

引用格式:何发岐,徐兵威,邵隆坎.再论油气勘探开发哲学和创新性思维——纪念“中国陆上第一口油井”延1井[J].油气藏评价与开发,2022,12(2):265-273.

HE Faqi, XU Bingwei, SHAO Longkan. On philosophy and innovative thinking of oil & gas exploration and development: Commemoration of the first oil well on land in China, Well-Yan1[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(2): 265-273.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.02.001

再论油气勘探开发哲学和创新性思维

——纪念“中国陆上第一口油井”延1井

何发岐,徐兵威,邵隆坎

(中国石化华北油气分公司,河南 郑州 450006)

摘要:油气勘探开发是创新性思维到实践认识的工作,油气首先在地质家的头脑里,勘探家要不断解放思想,要充满找油的激情,要用发展的眼光看问题,重新认识自我,重新认识地下,重新认识地质工程一体化的潜力,通过认识的不断发展研究油气藏地质情况。重新认识延1井的勘探发现,总结鄂尔多斯盆地油气藏勘探开发实践和野外地质考察,形成断缝体油藏理论。勘探开发理论认识的持续创新实现了鄂尔多斯盆地勘探开发的不断突破,年产油气当量超 $8\ 000\times 10^4\ \text{t}$,成为中国含油气盆地之首。总结中国石化华北油气分公司在鄂尔多斯盆地油气勘探开发中的经验,实事求是深化油藏认识成为油气藏勘探突破的关键,辩证思考的哲学方法能够在不同阶段获得油气地质新认识,精细描述油气藏是编制开发方案的基础,地质工程一体化实现致密油气藏效益开发。面对鄂尔多斯盆地油气勘探开发对象的复杂化,油气勘探要着眼于全盆地重新认识油气藏规律,通过勘探开发理论创新突破发现不同类型油气藏。

关键词:创新思维;延1井;鄂尔多斯盆地;断缝体;地质工程一体化

中图分类号:TE132

文献标识码:A

On philosophy and innovative thinking of oil & gas exploration and development: Commemoration of the first oil well on land in China, Well-Yan1

HE Faqi, XU Bingwei, SHAO Longkan

(Sinopec North China Oil and Gas Company, Zhengzhou, Henan 450006, China)

Abstract: Oil & gas exploration and development is a combination of innovative thinking and practice. Firstly, a geologist should have the concept of oil and gas in his mind. The geologists should constantly emancipate their minds and be full of passion for oil exploration. They should look at the problems in a sight of development, re-recognize themselves, re-recognize the underground, re-recognize the potential of geological-engineering integration, and study the geological situation of oil and gas reservoirs with the continuous development of the understanding. On the basis of re-understanding the exploration discovery of Well-Yan1, the theory of fault-fracture body reservoir is formed by summarizing the exploration and development practice and the field geological investigation of oil and gas reservoirs in Ordos Basin. The continuous innovation of exploration and development theory has realized the continuous breakthrough of exploration and development in Ordos Basin. As the annual oil and gas equivalent has exceeded 80 million tons, Ordos Basin become the first oil and gas bearing basin in China. By summarizing the experiences of Sinopec North China Oil and Gas Company in oil and gas exploration and development in Ordos Basin, it is found that seeking truth from facts is the key to deepen the understanding of oil reservoirs for the breakthrough of oil and gas exploration, the philosophical method of dialectical thinking can obtain new understanding of oil and gas geology at different stages, the fine description of oil and gas

收稿日期:2021-12-16。

第一作者简介:何发岐(1967—),男,博士,教授级高级工程师,本刊第二届编委会委员,主要从事石油地质综合研究及油气勘探开发方面工作。地址:河南省郑州市陇海西路199号,邮政编码:450006。E-mail: hefq.hbsj@sinopec.com

通信作者简介:徐兵威(1985—),男,博士,副研究员,主要从事油气勘探开发研究及科技管理工作。地址:河南省郑州市陇海西路199号,邮政编码:450006。E-mail: xubw.hbsj@sinopec.com

基金项目:中国石化科技项目“鄂尔多斯盆地南部中生界断缝体油藏开发关键技术”(P21026)。

reservoirs is the basis for the preparation of development plans, and the integration of geological engineering realize the benefit development of tight oil and gas reservoirs. The object of oil and gas exploration and development will be more complex in Ordos Basin. As a result, the oil and gas exploration should focus on the whole basin to re-recognize the oil and gas reservoirs, and find different types of oil and gas reservoirs by the breakthrough of exploration and development theory.

Keyword: innovative thinking; Well-Yan1; Ordos Basin; fault-fracture body; geology-engineering integration

著名地质学家 PRATT 于 1952 年在 AAPG 公报上曾说:“归根结底,石油首先是在人们的头脑中找到的,一旦不再有人相信还有剩下的油可以找到,那就再也不会发现任何新油田了”^[1],强调了石油勘探中加强形象化思维的重要性。视觉是成功的石油勘探人员不可缺少的品质,如果说新油田是在寻求油田的人员头脑中首先形成的话,那么,新油田就一定要等到头脑中形象化思维或想象出来之后才能被发现^[2]。1907 年 6 月 5 日,“中国陆上第一口油井”延 1 井开钻,9 月 10 日,于井深 81 m 上三叠统延长组完钻,获得日产油 1.5 t 的良好成果(图 1)。延 1 井的钻成并出油,标志着中国近代石油工业的诞生,是一个值得纪念的里程碑^[3]。鄂尔多斯盆地目前已成为中国产量最大的油气盆地,不仅打破了美孚石油公司马栋臣、王国栋关于“在陕北各油苗处和延长各油井中,可以预期的产油量是微不足道的”的错误论断^[4],同时勘探理论成长的过程也给我们启迪,“不同阶段都需要我们不断重新认识”^[5]。在生产和科学实验范围内,人类总是不断发展的,自然界也总是不断发展的,永远不会停止在一个水平上。近年来中国石化华北油气分公司在鄂尔多斯盆地石油勘探开发中跌宕起伏,使我们再从延 1 井出发,与她有关的勘探发现给我们认识油气藏类型带来新的启迪,在总结失败和庆祝成功的同时值得我们深沉地纪念一下这口井。

