

doi: 10.12029/gc20210206

陈欢庆. 2021. 中国石油精细油藏描述进展与展望[J]. 中国地质, 48(2): 424-446.

Chen Huanqing. 2021. Progress in the fine description of reservoirs in China and its prospect[J]. Geology in China, 48(2):424-446(in Chinese with English abstract).

中国石油精细油藏描述进展与展望

陈欢庆

(中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:结合研究实践,将中国石油精细油藏描述研究进展总结为基于开发地震技术的复杂构造精细研究、潜山复杂岩性识别技术、井震结合储层精细预测技术、特低渗透储层裂缝表征技术、砾岩储层微观孔隙结构分类研究、基于密井网资料隔夹层刻画技术、砾岩油藏水淹层解释技术、油田开发过程中储层变化规律研究、砾岩储层水流优势通道识别技术、低渗透储层定量分类评价技术、断块油藏构型建模技术和多学科剩余油综合表征技术等 12 个方面。总结目前精细油藏描述研究中存在 8 方面问题,主要包括微构造(特别是低级序断层)解释无法满足油田开发需求、单砂体边界刻画和井间预测难度很大、裂缝表征与地质建模问题、碳酸盐岩缝洞型储层定量预测十分困难、复杂储层测井解释仍需持续攻关、水流优势通道识别预测问题、剩余油表征方法单一难以满足生产需要、精细油藏描述成果管理现状无法满足工作需求。最后指出了精细油藏描述研究的发展趋势。

关键词:精细油藏描述;构造精细解释;储层精细预测;地质建模;剩余油表征;发展趋势;油气勘查工程

中图分类号: TE122.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2021)02-0424-23

Progress in the fine description of reservoirs in China and its prospect

CHEN Huanqing

(Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083 China)

Abstract: The latest progress of the studies on reservoir's fine description of petroleum in China is shown as the following 12 aspects, fine earthquake technology-based complex structure study, complex buried hill lithology recognition technology, fine prediction technology of reservoir through combination of well data and seismic data, characterizing techniques for fissures of low permeable reservoir, classification of microscopic pore structure of conglomerate reservoir, interlayer insulation features based on the data of dense well pattern, water flooded layer interpretation of conglomerate reservoir, reservoir variation law during the development of oilfields, flow channel identification technology of conglomerate reservoir, quantitative classification evaluation of low permeable reservoir, configuration modeling of fault block oil reservoir and multidisciplinary comprehensive characterization technique of residual oil, etc. At present, in the fine description research of reservoir there exist the following eight aspects of problems, mainly including interpretation of microstructures (especially low sequence faults) failing to meet oilfield development

收稿日期: 2020-05-07; **改回日期:** 2020-07-13

基金项目: 国家科技重大专项“CO₂驱油与埋存关键技术”(2011ZX05016-006)和中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司“精细油藏描述项目”(2019-40217-000019)资助。

作者简介: 陈欢庆,男,1979年出生,博士,高级工程师,从事储层地质学研究;E-mail:hqchen2009@163.com。

needs, many difficulties in single sand body boundary features and interwell prediction, fracture characterization and geological modeling, many difficulties in the quantitative prediction of carbonate fractured-vuggy reservoir, logging interpretation of complex reservoirs still needing to be studied continuously, difficulties in inflow channel identification, a single remaining oil characterization method difficult to meet the production needs, and management status of fine reservoir description result that cannot meet the work requirements. Finally, the development trend in the fine description of reservoir is pointed out.

Key words: Fine description of reservoirs; fine interpretation of structures; fine prediction of reservoirs; geologic modeling; remaining oil characterization; development tendency; oil-gas exploration engineering

About the first author: CHEN Huanqing, male, born in 1979, doctor, senior engineer, mainly engaged in oil and gas field development and reservoir geology research; E-mail:hqchen2009@163.com.

Found support: Supported by major national science and technology projects (No.2011ZX05016-006) and reservoir fine description project in 2019 from Petrochina Exploration and Development Company (No. 2019-40217-000019).

1 引言

精细油藏描述是指油田投入开发后,随着油藏开采程度的提高和动静态资料的增加所进行的精细地质研究与剩余油描述,并不断完善已有地质模型和量化剩余油分布所进行的研究工作。它是油田开发工作的基础,是各项开发调整对策制订和具体方案实施的重要依托,也是一项多学科、多专业、多岗位相互融合的系统工程。经历了数十年的快速发展,精细油藏描述在构造解释、储层描述和地

质建模等诸多方面都取得了长足进步。精细油藏描述的研究成果在开发调整方案设计、老油田加密调整、滚动扩边、水平井规模应用等工作中得到广泛应用,取得了很好的生产效果,因此越来越受到大家的重视(袁士义等,2018)。笔者在前人研究(Stright et al., 2008; Correia et al., 2016; Medina et al., 2017; Liang Baosheng et al, 2017; Jumat et al., 2017; Liu Kouqi et al, 2018; 陈欢庆, 2019)的基础上对国内外精细油藏描述研究的现状进行了全面综合和梳理(表1)。可以看出,由于研究水平和关注领

表1 国内外精细油藏描述研究现状对比 (Stright et al., 2008; Correia et al., 2016; Medina et al., 2017; Liang Baosheng et al, 2017; Jumat et al., 2017; Liu Kouqi et al, 2018; 陈欢庆, 2019)

Table 1 Comparison of research status of reservoir fine description at home and abroad

对比	优势	不足
国外	<ul style="list-style-type: none"> ①构造解释和储层预测中结果的不确定因素分析研究程度高 ②岩石地球物理和岩相分析深入 ③对储层孔隙度、渗透率和含水饱和度等进行实验机理研究比较深入成熟 ④对精细油藏描述中各种数学、地质统计学等算法研究深入透彻 ⑤对人工神经网络技术等充分体现计算机技术的新方法新技术研究较多 ⑥利用四维地震技术对开发中后期油藏进行动态监测研究较多 ⑦利用核磁共振测井等新技术研究储层性质较成熟 ⑧对致密油、重油等非常规储层研究已经取得了重大的成果 ⑨精细油藏描述中重视过程质量控制 	<ul style="list-style-type: none"> ①对精细油藏描述中地层精细划分与对比工作的重视程度不够 ②精细油藏描述工作程序化、系统化重视不够
国内	<ul style="list-style-type: none"> ①对储层地质属性研究较深入 ②对地层精细划分与对比研究比较重视 ③精细油藏描述研究体系和研究内容系统化、程序化 ④对剩余油研究充分重视 	<ul style="list-style-type: none"> ①精细油藏描述研究中实验机理研究较弱 ②岩石地球物理等方法在精细油藏描述中应用少 ③数理统计分析等不深入 ④人工神经网络技术、四维地震、核磁测井等新技术和新方法应用太少 ⑤对于致密油等非常规储层研究还刚刚起步,研究方法和技术不完善 ⑥对于类似于低渗透、天然裂缝等具有鲜明特征的油藏开展精细油藏描述研究特色未凸显 ⑦不确定性分析在精细油藏描述研究中刚刚起步 ⑧精细油藏描述中对质量控制工作重视不够

