文教授及其团队成员的正面评价和引用，还受到了美国奥本大学Jeffrey Steinwinder教授、密苏里科技大学白宝君教授，加拿大卡尔加里大学陈胜男教授、里贾纳大学杨道永教授的正面评价和引用。

3、获奖情况

“低孔低渗砂岩油藏微观非均质性成因机制及增产技术”获2019年陕西省高等学校科学技术奖一等奖；“致密砂岩油气藏多尺度表征与提高采收率关键理论技术创新及应用”获2020年中国石油和化学工业联合会技术发明奖二等奖。

4、现场应用效果

研究成果在延长油田、长庆油田规模推广应用，取得了显著的经济和社会效益，新增利润超过10亿元。

5、科技查新

教育部查新工作站（Z08）查新结果表明，在国内外公开发表的中外文文献中，与本项目查新点完全相同的未见报道。

**六、应用情况**

研究团队借助地缘优势，10余年来根植于鄂尔多斯盆地，始终以致密砂岩油藏高效开发作为技术攻关的切入点和突破口，研究方向固定、研究团队成员不断扩大，根据研究重点的动态调整，基于理论方法和技术创新，以微观孔隙结构作为各个环节的切入点，形成了致密砂岩油藏多尺度定量表征、剩余油分布预测、挖潜增产改造和提高采收率的一体化思想和一整套行之有效的技术，取得了系列成果，在延长油田、长庆油田规模推广应用，取得了显著的经济和社会效益。

**七、主要知识产权和标准规范等目录**

**1．技术评价证明及国家法律法规要求行业审批文件目录**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **序号** | **代表性项目名称** | **项目来源** | **负责人** | **起止时间** |
| **1** | 延长特低/超低渗透油藏注水开发方式优化研究 | “十一五”国家科技支撑计划项目 | 孙卫 | 2007.9~2009.9 |
| **2** | 低（超低）渗透油藏高效注水开发技术组合方式优化 | “十一五”国家科技支撑计划项目~子课题 | 张荣军 | 2007.9~2009.9 |
| **3** | 低渗透储层微观渗流特征表征技术 | 国家科技重大专项（子课题） | 孙卫 | 2012.06~2015.08 |
| **4** | 致密油储层人工裂缝网络形成机制及其流体多场耦合渗流理论研究 | 国家自然科学基金 | 张荣军 | 2020.10~2024.12 |
| **5** | 特低渗透双重介质砂岩微观孔隙结构的定量表征 | 国家自然科学基金 | 高辉 | 2012.1~2014.12 |
| **6** | 热电纳米材料与高分子材料对清洁压裂液的协同增效机理研究 | 国家自然科学基金 | 秦文龙 | 2014.1~2016.12 |
| **7** | 缝网形成潜力约束下的页岩可压裂性微观表征及影响机制研究 | 国家自然科学基金 | 屈乐 | 2020.10~2024.12 |
| **8** | 陕甘宁盆地特低渗油田高效开发与水资源可持续发展关键技术研究 | 国家科技攻关计划项目 | 蒲春生  张荣军 | 2005~2006 |
| **9** | 气藏气／液／固相互作用微观动力学理论研究 | 国家“973”项目 | 蒲春生  张荣军 | 2002~2007 |
| **10** | 鄂尔多斯盆地陕北地区延长组微观水驱油机理及提高采收率技术研究 | 陕西省科技厅科技统筹计划 | 孙卫 | 2015.1~2017.12 |
| **11** | 陕北特低渗透油藏注氮气提高采收率技术研究 | 陕西省科技攻关计划项目 | 张荣军 | 2010.1~2011.12 |
| **12** | 超低渗透砂岩微观孔隙结构的多参数定量表征 | 陕西省自然科学基础研究计划 | 高辉 | 2012.7~2014.12 |
| **13** | 智能型纳米复合清洁压裂液的耐高温抗滤失机理研究 | 陕西省自然科学基础研究计划 | 秦文龙 | 2010.1~2011.12 |
| **14** | 低渗透致密砂岩油藏微观孔隙结构及水驱油提高采收率机理研究 | 陕西省自然科学基础研究计划 | 任大忠 | 2016.01~2017.12 |
| **15** | 超低渗透砂岩储层的微观孔隙结构变化特征研究 | 陕西省教育厅科技计划项目 | 高辉 | 2010.7~2012.2 |
| **16** | 郭旗西区注水开发方案研究 | 延长油田股份有限公司七里村采油厂 | 张荣军 | 2010.8~2011.12 |
| **17** | 底水油藏堵水参数优化设计方法 | 中国石油天然气股份有限公司大港油田分公司 | 张荣军 | 2015.8~2015.12 |
| **18** | 理 844 区注水开发方案 | 延长油田子北采油厂 | 张荣军 | 2010.12~2011.2 |
| **19** | 涧峪岔区138 井区注水开发评价 | 延长油田股份有限公司开发部 | 张荣军 | 2012.1~2012.11 |
| **20** | 吴起油田胜利山苗沟31~27 井区长2、长4+5 注水方案 | 延长油田股份有限公司吴起采油厂 | 张荣军 | 2011.7~2011.12 |
| **21** | 安塞油田桥19井区长3油层组建产潜力研究 | 长庆油田分公司第一采油厂 | 张荣军 | 2012.11~2012.12 |
| **22** | 特低渗储层开发技术现场试验效果评价 | 长庆油田分公司第二采油厂 | 张荣军 | 2006.1~2006.12 |
| **23** | 低渗透油田暂堵酸化增产工艺研究 | 长庆油田分公司第一采油厂 | 张荣军 | 2008.11~2008.12 |
| **24** | 注水井深部调剖效果评价方法研究 | 长庆油田分公司第一采油厂 | 张荣军 | 2011.12~2011.12 |
| **25** | 合水长8储层压裂地质特征及增产方向研究 | 长庆油田分公司油气工艺研究院 | 高辉 | 2017.10~2018~12 |
| **26** | 南泥湾油田松树林区域差薄油层开发对策研究 | 延长油田股份有限公司 | 高辉 | 2016.10~2017.12 |
| **27** | 裂缝性特低渗油藏适度温和注水机理研究 | 陕西延长石油（集团）有限责任公司研究院 | 高辉 | 2018.2~2018.10 |
| **28** | 合水长6薄差储层压裂关键地质特征实验研究 | 长庆油田分公司油气工艺研究院 | 王琛  高辉 | 2019.1~2019.11 |
| **29** | 基于三维数字岩心的页岩CO2致裂裂缝特征及可压裂性定量表征研究 | 陕西省陆相页岩气成藏与开发重点实验室 | 屈乐 | 2019.6~2020.11 |
| **30** | 延长油田主力油层油藏地质特征及生产动态变化特征综合研究 | 陕西延长石油（集团）有限责任公司研究院 | 孙卫 | 2012.7~2013.7 |

