

引用格式:杨耀忠,谭绍泉,孙业恒,等.油气勘探开发综合研究数字平台建设及应用[J].油气藏评价与开发,2021,11(4):628-634.

YANG Yaozhong, TAN Shaoquan, SUN Yeheng, et al. Construction and application of digital platform for comprehensive research of oil and gas exploration and development[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(4): 628-634.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.04.020

油气勘探开发综合研究数字平台建设及应用

杨耀忠,谭绍泉,孙业恒,穆星,马承杰,刘建涛

(中国石化胜利油田分公司,山东 东营 257000)

摘要:勘探开发综合研究流程节点多、专业性强,针对研究流程未能实现显性化、数据服务支持不足、可视化手段缺乏等问题,面向胜利油田勘探开发综合研究业务的需求,形成了标准化的勘探开发综合研究流程,研发了油气勘探开发综合研究数字平台,实现了研究数据快速获取、成果自动归档。集成专业软件数据服务、可视化分析支持手段,一键调用所需的专业软件,实现不同研究岗位多学科在线协同。通过标准规范的综合研究流程,便于新员工能快速进入角色,老员工的宝贵经验通过流程不断完善得以传承。该平台在胜利油田勘探开发研究院主要研究室进行推广应用,支撑了7个地震工区的勘探综合研究、15个新老区方案编制与优化等工作,大幅提升综合研究工作的效率和质量,为油田高效勘探、效益开发提供支持。

关键词:勘探开发;综合研究;流程化;协同化;可视化

中图分类号:TE311

文献标识码:A

Construction and application of digital platform for comprehensive research of oil and gas exploration and development

YANG Yaozhong, TAN Shaoquan, SUN Yeheng, MU Xing, MA Chengjie, LIU Jiantao

(Sinopec Shengli Oilfield, Dongying, Shandong 257000, China)

Abstract: There are many nodes in the comprehensive research process of exploration and development, which are highly professional. In order to solve the problems that the research process is not explicit, and lack of data service support and visualization means, a standardized comprehensive research process of exploration and development has been formed, and a digital platform for comprehensive research of oil and gas exploration and development has been developed, so as to achieve rapid acquisition of research data and automatic archiving of research results. Integrating the professional software data service and visual analysis support means, and calling the required professional software with one click can realize multi-disciplinary online collaboration of different research posts. Through the standardized comprehensive research process, the new staff can be able to enter into the spirit of the role as soon as possible, and the valuable experience of the old staff can be inherited through the continuous improvement of the process. The platform has been widely applied in the main research office of Shengli Oilfield Exploration and Development Research Institute, supporting the exploration comprehensive research of seven seismic work areas, and the scheme preparation and optimization of 15 new and old areas, greatly improving the efficiency and quality of comprehensive research work, and providing support for efficient exploration and beneficial development of the oilfield.

Keywords: exploration and development, comprehensive research, process oriented, collaboration, visualization

勘探开发综合研究为探井部署、产能方案优化决策等提供科学依据、指明潜力方向,是油田增储上产、调整挖潜的基础和支撑。综合研究过程涉及地

球物理、油气地质、油藏工程等多门学科,需要多学科海量数据的高效组织和研究成果的实时共享^[1],实现跨学科、跨部门、跨地域协同,做到信息实时反馈,

收稿日期:2021-03-25。

第一作者简介:杨耀忠(1966—),男,本科,教授级高级工程师,现主要从事油田信息化规划与管理、智能油田建设顶层设计等工作。地址:山东省东营市东营区济南路258号胜利石油管理局,邮政编码:257000。E-mail: yangyaozhong.slyt@sinopec.com