域的差异,国内外精细油藏描述优势和不足差异十分明显,国内精细油藏描述还有许多方面需要向国外同行学习。本次对国内中国石油精细油藏描述近10年来相关研究进展作以梳理。对目前精细油藏描述研究中存在的问题进行了思考,并对如何解决问题给出了思路和对策。同时指出了未来精细油藏描述发展的趋势和方向,以期对相关研究提供参考。

2 精细油藏描述研究进展

本次工作中,笔者将中国石油精细油藏描述研究在方法技术方面的最新进展总结为基于开发地震技术的复杂构造精细研究、潜山复杂岩性识别技术、井震结合储层精细预测技术、特低渗透储层裂缝表征技术、砾岩储层微观孔隙结构分类研究、基于密井网资料的隔夹层刻画技术、砾岩油藏水淹层解释技术、油田开发过程中储层变化规律研究、砾岩储层的水流优势通道识别技术、低渗透储层定量分类评价技术、断块油藏构型建模技术和多学科剩余油综合表征技术等12个方面。

2.1 基于开发地震技术的复杂构造精细研究

构造精细解释是精细油藏描述研究最基础的内容之一,它的研究准确程度和精细程度的高低,直接决定着精细油藏描述研究水平的高低。与油气勘探和评价阶段不同,开发阶段,特别是在开发中后期,对构造解释的精度要求大大提高,一般需要解释出四级或五级这种低级序断层,构造等值线的间距要求在5m以内。关于断层的分级及识别标志,李阳做过详细的阐述(李阳等,2007;李阳,2011)。虽然油田开发生产实践对构造解释的精度提出了很高的要求,但是实际情况却不容乐观。以中国石油各油田构造解释中断层解释为例,目前几乎所有含油气盆地,从渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地、松辽盆地到准噶尔盆地,都存在很大问题。受资料掌握状况、研究目标、研究者以及研究水平的差异,同一区块,相同的层位,构造,特别是断裂体系的解释成果每年都会发生变化,有时甚至是三级断层的巨大变化。这个问题对精细油藏描述研究中构造精细解释提出了巨大的挑战。为了迎接这个挑战,各个油田都在积极攻关。一方面,不断提高地震资料的采集、处理和解释的精度;另一方面,积极进行断裂体系的地质成因分析,从成因模式方面理解和

认识断层。以大庆、大港和新疆等油田为例,一方面创新以现有三维地震资料为基础基于正演模拟的提高资料分辨率研究;另一方面采用井震结合多井速度模型标定、正演模拟等多技术手段识别低级序断层,取得了较好的效果。该项成果的最重要进展是充分将开发地震和密井网资料紧密结合,为低级序断层的精细解释提供了有力的工具。虽然目前只是在少数油田取得了一定的进展,但是随着工作的不断深入进展,该项研究一定会不断创新发展并推广应用,逐步解决构造精细解释(特别是低级序断层精细解释)的难题。笔者在进行辽河盆地西部凹陷某区于楼油层断层精细解释时,紧密结合开发地震数据和密井网资料,在构造发育史详细分析的基础上用成因模式指导解释断裂体系,断裂体系(特别是低级序断层)解释精度大大提高(图1)。大庆油田在低级序断层附近打井,挖潜剩余油,取得了很好的效果(梁文福,2019;宋宝权等,2019;杜庆龙等,2019)。井震结合构造精细解释,特别是低级序断层的解释,对于开发中后期油田剩余油挖潜具有十分重要的意义,因此一定要引起足够重视。

2.2 潜山复杂岩性识别技术

潜山油藏在辽河、华北、大港等油田属于一种十分重要的油藏类型,一般表现为单井产量高,开发效益好的特点。但是受岩石类型复杂等诸多因素的影响,开发难度很大。目前应用较多的是基于录井、测井等手段来解释岩性,在详细分类的基础上开展储层地质学研究,认识潜山油藏发育特征。针对潜山油藏岩性复杂的特点,辽河、大港等油田创新应用录井岩屑薄片分析,通过旋转井壁取心、岩屑与录井曲线相对应,建立测井—岩性响应关系,岩心刻度测井,有效识别单井岩性。基于录井、岩心、镜下薄片、测井等资料,通过建立测井—岩性解释模型,识别细分潜山油藏复杂岩性,取得了较好的效果。在进行潜山复杂岩性识别时,充分重视井壁取心、岩屑和镜下薄片资料的结合。同时探索特征的测井曲线结合使用,例如岩石密度和补偿中子曲线的组合来识别潜山油藏岩性。在岩性识别的基础上,结合潜山内幕裂缝研究成果,可以认识优质储层发育的部位,为开发(调整)方案编制提供依据。

2.3 井震结合储层精细预测技术

储层精细预测和构造精细解释一样,也是精细

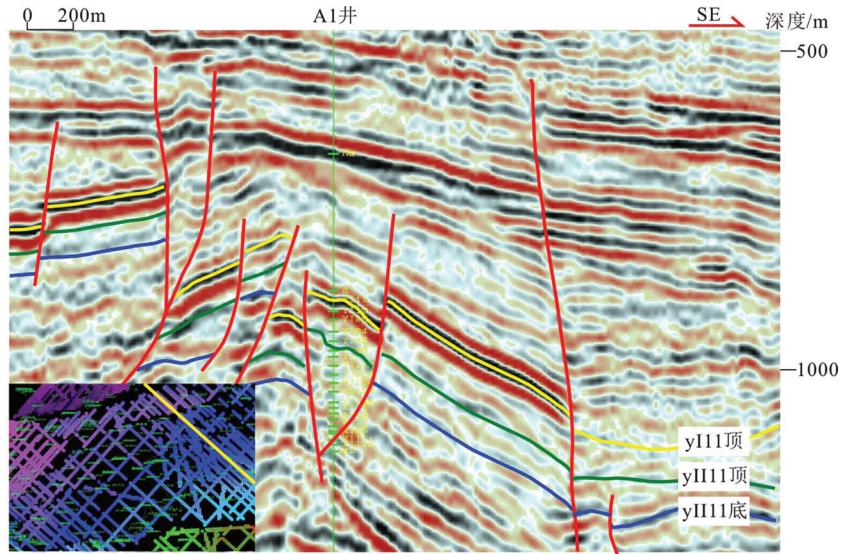


图1 辽河盆地西部凹陷于楼油层井震结合断裂体系精细解释

Fig.1 Fine interpretation of fault system based on combination of well data and seismic data in the Yulou oil-bearing layer in west depression of Liaohe Basin