从 1907 年第一口出油井发现算起,鄂尔多斯盆地油气勘探开发工作已走过了 114 a 的历史,累计发

现油气田 50 多个,年产油气当量已超 $8\,000 \times 10^4$ t,位居中国含油气盆地之首^[6]。鄂尔多斯盆地油气藏类型十分复杂,既有传统的构造油气藏,也有岩性油气藏(图 2)。不同的勘探阶段以不同类型油气藏为主要目标,取得了一定的勘探成效。但回顾总结起来差别很大,不同的油气藏在勘探开发中技术路线不一样、方案不一样、效益不一样。尤其是勘探初期,查清基础地质条件、搞好油气藏描述、确定油气藏类型对开发效益有至关重要的决定作用。

20 世纪 60 年代,中国石化华北油气分公司的前身地质矿产部华北石油地质局挺进鄂尔多斯盆地南征北战,在陇东、陕北、鄂尔多斯盆地北部连续获得勘探突破,打开了一个个油气勘探领域,促进了陇东油气会战,带动了致密油气规模开发,很好地完成了勘探历史使命。进入 21 世纪后,华北油气分公司从勘探转向勘探开发一体化,在鄂尔多斯盆地北部、南部、西缘构造过渡带等复杂矿权区,开展勘探开发一体化探索,取得了一些代表性的勘探成果,也走过了痛苦的弯路。“十二五”期间,油价跌宕起伏、石油产量未能形成规模,使得开发成本居高不下,进一步加大油气勘探开发力度陷入困局。“十三五”以来,通过系统梳理地质资料,着眼于全盆地重新认识鄂尔多斯盆地油气藏规律,获得断缝体油藏认识并展开评价试验,从技术效果和地质认识方面取得积极进展^[7]。

1 客观认识油藏是勘探突破的关键

实事求是深化油藏认识是勘探突破的关键。20 世纪 30 年代,国内石油地质工作者对陕北三叠系的油田认识主要有两种观点:一种是以王竹泉、汪鹏为代表提出的“断层油藏说”^[4,8-9],主张沿断层钻井;另一种是以潘钟祥、佟诚为代表提出的“背斜构造油藏说”^[10-11],认识到地层构造简单不易大量聚集石油,一些局部小构造的存在,仍可聚集相当数量的油。20 世纪 50 年代,陈贲、黄先驹提出“裂缝油藏说”^[12-13];1953 年 10 月,苏联专家到延长指导工作,确定延长