基金项目:中国石油化工股份有限公司科技项目“油田企业勘探开发服务云平台关键技术研究”(P17019-6)。

良性互动。建立面向勘探开发综合研究全业务、全流程、全要素的综合应用平台,成为提升勘探开发综合研究水平的迫切需求。

近年来,国内外各大油田公司与技术服务公司以综合研究各类数据集成为基础,积极开展勘探开发综合研究一体化应用平台建设。长庆油田建设了油气藏研究与决策支持(RDMS)系统,开展勘探数据整合与治理,建立了盆地级数据服务中心,基于实时成图、图形联动等技术开发了企业级“大科研”环境平台,实现16个勘探开发综合研究业务专题的场景式业务支持。大庆油田建成了具有自主知识产权的专业应用软件开发平台^[2-4],支持特色软件底层技术源码开放共享,实现标准化设计、插件化开发、流程化组装^[5],基于该平台完成油藏可视化、岩心数字化、井震结合储层预测等综合研究软件研发。斯伦贝谢公司围绕油藏研究目标,不断完善PetrelRE软件功能,基于研究目标的工作流程之间做到相互衔接,实现了地质研究与油藏管理一体化。这些综合应用平台的探索与实践,为胜利油田开展油气勘探开发综合研究数字平台建设提供了很好的指导和借鉴。

随着油田勘探开发难度的不断增加,隐蔽油气藏勘探目标的精准识别、剩余油分布的精细描述对综合研究提出了更高的要求,需要地震、测井、地质、油藏工程等多学科技术人员基于统一的综合应用平台,在多学科数据集成共享的基础上,综合应用多种勘探开发专业软件与自主研发的工具软件,由多学科的技术人员和专家协同开展项目研究,做到应用统一规范的研究流程,提高综合研究的工作效率与质量。基于上述需求,胜利油田勘探开发综合研究亟需开展油气勘探开发综合研究数字平台建设。

1 油气勘探开发综合研究数字平台功能设计与建设

针对胜利油田勘探开发综合研究流程未实现统一规范、数据与成果共享服务支持不足、勘探开发专业软件调用不便、综合可视化分析手段缺乏等问题,在深入分析综合研究业务流程的基础上,推进综合研究流程可视化,集成专业软件数据服务、可视化分析支持手段,实现研究数据快速获取、成果自动归档,一键调用所需的专业软件,实现不同研究岗位多学科在线协同。

1.1 勘探开发综合研究标准化流程分析

勘探开发综合研究业务过程复杂,涉及勘探、地质、开发等多个岗位,需要充分考虑各个岗位的应用需求,建立标准化的综合研究流程。按照规范流程、统一标准要求,业务专家与信息技术人员紧密结合,共同研讨。根据胜利油田勘探开发现状及工作要求,建立了勘探开发综合研究标准的流程体系,共有2类14个一级业务。勘探综合研究包含地层分析、构造分析、储层评价、圈闭评价、井位部署、储量计算6个一级业务^[6-9];开发综合研究包含地层对比与划分、构造研究、储层研究、油层特征研究、油藏模型建立、开发效果评价、剩余油分析、方案优化部署8个一级业务^[10]。其中开发综合研究的前3个一级业务与勘探综合研究的前3个一级业务基本活动相同,在系统设计上要实现功能共享应用。但由于勘探综合研究与开发综合研究针对的目标不同,应用的数据和分析工具有所不同,对勘探、开发综合研究这3个业务的特有功能点单独设计,形成面向勘探综合研究、开发综合研究的不同功能模块。

勘探开发综合研究的每个一级业务对应一套工作流程,如勘探储层评价一级业务由数据准备、数据格式转换、单井相分析、沉积特征研究、沉积体系分析、岩电震特征分析、储层预测、储层综合评价等流程节点构成。开发地层对比与划分一级业务由基础数据准备、数据格式转换、地层对比与划分(调用Petrel专业软件)、对比划分成果生成、成果上交等流程节点构成(图1)。全面梳理了每个流程节点涉及的数据、产生的成果、专业软件调用和自研软件功能需求,形成了完整的流程描述体系。