**2．主要知识产权证明目录**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 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 | 权利人 | 发明人 |
| **1** | 发明专利 | 一种定量评价注水对孔喉分布影响的方法 | 中国 | ZL201410175123.9 | 2016-02-24 | 西安石油大学 | 高辉；李天太；杨玲；张荣军；张明；赵金省 |
| **2** | 发明专利 | 一种定量评价应力敏感过程中孔喉变化程度的方法 | 中国 | ZL201410174667.3 | 2016-05-04 | 西安石油大学 | 高辉；王雅楠；蔡文斌；高永利；张荣军 |
| **3** | 发明专利 | 一种提高强纵向非均质性油藏驱油效果的方法 | 中国 | ZL201710184599.2 | 2019-03-19 | 西安石油大学 | 高辉；谢青；刘峰；窦亮彬；黄海；赵金省 |
| **4** | 发明专利 | 一种定量评价矿化度对页岩油藏自吸水驱油能力影响的方法 | 中国 | ZL201710183597.1 | 2018-11-20 | 西安石油大学 | 高辉，赵凯，毕刚，何梦卿，张晓，窦亮彬，朱耿博仑，李宇 |
| **5** | 发明专利 | 一种致密砂岩油储层全尺度孔喉的定量表征方法 | 中国 | ZL201811320792.5 | 2019-07-16 | 西安石油大学 | 曹杰，高辉，王琛，黄兴，窦亮彬，赵金省，杨玲，董悦 |
| **6** | 发明专利 | 定量评价自发渗吸作用对驱油效率最大贡献程度的方法 | 中国 | ZL201910294888.7 | 2020-11-6 | 西安石油大学 | 王琛、 王香增、 黄兴、高辉、 曹杰、 窦亮彬、李天太 |
| **7** | 发明专利 | 一种基于数据采集的地质勘探管理系统 | 中国 | ZL202010175043.9 | 2020-11-24 | 西安石油大学 | 郭庆，屈乐 |
| **8** | 发明专利 | 定量评价致密砂岩油藏自发渗吸驱油速度的方法 | 中国 | ZL201910491698.4 | 2020-09-08 | 西安石油大学 | 王琛; 李腾; 黄兴; 高辉; 张明; 曹杰 |
| **9** | 发明专利 | 一种提高中渗岩心驱油效果的方法 | 中国 | ZL201410174888.0 | 2017-01-18 | 西安石油大学 | 高辉，肖曾利，闫健，黄海，杨玲，张益 |
| **10** | 软件著作权 | 致密砂岩油藏氮气驱注气参数计算软件V1.0 | 中国 | 2019SR0781106 | 2019-07-29 | 西安石油大学 | 张荣军 |

