

引用: 牛栓文. 胜利油田低渗致密油藏地质工程一体化探索与实践[J]. 中国石油勘探, 2023,28(1):14-25.

Niu Shuanwen. Research and application of geology and engineering integration for low-permeability tight oil reservoirs in Shengli Oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2023,28(1):14-25.

# 胜利油田低渗致密油藏地质工程一体化探索与实践

牛栓文

(中国石化胜利油田分公司)

**摘要:** 胜利油田低渗致密油藏资源丰富, 类型多样, 以砂砾岩、浊积岩和滩坝砂油藏为主, 油藏特征复杂, 工程提速提效难度大, 急需建立地质工程一体化规模效益建产模式。胜利油田通过工作理念、运行机制和关键技术的创新突破, 聚焦各专业的技术瓶颈及交叉融合点, 开展地震—地质—油藏—工程一体化的多专业协同攻关, 夯实地质综合研究基础, 强化多专业的融合, 打造一体化协同决策支持平台, 通过钻前预测、钻中监测、钻后评价, 形成贯穿方案优化设计及实施全过程的地质工程一体化技术, 实现了观念、责任、流程、运行、技术和平台6个方面的一体化整合, 达到提高精度、提高时效、提高产能、降低桶油成本的目的。胜利油田地质工程一体化技术实现了不同油藏类型未动储量的有效动用。高精度一体化油藏模型的动态更新和多专业协同决策支持系统的构建是地质工程一体化持续发展的关键。

**关键词:** 地质工程一体化; 低渗致密油藏; 非常规油藏; 协同决策

中图分类号: TE319

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2023.01.002

## Research and application of geology and engineering integration for low-permeability tight oil reservoirs in Shengli Oilfield

Niu Shuanwen

(Sinopec Shengli Oilfield Company)

**Abstract:** Shengli Oilfield has abundant low-permeability tight oil resources with various types, dominated by glutenite, turbidite and beach-bar sandstone reservoirs, showing complex characteristics and leading to great challenges in improving the speed and efficiency. Therefore, it is urgent to establish a large-scale and beneficial capacity construction mode with the integration of geology and engineering. By innovating working concept, operation mechanism and key technologies, and focusing on the technical bottlenecks and cross integration points of various disciplines, Shengli Oilfield conducted multi-disciplinary collaborative research on the integration of geophysics, geology, oil reservoir and engineering, consolidated the basic comprehensive geological study, strengthened the integration of multiple disciplines, and built an integrated collaborative decision support platform. The pre drilling prediction, while-drilling monitoring and post drilling evaluation were combined to develop geology and engineering integration technology for the whole process of scheme optimization design and implementation, which supported to realize the integration of concept, responsibility, process, operation, technology and platform, and achieve the purpose of improving accuracy, timeliness, and capacity while reducing barrel oil cost. The geology and engineering integration technology enabled to realize the effective utilization of untapped reserves with various oil reservoir types. The dynamic updating of high-precision integrated oil reservoir model and the construction of multi-disciplinary collaborative decision support system are the keys to the sustainable development of geology and engineering integration.

**Key words:** geology and engineering integration, low-permeability tight oil reservoir, unconventional oil reservoir, collaborative decision making

基金项目: 中国石油化工股份有限公司重点科技项目“低渗致密油藏地质工程一体化关键技术研究”(P20069)。

作者简介: 牛栓文(1974—), 男, 甘肃宁县人, 博士, 2015年毕业于中国石油大学(华东), 正高级工程师, 主要从事油气田开发地质综合研究及管理方面的工作。地址: 山东省东营市济南路125号, 邮政编码: 257001。E-mail: niushuanwen.slyt@sinopec.com

收稿日期: 2022-04-24; 修改日期: 2022-12-29

## 0 引言

以低渗致密油藏为代表的非常规油气资源是我国最为现实的能源接替领域<sup>[1-3]</sup>。近年来,北美致密油勘探开发取得重大突破,改变了美国能源格局<sup>[4]</sup>。国内外大量理论实践证明,地质工程一体化是非常规油气藏经济有效开发的必由之路<sup>[5-17]</sup>。随着油气勘探开发形势进一步发展,需要针对不同油藏类型,发展和完善适合我国陆相致密油藏的地质工程一体化特色技术体系,提产能、降成本,实现致密油等复杂油气藏规模增储建产。

胜利油田低渗致密油藏属于典型的源储紧邻型非常规油藏,资源丰富,类型多样,探明和控制石油储量及远景资源量均有较大规模,是胜利油田分公司(简称分公司)乃至中国石化增储建产主阵地,但油藏特征的复杂性和工程技术难点,造成大量储量难以动用。截止到2017年,胜利油田探明未开发储量达 $5.73 \times 10^8 \text{t}$ ,中国石化两级筛选评价后剩余可供评价低渗致密未动用储量为 $10.9 \times 10^8 \text{t}$ 。近年来,中国石化高度重视低渗致密等难动用储量地质工程一体化效益建产工作<sup>[18]</sup>,出台了难动用储量合作开发指导意见,要求各油田企业“推进合作体制机制创新,加快难动

用储量转化为产量和效益”。

本文从胜利油田地质工程一体化发展的背景出发,总结阐述胜利油田低渗致密油藏地质工程一体化在理念、管理和技术等方面的创新探索和实践效果,探讨了地质工程一体化未来发展方向。

## 1 地质工程一体化提出的背景

胜利油田主体区域位于中生代晚期形成的断陷盆地,具有多沉积体系、多含油层系、多油藏类型、构造断裂系统复杂的地质特点<sup>[19-20]</sup>。胜利油田低渗致密油藏以深层砂砾岩(近岸水下扇、扇三角洲等)、滩坝砂和致密浊积岩等沉积类型为主(图1),广泛发育在陆相断陷盆地(以东营凹陷为例)北部陡坡带、湖盆和南部缓坡带;纵向上主要发育在沙四段,其中在陡坡带发育大套低渗致密近岸水下扇砂砾岩体,在砂砾岩扇体前端发育碎小分布的浊积砂岩,在滨浅湖带大规模发育薄互层致密滩坝砂岩(图2)。该类油藏特征复杂,整体具有“深、薄、贫、散”等特点,埋深在2800~4500m;储层有效厚度薄、变化快,其中滩砂单层厚度仅为1~2m;储层物性差,大部分渗透率小于5mD;大部分浊积砂岩油藏单个区块储量规模小,储量小于 $100 \times 10^4 \text{t}$ 的区块数占70%;试采