1.2 油气勘探开发综合研究数字平台建设

基于勘探开发综合研究标准化流程,对油气勘探开发综合研究数字平台进行功能设计(图2)。为实现勘探开发综合研究流程可配置化,设计了流程管理功能模块,包括项目管理和流程发布功能。针对综合研究数据集成和成果转化等需求,设计了数据集成与处理、成果管理等功能模块。按照综合研究的专业统计与成图需求,设计了统计分析及可视化模块,包括报表生成、曲线绘制、图形组件等功能。将研究人员在工作中长期积累形成的工具软件进行提升改造,设计了业务应用模块,包括劈产劈

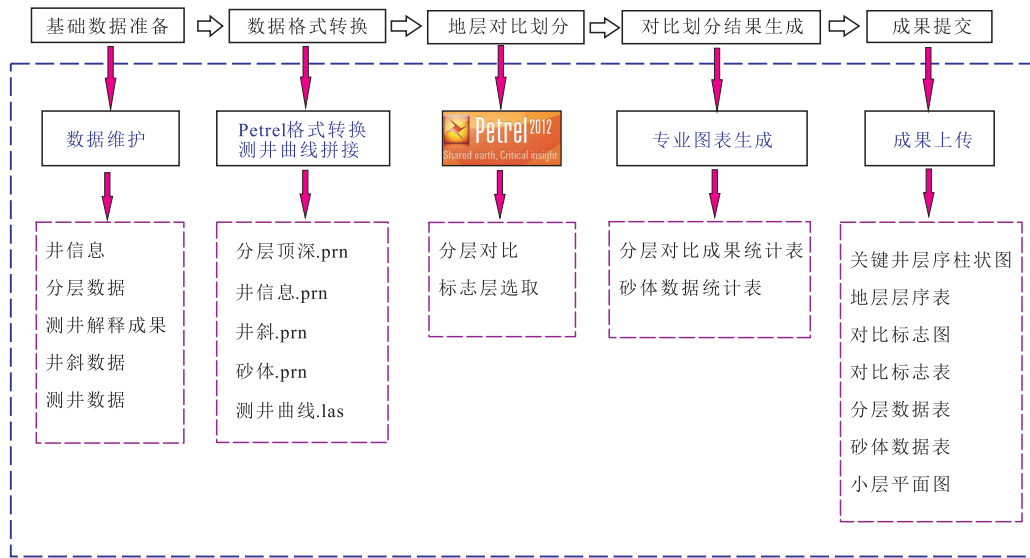


图1 开发综合研究地层对比与划分业务流程

Fig. 1 Business process of stratigraphic correlation and division in development comprehensive research

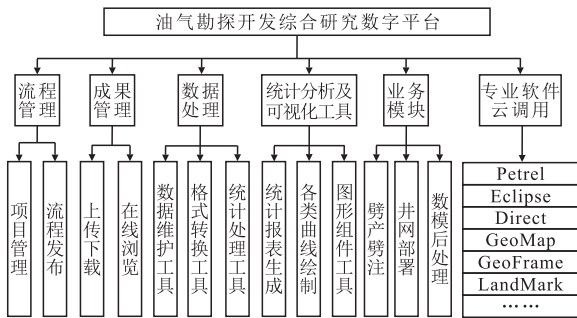


图2 油气勘探开发综合研究数字平台功能架构

Fig. 2 Functional architecture of digital platform for comprehensive research of oil and gas exploration and development

开发综合研究涵盖地质和开发两部分。其中地质部分5个一级业务,开发部分3个一级业务(图4)。系统基本实现了整个研究过程的线上运行功能,包括专业统计模块73个,开发专业图形、曲线模块32个,业务专业应用模块5个。

1) 地层自动对比

地层自动对比实现了基础数据的自动提取,全流程共享调用。测井曲线拼接提供两种实现方式,交互拼接或批量自动拼接下载,形成完整的测井系列曲线。Petrel等常用软件格式数据的一键生成,大大节省了数据手工处理和格式转换的时间。研究过程中可实时调用云端专业软件,完成地层对比工作,成果及时回存,主动推送到项目组共享应用。