**3.获奖证书**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **奖项名称** | **奖项等级** | **授予单位** | **时间** |
| 低孔低渗砂岩油藏微观非均质性成因机制及增产技术 | 陕西省高等学校科学技术奖一等奖 | 陕西省教育厅 | 2020年4月 |
| 致密砂岩油气藏多尺度表征与提高采收率关键理论技术创新及应用 | 技术发明奖二等奖 | 中国石油和化学工业联合会 | 2020年12月 |

**4.代表性专著**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **专著名称** | **出版社** | **作者** | **时间** |
| 特低渗透油藏注氮气提高采收率技术 | 石油工业出版社 | 张荣军 | 2017 |
| 渗透油藏有利区预测及工程设计—以西峰油田延安组油藏为例 | 石油工业出版社 | 张荣军，秦文龙 | 2013 |
| 低渗透油藏开发早期高含水井治理技术 | 石油工业出版社 | 张荣军 | 2009 |
| 特低渗透砂岩储层微观孔隙结构与渗流特征 | 中国石化出版社 | 高辉 | 2011 |
| 低渗透—致密砂岩储层精细表征技术 | 石油工业出版社 | 秦文龙 | 2015 |

**5.代表性论文**

[1] Zhang R , Li S . Research on Lowering Actuating Pressure of Injection Wells of Ultra-Low Permeable Reservoirs[J]. Procedia Engineering, 2011, 18(none):128-132.

[2] Zhang Rongjun,Geng Qian,Zhang Qian,Wei Hu，WuYanjun．Origin Mechanism of Tightness of Chang 6 Sandstone Reservoir in Zhiluo Oilfield，Ordos Basin [J]．MechatronicsElectronic industrial and Control Engineering，MEIC2014（November17-19）：711~715.

[3] Zhang Rongjun, Gao Long, Duan Wenguang, Hu Weiming, Du Weichao, Gu Xuefan, Zhang Jie\*, Chen Gang\*. The Application of Ferric Chloride-Lignin Sulfonate as Shale Inhibitor in Water-Based Drilling Fluid. Molecules.2019,24(23):4331.(SCI,JCR3区,影响因子3.06,2018年)

[4] Zhang Rongjun, Wang Xiaoke, Zhang Jie, Hu Weiming, Du Weichao, Chen Gang\*. Preparation and performance of ammonium-malic salts as shale swelling inhibitor and a mechanism study. Inorganic and Nano-Metal Chemistry.2019,50(10):1027-1031.(SCI,JCR4区,影响因子0.827,2019年)

[5] Rongjun Zhang, Xiaoke Wang, Jinlin Zhao, Zhengpeng Zhou, Gang Chen\*. Evaluation of a composite flooding formula used to enhance the oil recovery of Ansai Oil Field. Seminar on Advances in Materials Science and Engineering.2020,984(1):183-188. (EI(JA))

[6] Zhang Rongjun, Zhao Jinlin, Wang Xiaoke, Zhou Zhengpeng, Chen Gang\*. Synthesis of hydrophobically associating polymers and the application as oil-displacing agent. Advanced Materials Science II. 2020,991(1)185-190. (EI(JA))

[7] 张荣军,孙卫.垂直管流中的气液两相流压力计算[J].西北大学学报(自然科学版),2007(01):123-126.

[8] 张荣军，蒲春生，董正远．振动条件下地层流体渗流的数学模型[J]．石油学报，2004,25（5）：80-83.

[9] 张荣军，蒲春生．振动一土酸酸化复合解堵室内实验研究[J]．石油勘探与开发，2004,31（5）：114-117.