油藏描述最基础的研究内容之一。精细油藏描述中,特别是开发中后期,井网很密,间距有时甚至小于100 m,但是由于中国陆相沉积相变快、砂体规模小,井间砂体预测仍然有很大的难度。为此,需要在工作中不断挖掘地震信息,通过井震结合的方式提高井间储层预测精度。笔者在进行松辽盆地徐东地区营城组火山岩储层研究时,将地震资料和井

资料紧密结合来刻画火山岩相,在此基础上预测火山岩有利储层发育规律,取得了很好的效果(图2)。井震结合储层精细预测技术主要是大庆、辽河、大港和新疆等油田在实践中不断探索的成果。其主要的内容大体包含两方面:①在沉积模式指导下,充分结合井震资料,采用地震沉积学、层控储层反演等技术预测储层;②井震结合储层预测有效提

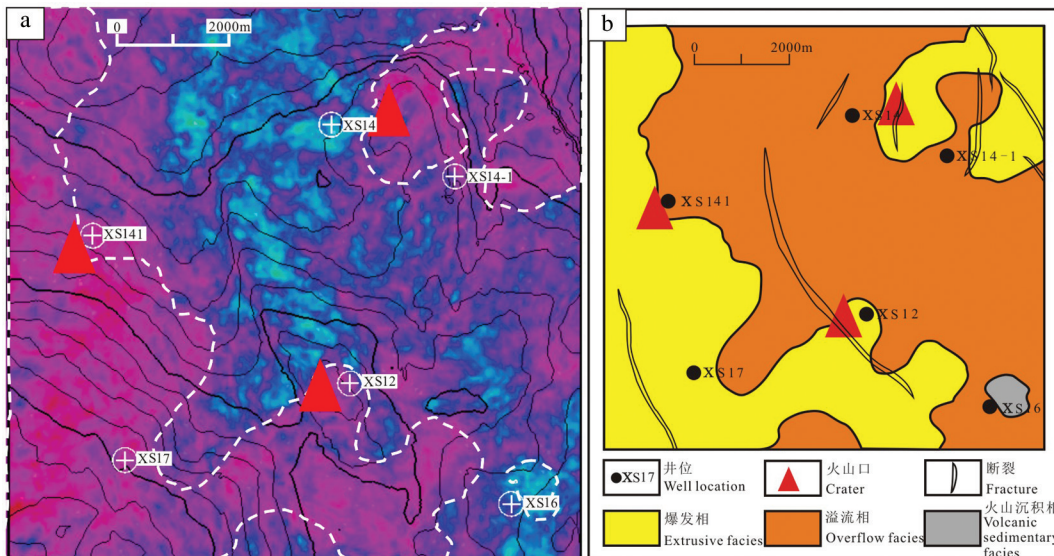


图2 松辽盆地徐东地区XS12区营城组一段火山岩地震相和火山岩相平面图

a—火山岩第III旋回地震相平面图;b—火山岩第III旋回岩相平面图

Fig.2 Plan of seismic facies and volcanic facies of No.1 Member of Yingcheng Formation in XS12 district, Xudong District, Songliao Basin

a—Plan of seismic facies of the third cycle volcanic rocks; b—Plan of lithofacies of the third cycle volcanic rocks

高砂体预测符合率,成果指导调整挖潜见到实效。总体而言,地震资料最大的优势是可以大幅度提高井间储层预测精度,这一点是井资料,甚至开发中后期密井网资料所无法相比的。根据大庆、辽河、大港和新疆等油田的实践经验来看,开发地震资料与密井网资料的充分结合,可以大幅度提高储层井间砂体的预测准确率和精度。在工作时应该从地震资料的采集、处理和解释等3方面共同努力,同时充分挖掘密井网资料信息(刘兴冬,2017;Aleari et al.,2018;Alkawai et al.,2018)。

2.4 特低渗透储层裂缝表征技术

裂缝表征是特低渗透储层研究中最重要内容,因为特低渗透油藏要实现有效开发,裂缝表征都是影响开发效果的最主要因素之一,无论是天然裂缝还是人工裂缝(曾联波等,2008)。长庆、青海、大港等油田在实践中创新发展,形成了特低渗透储层裂缝表征技术,主要包括两方面内容:①形成以古地磁、常规测井曲线裂缝识别、有限元数值模拟技术为核心的储层裂缝表征技术;②裂缝地质建模技术取得进展。一方面,通过古地磁、常规测井以

及岩石力学实验等,可以从成因角度对裂缝在空间上发育规律特征进行总体把握和认识,不至于犯比较明显的错误。另一方面,通过测井裂缝解释,可以实现裂缝初步定量表征。目前常规的岩心裂缝规模统计和测井裂缝解释预测等方法已经很难满足生产实践需要,这就要求研究者不断探索新方法、创新新技术,努力提高裂缝表征的精度和准确度。目前大家的探索方向包括镜下薄片裂缝观察和统计(图3)、成像测井裂缝研究、裂缝三维地质建模等。裂缝的成因机理相关实验研究和裂缝三维地质建模是未来裂缝表征主要的攻关难点。

2.5 砾岩储层微观孔隙结构分类研究

相对而言,砾岩储层的微观孔隙结构要比常规的储层复杂,因为砾岩储层具有复模态结构。所谓复模态结构,就是以砾岩形成的岩石骨架孔隙中,常常部分或全部被砂粒所充填,而在砾石和砂粒形成的孔隙结构中又部分被黏土颗粒充填。砾石、砂粒、黏土颗粒三者的粒径,含量及组合关系在不同的沉积环境中变化不同,形成了砾岩储集层复杂的岩石结构与孔隙结构(李庆昌等,1997)。砾岩储层