2) 构造研究

构造研究可根据工区自动提取数据,转换成主流地震综合解释软件格式,并可调用云端软件完成构造解释。根据解释成果,利用各种数字成图模块,可在线绘制构造图、等值图、断面图等平面图。

3) 储层描述

储层描述模块以实验岩心数据为基础,自动统计生成岩石特征、物性特征、非均质性等层组参数,通过该系统将实验岩心与层位自动匹配,大幅节省了人工统计分析的时间。

4) 油层特征研究

油层特征研究模块通过调用地层对比分析的砂

注、井网部署^[11-12]、数模后处理^[13]、开发效果评价等功能。为实现研究人员对各类勘探开发专业软件的方便调用,研究 CITRIX 虚拟技术搭建了专业软件应用云,部署了6套常用的专业软件,通过编程改造,实现了专业软件与系统的无缝对接,一键启动,即刻使用。

1.2.1 勘探开发综合研究业务功能

勘探综合研究涵盖地层分析、构造分析、储层评价、圈闭评价、井位部署和储量计算^[14]6个一级业务(图3)。系统基本实现了整个勘探研究过程的线上运行功能,包括统计分析与处理模块24个,专业数据成图模块28个。主要功能是线上数据的统计及分析处理、勘探专业数字成图和调用大型软件3类。

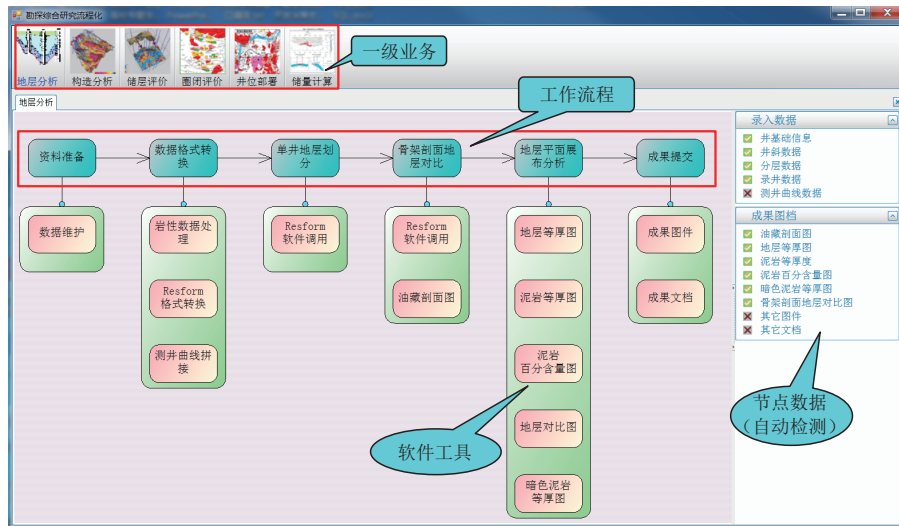


图3 勘探综合研究业务功能
Fig. 3 Functions of exploration comprehensive research



图4 开发综合研究业务功能
Fig. 4 Functions of development of comprehensive research

体成果数据,支持了油层有效厚度、流体性质及温压系统的自动统计分析。利用数字成图功能绘制小层平面图、油藏剖面图、砂厚、压降等值图等图件。

5) 油藏模型建立

该模块可提取前面流程的成果数据,自动转换成Petrel、Eclipse软件需要的数据格式,在线调用软件、导入数据,包括在线调用Petrel软件建立地质模型,在线调用Eclipse软件导入数据,建立油藏数模模型。还可提取储量参数,快速进行储量计算。