图 1 “中国陆上第一口油井”——延 1 井

Fig. 1 The first oil well on land in China: Well-Yan1

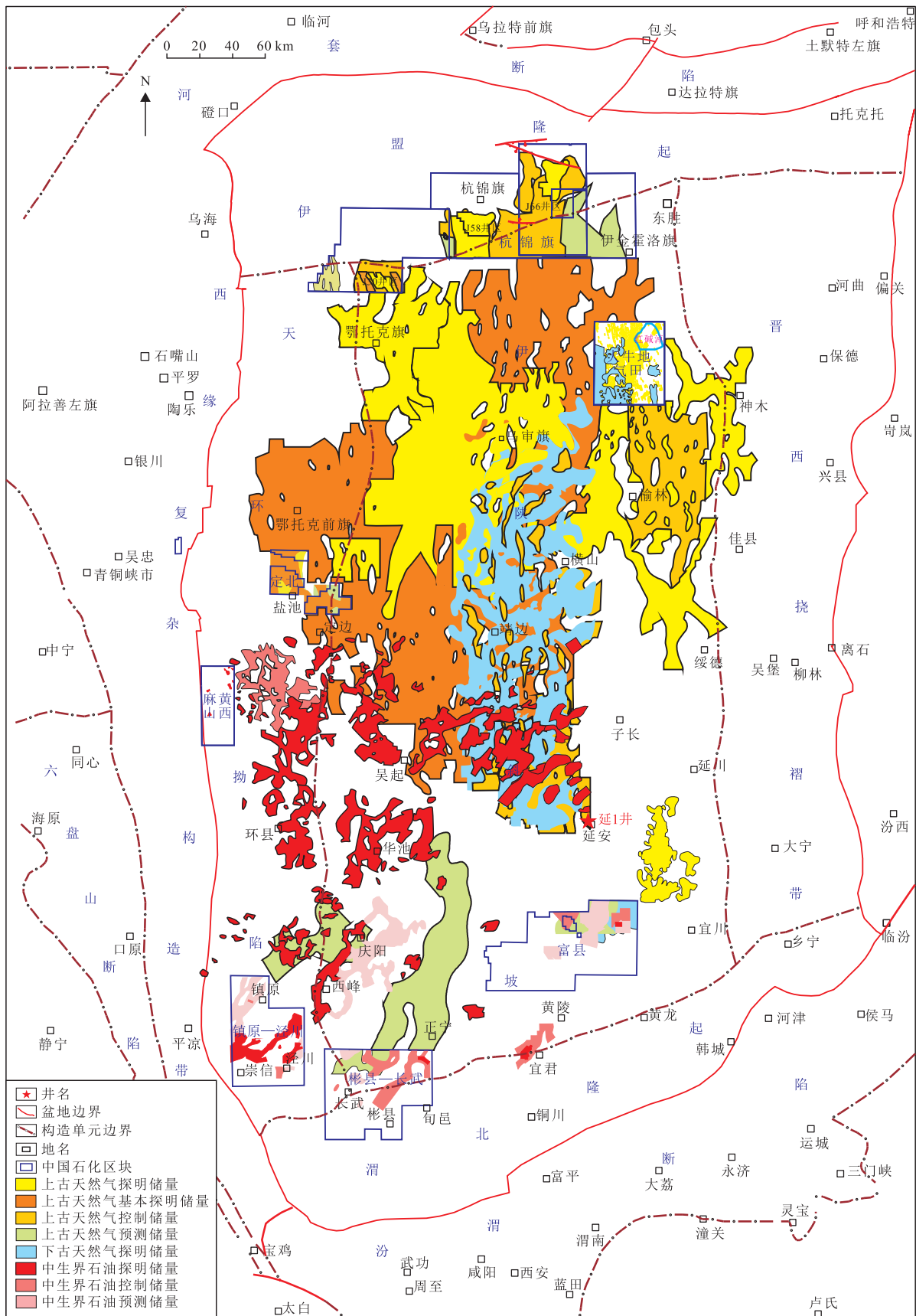


图2 鄂尔多斯盆地构造区划与油气勘探成果

Fig. 2 Structural division and distribution of oil and gas exploration results in Ordos Basin

油田为“裂缝性油田”,指出“油苗旺,地面裂缝发育和构造变陡是寻找裂缝油藏的必备条件”^[11]。在实践中,地质工作者把延长油田的钻探开发原则概括为“找油苗,顺节理,保持适当井距,封淡水,抽咸水,自上而下开采”,进一步研究裂缝的成因及其与油层的关系,提出根据油层和构造变化,结合钻井、采油资料、地面节理与油苗寻找裂缝油藏的布井方法,使钻探裂缝油藏的成功率高达76.5%^[3]。但随着盆地内部伊陕斜坡安塞油田的成功开发,石油勘探的重点集中到了三角洲控制的岩性油藏,而且影响深远^[14-16],绝大多数专家认为“盆地稳定,构造不发育,河道大面积连续发育砂体”^[17]。“十二五”期间,靠近盆地边缘构造、沉积、古地形地貌变化十分剧烈的部位,盆地边缘或者受基底大断裂多期活动控制的复杂油气藏勘探依照简单认识导致了开发效果差乃至失败。

“十三五”以来,笔者学习鄂尔多斯盆地勘探开发历史,受延1井勘探发现的启迪,在鄂南镇泾、彬长区块油藏勘探实践中,利用井震资料,结合野外露头观察、岩心观察、特殊测井等资料,综合分析识别断裂、裂缝展布,从动力学角度分析成因和规模,从几

何形态描述断缝体三维空间展布,进而研究断缝体与油气富集成藏的关系(图3)。总体看,鄂尔多斯盆地中生界普遍发育致密—低渗油气层,以长6—长8为代表,孔隙度在10%左右、渗透率为 $(0.1\sim 2.0)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。对于这些油气层而言,一定规模的断裂、裂缝的发育能够更有效地沟通油源、改变运移方向、控制成藏部位,断层、裂缝发育规律及其渗流特征改善油藏的渗流系统,是鄂尔多斯盆地烃源分布区边缘致密—低渗油气田油气富集的主控因素。延1井是盆地内部构造相对稳定区的一口井,在井深81m的上三叠统延长组获得日产油1.5t的效果,说明断裂、裂缝改变了地层渗流系统,沟通有效油源形成受断缝控制的规模油气富集区,断裂控藏是致密—低渗油气藏地质研究的重要领域。

回顾鄂尔多斯盆地油气勘探,不同单位采用不同的勘探思路走过了不同的历史轨迹,中国石油长庆油田的成就无疑最为辉煌。随着地质理论和勘探技术的不断进步,长庆油田经历了5个发展阶段,实现了从低渗油气(马岭油田、元城油田)、特低渗透油气(安塞油田、靖安油田)、超低渗透油气(西峰油田、姬塬油田)、致密油气(华庆油田、合水油田)到页岩