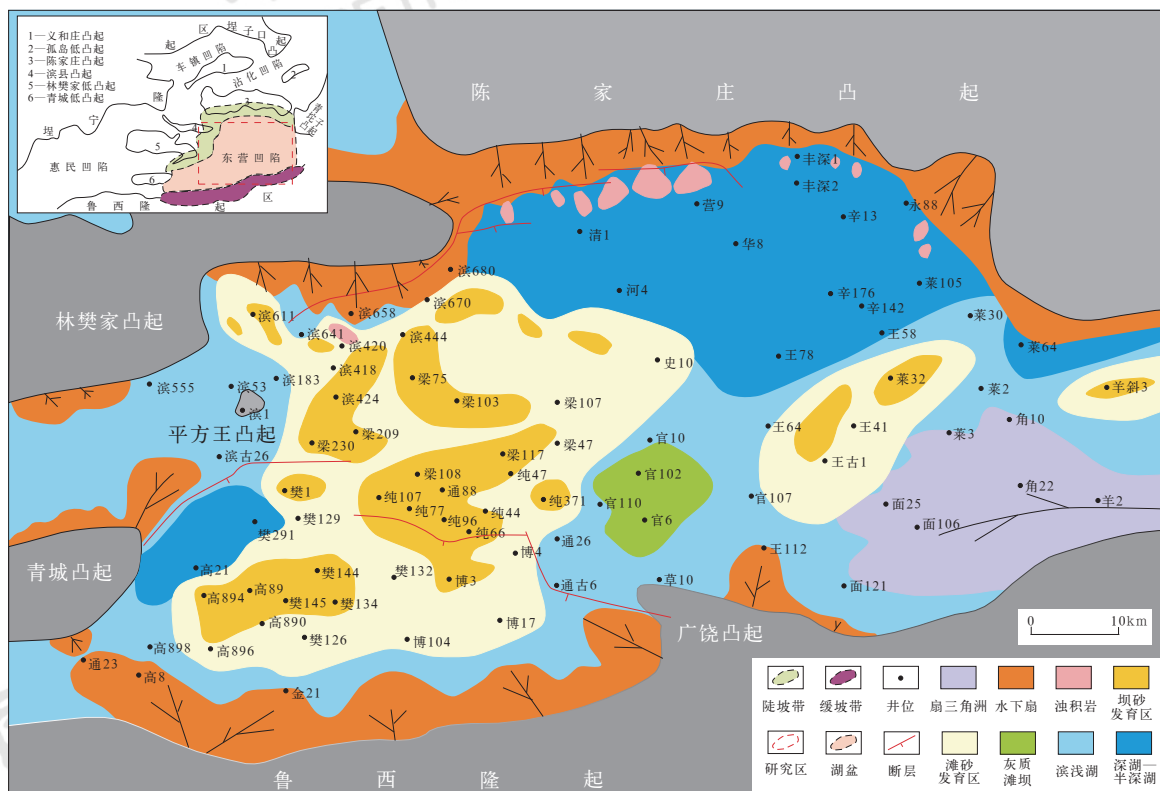


图1 东营凹陷沙四下亚段沉积体系图

Fig.1 Sedimentary system of the lower sub member of the 4<sup>th</sup> member of Shahejie Formation in Dongying Sag

产量低,大部分单井自然产能小于 1t,绝大部分需要通过工艺压裂改造才能获得经济产能。以上这种复杂的油藏特征决定了胜利油田低渗致密油藏效益建产的难点(表 1)。

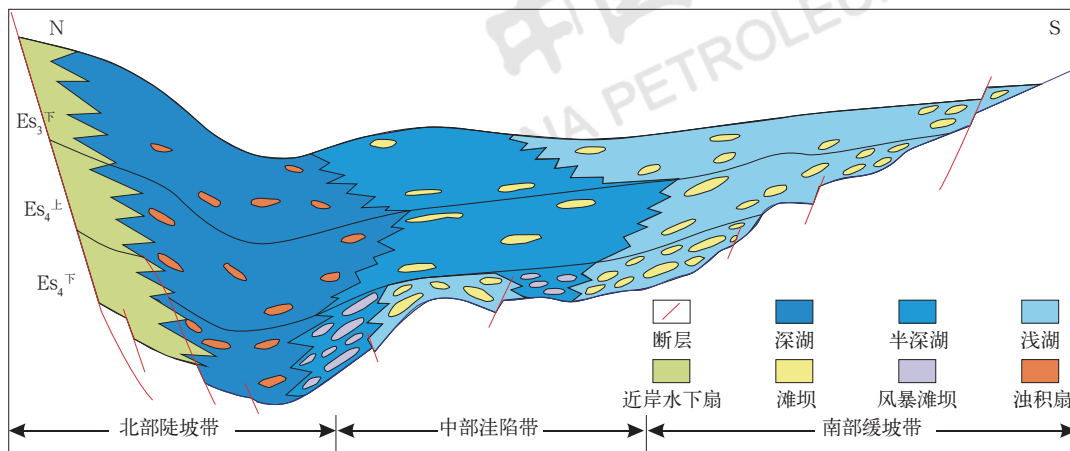


图 2 东营凹陷沙三下亚段—沙四下亚段沉积模式图

Fig.2 Depositional pattern from the lower sub member of the 3<sup>rd</sup> member to the lower sub member of the 4<sup>th</sup> member of Shahejie Formation in Dongying Sag

表 1 胜利油田东部低渗致密油藏效益建产难点一览表

Table 1 Challenges in beneficial capacity construction of low permeability tight oil reservoir in the eastern part of Shengli Oilfield

| 沉积类型 | 油藏地质特点    |   |             | 地质描述难点                           | 工程技术难点                                | 效益开发瓶颈                              |
|------|-----------|---|-------------|----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
|      | 深度 /m     | 丰度 /<br>(10 <sup>4</sup> t·km <sup>-2</sup> ) | 渗透率 /<br>mD |                                  |                                       |                                     |
| 砂砾岩体 | 3500      | 172   | 1~100       | 多期叠合;岩性粗、复杂多样;厚度大、成层性差,物性差;非均质性强 | 钻头选型难,机械钻速低,水力压裂裂缝高度难控制               | 地质工程甜点精确描述难;工程施工周期长、难度大             |
| 浊积岩  | 3400      | 76.3  | 0.03~3.3    | 埋藏较深、规模小、隐蔽性强;受灰质影响,储层描述难度大      | 固井难度大,质量难控制;加砂规模受限,压裂液返排困难            | 井型井网适配难;单井产能差异大                     |
| 滩坝砂  | 2800~3300 | 53.9  | 0.1~10      | 断裂系统发育;平面非均质性强,纵向层数多,单层厚度薄       | 井壁稳定性差,井况事故多;纵向多层沟通难度大;密切割分段压裂难,工艺优化难 | 地质工程甜点精确描述难;井型、井网、缝网适配难;单井产能低,建产成本高 |

从技术层面上,胜利油田低渗致密油藏精细描述难度大,需要突破地震分辨率低的制约,深度挖掘地震蕴含的油藏信息,解决圈闭小、厚度薄、埋藏深、物性差油藏的精细表征难题;低渗致密油藏工程施工难度大,钻井速度慢,复杂情况多发,需要解决储层物性、裂缝预测、地应力预测、储层大规模改造等难题;低渗致密油藏井网井型缝网优化难,需要结合整体储量动用状况及油藏特征,分期次建产,并建立学习曲线,提高储量的动用率和采收率,并不断降低建产成本。

从建产工作模式方面,以往接力式方案编制流程,地质部门向工程部门油藏设计交底、工程部门根据油

藏设计完成工程设计,形成了“地上服从地下,工程服从地质”建产模式,地质与工程无法形成合力,不能满足低渗致密油藏效益开发需求。从建产分配机制方面,分公司作为投资方独享建产收益,胜利石油工程有限公司(简称工程公司)完成工作量挣工程款,分公司和工程公司扮演角色不同、关注点不同,难以实现目标同向,在提升建产效益上难以一体化统筹、优势互补。

胜利油田低渗致密油藏复杂的油藏特征及建产运行机制的特点决定了必须走地质工程一体化效益建产之路。2017年以来,面对低渗致密油藏效益开发的问题和挑战,基于地质工程一体化基本理念,提出了



观念、流程、责任、运行、技术和平台6个方面一体化整合的思路,从一体化理念、管理机制、技术攻关3个方面开展全方位的探索和实践,形成了贯穿产能建设方案优化设计及实施全过程的地质工程一体化技术,实现了胜利油田低渗致密油藏未动储量的有效动用。

## 2 地质工程一体化理念创新

所谓地质是泛指以油藏为中心,包括油藏表征、地质建模、地质力学、油藏工程评价为主的多学科综合研究。所谓工程是泛指在开发过程中从钻井到压裂生产等一系列方案优化设计及工程技术应用。地质工程一体化本质上是直接服务于开发生产活动和过程的地质与工程的互动式综合性应用研究<sup>[21-23]</sup>。