6) 开发效果评价

该模块综合利用井史、小层、生产、储量等数据,进行自动劈产劈注^[15](100口井2~3 min即可完成),

可统计不同地质对象和不同阶段的开发指标,绘制开发曲线、采出程度柱状图等。实现了开发效果评价业务的全过程线上运行。

7) 剩余油分析

实时调用Eclipse软件进行计算,自动获取工区吸水饱和度和饱和度监测资料,还可将数值模拟方法与传统油藏工程方法相结合^[16],绘制不同类型的水驱特征曲线,拟合计算得出可采储量和采收率^[17],进行成果的相互验证。

8) 方案优化部署

基于地质模型实现了在线的井位部署,自动统计布井参数。通过在构造图上自动加载老井,交互

布井,改变了传统的纸上布井,估算指标的模式。通过数模前处理提供给Eclipse软件需要的数据格式文件,调用Eclipse软件部署多套方案,在线提交数模作业在集群进行并行运算,生成的结果支持数模在线下载与展示,并自动统计完成多方案结果对比^[18],优选开发方案,提高了工作效率。

1.2.2 勘探开发综合研究可视化功能

勘探开发综合研究过程需要通过曲线、图、表等直观展示数据信息进行综合分析。系统集成了大量的可视化工具,实现研究过程的数据可视化、计算分析可视化以及信息综合展示可视化,提供直观、可交互的可视化环境,辅助研究决策。

1) 指标统计分析

在勘探开发综合研究过程中需要进行大量的数据统计分析和计算。例如在开发效果评价阶段,为了更准确地把握开发状况和规律,制定有效的开发措施,需要针对不同时间、不同层位、不同开发阶段进行指标的统计^[19],基于小层、井史、生产、油藏静态属性等基础资料,研发劈产劈注计算模块,快速将产量和注水量劈分到小层,然后针对不同的地质对象(井、井组、单元、层位)进行指标统计分析。为了更直观地展示开采效果^[20],实现了单井、区块、阶段性开发综合曲线的绘制,便于油田开采现状的实时监控和在线分析。储层特征分析时,利用岩心实验数据,结合层位信息实现孔隙度、渗透率等储层参数的非均质性统计。

2) 智能井网部署

在方案设计和部署阶段,传统的井网部署模式是采用在地质构造图上手工布井的方式^[21],导致布井操作不灵活、效果不直观、误差大。基于分层储量和基础油藏参数,实现了基于电子图件的智能布井和多方案智能优选。通过研究底图加载、坐标校正、图元选取、面积计算等信息技术,实现了计算机化的交互布井,自动统计布井工作量。针对新区,可以自由选择井网形式,旋转井网方向,变换井距,也可以进行局部井的微调,自动统计布井工作量,预测生产指标。针对老区,可以设置老井措施类型,添加新井,自动统计措施工作量。业务专家还可同时部署多套井网,形成多套部署方案^[22],系统自动计算方案指标,进行综合对比评价和智能排队优选^[23-25]。

3) 数据自动成图

在勘探开发综合研究过程中,涉及大量的油藏开发和地质图件,商用专业成图软件类型多、版本多,导致数据格式不统一,难以共享交流。另外,数据准备时间长,需要进行数据格式转换,批量成图效率低,而且无法统一管理,不便于后期图件成果的共享、继承和改进。通过制定统一的图形格式标准,各种图形元素参照石油行业专业绘图标准,研发专业化的数据成图组件,实现了等值图、平面图、柱状图等常用的油藏开发和地质图件数据成图功能,并支持手工编辑调整,提高了图件制作效率。

1.2.3 数据集成处理与转换

油田勘探开发综合研究过程涉及大量的基础数据和研究过程数据。胜利油田建设了数据类型完备的数据资源中心,涵盖钻井、测井、录井、生产、分析化验等业务域的基础数据,为油田数字化转型发展以及培育数据服务新功能奠定了基础。综合研究流程化涉及的基础数据,直接从数据中心提取和加工,对研究过程的数据、成果数据进行统一的存储管理,实现数据的一次生成、全过程流转和共享应用,避免了数据的重复录入和相同数据的不唯一性。

