

引用格式:孙焕泉,周德华,赵培荣,等.中国石化地质工程一体化发展方向[J].油气藏评价与开发,2021,11(3):269-280.

SUN Huanquan, ZHOU Dehua, ZHAO Peirong, et al. Geology-engineering integration development direction of Sinopec[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 269-280.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.03.001

## 中国石化地质工程一体化发展方向

孙焕泉<sup>1</sup>,周德华<sup>1</sup>,赵培荣<sup>1</sup>,李王鹏<sup>2</sup>,冯动军<sup>2</sup>,高波<sup>2</sup>

(1.中国石化油田勘探开发事业部,北京 100728;2.中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

**摘要:**通过地质工程一体化的技术研究与应用,北美取得了页岩革命的胜利,美国实现了能源独立,并主导全球能源格局。北美页岩革命的发展历程及经验,对我国油气资源的勘探开发具有重要启示作用。中国石化探区油气资源丰富,有利目标类型多,加快勘探开发对改善我国能源结构和保障国家能源安全具有重要意义。四川盆地海相页岩气通过地质工程一体化已实现效益开发,围绕超深层海相碳酸盐岩、致密砂岩和页岩等重点领域的高效勘探开发,需要加强隐蔽油气藏精细描述和勘探开发适应性压裂技术攻关,加强超深层碳酸盐岩储层预测和优快钻井技术体系攻关,利用大数据对致密砂岩气藏开展高效调整和优化完井方式,发展海相页岩油气多层系立体开发技术,开展向深层、常压、陆相页岩油气领域攻关。中国石化将持续加强地质理论基础研究与工程技术攻关,加强技术装备升级,坚持地质工程一体化发展思路,建立一体化运行协同机制,加强项目全过程一体化管理,切实推进各油气田降本增效,实现高质量勘探和高效益开发。

**关键词:**地质工程一体化;页岩革命;超深层海相碳酸盐岩;致密油气;隐蔽油气藏

中图分类号:TE122

文献标识码:A

### Geology-engineering integration development direction of Sinopec

SUN Huanquan<sup>1</sup>, ZHOU Dehua<sup>1</sup>, ZHAO Peirong<sup>1</sup>, LI Wangpeng<sup>2</sup>, FENG Dongjun<sup>2</sup>, GAO Bo<sup>2</sup>

(1.Sinopec Oilfield Exploration and Development Division, Beijing 100728, China;

2.Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China)

**Abstract:** With the research and application of the geology-engineering integration technologies, North America has won the victory of shale revolution, and the United States has realized energy independence, playing a dominant role in the global energy market. Its history and experience in shale revolution are the references of great value to the exploration and production of hydrocarbon resources in China. With abundant oil and gas in the exploration areas of Sinopec and various types of favorable targets, accelerating exploration and production is of great significance to improve China's energy structure and ensure national energy security. The application of geology-engineering integration has brought benefit development for the marine shale gas in the Sichuan Basin. In terms of realizing efficient exploration and production of the ultra-deep marine carbonate, tight sandstone and shale, five key studies are suggested to be strengthened: ① fine reservoir description and adaptive fracturing technology of exploration and production for complicated reservoirs, ② ultra-deep carbonate reservoir prediction and optimal drilling technology system, ③ application of big data in realizing efficient adjustment and optimize completion program for tight sandstone gas reservoirs, ④ development of multi-layer and three-dimensional production technology for marine shale oil and gas, ⑤ research on the key problems in the deep, normal-pressure and continental shale oil and gas. To achieve high quality exploration and efficient production of oil and gas, Sinopec will keep strengthening the basic geological research and engineering technology innovation, upgrading technical equipment and following the idea of geology-engineering integration. And then, Sinopec will establish integrated operation coordination mechanism and emphasize integrated management of whole process in order to cut costs and increase efficiency.

**Key words:** geology-engineering integration, shale revolution, ultra-deep marine carbonate, tight reservoir, subtle reservoir

收稿日期:2021-01-07。

**第一作者简介:**孙焕泉(1965—),男,博士,教授级高级工程师,本刊第二届编委会顾问,从事油气田勘探开发规划与研究工作。地址:北京市朝阳门北大街22号中国石化油田勘探开发事业部,邮政编码:100728。E-mail:sunhquan@sinopec.com

**通信作者简介:**李王鹏(1986—),男,博士,副研究员,从事含油气盆地构造解析研究工作。地址:北京市昌平区百沙路197号中国石化科学技术研究中心,邮政编码:102206。E-mail:liwp.syky@sinopec.com

**基金项目:**国家科技重大专项“页岩气区带目标评价与勘探技术”(2017ZX05036);国家自然科学基金“塔里木盆地周缘新元古代冰期事件与古老烃源岩发育”(41902149)。

## 1 北美页岩革命的启示

### 1.1 地质工程一体化的效果

页岩是指由黏土和极细粒矿物堆积固化而形成的岩石,一般富含有机物,是一种生油气母岩<sup>[1]</sup>。页岩油气与常规油气相比,具有源—储—运—采—用—储—层物性差、自然产能低、产量递减快等特点,这要求特殊的理论和技术,从而实现油气资源的高效勘探和效益开发。兴起于美国20世纪70年代的页岩革命,带来了页岩油气理论的创新和一系列勘探开发技术的突破,使得页岩油气产量快速增长,极大降低了油气对外依存度,最终实现了能源自给。页岩革命起先局限在“页岩气革命”,后来在页岩油的开采上也取得了成功,统称“页岩革命”<sup>[2]</sup>。

1821年,在美国纽约州的弗里多尼亚镇(Fredonia)首次发现页岩气<sup>[3]</sup>。1914年,在阿巴拉契亚(Appalachia)盆地泥盆系俄亥俄(Ohio)页岩中,发现世界第一个页岩气田——大桑迪(Big Sandy)气田。20世纪70年代,全球爆发第一次石油危机,并引起了美国政府对国家能源安全的担心。经过20多年的探索,水平井钻井技术和分段压裂技术得到快速发展及大规模应用,美国页岩气产量迅猛增长<sup>[4-8]</sup>。巴奈特(Barnett)页岩气区带年产量由1999年的 $22 \times 10^8 \text{ m}^3$ 快速增加到2009年的 $560 \times 10^8 \text{ m}^3$ (图1),产量在10年间增长了25倍,成为页岩气革命成功的标志。2010年后,美国页岩气产量进入了高速增长阶段,由2010年的 $1\,511 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到2019年的 $7\,158 \times 10^8 \text{ m}^3$ (图2),页岩气产量占2019年天然气总产量的75%。美国Range公司总地质师ZAGORSKI B曾就页岩气革命提出两点成功经验:一是基于正确

的地质认识,二是雇用最好的工程技术人员和施工队伍,即“地质工程一体化”。

### 1.2 低油价时期的措施

虽然2015年底世界油价持续低迷,但是美国页岩油气产量并没有随之降低,仍保持着相当高的产量。页岩革命使得美国实现了从能源危机到能源独立的华丽转身,2017年成为天然气净出口国,2019年成为石油净出口国。推动美国页岩油气实现规模效益开发的主要因素有政策引领、开发技术进步和管理模式优化3个方面<sup>[9]</sup>。