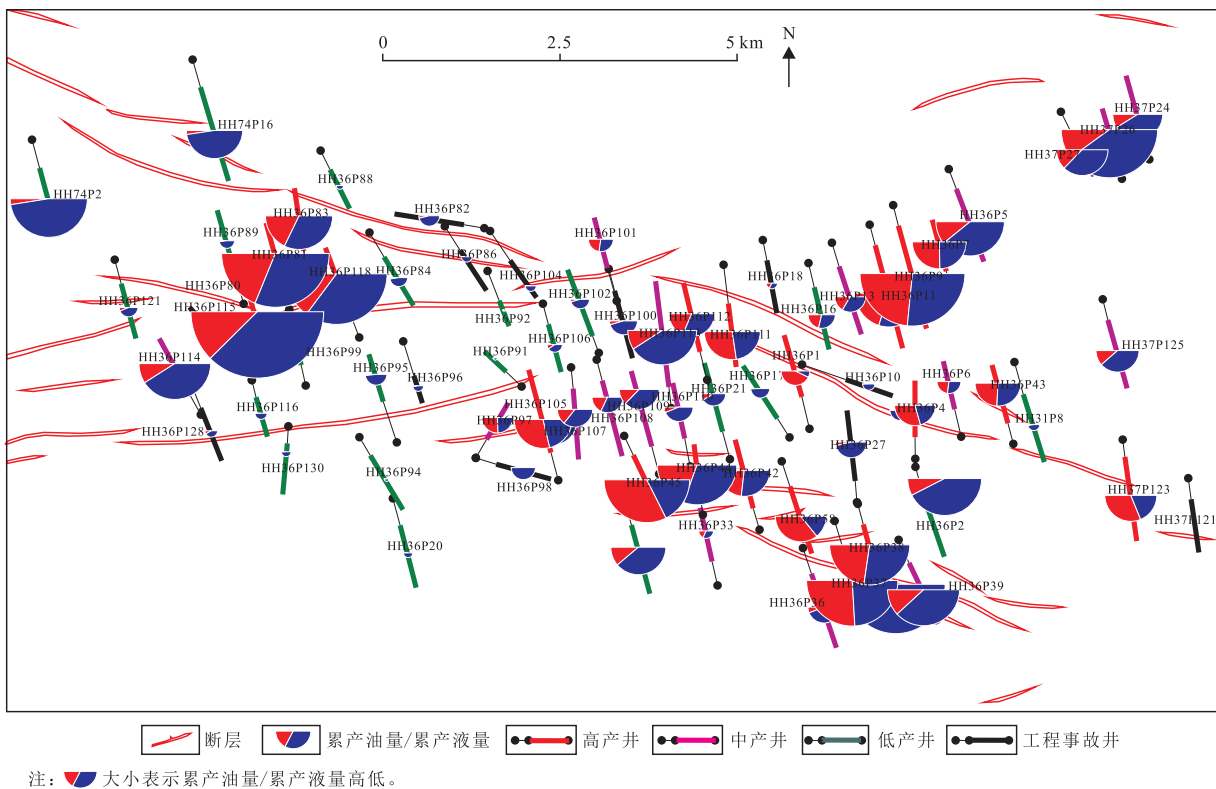


图3 鄂尔多斯盆地镇泾区块长8断裂、裂缝与油藏富集关系分布
 Fig. 3 Distribution of fracture-cracks and reservoir enrichment of Chang-8 oil layer in Zhenjing Block, Ordos Basin

油资源(庆城油田)的规模勘探及效益开发,促成了鄂尔多斯盆地产量位居国内第一的骄傲。在长庆油田的勘探开发过程中,体积压裂成为解决鄂尔多斯盆地低渗、特低渗油藏“井井有油,井井不流”的创新性技术,压裂裂缝延伸过程中形成裂缝网络系统,改变流体运动规律,提高油气勘探开发成功率。

2 辩证认识油气地质条件

辩证思考是提升油气地质认识的哲学方法。据《中国石油地质志》记载,鄂尔多斯盆地中部富县和北部延长、延安、延川地区是中国石油工业的发祥地,实际上也是“石油”一词的诞生地^[3]。北宋科学家沈括在《梦溪笔谈》中写道:“鄜延境内有石油,旧说高奴县出脂水,即此也。……此物后必大行于世,自余始为之。盖石油至多,生于地中无穷,不若松木有时而竭”^[18]。由此可知,鄂尔多斯盆地内部发育的延河、洛河两岸成为中国最早发现、认识石油的地方。根据史料考证,最早在东汉时期,历史学家班固曾在《汉书·地理志》中记载“高奴有洧水可燃”^[19],后期地质学家通常认为是由于鄂尔多斯盆地三叠系和侏罗系含油层系出露地面形成的油苗^[3]。笔者结合细致的野外地质考察,发现地面油苗呈带状排列发育,与断裂形成的裂缝带分布一致,推测油苗主要受断层裂缝带控制形成。断层裂缝的发育既控制了油藏的破坏,对油气勘探而言更要认识裂缝控制运移和聚集过程,受断缝控制形成规模有效油气聚集,部分油气在浅部聚集为断缝体油气藏。王竹泉和潘钟祥1934年在陕北调查石油发现,延2井、延10井与延1井3口井的位置在北东南西向的一条直线上,呈现为一个“长形油池”分布^[10]。随即沿此方向部署延15、延16两口井,其中延15井日产油1.5 t,油层埋深不到100 m,展示了北东向断裂对油气成藏的控制作用^[11]。下寺湾油田是长庆油田移交延长油田的一个边际效益油田,开发至2008年共有6个区块7套油层,先后发现长3、长6等新油层,并发现张岔、剡峪、柴窑等新区块,原油年产量规模从 1.096×10^4 t增至 40×10^4 t。下寺湾油田的勘探开发主要围绕储层和裂缝带开展攻关研究,形成“立足长2打基础,扩大长3、长6上产能,继续延安组研究,追踪裂缝寻突破”的开发思路。在下寺湾油田开发过程中,通过逐渐探索、认真总结经验,开发中发现一系列高产井。

1996年,泉4-3井在长1油层遇裂缝,井喷40 d,至2008年底累计产油量约 6×10^4 t,创鄂尔多斯盆地单井产量最高的纪录。泉4-3井长1地层压力系数仅0.6,该井的规模产量给油气地质勘探带来开拓性思路,地层压力较低区域浅部地层能够规模成藏。下寺湾油田按照追踪裂缝的开发部署思路,后续实施钻遇裂缝井16口,其中4口井初期曾日产油100 t以上,证实这个观点的正确性。泉4-3井在长1油藏规模成藏给石油地质学家形成一个全新的认识:盆地整体地层压力低与多期普遍发育的断层活动导致的裂缝发育、应力释放有关,断层裂缝的发育在破坏油藏的同时建立新的油气运移通道,形成受断缝控制的规模有效油气聚集^[20],断裂控藏、在浅部近地表应该是鄂尔多斯盆地值得重视的领域。