[10] Gao H., Liu Y., Zhang Z., Niu B., Li H. Impact of Secondary and Tertiary Floods on Microscopic Residual Oil Distribution in Medium-to-High Permeability Cores with NMR Technique[J]. Energy & Fuels, 2015, 29, 4721−4729（SCI收录，二区）

[11] Gao H., Li H. Determination of movable fluid percentage and movable fluid porosity in ultra-low permeability sandstone using nuclear magnetic resonance (NMR) technique[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015 (133): 258–267（SCI收录，石油类一区）

[12] Gao H., Wang C., Jie Cao, He M., Dou L. Quantitative study on the stress sensitivity of pores in tight sandstone reservoirs of Ordos basin using NMR technique[J].Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019,172: 401–410（SCI收录）

[13] Gao H., Cao J., Wang C., He M., Dou L., Huang X., Li T. Comprehensive characterization of pore and throat system for tight sandstone reservoirs and associated permeability determination method using SEM, rate-controlled mercury and high pressure mercury[J].Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019,174: 514–524（SCI收录）

[17]高辉，朱耿博仑，王泫懿，史华，王明磊，何梦卿，窦亮彬，王琛. 鄂尔多斯盆地延长组致密砂岩储层微观孔喉特征差异及其成因[J]. 石油与天然气地质，2019，40(2)：302-312（EI收录）

[18]高辉，任国富，穆谦益. 鄂尔多斯盆地延长组特低渗透砂岩微观孔喉特征的定量评价[J]. 岩石力学与工程学报，2013，32（增2）:3116-3122（EI收录）

[19] 高辉，孙卫．鄂尔多斯盆地合水地区长8 储层成岩作用与有利成岩相带[J].吉林大学学报（地球科学版），2010，40（3）：542-547（EI收录）

[20] Gao, H., Wang, C., Hu, L., et al. 2018. Enhancing CO2 Flooding Efficiency by Chemical Flooding: A Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Study. Special Topics & Reviews in Porous Media, 9: 145-154. （EI收录）

[21]Hui Gao, Tiantai Li, Ling Yang. Quantitative determination of pore and throat parameters in tight oil reservoir using constant rate mercury intrusion technique[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2016(6):309-318（SCI收录）

[22]Hui Gao, Sun Wei. Quantitative evaluation of micro-pore throat characteristics in extra low permeability sandstone oil reservoir of Yanchang group in Ordos basin using constant rate mercury penetration technique, Advanced Materials Research, 2012, (361-363) : 408-413（EI收录）

[23] 高辉，孙卫．特低渗透砂岩储层可动流体变化特征与差异性成因—以鄂尔多斯盆地延长组为例[J].地质学报，2010，84（8）：1223-1230（CSCD源期刊）

[24] 高辉，孙卫．特低渗透砂岩储层微观孔隙结构的定量表征[J].地质科技情报，2010，29（4）：67-72（CSCD源期刊）

[25] 高辉，解伟，杨建鹏，张创，孙卫．基于恒速压汞技术的特低—超低渗砂岩储层微观孔喉特征[J].石油实验地质，2011，33（2）：206-211（CSCD源期刊）

[26] 高辉，孙卫，田育红，任国富，路勇．核磁共振技术在特低渗砂岩微观孔隙结构评价中的应用[J].地球物理学进展，2011，26（1）：294-299（CSCD源期刊）

[27] 高辉，敬晓锋，张兰. 不同孔喉匹配关系下的特低渗透砂岩微观孔喉特征差异[J]. 石油实验地质，2013，25（4）：401-406（CSCD源期刊）

[28] 高辉，王小鹏，齐 银. 特低渗透砂岩的核磁共振水驱油特征及其影响因素—以鄂尔多斯盆地延长组为例[J]. 高校地质学报，2013，19（2）：364-372 （CSCD源期刊）

[29] 高辉，王美强，尚水龙．应用恒速压汞定量评价特低渗透砂岩的微观孔喉非均质性—以鄂尔多斯盆地西峰油田长8储层为例．地球物理学进展，2013，28（4）：1900-1907（CSCD源期刊）

[30] 高辉，程媛，王小军，李天太，杨玲．基于核磁共振驱替技术的超低渗透砂岩水驱油微观机理实验[J]. 地球物理学进展，2015，30（5）：2157-2163（CSCD源期刊）