21世纪初始,美国对页岩油气开发给予政策补贴,加之对能源安全的重视,页岩油气产量大幅提升。良好的政策引领增强了美国石油公司勘探开发非常规资源的积极性,同时国家主导的技术攻关也为其提供了坚实的后盾,使非常规资源逐渐变得具有经济效益。

技术进步是页岩油气等非常规油气资源从无效资源转变为可商业开发有效资源的关键因素,有效降低开发成本的关键技术包含:①“一趟钻”高效钻井。美国在页岩水平井钻井过程中普遍推行一趟钻,缩短页岩油气水平井钻井周期,如井深4 000~5 000 m的水平井平均钻井周期已缩短至10 d左右。“一趟钻”作为一项系统工程,既包括钻头工具的改进,还包括钻井工程全面升级、地质工程一体化解决方案等,需要集成应用先进的钻井技术及高效的团队协作。通过钻机升级,地质工程一体化提升钻井作业效率,大幅缩短钻井周期,已成为北美页岩油气公司低油价时期钻井实现降本的主要做法。②水平井轨迹远程导向。美国页岩油气钻井已由地质导向进入远程控制模式阶段,通过远程指令,可提高定向

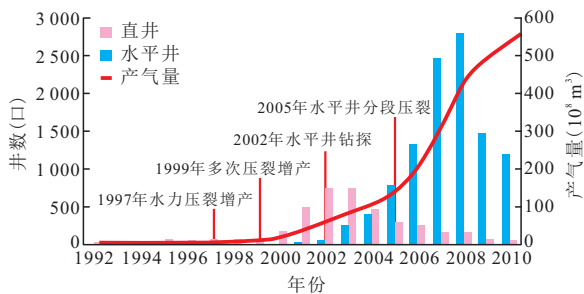


图1 美国沃斯堡盆地巴奈特页岩气开发历史

Fig. 1 Production history of Barnett Shale Gas in the Fort Worth Basin, USA

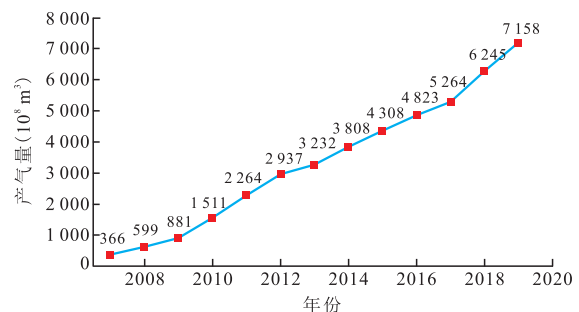


图2 美国页岩气产量爆发式增长

Fig. 2 Surge of shale gas production in America

决策效率和质量。据统计(2018年),在贝克休斯(Baker Hughes)98台钻机定向井服务过程中,58台钻机采用远程地质导向服务。钻机一钻井的地上一地下一体化发展,可整合钻井过程所涉及的软硬件设备及过程,用井下实际测量数据来实时指导优化钻井方案,不断提高钻井效率。③储层精细改造。美国卡博特(Cabot)公司通过增加压裂强度和压裂密度,在马塞勒斯(Marcellus)压裂设计的第1代到第4代水平井单位长度产量提高50%。该技术还形成了近井地带最大化精细改造方法:短缝+高砂量+簇间复杂缝网(不追求缝长)。④三维立体开发。页岩油气的开发模式由早期多井平台开发向立体化开发转变,利用多分支水平井大幅增加每个井场钻井数量,实现多层合采,最大化利用地下资源和地面设施。

在积极推进技术攻关的同时,创新管理也是降本增效的重要手段:①建立并利用学习曲线进行管理。学习曲线也称经验曲线,反映通过经验积累、调整及优化等措施使技术成本和生产效率随着技术规模扩大而降低的生产规律<sup>[10-11]</sup>,在很多行业中均有应用。对于不同地质条件及实际情况,通过不同的方法进行参数选取<sup>[12]</sup>,设计与之相适应的施工方案。与技术进步相比,学习曲线对于页岩油气开发成本的降低直接影响较小,但具有持续性效果。②优选“甜点”优化投资。在低油价的现状下,借助开发技术水平的提高,通过采取“甜点”优选措施,在大幅提升原油产量的同时,也相应使原油盈亏平衡价格大幅下降。为应对国际油价的影响,美国大部分石油公司均减少了投资力度,工作钻机数量大幅减少。石油公司基于“优中选优”的指导思想,将资金及设备主要用于核心区域中优质“甜点”区的开发,对于低产油区逐渐减少投资及钻机数量并撤出。单井产量的大幅提高在保证石油公司原油产量的同时,确保了现金流的充足,提供了良好的经营环境<sup>[13-14]</sup>。③优化经营举措。降低开发技术服务成本也是降本增效的关键,石油公司和专业技术服务公司以项目制进行管理,各司其职、分工明确。石油公司提供合理的方案设计和进行组织管理工作,专业技术服务公司以专业化、标准化、自动化、工厂化及高度协同为特征进行服务。石油公司与不同的服务公司合作,使各个环节实现投入小、效率高、作业周期短、资金回收

快、资本效率高的效果,大幅降低施工成本,实现非常规油气资源开发常规化。

### 1.3 借鉴意义与启示

地质工程一体化是实现油气资源高质量勘探和高效益开发的必经之路。页岩革命成功经验值得借鉴,同时中国页岩与美国页岩存在明显差别,海相页岩地质年代老、埋深大、热演化程度高,构造和地貌条件复杂。海陆过渡相和陆相页岩岩性变化快,非均质性强,黏土含量高,压裂难度大<sup>[15-17]</sup>,北美页岩油气勘探开发理论技术不完全适用于中国盆地。中国要实现页岩油气的规模开发还有较长的路要走,首先要掌握自身页岩的特点,明确基础地质认识;克服深层页岩油气勘探开发技术难点,在核心技术与装备上取得突破,实现技术创新;建立多学科多专业多层次的技术与管理创新团队,明确高效的领导与决策机制,并将基础地质研究、技术创新、管理创新紧密结合,形成提效降本的地质工程一体化技术攻关与管理创新模式。

## 2 中国石化地质工程一体化发展方向

中国石化探区石油与天然气资源丰富,有利目标类型多,各类油气资源的勘探开发仍将快速发展<sup>[18]</sup>。中国石化围绕隐蔽油气藏、超深层碳酸盐岩、致密油气、页岩油气等重点领域的高效勘探开发,将持续加强增产降本技术攻关和地质工程一体化发展。

### 2.1 隐蔽油气藏

#### 2.1.1 现状及存在问题

隐蔽油气藏勘探程度高,石油资源丰富,发育多种类型的油气藏,但剩余石油资源依然雄厚。近年通过创新思路,在油藏有序分布等新认识指导下,富油凹陷精细勘探不断有新发现,仍将是国家石油安全和中国石化增储稳产的“压舱石”。“十四五”期间具有新增石油探明储量 $3.2 \times 10^8$  t以上的潜力。在济阳、苏北等13个斜坡带剩余资源量 $12 \times 10^8$  t,具有年均探明 $3000 \times 10^4$  t以上的增储潜力。这类油气藏有利目标零散、碎小、隐蔽,勘探难度大,规模发现难度更大,技术经济条件较差,对勘探部署、工程技术等要求高。