3 夯实油气藏精细描述的全面性

精细描述油气藏是编制勘探开发方案的重要基础。“十二五”期间,中国石化华北油气分公司在鄂尔多斯盆地南部镇泾、彬长、富县和麻黄山西4个矿权区块提交探明储量累计 2.36×10^8 t,按照常规岩性油藏开发思路形成的方案动用探明储量 1.1×10^8 t,动用程度达48%,但采出程度仅2.4%,至今无法形成效益开发,年产量只有十多万吨。华北油气分公司在鄂尔多斯盆地南部区块多位于一级构造单元集合部位,由于沉积、构造演化的差异性及断缝的普遍发育,最终形成圈闭类型多样的非常规油气藏,一定规模的断层裂缝形成新的油气运移通道和有效聚集空间^[7]。低渗特低渗砂岩油藏开采特征因发育存在断裂体系、裂缝,难以用孔隙型储层勘探开发理论解释,非常规油气藏的勘探开发需要用非常规的手段去解决。总结勘探开发过程中与油气藏地质有关的现象,通过精细描述重新认识油藏地质参数,评价落实优质储量。裂缝和断层对致密油藏的渗透性和含油性具有明显的控制作用,如钻井过程中的泥浆漏失、放空、溢流,测井高浸低阻,压裂过程中的压穿、注水注气过程中的串流,注采井网关系不配对,都反映了裂缝和断层在致密砂岩中产生的储集空间是相对巨大的,断缝在油藏中产生强烈的流动能力控制是十分明显的。根据镇泾区块钻井数据统计,钻井在裂缝发育段泥浆漏失最高达1 200 m³以上。根据钻井泥浆漏失量可以推断,断层及其伴生的裂缝带

是导致致密砂岩油藏非均质性的重要因素。常规岩心渗透率测试以基质为主,不能反映储层裂缝渗透率,造成对裂缝油藏的整体孔隙度认识不足,难以形成对油藏的整体系统性评价(图4)。

砂岩岩性油藏在不同方向的渗透率受变异系数的影响,有断缝发育时受断层裂缝控制。裂缝型油藏开发方案编制要在研究储层变异系数基础上建立流动单元,逐层编制单砂体构造图,同时要考虑断层裂缝对渗透率的影响。红河油田开发早期,由于长8油层能量不足、水平井天然能量开发递减快,在以砂岩岩性油藏部署的井网基础上,优选储量基数较大的红河156井组开展注CO₂补充能量试验。在CO₂补充能量施工中,位于北东东向同一裂缝带的HH12P72井发生气窜,与注气井红河156井垂直裂缝带方向的HH12P152井和HH12P48井注气1 a见效。油藏开发中常规河流沉积砂对比连井油藏剖面描述难以表达同一油藏内部的连通性,控制油藏的单砂体空间结构不明,无法建立客观的注采对应关系。同时,由于断缝干扰,开发阶段油藏的注水流场、压裂串通等均得不到合理解释(图5)。

按照裂缝型油藏模式,重新处理镇原—泾川区块三维地震资料发现,鄂尔多斯盆地南部构造过渡带的断层裂缝强烈发育。在建立相应地质模型基础上,地质地球物理一体化处理解释发现断层裂缝带在北东东向分布50条、130多个断缝体(图6),落实资源量 2.1×10^8 t,为后续开发方案调整奠定新的基础。断缝带精细刻画推动了裂缝型油藏认识的提升,张扭性、压扭性、沟谷性等断缝体组合样式变化大,不同断缝体产状不一致,有效断缝体宽度分布范围较广且存在差异,控制裂缝型油藏储量甜点分布,形成高产井分布带。

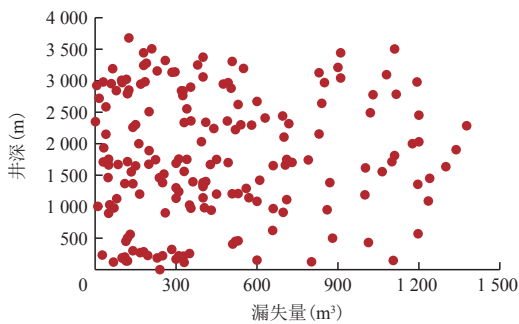


图4 鄂尔多斯盆地镇泾区块裂缝段钻井泥浆漏失量统计
Fig. 4 Drilling mud leakage in fracture section of Zhenjing Block, Ordos Basin

4 地质工程一体化适应性和必要性

北美页岩气勘探开发基于正确的地质认识和适应性工程技术创新,地质工程一体化运作实现产量大幅突破,降低了储层动用下限,树立了一切资源皆可动用的理念,地质工程一体化实现跨学科、跨部门多元协作,保障基础研究、技术创新有机结合,最终实现效益开发目标^[21]。在总结近年来北美致密油效益开发历程基础上,国内探索形成油藏地质工程一体化的解决方案,实现效益开发低品位储量^[22-23]。结合油气藏工程地质特征,以产量最优化原则为目标,编制地质工程一体化方案,优化地质工程一体化工作流程,明确各专业模块的工作责任,构建地质工程一体化信息化平台,形成油气藏地质工程一体化效益开发模式。

鄂尔多斯南部中生界油藏断缝发育、油水同层,渗透率变异系数受裂缝影响大,开发过程中合理控制压裂缝高难度大,难以有效沟通断缝,产出液高含水,按照油藏开发思路储量难以规模化效益动用。地质工程一体化是鄂南裂缝型油藏储量效益开发的必由之路,精细方案研究是一体化工作的基础,必须从设计源头、技术优化、增产方案等方面开展同步编