胜利油田在近几年低渗致密油藏效益建产探索与实践中,形成了地质工程一体化的基本理念“目标驱动、方案统领、强化基础、创新技术、协同决策、平台支撑”。具体阐述为:以提高单井产能、降低开发成本为目标,建立地质与工程协同作战的管理架构,以高精度三维地震资料为基础,以精细地质综合研究为核心,以一体化油藏模型建立为核心,充分发挥工程技术支撑作用,创新地震、地质、油藏、工程等关键技术,打破原有“技术条块分割、管理接力进行”的模式,通过一体化协同决策平台,实现地质研究与工程技术相互协同、多维度优化、动态更新,形成最优解决方案,实现储量动用的最大化和效益化。

胜利油田地质工程一体化理念,本质上是观念、运行、流程、责任、技术和平台6个方面的一体化整合。(1)观念上,围绕油藏经营价值最大化唯一目标,着力实现技术与管理、地质与工程各专业、科研与生产等各个方面的一体化;(2)运行上,通过领导引领、管理制度、经营模式的变革,确保各专业人员和技术的交互融合、一体整合、目标同向;(3)流程上,明确各专业关键节点,分析地质工程相互需求,建立各专业项目相互衔接的基本工作和技术流程,形成动态更新机制;(4)责任上,明确地质工程各专业及人员之间各自的工作重点和职责,建立效果导向的利益共享机制;(5)技术上,梳理方案设计到方案实施全过程各个关键节点,对不同专业的关键技术根据一体化实际需求进行整合,创新多专业协同应用的关键技术;(6)平台上,建立一体化协同决策支持平台,实现成果资料共享、多专业协同决策、实时跟踪评价。其特色具体体现在以下3个方面。

### 2.1 概念方案一体化,统领地质工程一体化各方面工作

地质工程一体化是一个庞大的系统工程,其实现基础是顶层设计,即针对不同油藏目标,发挥地质工程不同专业各自优势和特点,建立多专业相互结合、融合应用的一体化概念方案(图3),从理念、管理和技术方面,统领地质工程一体化各个方面的工作。整体概念方案围绕提产能、降成本基本目标,基于一体化协同决策支持平台,在对油藏构造、储层、产能及储量动用状况综合分析的基础上,针对制约区块效益建产的关键技术难题,突出地震资料基础,聚焦各专业的技术瓶颈及交叉融合点,创新一体化关键技术,以一体化油藏模型为核心,通过地震、地质、油藏、钻井、压裂等多专业的结合,实现井网部署、钻井提速提效、压裂提效等一体化优化、动态优化建产方案,形成贯穿方案优化设计及实施全过程的地质工程一体化技术。

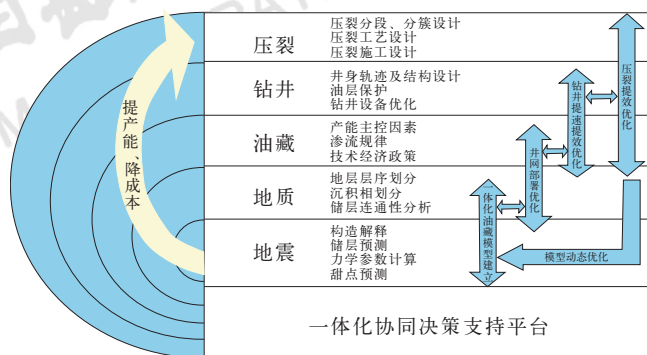


图3 胜利油田地质工程一体化整体概念方案  
Fig.3 Overall conceptual scheme of geology and engineering integration in Shengli Oilfield

### 2.2 油藏模型一体化,夯实地质综合评价基础

地震技术是唯一可以大规模经济精细描述地下构造、岩性、物性、流体等三维空间油藏信息的技术手段,贯穿了油气勘探开发全过程<sup>[24-27]</sup>。基于高分辨率三维地震资料,通过地震、地质结合,精细刻画复杂断块、砂砾岩体(近岸水下扇、扇三角洲和冲积扇等)、浊积砂体等不同油藏类型构造、储层、不同尺度断层的空间展布特征,精确预测岩石力学参数乃至地应力,建立一体化构造、储层物性及力学参数等油藏模型,通过储层品质、钻井品质、完井品质的综合评价,实现地质、工程双甜点的精细描述和三维空间刻画,为地质、油藏、钻井和压裂等提供三维空间资料基础和关键参数。

### 2.3 多专业协同决策一体化，动态优化产能方案

地质工程一体化的关键是多专业的协同式综合研究。基于地震地质一体化，实现地质甜点、工程甜点空间展布特征的精细描述和优化。基于地质油藏一体化，开展油藏与工程设计匹配优化，确保开发井网与钻井轨迹、压裂缝网适应性。基于油藏钻井一体化，结合井网部署、地应力分析及邻井井身轨迹参数，优化井身轨迹、井身结构及油层保护体系，实现优快钻井。基于油藏压裂一体化，以提高缝控储量为核心，结合油藏开发需求，形成分段分簇设计、压裂工艺设计、压后效果评价为基础的一体化流程，实现压裂工艺全生命周期迭代优化。

低渗致密油藏平面及垂向分布的复杂性决定了很难一次性准确描述地下油藏的三维空间特征，需要根据不断更新的地震、地质、测井及动态信息，实现油藏模型的适时更新，动态优化井网井型、钻井轨迹及压裂工艺，提高储层钻遇率和钻完井效果。

## 3 地质工程一体化管理创新

地质工程一体化实施的前提是从组织管理方面做好顶层设计。2017年以来，胜利油田分公司解放思想、创新体制机制，构建地质工程一体化“1+2+2+N”运行管理架构（图4），全力推进低渗致密油藏未动用储量效益建产。“1”是成立油田分公司领导小组作为统领地质工程一体化的最高决

策者，创新一体化工作体制机制、确定一体化工作目标、建立问题反馈解决机制，解决组织机构分割所导致的思想及行动不统一问题，由单纯压价控投资向技术突破提产能、极致优化创效益转变，为地质工程一体化高效运行提供组织保障。工程公司全面参与未动用储量区块筛选、承包，实现由“打工者”向“油藏经营者”的转变<sup>[21]</sup>。“2”是先后出台了难动用储量合作开发管理办法和开发运营权流转办法，建立以“项目化管理、市场化运营、运营权流转、合作共赢、高效运行、考核激励”为核心的6项管理机制，打造“风险共担、合作共赢”合作开发机制利益共同体。“2”成立管理+技术团队，搭建市场化平台，统筹协调解决市场准入、物资采购、财务经营等一体化运行问题，以及组建物探、地质、钻完井、地面等多专业技术团队，开展多专业关键技术攻关，指导一体化概念设计并进行开发方案编制指导与审查。“N”是依托采油厂成立由分公司单独考核的未动用储量开发项目组，以油藏经营管理为核心，牵头地质工程一体化效益建产优化运行，实行独立运行、独立核算、单独考核经营模式。

通过这种组织、机制的创新与实践，建立了高效流畅的领导引领决策、政策制度保障、技术管理团队服务、具体项目组实施等完整配套的地质工程一体化管理运行机制，确保地质工程一体化互动式综合研究的高效实现。