### 2.1.2 典型案例攻关分析

盐家油田砂砾岩油藏位于东部断陷盆地东营凹陷北带东段(图3),区带探明含油面积20.49 km<sup>2</sup>,探明地质储量5 345×10<sup>4</sup>t。先后动用了盐22、永920等4个区块1 815×10<sup>4</sup>t储量,未动用储量主要集中在盐222、永936区块。

盐222块位于已动用区块盐22块侧翼,完钻井3口,含油面积2.5 km<sup>2</sup>,地质储量450×10<sup>4</sup>t,属特低孔、特低渗、常温、常压、稀油油藏<sup>[19-20]</sup>。针对砂砾岩油藏埋藏深、储层预测难度大、物性差、产能低等特点,胜利油田分公司制定了一体化开发方案进行降本增效。一是地球物理与油藏地质相结合,描述油层展布,优选开发“甜点”区。通过井—震结合,综合沉积相和地震相研究,确定沉积特征,预测砂砾岩体储层展布。同时,结合扇中有利相带特征分析,利用相控约束反演开展有效储层预测,确定油层分布。利用经济极限初产确定经济界限生产厚度,结合油层分布特征、油层落实程度、布井风险,确定开发布井区。二是地质与油藏工程相结合,优化井网井距及纵向动用程度。根据地层最大主应力方向,预测盐222块压裂裂缝方向(NE60°),兼顾后期补充能量井网调整的需要,确定井排方向与裂缝方向一致NE60°。考虑盐222块极限泄油半径小(75 m),经济极限井距大(259 m),通过压裂改造扩大泄油面积,可拉大技术井距至490 m。围绕盐222块砂砾岩体纵向跨度300~400 m,在一次动用的基础上,对比段数与产能的关系(盐222井分段数大于5段,产能增

幅小),优化该井分5段压裂经济性最佳。三是地质与钻井工程相结合,优化钻井设计,提高钻井速度。在满足安全和后期压裂的必要条件下,将三开改二开,最大限度简化井身结构。由于目的层含油井段较长,油藏要求垂直中靶以保证纵向上不同层系井网规则,造成了轨迹控制难、钻头加压难和钻具易疲劳等现象。通过把地质与钻井工程充分结合,井身轨迹由台阶式改为缓弧形,适当放宽中靶要求,降低了钻井难度。针对砂砾岩可钻性差、降斜段托压等共性问题,改进设计五刀翼双排齿PDC提高破岩效率、适配水力振荡器防托压,实现提速。四是地质与压裂工程结合,优化缝网压裂技术。针对厚层砂砾盐油藏,以提高“缝控储量”为目标,适配纵向交错、横向分支缝+高导流主裂缝的立体组合缝网体积压裂技术。由于常规压裂液体系成本高、大型压裂施工组织困难,研发了一体化、多功能、低成本聚合物压裂液体系,通过在线实时调整黏度,实现滑溜水、线性胶、胶液一体化配制,满足井工厂整体压裂实施。

通过地质工程一体化攻关,盐家油田砂砾岩体实现了高质量勘探和效益开发。探明地质储量4 167×10<sup>4</sup>t,动用储量1 616×10<sup>4</sup>t,建成产能10×10<sup>4</sup>t。其中,2017—2018年动用储量780×10<sup>4</sup>t,建成产能3.3×10<sup>4</sup>t。

### 2.1.3 下步攻关方向

隐蔽油气藏在深层及潜山领域整体勘探程度较低。近年来,在济阳拗陷沙四下一孔店组、胜利滩海古近系、南襄盆地凝析油气以及复杂潜山等取得了新突破,形成多个千万吨级规模储量阵地。“十四五”期间具有新增探明储量1.1×10<sup>8</sup>t油当量的潜力,可在深部烃源发育条件、储层发育条件与机制研究,多类型潜山成储成山模式及非均质性储层预测技术,深层储层保护、优快钻井及增产技术等方面开展攻关。此外,为加快隐蔽油气藏效益开发,还可在以下3个方面开展一体化技术攻关:①加强砂砾岩体深度域成像、有效连通体交互反演预测等技术的重点攻关,进一步落实地质“甜点”;②综合多种地球物理资料优势互补的高精度联合成像及反演、地球物理信息约束的匹配确定性油藏建模等核心技术,大幅提升地球物理资料的三维空间分辨能力,建立确定性精细油藏模型;③利用快速分段高效压裂管柱、低伤

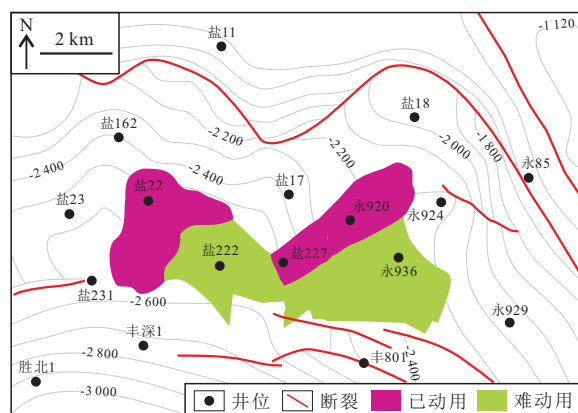


图3 渤海湾盆地东营凹陷盐家油田砂砾岩油藏位置  
Fig. 3 Location of glutenite reservoir in Yanjia Oilfield  
of Dongying Sag, Bay Basin

害压裂液为核心的立体组合缝网压裂工艺技术,可有效提高压裂体积和单井产能。

## 2.2 超深层碳酸盐岩

### 2.2.1 现状及存在问题

我国海相碳酸盐岩领域已发现油田21个,探明储量 $40.6 \times 10^8$  t,探明天然气田20个,探明储量 $5.5 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>。中国石化“十四五”具有新增探明石油储量 $4.4 \times 10^8$  t、天然气储量 $4.5 \times 10^8$  m<sup>3</sup>以上的潜力。超深层海相碳酸盐岩的油气资源具有规模整装、资源剪度高、成藏条件复杂、埋藏深度大的特点<sup>[21-22]</sup>。如四川盆地风险探井川深1井揭示,在8 100 m以下灯影组仍钻揭优质溶蚀孔隙型储层且含气性较好,揭示四川北部地区超深层碳酸盐岩具有巨大的勘探潜力;但是其储层埋藏深、剪度高(大于180 ℃)、应力高、物性差,酸液对油管腐蚀较大,测试工具失效风险极大,充分改造储层难度大<sup>[23]</sup>。川深1井因地层垮塌导致卡钻后侧钻,完钻周期超过设计63 d,试气期间又出现井筒落鱼,延误工期3个月,这也是超深层海相碳酸盐岩油气藏普遍存在的问题。