[31] 高辉，苏婕，孙卫，李天太，杨玲. 基于成岩和测井参数定量评价的成岩相划分—以鄂尔多斯盆地薛岔地区长6储集层为例[J]. 矿物岩石地球化学通报，2015，34（6）：1238-1246（CSCD源期刊）

[32] 高辉，何梦卿，赵鹏云，窦亮彬，王琛．鄂尔多斯盆地长7页岩油与北美地区典型页岩油地质特征对比[J]. 石油实验地质，2018，40（2）：133-140（CSCD源期刊）

[33] 高辉，张晓，何梦卿，徐创朝，窦亮彬，朱耿博仑，李宇. 基于测井数据体的页岩油储层可压裂性评价研究[J]. 地球物理学进展，2018，33（2）：0603-0612（CSCD源期刊）

[34] 高辉，孙卫，费二战，齐银，李达. 特低－超低渗透砂岩储层微观孔喉特征与物性差异[J]. 岩矿测试，2011，30（2）：244-250（CSCD源期刊）

[35] 高辉，孙卫，路勇，田育红，任国富. 特低渗透砂岩储层油水微观渗流通道与驱替特征实验研究—以鄂尔多斯盆地延长组为例[J].油气地质与采收率，2011，28（1）：58-62（CSCD源期刊）

[36] 高辉，孙卫， 高静乐，宋广寿. 特低渗透砂岩储层微观孔喉与可动流体变化特征[J]. 大庆石油地质与开发，2011，30（2）：89-93（核心期刊）

[37] 高辉，孙卫，李建强. 特低渗砂岩储层临界启动渗透率分析[J]. 西安石油大学学报 (自然科学版)，2010，25（3）：38-40（核心期刊）

[38]高辉,孙卫,宋广寿,任国富.鄂尔多斯盆地合水地区长8储层特低渗透成因分析与评价[J].地质科技情报,2008(05):71-76.

[39]高辉,宋广寿,高静乐,孙卫,路勇,任国富.西峰油田微观孔隙结构对注水开发效果的影响[J].西北大学学报(自然科学版),2008(01):121-126.

[40]高辉,宋广寿,孙卫,任国富,张创,韩宗元.储层特低渗透成因分析与评价——以安塞油田沿25区块为例[J].地球科学进展,2007(11):1134-1140.

[41].Le Qu, Xiang Li, Rongjun Zhang, Zhipeng Miao, Hui Gao\*. Experimental analysis of dynamic and static rock properties of interbedded tight sandstone and shale rocks, Fresenius Environmental Bulletin, 2020, 29(03): 1850-1856

[42].Le Qu\*, Tiantai Li, Rongjun Zhang, Zhipeng Miao, Hui Gao, Qing Guo. Experimental Study on Optimal CO2 Flooding Pressure Before and After Fracturing in Heavy Oil Reservoirs,Fresenius Environmental Bulletin, 2020,29(04A):3261-3268

[43]屈乐，孙卫，章海宁，杜环虹.火成岩储层核磁共振岩石物理影响特征研究，兰州大学学报（自然科学版），2014，50（1）：26 ~ 30

[44]屈乐，孙卫，杜环虹，张创，姜黎明，魏虎. 基于CT扫描的三维数字岩心孔隙结构表征方法及应用，现代地质，2014，28（1）：190 ~ 196

[45]屈乐，孙卫，谢佃和，汤爱云，刘哲.牛圈湖油田开发初期高含水原因探析，西北大学学报自然科学版（自然科学版），2011，41（6）：1037 ~ 1043

[46]Wang, C., Li, T., Gao, H\*., et al. Study on the Blockage in Pores due to Asphaltene Precipitation during Different CO2 Flooding Schemes with NMR Technique[J]. Petroleum Science and Technology, 2017, 35(16):1660-1666 (SCI收录)

[47]Wang C., Li T., Gao H., Zhao J., Gao Y. Quantitative Study on the Blockage Degree of Pores Due to Asphaltene Precipitation in Low-Permeability Reservoirs with NMR Technique[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 163: 703-711 (SCI收录，石油类一区)

[48]Wang, C., Li, T., Gao, H., Zhao J., Li H. Effect of asphaltene precipitation on CO2-flooding performance in low-permeability sandstones: a nuclear magnetic resonance study[J]. RSC Advances, 2017, 7(61): 38367-38376 (SCI收录，三区)