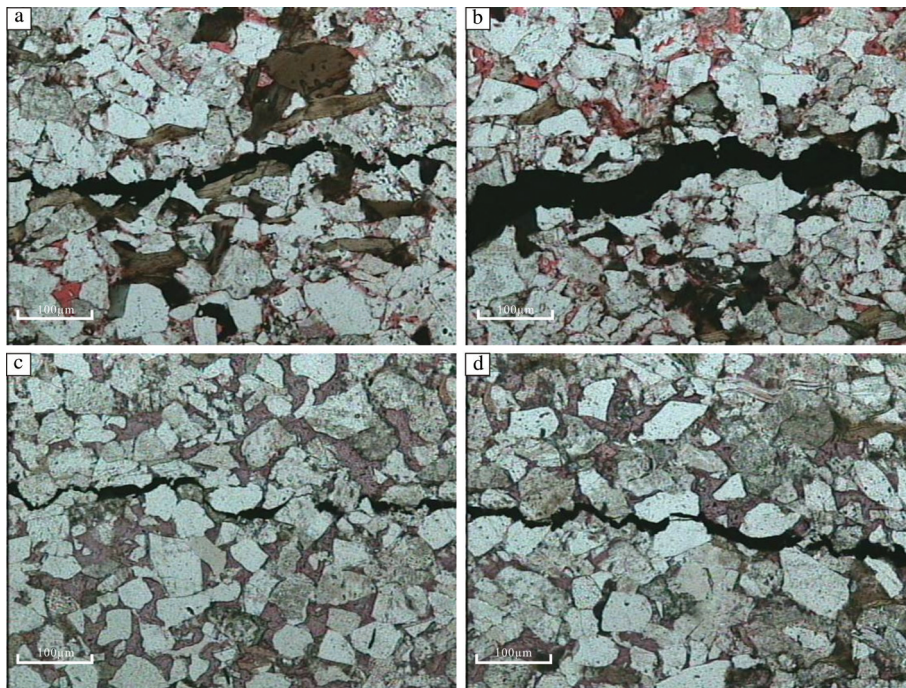


图3 鄂尔多斯盆地某区延长组长2油层组镜下薄片裂缝特征
a,b—Z9井,裂缝,深度:1468.59 m; c,d—D2井,裂缝,深度:1415.16 m

Fig.3 Fractures of thin section under microscope from the Chang 2 oil-bearing layer of Yanchang Formation in one area in Ordos Basin

a,b—Well9, fracture, depth:1468.59 m; c,d—WellD2,fracture, depth:1415.16 m

微观孔隙结构分类研究主要包括两方面内容:①利用岩心分析测试和镜下薄片等资料,通过统计分析建立孔隙结构与储层构型、岩性和渗透率关系,开展复模态孔隙结构分类研究;②基于详细的岩心分析,刻画不同岩性典型微观孔喉特征。首先,从资料基础而言,砾岩储层取心比较困难,由于钻井取心直径限制,而有时砾石直径又会很大,所以导致取心资料无法真实反映地下地质实际情况,进而在显微镜下薄片中也很难真实反映地下地质实际。虽然在工作中发展了大岩心取心的方法,但这一问题仍然没有从根本上得到解决。所以这就需要结合岩心分析测试、岩性分析、测井储层物性解释等方法来综合分析。笔者在进行准噶尔盆地西北缘某区克下组砾岩储层孔隙结构特征研究时,详细分析了储层粒内孔、粒间孔和微裂缝等特征(图4),从岩心统计分析结果来看,粒间孔和粒间溶孔最发育。由于复模态结构十分复杂,而目前各种方法均具有局限性,因此在工作中应该尽量采用多种方法,综合分析,以达到优势互补的效果,提高砾岩储层微观孔隙结构研究精度和研究水平。

2.6 基于密井网资料隔夹层刻画技术

由于测井资料比较容易获取,而且纵向分辨率较高,因此在储层隔夹层研究时,基于精细的二次精细解释资料来研究隔夹层,就成为隔夹层研究中十分重要的方法之一。辽河、大港等油田发展形成了基于密井网资料的隔夹层刻画技术。主要包括以下两方面:①岩心刻度测井,建立油藏薄互层隔夹层划分标准,有效识别不同类型隔夹层,隔夹层识别精度达到0.5 m。②以精细地层划分对比数据为基础,刻画小层级别隔夹层分布特征。笔者在进行辽河盆地西部凹陷某区于楼油层隔夹层研究时,首先紧密结合井震资料,建立研究区目的层单层级别高精度等时地层格架,在这个等时地层格架内,主要利用测井精细二次解释成果,在单井上识别隔夹层。平面上,特别是井间主要参考沉积微相研究成果和储层综合定量评价成果等,刻画隔夹层空间发育规律(图5),取得了比较好的效果。由于测井精细二次解释成果是本次隔夹层识别的最基础资料,因此一定要确保其具有足够高的精度。一方面对于不同时间和不同测井仪器所获取的测井资料要进行校正,另一方面需要分区块分层位进行测井

解释,充分保证测井解释模型的正确性。同时,单层级高精度等时地层格架也是保证研究成果精度和正确与否的关键,因为一方面地层格架中不同分层界限位置直接影响隔夹层的厚度,另一方面,地层格架的划分精度和级别也直接影响着隔夹层研究的级别,因为当地层划分精度由小层精细至单层时,有很多在地层格架级别为小层时的层内夹层都变成了层间隔层。

2.7 砾岩油藏水淹层解释技术

水淹层测井解释一直是精细油藏描述研究中的难点问题之一(陈欢庆等,2018),对于砾岩油藏而言更是如此。新疆等油田在生产实践中形成了砾岩油藏水淹层测井解释技术,主要包括三方面内容:①砾岩油藏岩性特征曲线构建技术;②砾岩油藏原始含油饱和度恢复技术;③完善对水淹层测井解释机理的认识、定量解释流程,实现了细分岩性、多参数定量水淹层解释,符合率达到80%以上,并建立水淹模式指导开发生产。砾岩储层岩性种类多,主要包括砾岩、砂砾岩、含砾砂岩、砂岩、粉砂岩等。受陆相沉积特征影响,储层非均质性强,岩性在短距离内可以发生很大变化。这一方面使得测井岩性解释难度变大,另一方面使得地下油层水淹规律复杂化,给水淹层的准确解释提出了很大挑战。另外,受复模态孔隙结构等影响,砾岩油藏储层油气水分布特征复杂,加之随着油田开发工作的不断进展,地下油气水分布规律进一步复杂化,含油饱和度解释难度增大。为此,新疆等油田从成因机理方面深刻认识砾岩油藏水淹层形成规律,提高了水淹层解释精度,在实践中应用,取得了较好的效果。