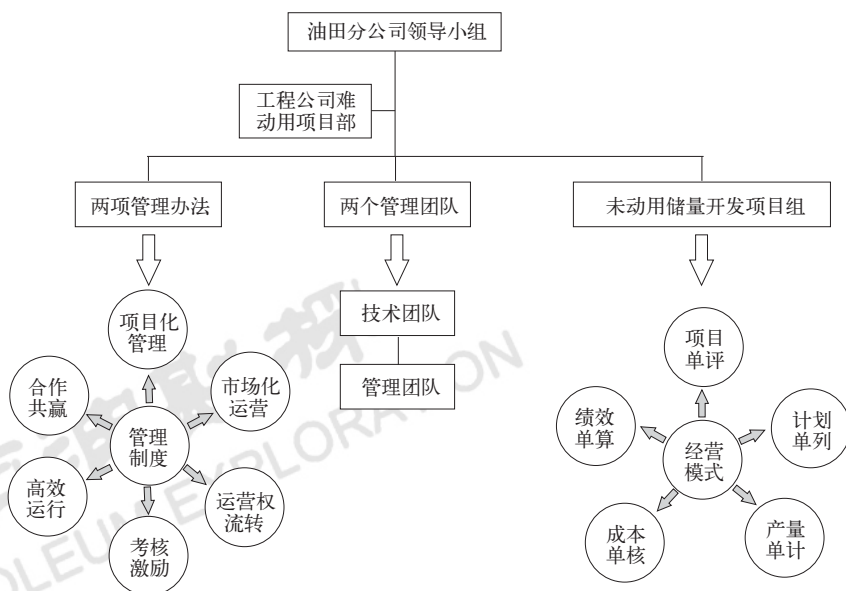


图4 胜利油田地质工程一体化管理运行机制

Fig.4 Management and operation mechanism of geology and engineering integration in Shengli Oilfield

## 4 地质工程一体化关键技术创新

地质工程一体化还需要针对不同油藏开发难点进行技术创新和融合<sup>[22-26]</sup>。围绕着低渗致密油藏效

益开发基本目标，创新形成了多专业相互融合的关键技术，构建多专业相互沟通联系的桥梁和纽带，为地质工程一体化实现提供完整的技术系列和流程（图 5）。

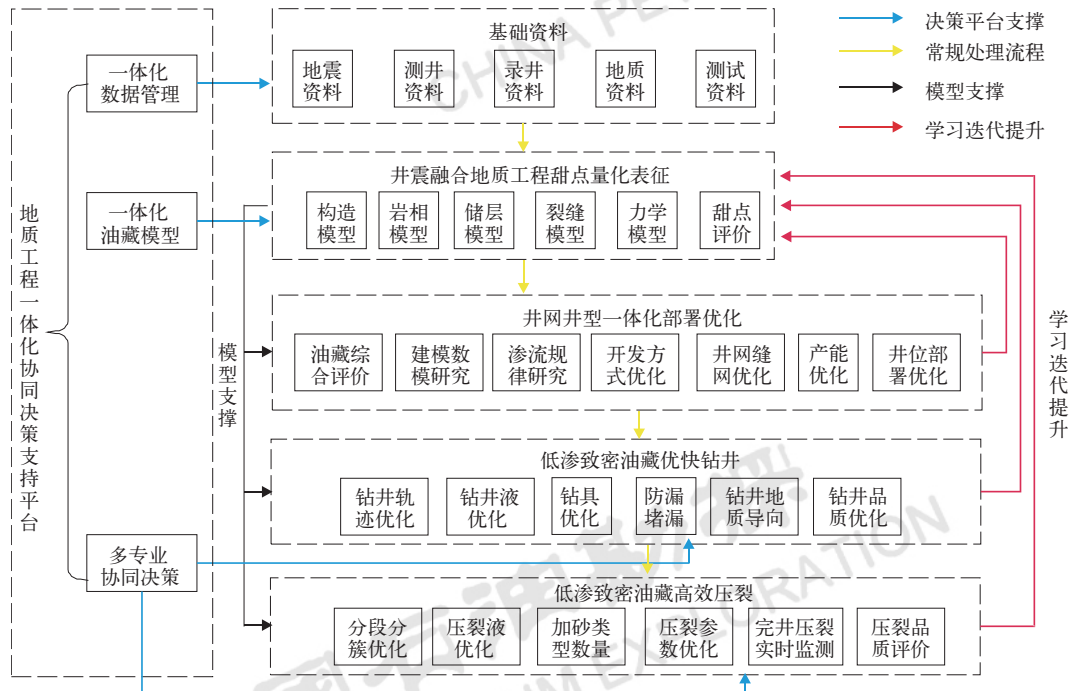


图 5 低渗致密油藏地质工程一体化基本流程图

Fig.5 General work flow of geology and engineering integration for low permeability tight oil reservoir

### 4.1 井震融合地质工程甜点量化表征技术

基于统一油藏模型下的解决方案是地质工程一体化的基本模式，研发了井震融合地质工程甜点量化表征关键技术（表 2）。针对胜利油田低渗致密油藏“深、薄、贫、散”的特点，基于岩石物理理论模型和高分

辨率测井资料，深度挖掘物探资料蕴含的油藏信息，通过地震构造精细解释、多尺度裂缝预测、储层物性反演、储层工程力学参数预测，建立一体化油藏模型，实现地质工程甜点的三维空间综合评价，为油藏、钻井、压裂等专业井网井型优选、井轨迹优化、地质导向、压裂施工等提供模型基础。

表 2 井震融合地质工程甜点量化表征关键技术一览表

Table 2 Key technologies for well-seismic fused quantitative characterization of geological and engineering sweet spots

| 关键技术        | 地质问题              | 技术原理                    | 技术效果               |
|-------------|-------------------|-------------------------|--------------------|
| 井控提高地震分辨率技术 | 地震分辨率不高           | 利用测井资料计算吸收衰减因子补偿地震高频信息  | 提高地震资料分辨率 15Hz 左右  |
| 多尺度地震裂缝预测技术 | 陆相断陷盆地低序级断层、裂缝发育  | 基于地震相干、似然体及 OVT 域资料预测裂缝 | 实现低序级断层精细刻画和裂缝带预测  |
| 井震联合地应力预测技术 | 受复杂断裂系统影响，地应力方向复杂 | 基于地震方位各向异性信息，井震联合计算地应力  | 实现复杂构造带地应力大小和方向的预测 |
| 一体化油藏建模技术   | 油藏特征三维空间融合评价      | 井震联合地质甜点、工程甜点计算及融合分析    | 构建地质工程甜点一体化三维油藏模型  |

### 4.2 井网井型一体化部署优化技术

多层系立体开发是非常规油藏第二次革命的核心

抓手。以提高储层钻遇率、提高单井产能为目标，基于一体化油藏模型，通过地质工程甜点综合分析以及地应力方向和压裂裂缝长度模拟，根据不同井网与缝



网的迭代适配,形成井型、井网、缝网协同优化技术(图6),最大程度发挥工程技术优势,保障井轨迹穿越多个有利目标层,有效提高单井控制储量和单井产能。

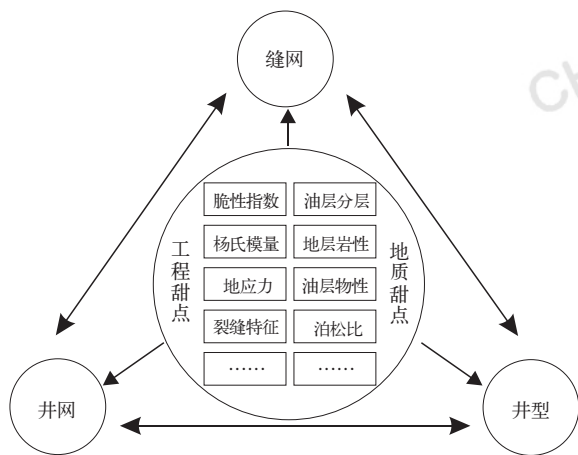


图6 井网井型一体化部署优化流程图

Fig.6 Work flow of integrated well pattern and well type deployment optimization

#### 4.3 低渗致密油藏优快钻井技术

高效钻井技术是低渗致密油藏立体开发提速提效的保障。利用岩性剖面、应力剖面、压力剖面等地质油藏综合研究成果,建立胜利油田低渗致密油藏个性化、集约化井工厂作业模式,结合井网井距及组台需要,优化形成三维水平井轨道设计及轨迹控制技术(图7)、“解决一次水化”为核心的井壁稳定性技术、“主动防漏、专项堵漏”为核心的防漏堵漏技术(图8),实现了钻井技术的标准化、系列化、规模化和工厂化,从而指导钻井过程的提速提效。