### 2.2.2 典型案例攻关分析

塔里木盆地蕴含着丰富的超深层海相碳酸盐岩油气资源,具体表现为储集体埋深大、地层结构复杂、储集体类型复杂、目的层温压条件复杂,油气藏流体性质复杂等特点<sup>[24-25]</sup>。顺北41X井位于顺北4号主干断裂带(图4),井区地表松散沙漠覆盖,勘探目标埋藏深度大,地震波反射能量弱,深层信噪比低,二叠系和奥陶系上部火成岩发育,奥陶系目的层目

标屏蔽及假象问题突出,超深不同尺度断裂体系解释评价难度大,规模储层地震响应特征不清,不同类型储层预测描述给目标优选与井轨迹优化设计造成了较大困难,二叠系火山岩、志留系断裂、下古生界侵入岩发育造成多口钻井发生卡钻、漏失等井况,同时奥陶系目的层具有超深、高温等特点,钻井剪难度大。为此,针对地质、物探、工程难点开展了一系列针对性的技术攻关:①通过“三保一测”关键参数优选,做好精细预处理工作,通过“三层一带”精细速度建模,改善复杂地表地下地质条件带来的走滑断裂带成像剪难度大问题;②创新建立了储集体分类预测,融合雕刻的“三元一体”断控储集体三维空间描述技术,形成了规模储集体评价技术,提高了断裂带和断控储集体描述精度,指导了规模井位目标优选;③在断裂带挤压、平移、拉张段精细对比分析已钻井储量产量与地震反射特征关系,以多穿断面,打通阻隔,多点控制、纵横连通为原则,依据“主断断面+异常”优选和设计井位,提高了井位部署工作效率和剪准性。在项目管理中,以问题、目标、结果为导向,聚焦关键环节,全流程贯通地质、物探、工程一体化思路,处理紧扣地质目标,解释深度参与处理质控,为圈闭、井位部署提供技术支持。全井周期地质与工程密切融合,开展复杂井况(漏失、卡钻等)精细分析,最终为工程避风险、提效率、降成本提供指导。

通过积极打造“采集—处理—解释一体化”“地质—物探—工程一体化”融合模式,井深结构从前期六开优化为四开,安全提速增效效果显著,顺北41X井节约钻井周期63 d(提速28%),节约费用1 200万元。

### 2.2.3 下步攻关方向

为实现超深层海相碳酸盐岩领域高质量勘探和效益开发,“瞄的准,打的快,产量高”是关键。地质工程一体化研究可在以下2个方面开展攻关:①加强成藏演化研究,建立超深层碳酸盐岩储层预测技术,实现“瞄的准”。综合研究“源岩演化、构造演化、圈闭形成、疏导盖保体系”等成藏要素的配置关系,重点研究构造演化对成藏调整的影响,明确成藏规律。储层预测可在建立地震—地质有利相带及储层识别模式的基础上,利用地震几何及物理属性分析有利相带,预测藻丘相储层展布及圈闭边界分布。②地质工程结合形成优快钻井技术体系,确保“打的快”。首先,加强区域地质特征研究,地质工程

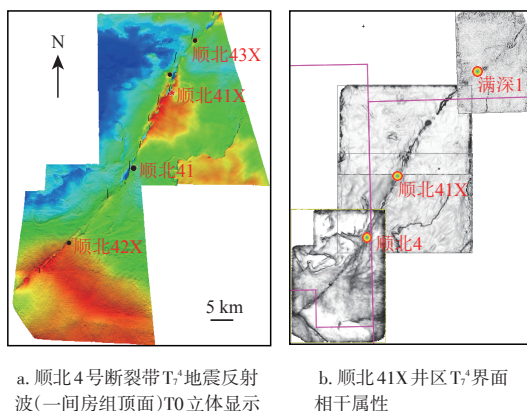


图4 塔里木盆地顺北41X井位置  
Fig. 4 Location of Well-Shunbei-41X in Tarim Basin



础,推动了单砂体研究的整体进程。

### 2.3.3 下步攻关方向

致密油藏普遍具有“甜点”小且分散,有效识别难度大及工程技术要求高,效益开发难度大的开发特点。主要在以下3个方面开展一体化攻关:①发展陆相致密油藏精细描述及选区评价技术。该项技术综合滩坝砂薄互层储层预测、储层质量非均质性表征、地应力预测及多尺度裂缝分级描述和含油非均质性表征等关键技术,可大幅度提高油藏描述精度,识别优选“甜点”区,并提高水平井油层钻遇率及井控储量。②发展水平井优快钻完井技术。包含水平井钻井提速优化、井壁稳定及储层保护、大位移长水平井固井技术和黄土塬钻井“井工厂”模式,可显著提高钻速、缩短钻井周期,加强储层保护,提升固井质量和降本增效。③发展与储层特征相适应的储层改造技术。技术的关键在于复杂缝网体积压裂技术,具备低伤害增能增效驱油压裂液介质和多尺度裂缝全支撑裂缝加砂技术体系,可同步实现“增大SRV(有效改造体积)+补充地层能量+提高油藏流度”,并提高单井产量与采收率。

致密气藏在以下2个方面存在攻关难点:①储量动用程度低,未动用储量效益开发难度大。中国石化低渗一致密气藏探明未动用储量 $7\ 842\times 10^8\text{m}^3$ ,储量动用率48.4%,探明未动用区块储层非均质性强、物性差、储量丰度低,含水饱和度高(大于40%)、气水关系复杂,单井产量低、开发成本高、效益开发难度大。②已开发气田采收率相对较低,稳产形势严峻。已开发气田剩余气分布复杂、定量刻画难度大,缺乏新型提高采收率技术,目前已开发气藏采收率仅为24.6%,气井初期递减快、气水流动机理及规律认识不清、低压低产井排液难度大,控制递减难度大、气藏稳产面临挑战。针对上述问题,可采取以下措施开展一体化攻关:①开展高效调整。应用大数据研究剩余气分布、监测生产设备的性能和工况进行资源“甜点”分析、指导精确布井、高效钻井和压裂设计优化,实现地质科学、气藏研究、钻井和完井工程协作,为油田建立一个可互动的地质模型,通过模型进行“甜点”识别、气藏模拟和钻完井优化,进而实现高效调整。②优化完井方式、提高单井产量和储量动用程度。建立地质工程一体化平台,促进多学科组织管理和数据融合,通过多专业协同和数据挖