2.8 油田开发过程中储层变化规律研究

随着油田开发工作的不断深入,油藏油气水分布规律会发生一系列变化。同时储层受水敏、盐敏、酸敏、碱敏、速敏等一系列影响,也会发生变化。对于这些变化进行正确认识,可以为开发中后期一些针对性稳油控水措施的实施提供重要参考。为此,吉林、大庆和大港等油田积极开展油田开发过程中储层变化规律研究。主要包括两方面内容:①分层位、分区块建立测井精细解释模型,实现储层物性精细二次解释。②基于储层精细二次解释物性成果,统计分析开发过程中储层物性变化规律。分层位、分区块测井精细二次解释,有效提

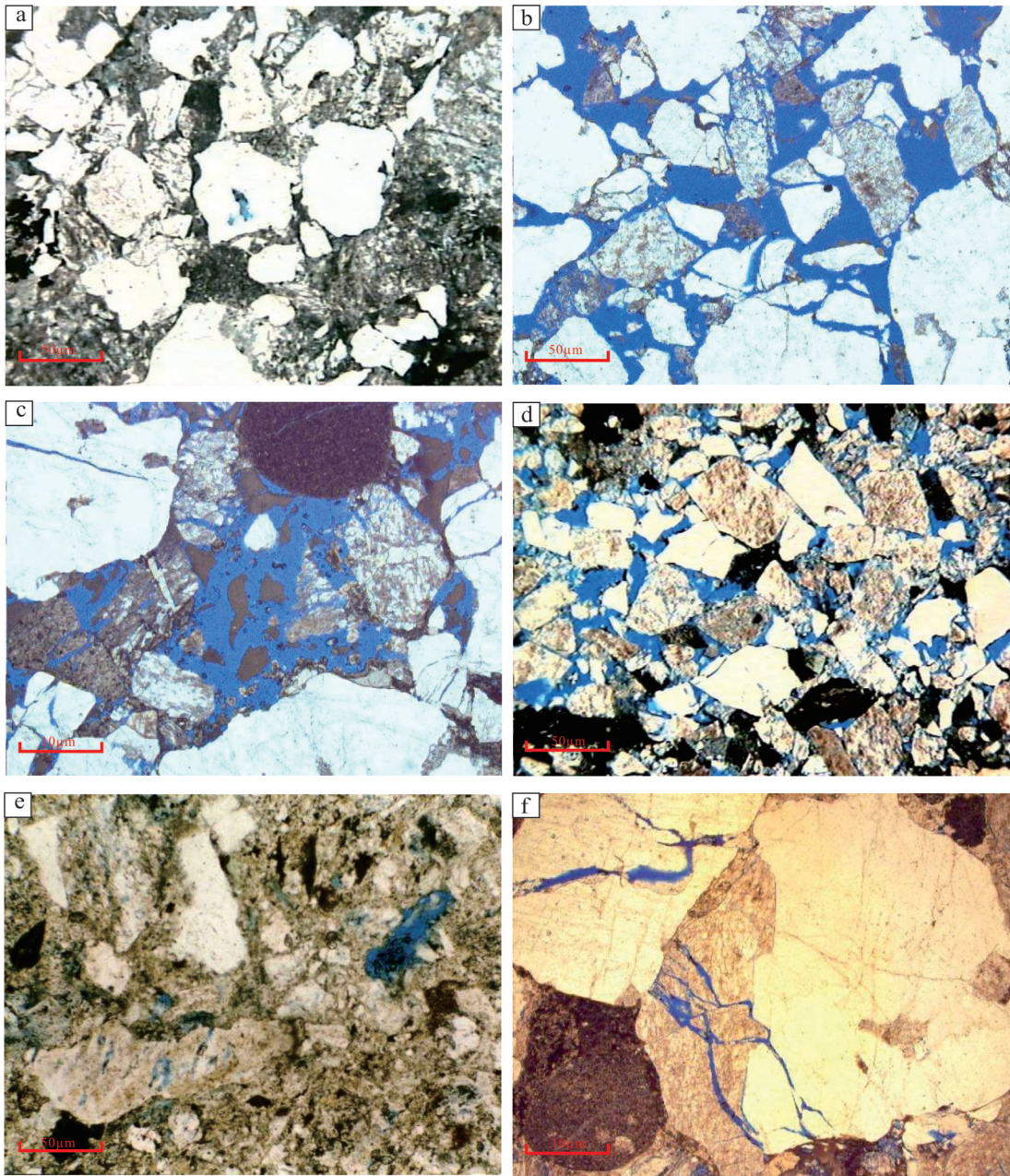


图4 准噶尔盆地西北缘某区克下组砾岩储层孔隙结构特征

a—J6井,砂砾岩,深度:405.32 m,粒内溶孔;b—J7井,砾质不等粒砂岩,深度:404.66 m,剩余粒间孔;c—J3井,砂质砾岩,深度:406.87 m,收缩孔、剩余粒间孔;d—J9井,中粗砂岩,深度:552.69 m,粒间孔、粒间溶孔;e—T6井,含泥质不等粒砂岩,深度:939.50 m,基质中溶孔、粒内溶孔;f—J8井,含灰质砂砾岩,深度:430.73 m,微裂缝

Fig.4 Pore structure of conglomerate reservoir in Lower Karamay Formation in an Area on the northwestern margin of Junggar Basin

a—WellJ6, glutenite,depth:405.32 m, Intragranular dissolved pore; b—WellJ7, pebbled unequal sandstone, depth: 404.66 m, residual intergranular pore; c—WellJ3, sandy conglomerate, depth:406.87 m, shrinkage hole, residual intergranular pore; d—WellJ9, grit,depth: 552.69 m, the intergranular hole, intergranular dissolved pore; e—WellT6, argillaceous unequal sandstone,depth:939.50 m, pores in the matrix, intragranular dissolved pore; f—WellJ8, gray-bearing conglomerate, depth: 430.73 m, microfracture