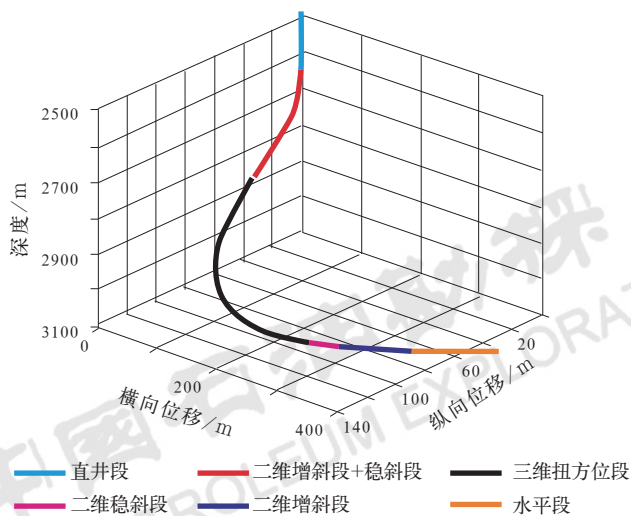


图7 三维水平井轨道设计及轨迹控制示意图

Fig.7 3D trajectory design and control of horizontal well

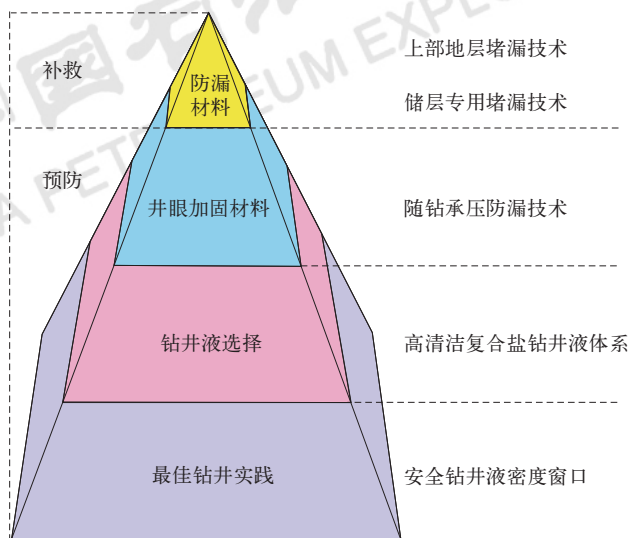


图8 低渗致密油藏防漏堵漏金字塔模型

Fig.8 Pyramid model of leakage prevention and plugging of low permeability tight oil reservoirs

#### 4.4 低渗致密油藏高效压裂技术

压裂理论和工艺技术的不断革新是低渗致密油藏提产降本的关键。针对现有地质—钻井—压裂接力式开发设计模式针对性弱、效率低的问题,以提高缝控储量为核心,构建了以甜点选择、段簇优化、工艺设计、监测评价为基础的压裂全生命周期一体化流程(图9),建立非均质性油藏地质工程一体化三维体积压裂可压裂性评价方法,形成水平井密切割分段组合缝网压裂完井技术,扩大低渗致密储层改造体积,实现最优压裂规模。

#### 4.5 地质工程一体化协同决策支持平台

地质工程一体化在管理上涉及组织机构中的多个部门,在技术上涉及不同专业的相互结合,在运行上涉及产能建设不同阶段的并行优化,需要在一体化管理机制和技术融合的基础上,建立不同专业系统化、集成化、标准化、可视化的互动式一体化协同决策支持平台。基于云端运行的软件架构,构建了包含地震、地质、油藏、钻井、压裂等各专业相关的模型库、知识库、学习库一体化数据平台,开发了油藏设计、钻井工程、地质导向、压裂施工等核心功能模块,集成了GIS导航、井震交互显示、三维模型可视化等专业化成果可视化模块,实现了井网井型优选、钻井实时监测、随钻地质导向以及油藏地质工程多专业、多轮次综合协同应用,做到优化有数据、决策有模型。

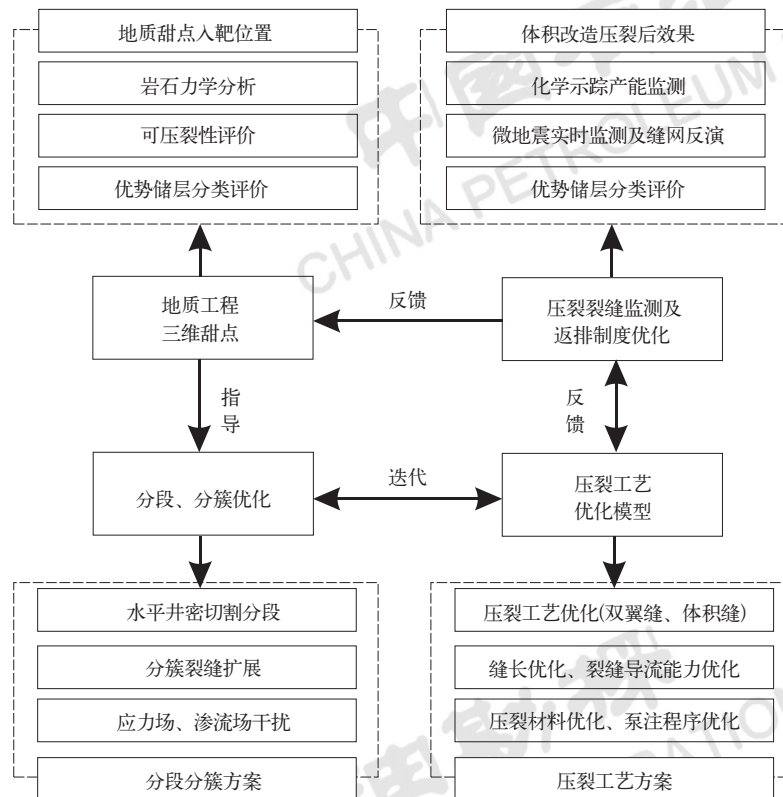


图 9 地质工程一体化高效压裂完井流程图

Fig.9 Work flow of high-efficiency well fracturing and completion with geology and engineering integration

## 5 地质工程一体化效益建产实践

围绕“选好区、定好井、钻好井、压好井”整体目标，地质工程一体化技术在胜利油田东部义 184、永 936 扩等不同油藏类型区块开展了示范应用，并全面推广到胜利油田整个低渗致密油藏的效益建产实践中。

### 5.1 义 184 区块应用实例

义 184 区块位于济阳拗陷沾化凹陷渤南洼陷中部断阶带，为扇三角洲油藏，埋深为 3500~4300m，单层厚度薄（最薄 1~3m）、储层物性差（渗透率为 2~5mD），断裂系统复杂，平面非均质性强，多套压力系统并存，效益开发难度较大。

基于地震地质一体化，充分利用叠前、叠后地震资料，通过新井资料加入及地质认识持续提升，建立适应不同阶段需求的全井段地质工程三维可视化模型（图 10），为井位优化部署、井轨迹设计、井壁稳定性评价等提供基础模型和关键参数。针对深层地震资料分辨率低的问题，通过井震联合优化处理提高深层地震资料主频 15Hz，提高薄层描述能力；先后开

展三轮多体联合构造解释和储层预测，精细落实扇三角洲水道发育位置和扇体发育形态，储层预测精度从 60% 提升到 90%，实现了扇三角洲的准确刻画；通过多资料联合，预测了复杂构造背景下低序级断层、多尺度裂缝发育带和地应力大小及方向。