掘不断调整和完善钻井、压裂等工程技术方案,缩短钻井周期、提高水平井钻遇率和储层改造效果,提高储量动用程度。

## 2.4 页岩油气

### 2.4.1 现状及存在问题

据“十三五”资评,全国页岩油地质资源量约 $290\times 10^8\text{t}$ ,其中,中国石化页岩油地质资源量 $84.88\times 10^8\text{t}$ ,可采资源量 $10.49\times 10^8\text{t}$ ,主要分布在渤海湾、江汉、四川、鄂尔多斯、苏北等盆地。中国石化页岩油勘探开发大致经历了3个阶段:第一阶段(2010年以前),“常规石油”兼探阶段。页岩油勘探进展缓慢,兼顾常规石油勘探。第二阶段(2010—2013年),“非常规页岩油”探索阶段。一方面,在济阳坳陷、东濮凹陷、泌阳凹陷和潜江凹陷等东部探区,针对常规探井页岩层段开展页岩油老井复查和复试工作,1 559口井页岩层段见到油气显示,103口井获工业油流;另一方面,部署BYHF-1、BYHF-2、BYP1、BYP2、YYHF-1等专探井开展页岩油资源及其基础地质规律的探索,同时开展相关工程工艺技术攻关。第三阶段(2014年至今),新一轮基础研究与先导试验阶段。在国家“973”、国家重大专项和中国石化科技部等项目的依托下,持续开展页岩油基础地质研究和先导试验,并在我国典型沉积盆地开展陆相页岩油勘探选区与目标评价工作,聚焦济阳坳陷沙河街组、潜江凹陷潜江组、四川盆地侏罗系开展不同类型页岩油“甜点”区,部署蚌页油1、义页平1、涪页10、元页2等一批页岩油探井探索资源潜力,多口井获得了工业油气流,展示出较好的页岩油勘探开发前景<sup>[33-35]</sup>。然而,与美国海相页岩油相比,我国陆相页岩面临非均质性强、页岩油“甜点”预测难度大、热演化程度低、原油可流动性差、单井产量低、黏土含量高、可压裂性差等问题,距离我国“页岩油革命”的到来还有一段路要走。

我国页岩气资源丰富,发育海相、海陆过渡相和陆相多种类型页岩气,页岩气地质资源量 $122\times 10^{12}\text{m}^3$ ,技术可采资源量 $21.8\times 10^{12}\text{m}^3$ 。其中,海相页岩气可采资源量 $13\times 10^{12}\text{m}^3$ ,主要分布在四川盆地及其周缘地区;海陆过渡相 $5.1\times 10^{12}\text{m}^3$ 、陆相 $3.7\times 10^{12}\text{m}^3$ ,主要分布在鄂尔多斯、四川、松辽等盆地(据原国土资源部,2015年)。与页岩气生产大国美国相比,我国页

岩地层一般经历了多期次构造运动,褶皱、断裂及隆升剥蚀作用频繁,构造变形作用强,地貌条件复杂,保存条件差异性大。陆相和海陆过渡相富含有机质页岩纵横向非均质性强,热演化程度差异大,陆相页岩普遍具有油气共生的特点,海陆过渡相具有页岩气、致密气和煤层气共生的特点,且有效压裂改造难度大。2012年中国石化在四川盆地海相页岩气勘探取得重大突破,建成中国首个大型页岩气田——涪陵页岩气田,并实现深层页岩气大规模商业开发(图5)<sup>[36-37]</sup>。借鉴涪陵页岩气田成功经验,中国石化持续加大页岩气勘探,重点聚焦四川盆地志留系深层、常压及新区新层系页岩气勘探,进一步拓展资源阵地。2017年,通过优质储层钻遇率、深层压裂的技术攻关,威页23-1HF井测试获日产气 $26\times 10^4\text{ m}^3$ 高产气流,发现了威荣页岩气田。该气田地层压力系数为1.94~2.06,气田埋深达3 550~3 880 m,属于深层高压页岩气藏,2018年提交探明储量 $1\ 246.78\times 10^8\text{ m}^3$ ,同步启动产能建设。与此同时,永川、南川、丁山—东溪、武隆、彭水等深水陆棚优质页岩分布区均实现勘探突破<sup>[36]</sup>,是下步实现商业增储上产的潜力区。近期,在志留系外围新区以及陆相、海陆过渡相新层系的风险勘探见到好的苗头,宜昌地区宜志页1井志留

系、涪陵地区涪页10井侏罗系和建南地区红页1井二叠系均获工业油气流。截至2019年底,中国石化累计探明储量 $7\ 489\times 10^8\text{ m}^3$ ,年产气量达 $73.8\times 10^8\text{ m}^3$ ,累计产气 $294.6\times 10^8\text{ m}^3$ 。

#### 2.4.2 典型案例攻关分析

2012年11月28日,焦页1HF井(图6)五峰组—龙马溪组页岩气层测试获得日产 $20.3\times 10^4\text{ m}^3$ 高产页岩气流,宣告了涪陵页岩气田的发现,并于2013年被国家能源局批准设立重庆涪陵国家级页岩气示范区<sup>[36]</sup>。涪陵页岩气田地质条件较北美更复杂,无成熟可借鉴的技术经验,面临技术、成本、环保等多方面挑战。为解决诸多困难,科研人员通过地质—工程一体化科技攻关,全力推进涪陵国家级示范区建设,高效建成了全球除北美以外最大的页岩气田。

在涪陵焦石坝区块产能建设时(图7),上部气层穿行层位如何优选成为困扰地质和工程人员的难题。焦石坝上部气层(⑥—⑨小层)构造特征与下部气层(①—⑤小层)基本一致,页岩品质、储层物性等方面则均存在一定差异性,上部气层TOC(总有机碳含量)平均为1.61%,孔隙度平均为3.98%,含气量约为 $3\sim 4\text{ m}^3/\text{t}$ 。除⑨小层外,脆性矿物含量为