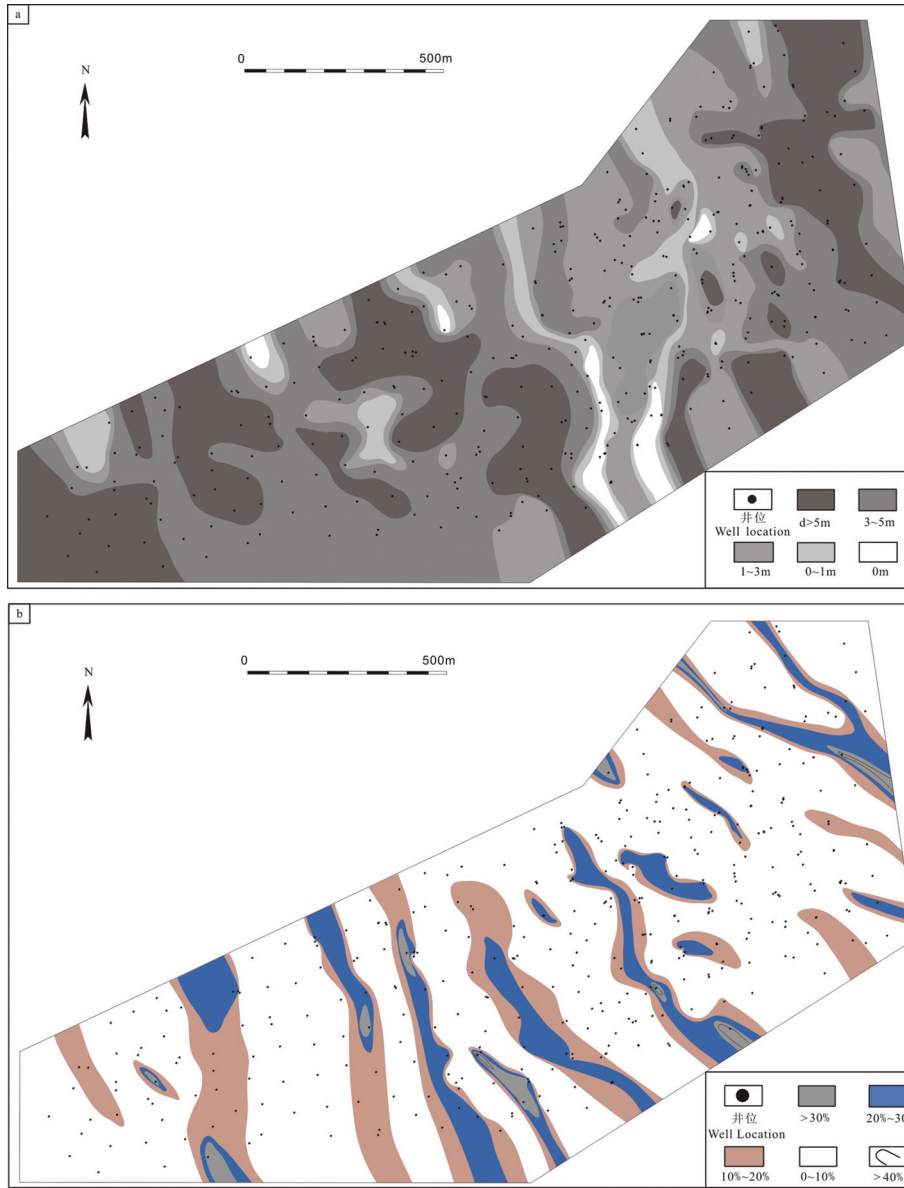


图5 辽河盆地西部凹陷于楼油层隔夹层特征

a—单层y112c-y123a之间隔层发育特征;b—单层y112c中夹层频率特征

Fig.5 Characteristics of interlayer between single layers of Yulou oil-bearing layer in west depression of Liaohe Basin
a—Developed interlayer characteristics between single layer y112c and y123a; b—Sandwich frequency characteristics of single layer y112c

高了测井解释精度。通过对比开发初期、中含水期和高含水期储层孔隙度和渗透率等物性参数发现,随着开发工作不断进展,储层物性大多具有逐渐增大的趋势。Chen Huanqing(2019)通过储层敏感性分析和扫描电镜照片对比等,详细研究了辽河盆地西部凹陷某区于楼油层稠油热采过程中储层变化规律。结果表明,开发过程中,储层发生水敏、速敏、盐敏等一系列变化,物性随之变化。整体上,蒸汽驱导致储层发生酸敏,孔隙度和渗透率降低,物

性变差(表2)。对于开发中后期的油藏而言,储层在开发过程中的变化规律研究尤其重要,需要在精细油藏描述中重点考虑。

2.9 砾岩储层水流优势通道识别技术

水流优势通道的识别是水驱开发油藏高含水期一项十分重要的工作。由于水流优势通道的存在,注入水的无效循环,每年导致全国范围内注水开发油藏数亿元损失。水流优势通道研究目前已成为高含水油藏开发中关注的焦点问题,为此新疆

表2 辽河盆地西部凹陷某区某密闭取心井于楼油层岩心酸敏性实验结果(据Chen Huanqing, 2019)

Table 2 Acid sensitivity test result of a closed coring well in Yulou oil-bearing layer in one area in western depression of Liaohe Basin (after Chen Huanqing, 2019)

岩样 编号	取样深度 /m	层位	孔隙 度/%	空气渗透率 / μm^2	驱替介质盐度 /(mg/L)	碳酸盐含量 /%	酸化液	酸化前渗透率 / μm^2	酸化后渗透率 / μm^2	Ki/Kf
1	951.53	于1	35.95	9.4343	2009.31	1	12%HCl	0.18004	0.05237	0.29088
2	1001.59	于2	35.1	8.0335	2009.31	0.9	12%HCl	0.28528	0.07864	0.27566

注:Ki/Kf=酸化后渗透率/酸化前渗透率。

等油田积极探索,发展了砾岩储层水流优势通道识别技术,主要包括两方面内容:①综合动态特征、PI指数、试井、生产测井、井间示踪剂监测、综合参数法,形成了一套各种优势互补的水流优势通道识别配套技术。②利用三维地质建模技术,采用沉积约束、动态控制的方法,实现水流优势通道三维定量表征。上述生产动态、压力、动态监测等数据的综合应用,实现了水流优势通道的定量表征,对于开发生产实践具有重要参考意义。在水流优势通道识别中,应该以地质基础资料的详细分析为基础,重点关注开发动态资料信息挖掘,优选能够充分体现水流优势通道发育规律的评价参数,实现水流优势通道的定量表征。对于注水开发相关的机理和水流优势通道的成因等,可以进行相关的物理模拟和数值模拟实验,开展深入研究。相关研究者已经在开展探索(龙明等,2017)。

2.10 低渗透储层定量分类评价技术

储层定量分类评价是精细油藏描述中储层研究的核心内容,一直受到研究者的高度关注(喻建等,2019)。辽河、长庆等油田,针对低渗透储层的特点,创新发展了低渗透储层定量分类评价技术,主要包括两方面内容:①通过岩心刻度测井,建立岩矿-测井响应模型,定性识别岩性,多次交会图叠加定量识别岩性;②综合物性、电性、孔隙结构、分