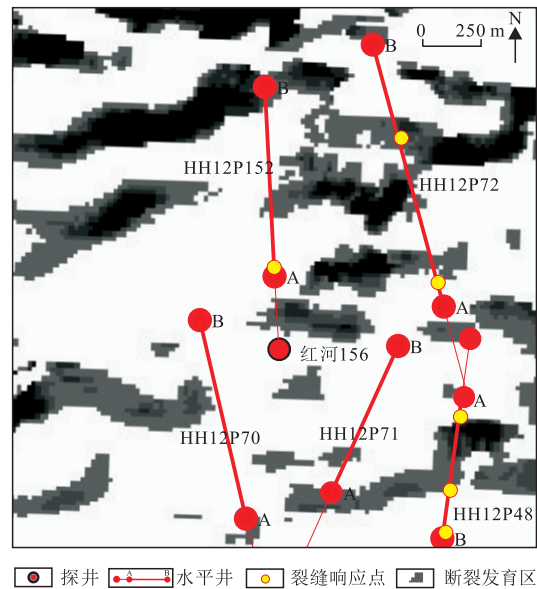


图5 鄂尔多斯盆地红河156井组断缝发育及水平井方位

Fig. 5 Fracture development and distribution of horizontal wells in well group Honghe-156, Ordos Basin