油藏勘探开发综合研究过程需要用到的专业软件多,数据格式不统一,手工处理工作量大,通过对主流勘探开发专业软件的输入数据类型和格式进行分析,针对不同软件建立相应数据格式转换功能,实现Geoframe、Eclipse、Petrel等勘探开发专业软件所需输入数据按标准格式的一键生成,打通了主流软件的数据交换通道。例如地层对比划分研究过程需要从各个系统收集井基本信息、测井解释数据、分层结果等资料,格式化整理后导入专业软件进行分析研究,耗时较长。系统自动提取所需基础数据,完成格式转换,大大提高了研究效率。为解决老井测井曲线分段测试导致测井曲线不连续的问题,采用离差平方和最小算法,实现了测井曲线数据的自动拼接和批量下载,为全井或目标段测井曲线解释提供支持,提高了工作效率。

1.2.4 流程管理与配置

随着勘探开发技术的进步,勘探开发综合研究流程以及每个流程应用的软件工具需要不断的迭代更新,通过智能流程配置,解决流程动态更新、即时扩展的问题。智能流程配置主要基于流程配置、流

程动态绘制和模块的反射装配等技术完成。根据勘探开发综合研究流程体系中的一级业务和 workflows 的对应关系,进行流程配置。通过建立流程管理表、功能配置表进行配置管理。需要调整流程时,修改流程配置表中的流程体系,通过流程动态绘制技术,软件界面上就能及时看到调整效果。调整流程节点的应用模块时,修改功能配置表,通过反射技术挂接模块,实现节点上应用工具的自动更新。勘探开发综合研究采用项目运行管理模式,为每个用户根据岗位类别配置功能权限,实现项目全过程管理、研究过程的线上运行以及不同岗位的业务协同,通过流程配置技术实现流程的无缝衔接、高效办公。

油气勘探开发综合研究数字平台基于胜利油田综合研究业务实际,在实现数据共享、流程统一规范的基础上,集成专业软件及自研软件功能,使多学科综合研究人员在同一个平台上协同工作,可根据实际业务需求定制研究流程,做到所有研究手段线上化、所有研究成果共享化,实现了研究经验和知识的传承,推动了勘探开发综合研究工作的数字化转型。

2 油气勘探开发综合研究数字平台应用

该平台经过功能设计、系统研发、测试试用等阶段,目前已在胜利油田勘探开发研究院沾车室、滩海室、整装室、断块室、低渗室、稠油室等专业科室培训应用,研究人员利用该平台,开展了7个地震工区的勘探综合研究、15个新老区方案编制与优化等工作,在大幅提升工作效率的基础上,综合研究成果的质量也有了很大提升。

在T76双低单元治理研究工作中,研究人员根据研究单元目标建立项目,系统自动查找并导入油田数据资源中心的各种数据,如井信息、测井解释成果、井斜数据等,实现数据的一键获取,大大节省了搜集数据耗费的时间和精力。在丰深斜101块新区产能建设方案等工作中,研究人员按照自定义的研究流程,调用平台功能、专业软件开展综合研究,各业务功能形成的成果数据保存在项目库中,为后续研究环节共享研究成果奠定了基础。通过油气勘探开发综合研究数字平台的应用,解决数据高效组织、成果实时共享、数据主动推送等问题,实现了统一办公环境、跨专业、跨部门、跨地域的协同研究。

3 结论

1) 根据胜利油田勘探开发现状和特点,建立了适合于胜利油田勘探开发综合研究的标准流程,利用统一流程模板和节点支持模板,对14个业务流程进行了分析,为平台功能实现奠定了基础。