形维数定量等指标,建立三类低渗透储层分类评价标准,为油藏动用界限确定提供技术支撑。笔者在进行鄂尔多斯盆地某区延长组长2油层组储层定量评价研究时,主要利用聚类分析的方法,根据地质成因分析成果,优选孔隙度、渗透率、含油饱和度、突进系数和夹层频率等参数,开展储层综合定量评价,将研究区目的层储层划分为好、中、差等3种类型(表3)。聚类分析方法最大的优点是将地质定性分析和数学定量统计计算方法有机结合,来开展储层综合分类评价。储层评价的方法很多,主要包括地质经验法、权重分析法、层次分析法、模糊数学法、人工神经网络法、分形几何法、变差函数法、聚类分析法、灰色关联法、各种测井方法和地震方法等(陈欢庆等,2015)。无论哪一种方法,最重要是要体现储层最根本的特征。上述方法中地质经验法、模糊数学法和聚类分析等方法在实践中应用较多。

2.11 断块油藏构型建模技术

随着油田开发对于砂体研究精度要求不断提高,储层构型研究逐渐取代沉积微相划分,成为目前储层砂体刻画的主要研究手段。大港、辽河等油田,在生产实践中创新发展,初步形成了断块油藏构型建模技术,主要包括以下两方面内容:①以中高渗断块油藏为例,应用地质、地震、综合成果多条件协同约束断层模拟,模拟与验证同步结合、立体

表3 鄂尔多斯盆地某区延长组长2油层组储层定量评价参数特征统计

Table 3 Statistics of quantitative evaluation parameters of Chang 2 oil-bearing layer in Yanchang Area of Ordos Basin

储层分类	取值	孔隙度/%	渗透率/MD	含油饱和度	突进系数	夹层频率
好	最大值	17.633	18.909	56.374	10.705	0.6
	最小值	12.777	2.211	35.168	1.371	0
	平均值	15.447	9.018	43.531	3.78	0.145
中	最大值	18.778	45.822	52.48	4.574	0.169
	最小值	15.364	18.267	18.267	1.6	0
	平均值	16.725	27.145	27.145	3.038	0.072
差	最大值	19.014	20.899	39.888	9.573	0.588
	最小值	14.785	0.387	29.805	1	0
	平均值	10.187	6.471	13.465	3.538	0.164

定位构造模型,为储层构型建模提供基础;②基于详细的单井沉积学分析和隔夹层识别,创新了三角洲砂体内部构型三维地质建模方法。构型建模技术不但极大地提高了井间砂体预测的精度,而且很大程度上提高了井间隔夹层刻画的精度,目前正在实践中初见成效,正在积极推广应用。

需要特别指出的是,在进行断块油藏构型地质建模时,需要提供一定的工作基础。一方面,地层精细划分的级别要达到单层级别,至少应该是小层级别。另一方面,构造精细解释的精度也要达到要求,一般构造等高线的间距小于5 m,同时断层解释的精度达到低级序断层的级别,即四级或者五级断层。

2.12 多学科剩余油综合表征技术

剩余油综合表征是开发中后期精细油藏描述最主要的内容。陈欢庆等(2018)总结剩余油表征的方法主要包括开发地质学、岩心观察和分析测试、水淹层测井解释、四维地震、各种数理统计学、油藏数值模拟、动态监测分析、油藏工程、试井解释方法等。由于资料掌握状况的差异、各种方法技术自身的局限性以及剩余油分布规律的复杂性等因素的影响,剩余油表征的难度很大,精度目前还不高。为此大庆、大港、新疆等油田在生产实践中探索形成了多学科剩余油综合表征技术。研究中综合地质、各种分析测试、地球物理、动态监测和生产动态等资料,来开展剩余油综合表征,研究结果明显优于只依靠水淹层测井解释或者油藏数值模拟方法进行剩余油表征。笔者在进行辽河盆地西部凹陷某区于楼油层剩余油表征时,充分挖掘地质信息。首先开展密闭取心井剩余油分布规律研究,通过岩心的观察和荧光镜下薄片观察分析含油性(图6)。最后再结合水淹层测井解释的成果刻画剩余油空间分布规律。多种方法综合应用,有效减小了各种剩余油表征方法的局限性影响,提高了剩余油表征的精度。

3 精细油藏描述存在的主要问题

上已述及,精细油藏描述是一项系统工程,涉及内容几乎涵盖了开发地质学所有方面。虽然经过数十年的快速发展,精细油藏描述取得了长足进步,但是受资料基础、研究方法技术局限、研究者能力水平等因素的制约,目前还存在诸多问题。笔者结合自身的科研实践,将目前精细油藏描述存在的

主要问题总结为8方面,分别作以阐述。

3.1 微构造(特别是低级序断层)解释无法满足油田开发需求

微构造也叫沉积微构造或油层微构造,是指在油田总的构造背景上,油层顶部构造起伏形态的微小变化所显示的局部构造特征及不易确定的微小断层的总称(张金亮等,2011)。由于微构造对剩余油具有十分重要的控制作用,因此越来越受到研究者的重视。但是受地质成因的复杂性,地质、地球物理资料的品质和分辨率等诸多因素影响,微构造(特别是低级序断层)的精细解释目前还无法满足油田开发需要。笔者认为,这就需要在成因机制详细分析的基础上,创新地质和地球物理资料的处理和解释方法技术,充分结合挖掘井震资料信息,依靠动态资料验证解释微构造。李兴国(1993)对微构造驱油特征进行了研究,结果显示对于斜面微构造,两个方向为水平驱油,一个方向为向上驱油,另一个方向为向下驱油(图7)。赵亚男等(2019)以惠民凹陷江家店地区为例,对油气盆地小断层识别及发育机理进行了研究。目前冀东、吉林等油田在构造成因机制方面开展了一系列实验,取得了初步成果。通过微构造来研究剩余油的分布,制定挖潜措施,在大庆、辽河、大港和胜利等油田已经见到了很好的效果,需要在探索微构造研究方法技术攻关的同时扩大推广应用力度。