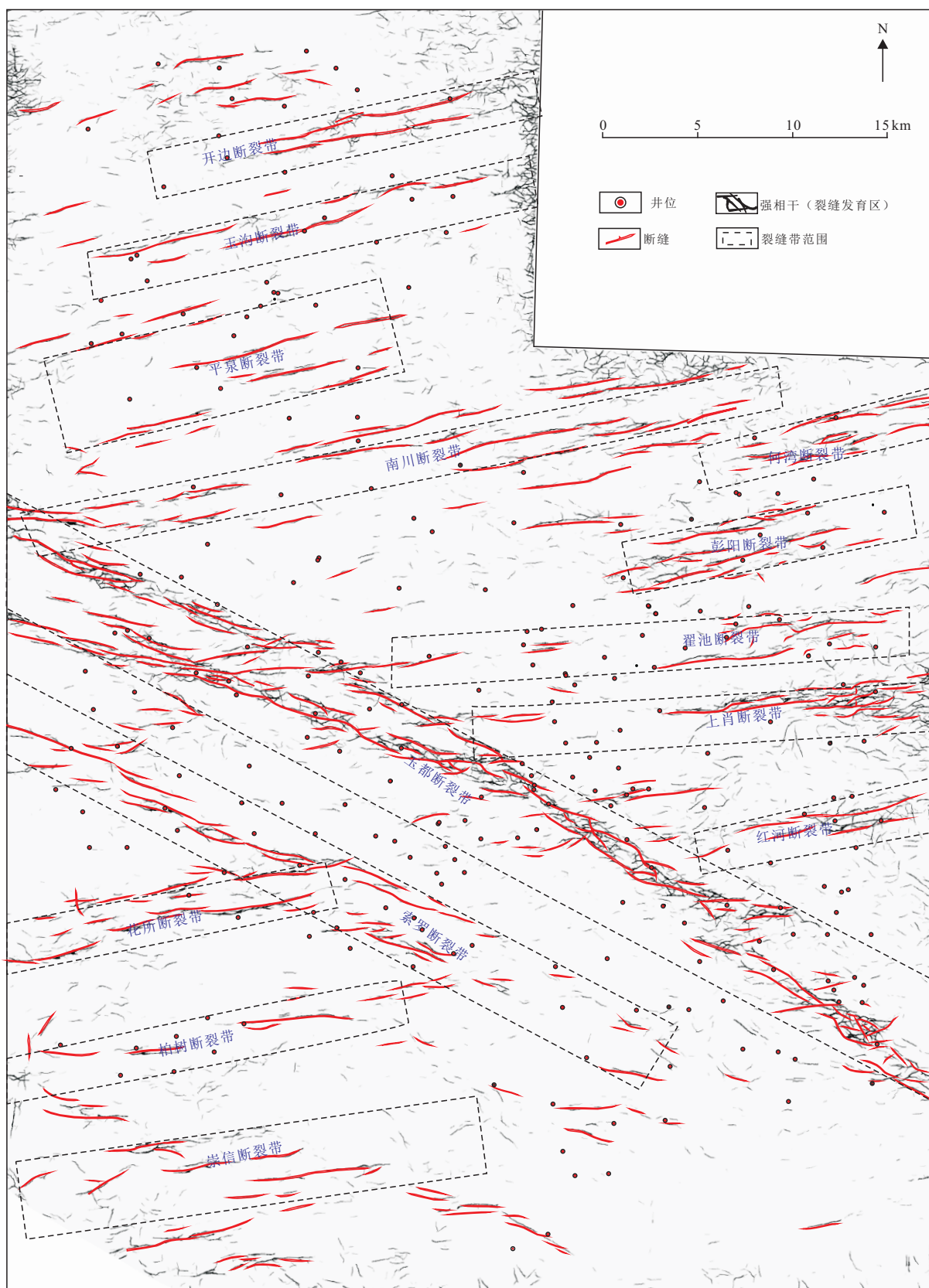


图6 鄂尔多斯盆地镇泾区块断裂发育图

Fig. 6 Distribution of fault-fracture development of Zhenjing Block, Ordos Basin

制、同步确定和同步优化,形成地质与工程融合的地质工程一体化方案。将地质特征、目标要求与工程工艺技术深入结合,油藏地质研究及设计要贯穿井位部署、钻完井及投产整个流程,并根据工程、工艺的反馈作动态迭代优化,形成地质工程一体化平台,构建地质工程一体化快速决策机制,提高工作效率及实施效果。地质工程一体化方案在断缝体油藏开发降低成本的同时初步显现好苗头。考虑到已有钻井在钻遇断缝时明显漏失造成污染,采用近平衡钻井控制漏失,保护储层。彬县长武区块早胜断裂带东段发育6个断缝体(图7),其中4号断缝体上的JH2P9井自然投产,稳定日产油30 t,已累计产油12 000 t;早胜断裂带上部署的JH2P43井稳定日产油10.6 t。镇泾区块红河断裂带上部署的HH51P1和HH51P4井,通过地质工程一体化的应用实施,累产均超7 000 t。通过地质工程一体化方案的系统性技术攻关,说明在精确描述地质对象的基础上选择匹配性技术是必要的。鄂尔多斯南部彬县长武区块中生界长8断缝体油藏预测形成探明储量 122×10^4 t,有望成为国内第一个断缝体油藏储量。

5 结论

结合勘探开发实践及油气藏地质资料,石油地质学家的实事求是的形象化思维是发现油气藏不可缺少的品质。随着勘探开发理论的成长丰富,辩证认识油气藏能够在不同阶段都取得新发现,重新认识延1井的勘探发现给我们带来断缝体油气藏类型的启迪。

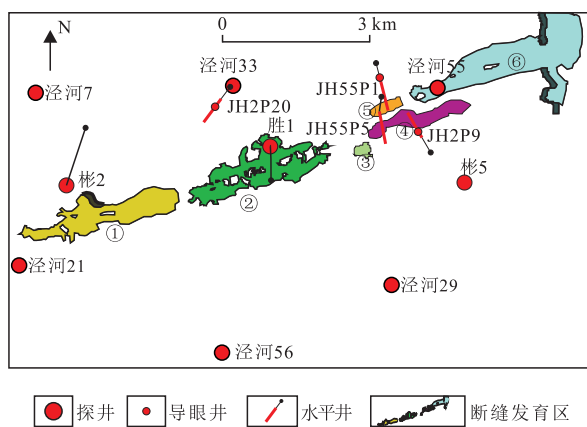


图7 鄂尔多斯盆地彬县长武区块早胜断裂带6个断缝体
Fig. 7 Six fault-fracture bodies of Zaosheng Fault Belt in Binchang Block, Ordos Basin

鄂尔多斯盆地油气藏类型十分复杂,不同勘探开发阶段的理论创新突破发现了不同类型油气藏类型,取得了一定的勘探开发成效,但效果差别较大。在实际勘探开发实践中,再次认识到断缝体改变油气藏渗流系统形成规模油气富集区,形成了断缝体油藏理论。“井井有油,井井不流”是鄂尔多斯三叠系致密油的最基本的表征,断缝油藏理论为精细描述油藏编制开发方案奠定了基础,地质工程一体化方案实现了致密油规模化效益开发。鄂尔多斯盆地油气藏的高难度勘探开发锻炼了无数的人才成长,翻开《中国石油地质志》,鄂尔多斯浩如瀚海的宏卷巨著是中国石油战线上的英雄巨匠留下的脚印、洒下的汗水、留下的心血。鄂尔多斯盆地如此巨大的油气勘探开发成就,需要我们坚定信心,虚怀若谷,仔细咀嚼前辈留下的箴言,踏石留印,走好致密低渗油气田勘探开发的每一步。

致谢:近年来华东油气分公司在页岩气、煤层气和苏北小盆地常规、非常规油气勘探领域勘探开发取得了不凡的成绩。在和吴聿元、陈祖华等同志交流的过程中,他们重视基础研究、重视科技工作,强化地质工程一体化。一个1 700多名员工、产量220多万吨的企业在生产经营形势十分严峻的时候,持续坚持办好《油气藏评价与开发》,为技术人员搭建好一个平台,实属思维超前、目光远大,对我很有启发,重视科技并注重技术团队建设是企业高质量发展的不二法则。作为编委之一,按照姚红生、吴聿元、陈祖华同志要求,我组织一期华北油气分公司的专刊,并撰写一篇综述性文章,感谢他们为我们开放平台。鉴于具体稿件内容涉及面广,我没有完全按照主编要求完成任务,把我在鄂尔多斯盆地近几年的勘探开发地质研究中的领悟整理出来,与大家分享。

参考文献

- [1] PRATT W E. Toward a philosophy of oil-finding[J]. AAPG Bulletin, 1952, 36(12): 2231-2236.
- [2] 费琪. 油气勘探中的创造性思维[M]. 北京:地震出版社, 2005.
FEI Qi. Creative thinking in oil and gas exploration[M]. Beijing: Seismological Press, 2005.
- [3] 长庆油田石油地质志编写组. 中国石油地质志(卷十二:长庆油田)[M]. 北京:石油工业出版社, 1992.
Petroleum geology compilation group of Changqing oilfield. Petroleum Geology of China (Volume 12: Changqing Oilfield) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.
- [4] 王竹泉,潘钟祥. 陕北油田地质[J]. 地质汇报, 1933(20): 48-58.