基于地质油藏一体化，综合分析平面油层厚度变化和微裂缝发育程度，划分为 I、II、III、IV 类甜点，本着“先易后难、先好后差、有序推进”原则，对井网井距及开发方式优化设计，分不同期次开展产能建设（图 11）。基于油藏钻井一体化，优化井轨迹、井身结构，将垂直中靶改为 6° 井斜中靶，深下技术套管，将中低压系统全部封住，三开全部为高压系统；建立学习曲线，钻井周期由前期 78 天降至 45 天，最短缩至 26 天。基于油藏压裂一体化，不断改进压裂工艺，实现大规模、大排量、密切割和连续施工，储层压裂改造从一期高速通道压裂工艺、二期长缝压裂工艺，优化完善到三期复杂缝网压裂工艺，施工排量从 6m<sup>3</sup>/min 提高到 14m<sup>3</sup>/min，加砂强度从 3m<sup>3</sup>/m 提高到 5.5m<sup>3</sup>/m，在储层品质逐渐降低（单层有效储层厚度由 7m 降到 3m）情况下，平均单井产能稳定在 6t/d 左右。



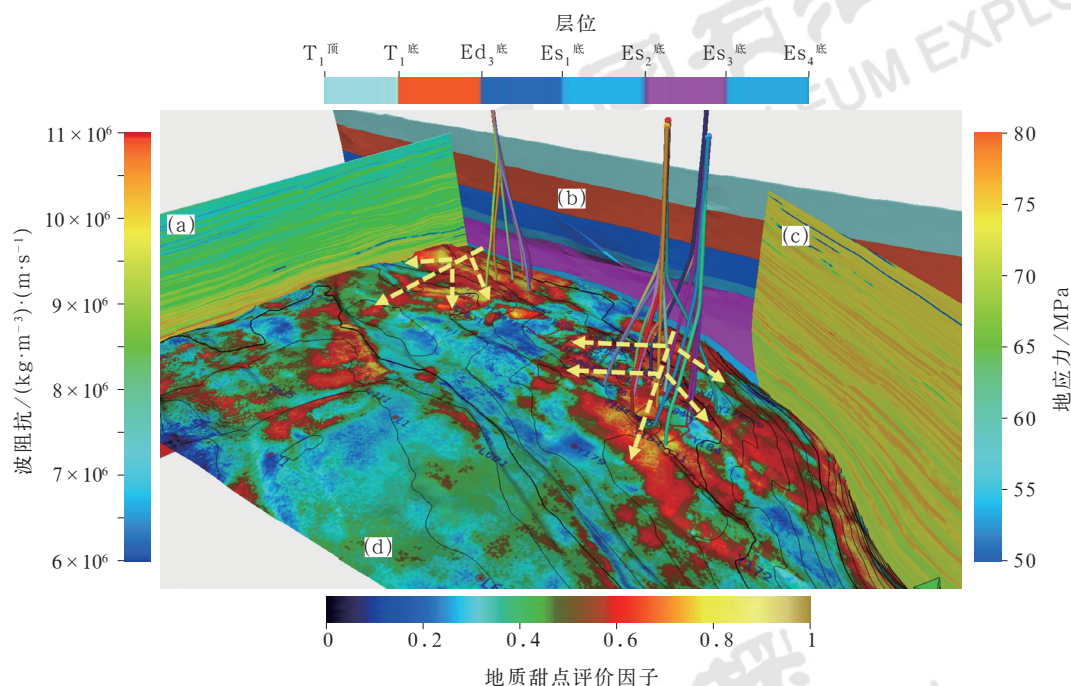


图10 义184区块地质工程全井段三维可视化模型

Fig.10 3D visualization model of whole well section with geology and engineering integration in Yi 184 block

(a) 地质甜点模型阻抗剖面; (b) 全井段构造框架地质模型; (c) 工程甜点模型地应力剖面; (d) 地质甜点融合沿层平面

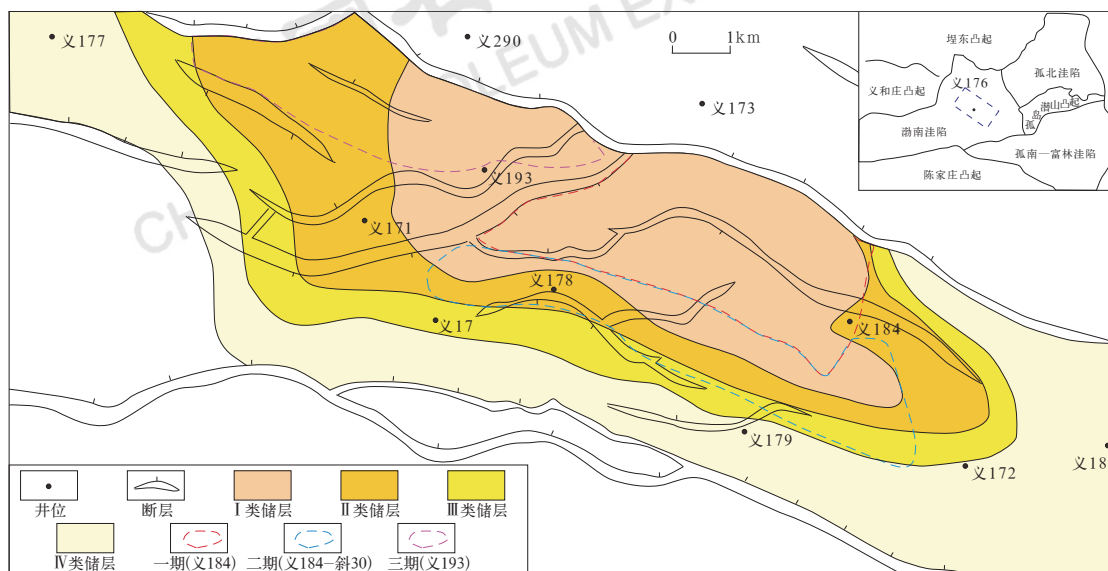


图11 义176区块不同期次产能建设分布图

Fig.11 Plane distribution of capacity construction of different stages in Yi 176 block

通过地质工程一体化模式实践, 累计动用储量1300余万吨, 设计新井87口, 新建产能 $18 \times 10^4 \text{t}$ 。义176区块在储量品位下降的形势下, 实现了二期、三期建产效益持续提升。

## 5.2 永936扩区块应用实例

永936扩区块位于东营凹陷北部陡坡带, 为近岸

水下扇油藏 (图12a), 含油层系沙四段砂砾岩体沿古断剖面呈裙带分布, 油藏埋深为3000~4350m, 测井解释孔隙度平均为7.9%, 渗透率平均为4.0mD, 属于特低孔、特低渗构造—岩性油藏。