[49] 王琛，李天太，高辉\*，等. CO2驱沥青质沉积对岩心的微观伤害机理[J].新疆石油地质，2017，38（5）：602-606（CSCD源期刊）

[50]Cao, J., Zhang, N., and Johansen, T.E., Applications of fully coupled well/near-well modeling to reservoir heterogeneity and formation damage effects. Journal of Petroleum Science and Engineering, 176: 640–652, 2019. (SCI)

[51]Cao, J., Zhang, N., James, L.A., and Johansen, T.E., Modeling semi-steady state near-well flow performance for horizontal wells in anisotropic reservoirs. Computational Geoscience, 22:725-744, 2018. (SCI)

[52]Kai Zhao, Xiaorong Li, Chuanliang Yan, Yongcun Feng, Liangbin Dou. A new approach to evaluate fault-sliding potential with reservoir depletion[J]. SPE Journal, 2019, 24(5): 2320-2334.

[53]Kai Zhao, Junliang Yuan, Yongcun Feng, Chuanliang Yan. A novel evaluation on fracture pressure in depleted shale gas reservoir[J]. Energy Science & Engineering, 2018, 6(3):201-216.

[54]Qin W L, Yue L, Liang G Q, Jiang G F, Yang J, Liu Y. Effect of multi-walled carbon nanotubes on linear viscoelastic behavior and microstructure of zwitterionic wormlike micelle at high temperature[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2017, 123:14–22. (SCI二区)

[55]秦文龙, 姜关锋, 秦国伟, 杨江. 纳米纤维素对两性蠕虫胶束线性黏弹性的影响[J].复合材料学报, 2019, 36(2):514-521. (EI)

[56]秦文龙, 姜关锋, 梁国琦, 李冉, 杨江. pH值和盐度对阴离子蠕虫胶束/纳米流体流变性的影响[J]. 石油学报(石油加工), 2017, 33(5):985-991. (EI)

[57]秦文龙, 乐雷, 贾帅, 杨江. 纳米碳管对蠕虫状胶束流体流变特性的影响[J]. 石油学报(石油加工), 2016, 32(5):1068-1074. (EI)

[58]Qin W L; Liu X; Chen H P; Yang J; Amperometric sensors for detection of phenol in oilfield wastewater using electrochemical polymerization of zinconfilm, Analytical Methods, 2014, 6(15):5734-5740. (SCI三区)

[59]董凤娟,孙卫,陈文武,姚江荣.低渗透砂岩储层微观孔隙结构对注水开发的影响——以丘陵油田三间房组储层为例[J].西北大学学报(自然科学版),2010,40(06):1041-1045.