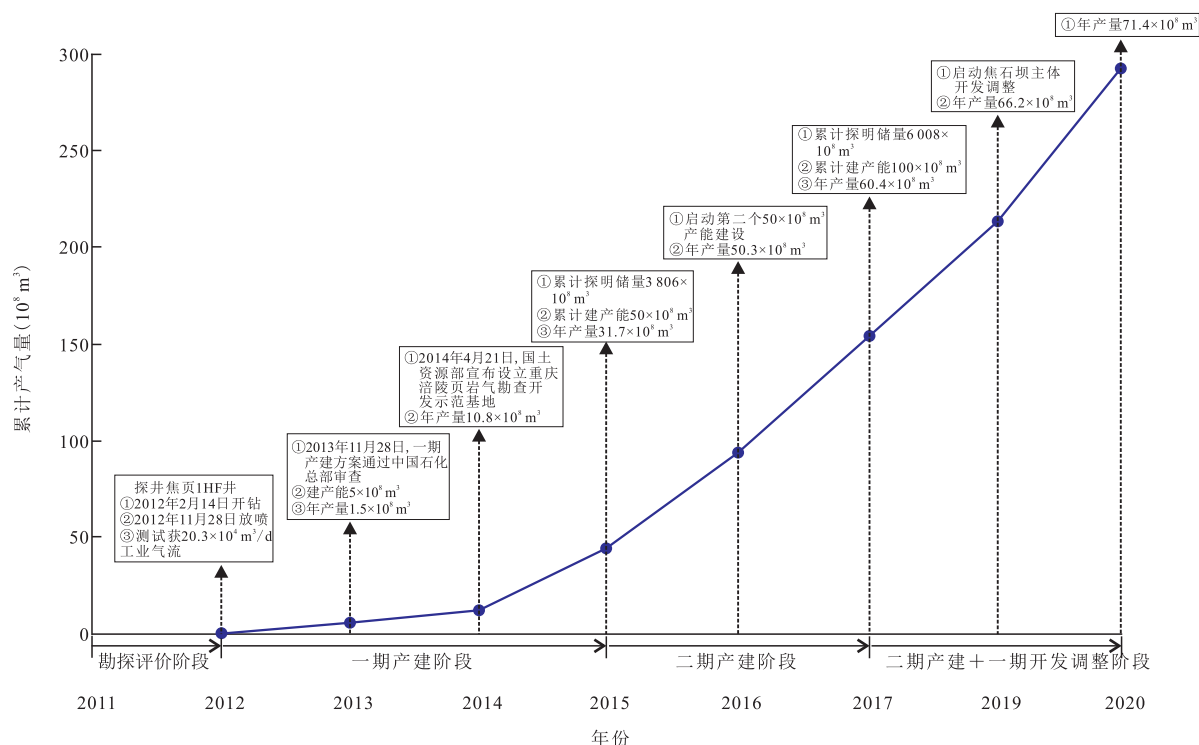


图5 四川盆地涪陵页岩气田开发历程

Fig. 5 Production history of Fuling Shale Gas Field in Sichuan Basin

54%~59%,整体评价上部气层仍属于Ⅱ类气层。其中,⑧小层页岩纹层较为发育,有机碳含量和孔隙度较高,为上部气层优质页岩段。基于地质工程一体化综合分析,确定焦石坝区块平面上采用加密井进一步完善下部井网,纵向上部署调整井网动用上部气层储量,其中,上部气层控制⑧小层底上、下5 m

内;水平井方位均沿垂直最大主应力方向—南北向部署,水平段长度以2000 m为主,结合地面平台适当调整;布井方式采用交叉布井+单向布井,尽可能利用老平台;针对上部气层易漏失、长水平井眼轨迹控制难度大的难题,开展了页岩地层岩石力学特征精细描述,形成了“导眼+三开制”的长井段水平井井身结构设计技术。在坚持地质工程一体化的优化方案下,焦页30井组上部气层井优化穿行层位后,测试产量和压力大幅提升,平均测试产量由 $9.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 上升到 $14.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。方案共部署焦石坝开发调整井223口,预计区块立体开发有利区的地质储量预测采收率由12.57%提高到了40%。

复兴地区位于川东高陡褶皱带万县复向斜、拔山寺向斜、梁平向斜,为低山—丘陵地貌。复兴地区侏罗系自下而上发育3套浅湖—半深湖相泥页岩,埋深2350~3000 m,勘探有利区面积合计2100 km<sup>2</sup>,油气资源规模达 $1.27 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,勘探开发潜力巨大。与海相页岩相比,复兴地区侏罗系页岩储层类型多样,岩性、物性和裂缝纵横向变化快、非均质性更强;页岩黏土矿物含量30%~60%,可压性较差;流体性质复杂,相态多样化,凝析油、凝析气和湿气并存;气藏赋存于低压、常压和高压多个系统。2019年涪页10HF井、涪页8-1HF井分别在东岳庙段和大安寨段钻获工业气流。2020年忠1井在凉高山组见到良好油气显示,呈大面积、多层段、整体含油气态势,是中国石化“十四五”规模增储、上产的重要领域。

#### 2.4.3 下步攻关方向

地质工程一体化实施方案在涪陵页岩气田已取得显著成效,基于前期勘探开发经验,今后页岩油气资源可在以下4个方面开展攻关:①单层/两层开发向多层系立体开发攻关。多层系立体开发可将页岩油气田的页岩油气资源整体采收率明显提升,最大化地实现储量整体动用。为实现多层系立体开发的可行性,需针对多层系水平井穿行层位优选技术、同平台密集水平井轨迹整体规划与防碰绕障技术、水平井可控体积压裂技术和大数据分析优化技术等开展攻关。②向深层页岩油气领域攻关。深层页岩是指埋深大于3500 m的区域,主要分布在四川盆地深层,是近中期页岩油气资源增储上产的重点方向,但其埋藏深、钻完井周期长、压裂改造难度大、套变问题突出、施工成本高。鉴于此,一体化研究需在明确

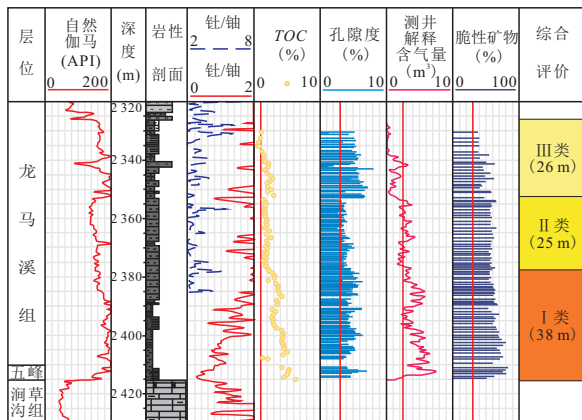


图6 四川盆地焦页1HF井五峰组—龙马溪组页岩气综合评价

Fig. 6 Comprehensive evaluation of shale gas in Wufeng-Longmaxi Formations of Well-Jiaoye-1HF in Sichuan Basin

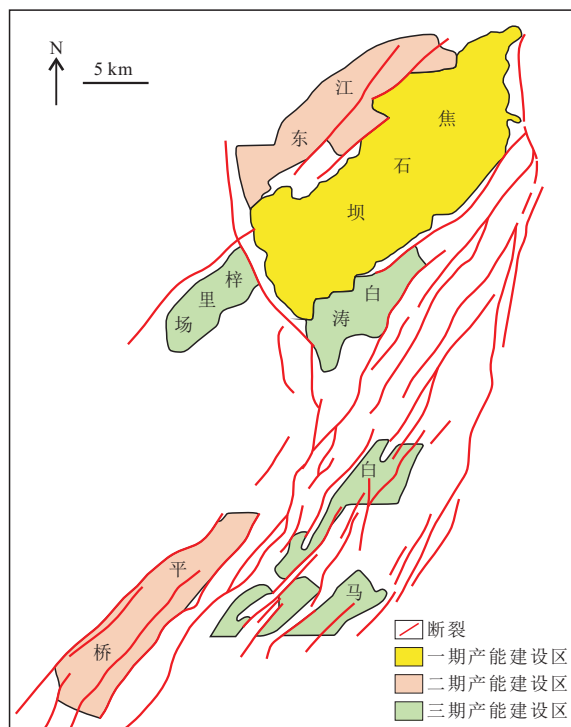


图7 四川盆地涪陵页岩气田产能建设开发形势

Fig. 7 Productivity construction development situation of Fuling Shale Gas Field in Sichuan Basin