针对油藏埋藏深、内幕刻画难等问题, 通过井震联合地震资料分辨率提高、储层去压实高精度反演 (图12b、c), 合理放大扇根、扇中和扇端弹性参数

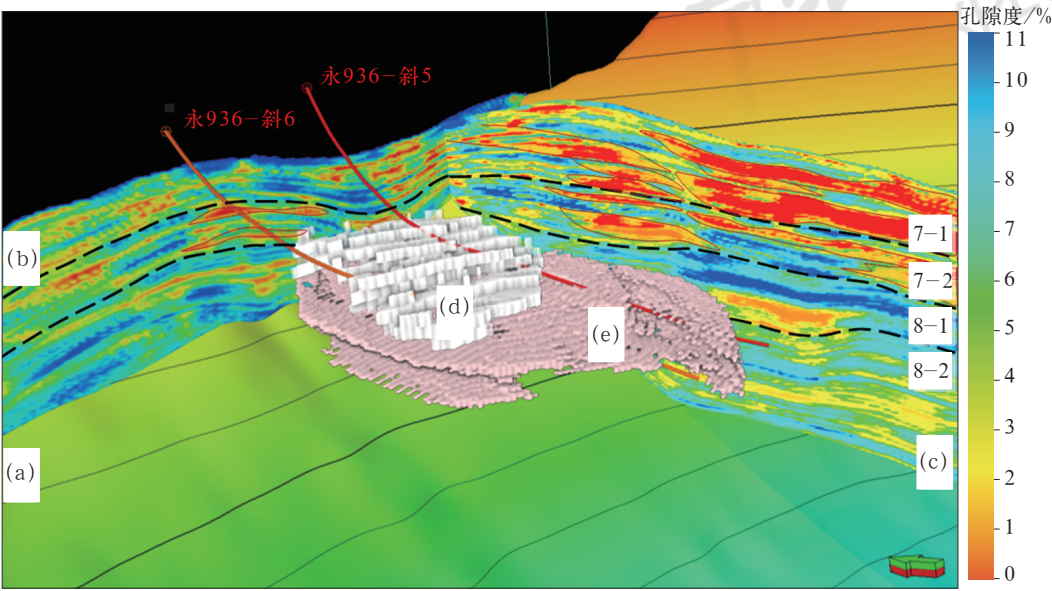


图 12 永 936 扩区块地质工程一体化三维油藏模型

Fig.12 3D oil reservoir model for expansion of Yong 936 block with geology and engineering integration  
(a) 近岸水下扇油藏基底面；(b) 垂直物源方向反演剖面；(c) 顺物源方向反演剖面；(d) 沙四上亚段 7-1 期次三维地质甜点；  
(e) 沙四上亚段 7-2 期次三维地质甜点

差异，有效刻画永 936 扩区块沙四上亚段 7-1、7-2 期次有利储层分布范围（图 12d、e），建立高精度三维地质工程一体化油藏模型（图 12），为油藏、钻井、压裂等专业井轨迹优化、随钻跟踪、钻后评价提供模型基础。

基于地质工程一体化基本流程，以井震融合地质工程甜点模型为基础，以少井高控为原则，根据近岸水下扇退积叠置的特点，将三口大斜度井（图 13a）

优化为两口大斜度井（图 13b），优化永 936-斜 5 和永 936-斜 6 两口井井轨迹，通过平面靠近、纵向错开的方式，凭借差异化设计、协同压裂、补能驱油等，实现少井多控和长井段组合缝网压裂，保证地质工程甜点最大限度的钻遇和改造，钻井周期减少 7 天，钻遇油层段厚度由 316m 增加到 403m，单井控制储量由  $40 \times 10^4\text{t}$  增加到  $46.5 \times 10^4\text{t}$ ，单井产能由 9.8t/d 提高到 13.7t/d。

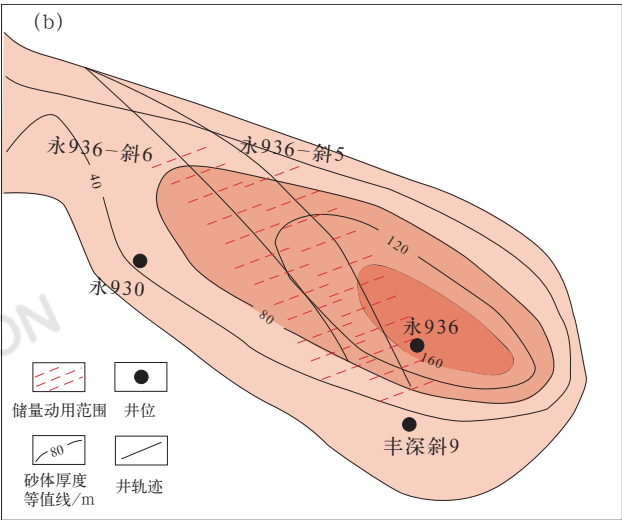
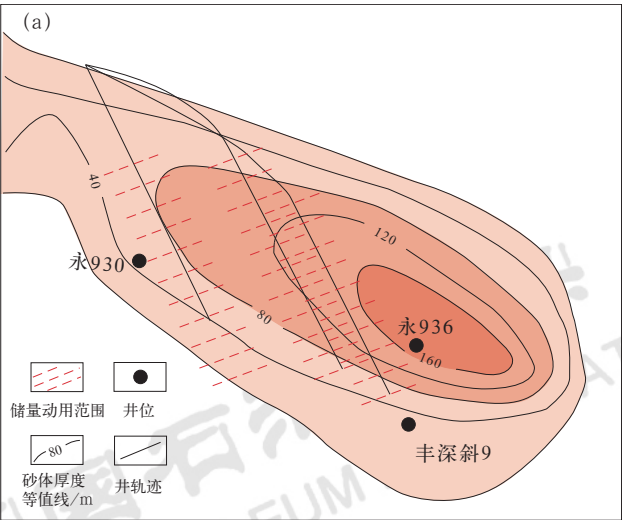


图 13 永 936 扩区块井网井型优化设计对比图

Fig.13 Optimal design of well layout and well type for expansion of Yong 936 block  
(a) 井网井型优化前井位部署情况；(b) 井网井型优化后井位部署情况

总体上,胜利油田整体未动储量建产规模由 2017 年  $26.5 \times 10^4 \text{t}$  增加到 2020 年  $62.4 \times 10^4 \text{t}$ , 规模占比增加到 62%, 成效显著。2020 年以来完成项目重新优化 33 个, 动用储量  $7509 \times 10^4 \text{t}$ , 涉及新钻井 348 口、产能  $94.7 \times 10^4 \text{t}$ , 实现了胜利油田低渗致密油藏未动用储量的有效动用。

## 6 结论与认识

(1) 针对胜利油田低渗致密油藏复杂的油藏特征和工程技术难点, 通过理念、管理和关键技术的创新突破, 形成了贯穿油藏方案优化设计及实施全过程的地质工程一体化技术, 创新了地质工程甜点预测、井网井型缝网协同优化、长井段水平井轨道三维设计及优化、密切割分段组合缝网压裂工艺、一体化协同决策平台构建等地质工程一体化关键技术, 实现了观念、责任、流程、运行、技术和平台 6 个方面的一体化整合, 推动了胜利油田低渗致密油藏未动用储量的效益动用, 丰富和发展了地质工程一体化技术系列。

(2) 地质工程一体化有效实施面临的主要挑战是如何实现多专业融合, 以及建立针对特定油藏类型的规范化工作流程。因此需要完善以油藏地质研究为基础和多学科、多专业协同配合的运行模式, 一体化组织实施, 以高效联动、无缝衔接的链条体系提升效率和效益。

(3) 非常规油藏的多层系立体开发是提高储量动用率、油藏采收率的核心, 所以地质工程一体化建产模式需要在实践中不断更新和发展。一方面, 要构建高精度一体化动态更新油藏模型, 实现地质工程甜点与井网井型缝网的三维空间动态优化, 深化地质综合研究在钻井、压裂等工程技术的融合应用。另一方面, 需要构建完善的多专业协同的一体化软件系统, 实现多专业数据的一体化集成、技术的一体化整合、学习型曲线的建立, 为理念、管理和技术的一体化提供实现的载体。同时, 针对不同油藏类型, 要建立地质工程一体化作业流程及规范, 实现非常规油藏效益建产模式的复制和推广。

## 参考文献

- [1] 赵政璋, 杜金虎, 邹才能, 等. 致密油气 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.  
Zhao Zhengzhang, Du Jinhu, Zou Caineng, *et al.* Tight oil and gas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [2] 李建忠, 郑民, 陈晓明, 等. 非常规油气内涵辨析、源—储组合类型及中国非常规油气发展潜力 [J]. 石油学报, 2015, 36(5): 521–529.  
Li Jianzhong, Zheng Min, Chen Xiaoming, *et al.* Connotation