**八、主要完成人情况**（姓名、排名、行政职务、技术职称、工作单位、完成单位、对本项目贡献）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 张荣军 | 行政职务 | 副校长 | 工作单位 | 西安石油大学 |
| 排名 | 1 | 技术职称 | 教授 | 完成单位 | 西安石油大学 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | 作为团队带头人，提出了将致密砂岩油藏不同开发阶段有效衔接，建立有机联系，将不同方法有效融合，多学科相互支撑的新思想，这些成果在致密砂岩油藏开发中得到了应用，取得了显著的经济效益和社会效益，为致密砂岩油藏科学、高效开发提供了新思路。  （1）对创新点1的贡献：揭示了制约致密油藏品质和开发效果的关键因素；  （2）对创新点2的贡献：提出了孔隙结构动态评价新方法；  （3）对创新点3的贡献：提出了有效动用剩余油的新方法；  （4）对创新点4的贡献：创新了压裂液改进方法和压裂工艺优化技术。 | | | | |
| 姓名 | 高辉 | 行政职务 | 副院长 | 工作单位 | 西安石油大学 |
| 排名 | 2 | 技术职称 | 教授 | 完成单位 | 西安石油大学 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | 对创新点1的突出贡献：建立了致密砂岩油藏多尺度表征方法与理论体系；  对创新点2的突出贡献：创新了孔隙空间变化评价方法、刻画了剩余油赋存范围；  对创新点3的突出贡献：揭示了CO2驱微观剩余油动用机理。 | | | | |
| 姓名 | 魏登峰 | 行政职务 | 院长 | 工作单位 | 陕西延长石油（集团）  有限责任公司 |
| 排名 | 3 | 技术职称 | 正高级工程师 | 完成单位 | 陕西延长石油（集团）  有限责任公司 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | 对创新点2的突出贡献：参与创新了剩余油评价方法，指导现场开发方案调整；  对创新点3的突出贡献：参与创新了CO驱油技术；  对创新点4的突出贡献：负责剩余油挖潜改造和提高采收率新方法的现场实施、应用结果反馈和技术改进。 | | | | |
| 姓名 | 屈乐 | 行政职务 | 无 | 工作单位 | 西安石油大学 |
| 排名 | 4 | 技术职称 | 高级工程师 | 完成单位 | 西安石油大学 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | 对创新点1的突出贡献：参与创新了储层多尺度分类评价方法；  对创新点4的突出贡献：参与创新了压裂工艺新模式。 | | | | |
| 姓名 | 任剑 | 行政职务 | 无 | 工作单位 | 陕西延长石油（集团）  有限责任公司 |
| 排名 | 5 | 技术职称 | 高级工程师 | 完成单位 | 陕西延长石油（集团）  有限责任公司 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | 对创新点2的突出贡献：参与创新了剩余油评价方法，指导现场开发方案调整；  对创新点4的突出贡献：负责剩余油挖潜改造和提高采收率新方法的现场实施、应用结果反馈和技术改进。 | | | | |
| 姓名 | 孙卫 | 行政职务 | 无 | 工作单位 | 西北大学 |
| 排名 | 6 | 技术职称 | 教授 | 完成单位 | 西北大学 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | 对创新点1的突出贡献：参与创新了致密油藏分类评价方法；  对创新点2的突出贡献：创新了油水运动规律评价方法。 | | | | |
| 姓名 | 秦文龙 | 行政职务 | 无 | 工作单位 | 西安石油大学 |
| 排名 | 7 | 技术职称 | 副教授 | 完成单位 | 西安石油大学 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | 对创新点4的突出贡献：创新了压裂液改性方法，优化了压裂液性能。 | | | | |
| 姓名 | 赵凯 | 行政职务 | 无 | 工作单位 | 西安石油大学 |
| 排名 | 8 | 技术职称 | 副教授 | 完成单位 | 西安石油大学 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | 对创新点4的突出贡献：创新了长期注采条件下的地应力、井周应力变化及弱面开启状态变化特征研究方法，提出了压裂过程中裂缝扩展新模型。 | | | | |
| 姓名 | 窦亮彬 | 行政职务 | 无 | 工作单位 | 西安石油大学 |
| 排名 | 9 | 技术职称 | 副教授 | 完成单位 | 西安石油大学 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | 对创新点3的突出贡献：参与CO2驱过程中水岩反应对孔隙结构的影响规律评价。  对创新点4的突出贡献：参与了压裂过程中缝网形成规律的预测。 | | | | |
| 姓名 | 王琛 | 行政职务 | 无 | 工作单位 | 西安石油大学 |
| 排名 | 10 | 技术职称 | 副教授 | 完成单位 | 西安石油大学 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | 对创新点3的突出贡献：评价了不同方式CO2驱油过程中的动用效果差异，建立了CO2驱过程中孔隙伤害评价新方法和预测模型。 | | | | |
| 姓名 | 曹杰 | 行政职务 | 无 | 工作单位 | 西安石油大学 |
| 排名 | 11 | 技术职称 | 副教授 | 完成单位 | 西安石油大学 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | 对创新点2的突出贡献：考虑完井与油藏耦合、储层非均质性，提出了基于分段多项式压力逼近的流线跟踪方法，建立了油水实时预测评价方法。 | | | | |