深层页岩“甜点”层—“甜点”区、深层高陡构造精细解释与水平井轨迹优化设计、深层水平井优快钻井技术、深层适应性压裂技术和深层一超压页岩气单井生产规律与适应性开采方式等方面展开攻关。③向常压页岩油气领域攻关。常压页岩是指地层压力系数小于1.2的页岩油气藏,主要分布在四川盆地盆缘地区,主要特点是埋藏浅、构造复杂、高角度缝及层理缝更发育、孔隙度略低与吸附气占比高、最大和最小水平主应力差异大、压裂返排率高与缝网复杂程度变差、分布面积广。初步评价中国石化四川盆地探区拥有 $2.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 页岩气资源,需要在复杂构造区“甜点”优选技术、复杂构造区低成本水平井与轨迹控制技术、单井产量提高、立体开发与储量动用、低成本压裂工程工艺和地质工程经济一体化体系等方面加强攻关。以效益最大化,根据工程成本与产量之间最佳匹配关系,优化提出最合理水平段长、压裂规模等施工最优参数。④向陆相页岩油气领域攻关。陆相页岩油气是指湖相沉积体系及海陆过渡相的优质页岩形成的油气资源,主要分布在四川盆地、鄂尔多斯盆地等地区,但是这类油气藏岩性变化快、储层非均质性强、热演化程度低与原油可流动性差、成岩作用弱与塑性强、黏土含量高、压裂难度大。陆相页岩油气是中长期攻关及发展领域,初步评价资源量为 $5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,并且近期中国石化在涪页10井取得陆相页岩气新突破。前期研究表明,页岩油勘探宜向中高成熟度的生烃洼陷转移,纹层(夹层)发育段、中高成熟区、异常高压带为有利勘探方向。为能够有效动用陆相页岩油气资源,可在陆相页岩“甜点”区段识别与优选技术、陆相页岩地球物理“甜点”预测技术、陆相页岩水平井轨迹精准控制技术、流动机理及有效动用条件、低成熟度陆相页岩原位改质技术和高黏土页岩适应性压裂技术体系等开展攻关。

### 3 结论

1) 页岩革命的意义在于突破常规圈闭型油气藏地质理论,打破油气勘探开发储层下限,推动石油工业技术升级换代,建立一体化提效降本模式,是基础地质研究、科学技术创新与管理创新成功紧密结合的综合体现。

2) 地质工程一体化本质上是一种技术管理模

式,其核心是实现地质、工程跨学科、跨部门多元协作,实现快速高效科学决策与实施。成功的地质工程一体化项目,往往具备一支多学科扁平化、高效一体化的团队,具有现场作业协同化运作机制和地质工程一体化工作平台,从而降低工程风险、提高工作效率,增加经济效益。

3) 油气资源劣质化和油气开发对象复杂化趋势日益明显,油气勘探开发工程作业难度日益增大,叠加油价持续低迷,效益勘探开发挑战更为突出,通过地质工程一体化,将有望探索出一条提高油气勘探开发效果、有效降低工程作业成本的新路。

4) 不同地质条件、不同地表环境、不同工程特征的油气藏,对地质工程一体化实施的要求存在差异。地质工程一体化实践必须根据油气藏自身的特点,探索出符合地质、地表和油田生产特点的技术体系与管理模式,形成各类复杂油气藏的地质工程一体化发展之路。

#### 参考文献

- [1] 赵文智,李建忠,杨涛,等.中国南方海相页岩气成藏差异性比较与意义[J].石油勘探与开发,2016,43(4):499-510.  
ZHAO Wenzhi, LI Jianzhong, YANG Tao, et al. Geological difference and its significance of marine shale gases in South China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 499-510.
- [2] 邹才能,潘松圻,荆振华,等.页岩油气革命及影响[J].石油学报,2020,41(1):1-12.  
ZOU Caineng, PAN Songqi, JING Zhenhua, et al. Shale oil and gas revolution and its impact[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 1-12.
- [3] CURTIS J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [4] 聂海宽,何治亮,刘光祥,等.中国页岩气勘探开发现状与优选方向[J].中国矿业大学学报,2020,49(1):13-35.  
NIE Haikuan, HE Zhiliang, LIU Guangxiang, et al. Status and direction of shale gas exploration and development in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(1): 13-35.
- [5] 赵全民,张金成,刘劲歌.中国页岩气革命现状与发展建议[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(8):1-9.  
ZHAO Quanmin, ZHANG Jincheng, LIU Jingge. Status of Chinese shale gas revolution and development proposal[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(8): 1-9.
- [6] 张所续.世界页岩气勘探开发现状及我国页岩气发展展望[J].中国矿业,2013,22(3):1-3.  
ZHANG Suoxu. The exploration and development situation of world shale gas and development of China's shale gas outlook[J]. China Mining Magazine, 2013, 22(3): 1-3.
- [7] 门晓溪,韩志辉,王磊.页岩气资源勘探开发历史及现状[J].