2) 快速集成综合研究工作所需的基础数据,同时建立综合研究项目库,实现了过程数据、成果数据的管理高效、安全共享,通过成果版本控制实现了过程留痕。

3) 通过统计分析工具、可视化分析工具、业务应用模块和大型应用软件的集成应用,大幅提高工作效率。通过流程化的管理工具,实现了开发综合研究项目全过程的线上运行。

油气勘探开发综合研究数字平台的应用,打破了传统的研究模式,达成不同岗位的协同研究,构建了一种全新的科研工作模式,实现了勘探开发研究流程化、一体化和协同化。

参考文献

- [1] 王志高,卞法敏,明光春.勘探综合研究项目数据管理模式探讨[J].石油地球物理勘探,2008,43(1):119-122.
WANG Zhigao, BIAN Famin, MING Guangchun. Discussion on data management mode in integrative exploration research projects[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2008, 43(1): 119-122.
- [2] 彭英,万剑华,宋建,等.一种用于油田勘探的云服务平台的构建设计[J].石油地球物理勘探,2012,47(1):166-172.
PENG Ying, WAN Jianhua, SONG Jian, et al. An architecture design of cloud computing service platform for oil exploration [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(1): 166-172.
- [3] 盛秀杰,梅廉夫.油气勘探和开发领域中间件的设计及实现[J].石油地球物理勘探,2010,45(4):602-605.
SHENG Xiujie, MEI Lianfu. Designing and realization of middleware in E&P area[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(4): 602-605.
- [4] 陈强,王宏琳.数字油田:集成油田的数据、信息、软件和知识[J].石油地球物理勘探,2002,37(1):90-96.
CHEN Qiang, WANG Honglin. Numeric oilfield: integrating data, information, software and knowledge of oilfield[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2002, 37(1): 90-96.
- [5] 吴钧,于晓红.大庆油田生产经营管理与辅助决策系统设计与实施[J].大庆石油地质与开发,2019,38(5):294-300.
WU Jun, YU Xiaohong. Design and implementation of the production management and assistant decision-making system for Daqing Oilfield[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(5): 294-300.
- [6] 金晓波.南川区块断层精细解释研究[J].油气藏评价与开发,2018,8(4):6-10.