**九、主要完成单位及创新推广贡献**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 排名 | 单位名称 | 对本项目技术创新和应用的主要贡献 |
| 1 | 西安石油大学 | 西安石油大学作为第一完成单位，持续开展关键技术攻关，并参与指导了项目成果的推广应用，做出了以下突出贡献：  （1）创新了致密砂岩油藏成岩相的定量划分方法，评价了不同沉积和成岩作用改造下的微观孔隙结构变化规律，揭示了制约油气藏品质和开发效果的关键因素，实现了从宏观到微观、从微米到纳米尺度的定量分类表征，提高了优质储层预测的准确率。  （2）创新了致密砂岩油藏开发过程微观孔隙结构变化的评价方法和流体分布的定量预测技术，实现了剩余油分布的实时预测，有效提高了预测精度，为开发方式调整提供了依据，为挖潜改造和提高采收率方法选择提供了目标靶点。  （3）形成了致密砂岩油藏有效降低水驱后微观剩余油含量的气驱提高采收率技术，确定了最佳注入参数组合方式，优选了现场注入参数，为矿场试验提供了依据。  （4）创新了清洁压裂液纳米改性方法，解决了传统清洁压裂液携砂、抗滤失及耐温性等难题；揭示了长期注采条件下的地应力、井周应力变化及弱面开启状态变化规律，提出了压裂工艺新模式。 |
| 2 | 陕西延长石油（集团）有限责任公司 | 陕西延长石油（集团）有限责任公司作为第二完成单位，长期、持续开展了剩余油挖潜重复压裂改造和气驱提高采收率技术攻关，并指导参与了项目的研究过程和成果的推广应用，做出了以下突出贡献：  （1）形成了致密砂岩油藏纵向剩余油挖潜的定点缝控压裂技术和平面剩余油挖潜的缝端暂堵体积压裂重复改造技术，并进行了成果推广应用。  （2）参与了优质储层关键制约因素的分析、分类评价与实际应用验证，并协助推广了研究成果。  （3）参与了开发过程中剩余油分布预测的现场验证，并协助推广了主要成果。  （4）参与了气驱实验关键参数的确定，并协助推广了相关成果。 |
| 3 | 西北大学 | 西北大学作为第三完成单位，在优质储层分类评价，水驱油过程中的油水运动规律刻画方面开展了创新，做出了一下突出贡献：  （1）揭示了制约储层品质的关键因素，参与创新了分类定量评价方法。  （2）创新了微观可视化油水分布评价技术，刻画了油水运动规律。  （3）参与创新了气体提高采收率技术。 |

**十、完成人合作关系说明**

（1）高辉为第二完成人，建立了致密砂岩油藏多尺度表征方法与理论体系；创新了孔隙空间变化评价方法、刻画了剩余油赋存范围；揭示了CO2驱微观剩余油动用机理；合作方式为共同立项、共同知识产权；合作时间为 2009年7月~2020年12月。

（2）魏登峰为第三完成人，参与创新了剩余油评价方法，指导现场开发方案调整；参与创新了CO2驱油技术，负责剩余油挖潜改造和提高采收率新方法的现场实施、应用结果反馈和技术改进。对创新点2、3、4做出了创造性贡献；合作方式为共同立项；合作时间为 2006年7月~2020年12月。

（3）屈乐为第四完成人，参与创新了储层多尺度分类评价方法和压裂工艺新模式，对创新点1、4做出了创造性贡献；合作方式为共同获奖；合作时间为 2011年1月~2020年12月。

（4）孙卫为第五完成人，参与创新了致密油藏分类评价方法，创新了油水运动规律评价方法。对创新点1、2做出了创造性贡献；合作方式为共同获奖；合作时间为 2004年1月~2020年12月。

（5）秦文龙为第六完成人，创新了压裂液改性方法，优化了压裂液性能。对创新点4做出了创造性贡献；合作方式为共同立项、论文合著；合作时间为 2002年1月~2020年12月。

（6）赵凯为第七完成人，创新了长期注采条件下的地应力、井周应力变化及弱面开启状态变化特征研究方法，提出了压裂过程中裂缝扩展新模型。对创新点4做出了创造性贡献；合作方式为共同立项；合作时间为 2013年1月~2020年12月。

（7）窦亮彬第八完成人，参与CO2驱过程中水岩反应对孔隙结构的影响规律评价，参与了压裂过程中缝网形成规律的预测。对创新点3、4做出了突出贡献；合作方式为共同立项、论文合著；合作时间为 2015年1月~2020年12月。

（8）王琛为第九完成人，评价了不同方式CO2驱油过程中的动用效果差异，建立了CO2驱过程中孔隙伤害评价新方法和预测模型。对创新点3做出了创造性贡献；合作方式为共同立项、论文合著；合作时间为 2016年12月~2020年12月。

（9）曹杰为第十完成人，考虑完井与油藏耦合、储层非均质性，提出了基于分段多项式压力逼近的流线跟踪方法，建立了油水实时预测评价方法。对创新点2做出了创造性贡献；合作方式为共同立项；合作时间为 2017年1月~2020年12月。

（10）董凤娟为第十一完成人，参与创新了致密砂岩油藏定量表征理论与方法。对创新点1做出了创造性贡献；合作方式为共同获奖；合作时间为 2011年1月~2020年12月。