- 新疆石油地质,2018,39(3):372-376.
- MEN Xiaoxi, HAN Zhihui, WANG Lei. History and current situation of shale gas exploration and development[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(3): 372-376.
- [8] 刘航.页岩气国内外研究现状[J].石化技术,2018,25(3):123. LIU Hang. Research status of shale gas at home and abroad[J]. Petrochemical Industry Technology, 2018, 25(3):123.
- [9] 汪天凯,何文渊,袁余洋,等.美国页岩油低油价下效益开发新进展及启示[J].石油科技论坛,2017,36(2):60-68. WANG Tiankai, HE Wenyuan, YUAN Yuyang, et al. Latest development in US cost-effective development of shale oil under background of low oil prices[J]. Oil Forum, 2017, 36(2): 60-68.
- [10] 刘子哈,郭菊娥,王树斌.我国页岩气开发技术工程化实现的学习曲线研究[J].科技管理研究,2016,36(3):118-122. LIU Zihan, GUO Ju'e, WANG Shubin. The research on the learning curve of technology engineering implementation for shale gas development in China[J]. Science and Technology Management Research, 2016, 36(3): 118-122.
- [11] 王志刚.应用学习曲线实现非常规油气规模有效开发[J].天然气工业,2014,34(6):1-8. WANG Zhigang. Application of the learning curve theory to achieve the scale and cost-effective development of unconventional hydrocarbon resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 1-8.
- [12] 梁涛,常毓文,郭晓飞,等.巴肯致密油藏单井产能参数影响程度排序[J].石油勘探与开发,2013,40(3):357-362. LIANG Tao, CHANG Yuwen, GUO Xiaofei, et al. Influence factors of single well's productivity in the Bakken tight oil reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3): 357-362.
- [13] 罗佐县.美国海恩斯维尔页岩气产业发展模式分析与启示[J].石油科技论坛,2016,35(1):50-55. LUO Zuoxian. Analysis of US Haynesville shale gas industrial development pattern[J]. Oil Forum, 2016, 35(1): 50-55.
- [14] 杜金虎,何海清,杨涛,等.中国致密油勘探进展及面临的挑战[J].中国石油勘探,2014,19(1):1-9. DU Jinhu, HE Haiqing, YANG Tao, et al. Progress in China's tight oil exploration and challenges[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(1): 1-9.
- [15] 孙焕泉,周德华,蔡勋育,等.中国石化页岩气发展现状与趋势[J].中国石油勘探,2020,25(2):14-25. SUN Huanquan, ZHOU Dehua, CAI Xunyu, et al. Progress and prospect of shale gas development of Sinopec[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 14-25.
- [16] 金之钧,白振瑞,高波,等.中国迎来页岩油气革命了吗?[J].石油与天然气地质,2019,40(3):451-458. JIN Zhijun, BAI Zhenrui, GAO Bo, et al. Has China ushered in the shale oil and gas revolution?[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 451-458.
- [17] 邹才能,董大忠,王玉满,等.中国页岩气特征、挑战及前景(一)[J].石油勘探与开发,2015,42(6):689-701. ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Shale gas in China: characteristics, challenges and prospects ( I ) [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6): 689-701.
- [18] 龙胜祥,程喆,许华明,等.四川盆地中国石化探区天然气勘探开发领域与技术攻关方向[J].天然气地球科学,2020,31(9):1-9. LONG Shengxiang, CHENG Zhe, XU Huaming, et al. Exploration domains and technological breakthrough directions of natural gas in SINOPEC exploratory areas, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(9): 1-9.
- [19] 邱隆伟,韩晓彤,宋璐,等.东营凹陷盐2区块沙四上亚段近岸水下扇岩相特征及沉积演化[J].大庆石油地质与开发,2021,40(1):26-37. QIU Longwei, HAN Xiaotong, SONG Fan, et al. Lithofacies characteristics and sedimentary evolution of the near-shore subaqueous fans in the upper submember of Es<sub>4</sub> in Block Yan22 of Dongying Sag[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(1): 26-37.
- [20] 董越,张翔宇,侯加根,等.盐家油田盐2块复杂砂砾岩储层表征[J].特种油气藏,2018,25(1):11-15. DONG Yue, ZHANG Xiangyu, HOU Jiagen, et al. Characterization of the complex glutenite reservoir in Yan22 Block of Yanjia Oilfield[J]. Special Oil and Reservoirs, 2018, 25(1): 11-15.
- [21] 马永生,黎茂稳,蔡勋育,等.中国海相深层油气富集机理与勘探开发:研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题[J].石油与天然气地质,2020,41(4):655-672. MA Yongsheng, LI Maowen, CAI Xunyu, et al. Mechanisms and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China: Advances, technological bottlenecks and basic scientific problems[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 655-672.
- [22] 庞雄奇,林会喜,郑定业,等.中国深层和超深层碳酸盐岩油气藏形成分布的基本特征与动力机制及发展方向[J].地质力学学报,2020,26(5):673-695. PANG Xiongqi, LIN Huixi, ZHENG Dingye, et al. Basic characteristics, dynamic mechanism and development direction of the formation and distribution of deep and ultra-deep carbonate reservoirs in China[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(5): 673-695.
- [23] 叶金龙,沈建文,吴玉君,等.川深1井超深井钻井提速关键技术[J].石油钻探技术,2019,47(3):121-126. YE Jinlong, SHEN Jianwen, WU Yujun, et al. Key techniques of drilling penetration rate improvement in ultra-deep well Chuanshen-1[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3): 121-126.
- [24] 黄少英,杨文静,卢玉红,等.塔里木盆地天然气地质条件、资源潜力及勘探方向[J].天然气地球科学,2018,29(10):1497-1505. HUANG Shaoying, YANG Wenjing, LU Yuhong, et al. Geological conditions, resource potential and exploration direction of natural gas in Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(10): 1497-1505.
- [25] 孙龙德,周新源,王国林.塔里木盆地石油地质研究新进展和油气勘探主攻方向[J].地质科学,2005,40(2):167-178. SUN Longde, ZHOU Xinyuan, WANG Guolin. Contributions of petroleum geology and main directions of oil-gas exploration in

- the Tarim Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2005, 40(2): 167-178.
- [26] OLSON J E, LAUBACH S E, LANDER R H. Natural fracture characterization in tight gas sandstones: Integrating mechanics and diagenesis[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(11): 1535-1549.
- [27] 丁文龙,梅永贵,尹帅,等.沁水盆地煤系地层孔裂隙特征测井反演[J].煤炭科学技术,2015,43(2):53-57.  
DING Wenlong, MEI Yonggui, YIN Shuai, et al. Logging inversion on pore-crack features of coal measure strata in Qinshui Basin[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 53-57.
- [28] 白斌,邹才能,朱如凯,等.四川盆地九龙山构造须二段致密砂岩储层裂缝特征、形成时期与主控因素[J].石油与天然气地质,2012,33(4):526-533.  
BAI Bin, ZOU Caineng, ZHU Rukai, et al. Characteristics, time and controlling factors of structural fractures in tight sandstones of the 2nd member of Xujiahe Formation in Jiulong Mountain structure, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 526-533.
- [29] 邓虎成,周文,周秋媚,等.新场气田须二气藏天然裂缝有效性定量表征方法及应用[J].岩石学报,2013,29(3):1087-1096.  
DENG Hucheng, ZHOU Wen, ZHOU Qiumei, et al. Quantification characterization of the valid natural fractures in the 2nd Xu Member, Xinchang gas field[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(3): 1087-1097.
- [30] 吕玮,张建,董建国,等.水平井固井预置滑套多级分段压裂完井技术[J].石油机械,2013,41(11):88-90.  
LYU Wei, ZHANG Jian, DONG Jianguo, et al. Preset sliding sleeve multistage fracturing completion technology in horizontal well[J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(11): 88-90.
- [31] 张全胜,李明,张子麟,等.胜利油田致密油储层体积压裂技术及应用[J].中国石油勘探,2019,24(2):233-240.  
ZHANG Quansheng, LI Ming, ZHANG Zilin, et al. Application of volume fracturing technology in tight oil reservoirs of Shengli oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 233-240.
- [32] 李月丽,易小燕,罗衍灵.大牛地气田产气剖面特征的认识及思考[J].石油地质与工程,2019,33(3):106-108.  
LI Yueli, YI Xiaoyan, LUO Yanling. Understanding and thinking of gas production profile characteristics in Daniudi gas field[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2019, 33(3): 106-108.
- [33] 孙焕泉.济阳坳陷页岩油勘探实践与认识[J].中国石油勘探,2017,22(4):1-14.  
SUN Huanquan. Exploration practice and cognitions of shale oil in Jiyang Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(4): 1-14.
- [34] 付茜.中国页岩油勘探开发现状、挑战及前景[J].石油钻采工艺,2015,37(3):58-62.  
FU Qian. The status, challenge and prospect of shale oil exploration and development in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(3): 58-62.
- [35] 盛湘,陈祥,章新文,等.中国陆相页岩油开发前景与挑战[J].石油实验地质,2015,37(3):267-271.  
SHENG Xiang, CHEN Xiang, ZHANG Xinwen, et al. Prospects and challenges of continental shale oil development in China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(3): 267-271.
- [36] 郭旭升,胡东风,魏志红,等.涪陵页岩气田的发现与勘探认识[J].中国石油勘探,2016,21(3):24-36.  
GUO Xusheng, HU Dongfeng, WEI Zhihong, et al. Discovery and exploration of Fuling shale gas field[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3): 24-36.
- [37] 郭彤楼.涪陵页岩气田发现的启示与思考[J].地学前缘,2016,23(1):29-43.  
GUO Tonglou. Discovery and characteristics of the Fuling shale gas field and its enlightenment and thinking[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 29-43.

(编辑 黄颖)