- analyses, source–reservoir assemblage types and development potential of unconventional hydrocarbon in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(5): 521–529.
- [3] 邹才能, 陶士振, 白斌, 等. 论非常规油气与常规油气的区别和联系 [J]. 中国石油勘探, 2015, 20(1): 1–16.  
Zou Caineng, Tao Shizhen, Bai Bin, *et al.* Differences and relations between unconventional and conventional oil and gas[J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20(1): 1–16.
- [4] 侯明扬, 杨国丰. 北美致密油勘探开发现状及影响分析 [J]. 国际石油经济, 2013, 21(7): 11–16.  
Hou Mingyang, Yang Guofeng. The status and impact of tight oil in North America[J]. *International Petroleum Economics*, 2013, 21(7): 11–16.
- [5] 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.
- [6] 李国欣, 朱如凯. 中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 1–13.  
Li Guoxin, Zhu Rukai. Progress, challenges and key issues of unconventional oil and gas development of CNPC[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(3): 1–13.
- [7] 胡素云, 陶士振, 闫伟鹏, 等. 中国陆相致密油富集规律及勘探开发关键技术研究及进展 [J]. 天然气地球科学, 2019, 20(8): 1083–1093.  
Hu Suyun, Tao Shizhen, Yan Weipeng, *et al.* Advances on continental tight oil accumulation and key technologies for exploration and development in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 20(8): 1083–1093.
- [8] 胡文瑞. 地质工程一体化是实现复杂油气藏效益勘探开发的必由之路 [J]. 中国石油勘探, 2017, 22(1): 1–5.  
Hu Wenrui. Geology–engineering integration—a necessary way to realize profitable exploration and development of complex reservoirs[J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(1): 1–5.
- [9] 冯张斌, 马福建, 陈波, 等. 鄂尔多斯盆地延长组 7 段致密油地质工程一体化解决方案: 针对科学布井和高效钻井 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 155–168.  
Feng Zhangbin, Ma Fujian, Chen Bo, *et al.* Geology–engineering integration solution for tight oil exploration of Chang–7 member, Ordos Basin: focusing on scientific well spacing and efficient drilling[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(2): 155–168.
- [10] 梁兴, 徐进宾, 刘成, 等. 昭通国家级页岩气示范区水平井地质工程一体化导向技术应用 [J]. 中国石油勘探, 2019, 24(2): 226–232.  
Liang Xing, Xu Jinbin, Liu Cheng, *et al.* Geosteering technology based on geological and engineering integration for horizontal wells in Zhaotong national shale gas demonstration zone[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(2): 226–232.
- [11] 谢军, 鲜成钢, 吴建发, 等. 长宁国家级页岩气示范区地质工程一体化最优化关键要素实践与认识 [J]. 中国石油勘探, 2019, 24(2): 174–185.  
Xie Jun, Xian Chenggang, Wu Jianfa, *et al.* Optimal key elements of geoengineering integration in Changning national shale gas demonstration zone[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(2): 174–185.



- [12] 田军, 刘洪涛, 腾学清, 等. 塔里木盆地克拉苏构造带超深复杂气田井全生命周期地质工程一体化实践[J]. 中国石油勘探, 2019,24(2): 165-173.
- Tian Jun, Liu Hongtao, Teng Xueqing, *et al.* Geology-engineering integration practices throughout well lifecycle in ultra-deep complex gas reservoirs of Kelasu tectonic belt, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(2): 165-173.
- [13] 曾义金. 页岩气开发的地质与工程一体化技术[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(1):1-6.
- Zeng Yijin. Integration technology of geology & engineering for shale gas development[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014,42(1):1-6.
- [14] 冯斌, 王峰, 梁栋, 等. 胜利油田“三位一体”科技管理模式创新探索[J]. 石油科技论坛, 2021,40(2):35-38.
- Feng Bin, Wang Feng, Liang Dong, *et al.* Research on innovative “three in one” technological management pattern[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2021,40(2):35-38.
- [15] 包汉勇, 梁榜, 郑爱维, 等. 地质工程一体化在涪陵页岩气示范区立体勘探开发中的应用[J]. 中国石油勘探, 2022,27(1):88-98.
- Bao Hanyong, Liang Bang, Zheng Aiwei, *et al.* Application of geology and engineering integration in stereoscopic exploration and development of Fuling shale gas demonstration area[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(1):88-98.
- [16] 李松泉, 吴志宇, 王娟, 等. 长庆油田地质工程一体化智能决策系统开发与应用[J]. 中国石油勘探, 2022,27(1):12-25.
- Li Songquan, Wu Zhiyu, Wang Juan, *et al.* Development and application of geology and engineering integrated intelligent decision-making system of Changqing Oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(1):12-25.
- [17] 刘惠民. 济阳坳陷页岩油勘探实践与前景展望[J]. 中国石油勘探, 2022,27(1):73-87.
- Liu Huimin. Exploration practice and prospect of shale oil in Jiyang Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 7(1):73-87.
- [18] 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]. Reservoir Evaluation and Development, 2021,11(3):269-280.
- [19] 张善文. 济阳坳陷第三系隐蔽油气藏勘探理论与实践[J]. 石油与天然气地质, 2006,27(6):731-740.
- Zhang Shanwen. Exploration theory and practice of the Tertiary subtle reservoirs in Jiyang Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2006,27(6):731-740.
- [20] 张善文. 中国东部老区第三系油气勘探思考与实践: 以济阳坳陷为例[J]. 石油学报, 2012,33(增刊1):53-62.
- Zhang Shanwen. Thinking and practice of Tertiary oil and gas exploration of maturing region in eastern China: a case study of Jiyang Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(S1):53-62.
- [21] 万绪新, 谢广龙, 丁余刚. 胜利油田难动用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.
- [22] 乔辉, 贾爱林, 位云生. 页岩气水平井地质信息解析与三维构造建模[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2018,40(1):78-88.
- Qiao Hui, Jia Ailin, Wei Yunsheng. Geological information analysis of horizontal wells and 3D modeling of shale gas reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2018,40(1):78-88.
- [23] 鲜成钢. 页岩气地质工程一体化建模及数值模拟: 现状、挑战和机遇[J]. 石油科技论坛, 2018,37(5):24-34.
- Xian Chenggang. Shale gas geological engineering integrated modeling and numerical simulation: present conditions, challenges and opportunities[J]. Oil Forum, 2018,37(5):24-34.
- [24] 尚新民, 芮拥军, 石林光, 等. 胜利油田高密度地震探索与实践[J]. 地球物理学进展, 2018,33(4):1545-1553.
- Shang Xinmin, Rui Yongjun, Shi Linguang, *et al.* Exploration and practice of high-density seismic survey in Shengli Oilfield[J]. Progress in Geophysics, 2018,33(4):1545-1553.
- [25] 朱斗星, 蒋立伟, 牛卫涛, 等. 页岩气地震地质工程一体化技术的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2018,53(增刊1):249-255.
- Zhu Douxing, Jiang Liwei, Niu Weitao, *et al.* Seismic and geological integration applied in the shale gas exploration[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018,53(S1):249-255.
- [26] 舒红林, 王利芝, 尹开贵, 等. 地质工程一体化实施过程中的页岩气藏地质建模[J]. 中国石油勘探, 2020,25(2):84-95.
- Shu Honglin, Wang Lizhi, Yin Kaigui, *et al.* Geological modeling of shale gas reservoir during the implementation process of geology-engineering integration[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(2): 84-95.
- [27] 王延光, 孟宪军, 夏吉庄, 等. 油藏地球物理技术发展与应用实践[J]. 地球物理学进展, 2015,30(5):2246-2256.
- Wang Yanguang, Meng Xianjun, Xia Jizhuang, *et al.* Development and practice in reservoir geophysics[J]. Progress in Geophysics, 2015,30(5):2246-2256.