- JIN Xiaobo. Study on the fine fault interpretation in Nanchuan district[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2018, 8(4): 6-10.
- [7] 蔺鹏. 基于深水沉积学原理的地震属性分析新思路[J]. 特种油气藏, 2019, 26(3): 30-35.
- LIN Peng. A new seismic attribute analysis with deep-water sedimentation[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(3): 30-35.
- [8] 卢伟, 李国福. 最大熵谱分解结合小波变换技术在层序地层划分中的应用[J]. 油气藏评价与开发, 2018, 8(1): 1-3.
- LU Wei, LI Guofu. Application of maximum entropy spectrum decomposition combined with wavelet transform in the division of sequence stratigraphy[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2018, 8(1): 1-3.
- [9] 宋辉, 陈伟, 李谋杰, 等. 基于卷积分控循环单元网络的储层参数预测方法[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(5): 73-78.
- SONG Hui, CHEN Wei, LI Moujie, et al. A method to predict reservoir parameters based on convolutional neural network-gated recurrent unit (CNN-GRU) [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(5): 73-78.
- [10] 袁士义, 王强. 中国油田开发主体技术新进展与展望[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 657-668.
- YUAN Shiyi, WANG Qiang. New progress and prospect of oilfields development technologies in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 657-668.
- [11] 熊钰, 徐宏光, 王玲, 等. 反九点井网加密前后流场变化及驱油效率实验研究[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(3): 70-78.
- XIONG Yu, XU Hongguang, WANG Ling, et al. Experimental research on variation of flow field and displacement efficiency before and after infilling of inverted nine-spot well pattern[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(3): 70-78.
- [12] 胡国强, 胡书勇, 李勇凯, 等. 低渗油藏注水开发五点井网有效驱替压力系统研究[J]. 油气藏评价与开发, 2017, 7(3): 20-22.
- HU Guoqiang, HU Shuyong, LI Yongkai, et al. Effective displacement pressure of five-spot pattern by waterflood development in low permeability reservoir[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(3): 20-22.
- [13] 于金彪. 油藏数值模拟历史拟合分析方法[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(3): 66-70.
- YU Jinbiao. History matching analysis method on reservoir numerical simulation[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(3): 66-70.
- [14] 张茂林, 廖洪, 杨龙, 等. 页岩气藏储量计算方法分析[J]. 油气藏评价与开发, 2017, 7(3): 67-73.
- ZHANG Maolin, LIAO Hong, YANG Long, et al. Reserve calculating method of shale gas reservoir[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(3): 67-73.
- [15] 谷建伟, 周梅, 李志涛, 等. 基于数据挖掘的长短期记忆网络模型油井产量预测方法[J]. 特种油气藏, 2019, 26(2): 77-81.
- GU Jianwei, ZHOU Mei, LI Zhitao, et al. Oil well production forecast with long-shortterm memory network model based on data mining[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(2): 77-81.
- [16] 刘万伟, 刘瑞超, 张鸣歌. 石油勘探开发知识管理技术研究与应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(5): 290-293.
- LIU Wanwei, LIU Ruichao, ZHANG Mingge. Research on the knowledge management technique for petroleum exploration and development and its application[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(5): 290-293.
- [17] 周灿灿, 李潮流, 王昌学, 等. 复杂碎屑岩测井岩石物理与处理评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
- ZHOU Cancan, LI Chaoliu, WANG Changxue, et al. Petrophysics and treatment evaluation of logging complex clastic rocks[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [18] 黄帅, 彭彩珍. 基于灰色关联的产量递减因素分析[J]. 油气藏评价与开发, 2018, 8(4): 33-35.
- HUANG Shuai, PENG Caizhen. Study on production decline factors based on gray correlation[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2018, 8(4): 33-35.
- [19] 李克文, 周广悦, 路慎强, 等. 一种基于机器学习的有利区评价新方法[J]. 特种油气藏, 2019, 26(3): 7-11.
- LI Kewen, ZHOU Guangyue, LU Shenqiang, et al. A new method for favorable zone evaluation based on machine learning [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(3): 7-11.
- [20] 阳晓燕. 非均质油藏水驱开发效果研究[J]. 特种油气藏, 2019, 26(2): 152-156.
- YANG Xiaoyan. Waterflood development effect study of heterogeneous reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(2): 152-156.
- [21] 刘兰芹. 胜坨油田整装砂岩油藏矢量化井网调整技术[J]. 长江大学学报(自科版): 2014, 11(13): 109-111.
- LIU Lanqin. Vectorization well pattern adjustment technology for integrated sandstone reservoir in Shengtuo Oilfield[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2014, 11(13): 109-111.
- [22] 张善义, 兰金玉, 李冰. 基于粒子群算法的综合调整方案优化方法[J]. 特种油气藏, 2019, 26(1): 126-130.
- ZHANG Shanyi, LAN Jinyu, LI Bing. Comprehensive optimization of adjustment program based on particle swarm optimization[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(1): 126-130.
- [23] 田鸿照. 水平井注采井网和注采参数优化研究[J]. 石油化工应用, 2016, 35(8): 6-9.
- WANG Hongzhao. Optimization of horizontal injection-production well pattern and parameter[J]. Petrochemical Industry Application, 2016, 35(8): 6-9.
- [24] 侯春华. 基于长短期记忆神经网络的油田新井产油量预测方法[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(3): 105-110.
- HOU Chunhua. New well oil production forecast method based on long-term and short-term memory neural network[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(3): 105-110.
- [25] 邵绍献. 基于特高含水期油水两相渗流的水驱开发特征研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2013.
- BING Shaoxian. Study on water drive development characteristics based on the oil-water two phase flow of ultra-high water cut stage[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2013.

(编辑 常燕)