- WANG Zhuquan, PAN Zhongxiang. Geology of north Shaanxi oil field[J]. Geological Report, 1933(20): 48-58.
- [5] 胡文瑞.重新发现石油——石油将缓慢地失去青睐度[M].北京:石油工业出版社,2018.
- HU Wenrui. A new understanding of petroleum: Oil attractiveness is gradually fading[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.
- [6] 刘池洋,王建强,张东东,等.鄂尔多斯盆地油气资源丰富的成因与赋存—成藏特点[J].石油与天然气地质,2021,10(42):1011-1029.
- LIU Chiyang, WANG Jianqiang, ZHANG Dongdong, et al. Genesis of rich hydrocarbon resources and their occurrence and accumulation characteristics in the Ordos Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2021, 10(42): 1011-1029.
- [7] 何发岐,梁承春,陆骋,等.鄂尔多斯盆地南缘过渡带致密—低渗油藏断缝体的识别与描述[J].石油与天然气地质,2020,8(41):710-717.
- HE Faqi, LIANG Chengchun, LU Cheng, et al. Identification and description of fault-fracture bodies in tight and low permeability reservoirs in transitional zone at the south margin of Ordos Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2020, 8(41): 710-717.
- [8] 王池阶,冯天元.我国著名的地质学家、煤田地质学界的先驱——王竹泉先生[J].地质论评,1981,27(2):185-187.
- WANG Chijie, FENG Tianyuan. WANG Zhuquan: A famous geologist and pioneer of coalfield geology in China[J]. Geological Review, 1981, 27(2): 185-187.
- [9] 王仰之,徐寒冰.汪鹏和陕北油矿[J].中国科技史杂志,1982(2):51-54.
- WANG Yangzhi, XU Hanbing. WANG Peng and oilfields in Northern Shaanxi[J]. The Chinese Journal for the History of Science and Technology, 1982(2): 51-54.
- [10] 潘钟祥.不整合对于油气运移聚集的重要性及寻找不整合面下的某些油气藏[J].地质论评,1983,29(4):374-381.
- PAN Zhongxiang. The importance of unconformity for oil and gas migration and accumulation and the search for some oil and gas reservoirs under unconformity surface[J]. Geological Review, 1983, 29(4): 374-381.
- [11] 李德生,龚剑明.延长油矿勘探历史及对当代石油工业的启示[J].中国石油勘探,2018,23(3):1-10.
- LI Desheng, GONG Jianming. The exploration history of Yanchang oilfield and its enlightenment to China petroleum industry[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(3): 1-10.
- [12] 陈劲,顾广宇.新中国第一任石油总地质师——陈贲[J].中国科技史料,1993,14(4):43-48.
- CHEN Jin, GU Guangyu. CHEN Ben: First chief petroleum geologist in new China[J]. China Historical Materials of Science and Technology, 1993, 14(4): 43-48.
- [13] 麻真民.安葬在陈贲墓旁的黄先驷[J].中国石油石化,2020(15):2.
- MA Zhenmin. HUANG Xianxun: Buried next to the tomb of CHEN Ben[J]. China Petrochem, 2020(15): 2.
- [14] 曾联波,李忠兴,史成恩,等.鄂尔多斯盆地延长组特低渗透砂岩储层裂缝特征及成因[J].地质学报,2007,81(2):174-180.
- ZENG Lianbo, LI Zhongxing, SHI Chengen, et al. Fracture characteristics and genesis of ultra-low permeability sandstone reservoirs in Yanchang formation of Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(2): 174-180.
- [15] 曾联波,高春宇,漆家福,等.鄂尔多斯盆地陇东地区特低渗透砂岩储层裂缝分布规律及其渗流作用[J].中国科学:地球科学,2008,38(S1):41-47.
- ZENG Lianbo, GAO Chunyu, QI Jiafu, et al. Fracture distribution and seepage action of ultra-low permeability sandstone reservoir in Longdong area of Ordos Basin[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2008, 38(S1): 41-47.
- [16] 刘格云,黄臣军,周新桂,等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组裂缝发育程度定量评价[J].石油勘探与开发,2015,42(4):444-453.
- LIU Geyun, HUANG Chenjun, ZHOU Xingui, et al. Quantitative evaluation of fracture development degree of triassic Yanchang formation in Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(4): 444-453.
- [17] 付金华,郭正权,邓秀芹.鄂尔多斯盆地西南地区上三叠统延长组沉积相及石油地质意义[J].古地理学报,2005,7(1):34-44.
- FU Jinhua, GUO Zhengquan, DENG Xiuqin. Sedimentary facies of the Yanchang formation of upper triassic and petroleum geological implication in southwestern Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(1): 34-44.
- [18] 沈括.梦溪笔谈[M].上海:上海古籍出版社,2013.
- SHEN Kuo. Brush talk from dream brook[M]. Shanghai: Shanghai Classics Publishing House, 2013.
- [19] 周振鹤.汉书地理志汇释[M].合肥:安徽教育出版社,2006.
- ZHOU Zhenhe. Explanation of geographical annals of han shu [M]. Hefei: Anhui Education Press, 2006.
- [20] 罗群,姜振学,庞雄奇.断裂控藏机理与模式[M].北京:石油工业出版社,2007.
- LUO Qun, JIANG Zhenxue, PANG Xiongqi. Mechanism and model of fault controlling petroleum accumulation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [21] 郭彤楼,蒋恕,张培先,等.四川盆地外围常压页岩气勘探开发进展与攻关方向[J].石油实验地质,2020,42(5):837-845.
- GUO Tonglou, JIANG Shu, ZHANG Peixian, et al. Progress and direction of exploration and development of normally-pressured shale gas from the periphery of Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 837-845.
- [22] 万绪新,谢广龙,丁余刚.胜利油田难动用石油储量地质工程一体化探索[J].中国石油勘探,2020,25(2):43-50.
- WAN Xuxin, XIE Guanglong, DING Yugang. Exploration on geology-engineering integration of hard-to-recover reserves in Shengli Oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 43-50.
- [23] 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.

(编辑 柳超超)