3.2 单砂体边界刻画和井间预测难度很大

前已述及,构造解释和储层预测是精细油藏描述最基本的内容。对于以陆相沉积为主的国内各大油田而言,砂体刻画和预测就成为储层预测的核心问题。受钻井资料横向分辨率和地震数据纵向分辨率等因素制约,以及陆相沉积地层平面上相变快,储层非均质性强等影响,单砂体边界精细刻画和井间准确预测难度很大。包括单砂体规模的确定、砂体边界的刻画、井间砂体预测、井间砂体连通性研究等。结合实践研究和文献调研,笔者认为,砂体的刻画和预测,需要重点关注储层地质成因分析。通过野外露头和现代沉积考察,建立不同沉积相类型地质知识库。充分结合三维地震资料和密井网资料,借助构型表征、地震沉积学和地震叠前反演等手段进行。同时利用分析测试资料、动态监测和生产动态资料等分析砂体井间连通性。笔者

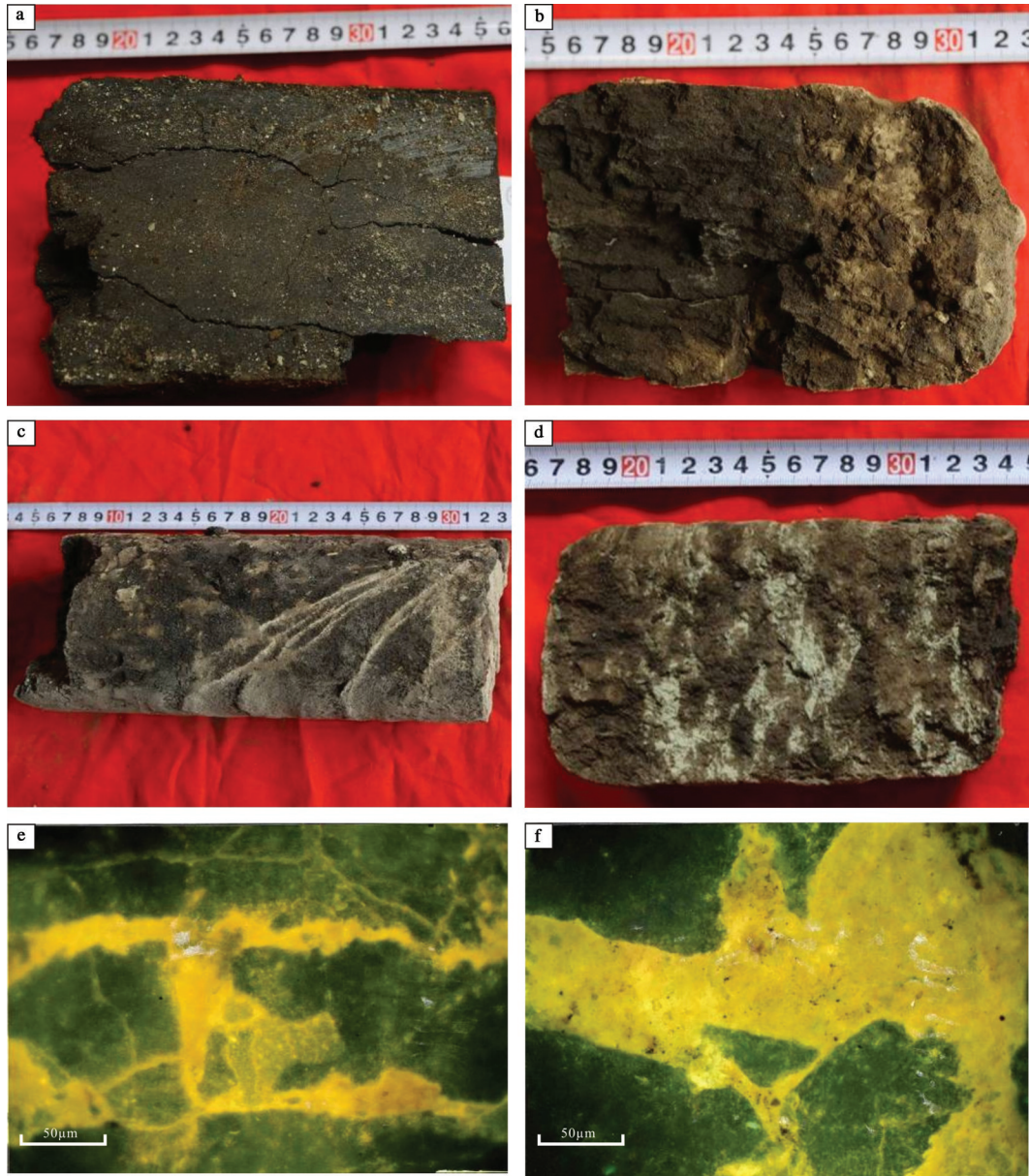


图6 不同含油气盆地岩心和荧光薄片含油性特征

a—辽河盆地西部凹陷某区于楼油层,A2井,灰黑色细砂岩,油砂,深度:990.04~990.19 m;b—辽河盆地西部凹陷某区于楼油层,A10井,灰褐色细砂岩,含油,深度:950.86~951.03 m;c—辽河盆地西部凹陷某区于楼油层,A10井,灰褐色粉砂岩,油浸,深度:941.68~941.88 m;d—辽河盆地西部凹陷某区于楼油层,A261,灰黑色细砂岩,油斑,深度:962.05~962.25 m;e—准噶尔盆地西北缘某区克下组砾岩储层,T6井,灰色砂砾岩,油浸,深度:1076.38 m(荧光薄片);f—准噶尔盆地西北缘某区克下组砾岩储层,T6井,灰色砾状不等粒岩屑砂岩,油浸,深度:1086.38 m(荧光薄片)

Fig.6 Cores of oil-bearing layer of and fluorescent thin sections in different oil-bearing Basins

a—Yulou oil-bearing layer in one area in the Western Depression of Liaohe Basin,WellA2, gray-black fine sandstone, the oil sands, depth: 990.04~990.19 m; b—Yulou oil-bearing layer in one area in the Western Depression of Liaohe Basin,WellA10, gray-brown fine sandstone, oil, depth: 950.86~951.03 m; c—Yulou oil-bearing layer in one area in the west sepression of Liaohe Basin,WellA10, taupe siltstone, oil immersion, depth: 941.68~941.88 m; d—Yulou oil-bearing layer in one area in the west depression of Liaohe Basin,WellA261, gray-black fine sandstone, oil spot, depth: 962.05~962.25 m; e—Conglomerate reservoir of the Lower Karamay Formation in a region in the northwest margin of Junggar Basin, WellT6, grey conglomerate, oil immersion, depth: 1076.38 m(Fluorescence section); f—Conglomerate reservoir of the lower Karamay Formation in a region on the northwest margin of Junggar Basin, WellT6, gray pebbly unequal lithic sandstone, oil immersion, depth: 1086.38 m (Fluorescence section)

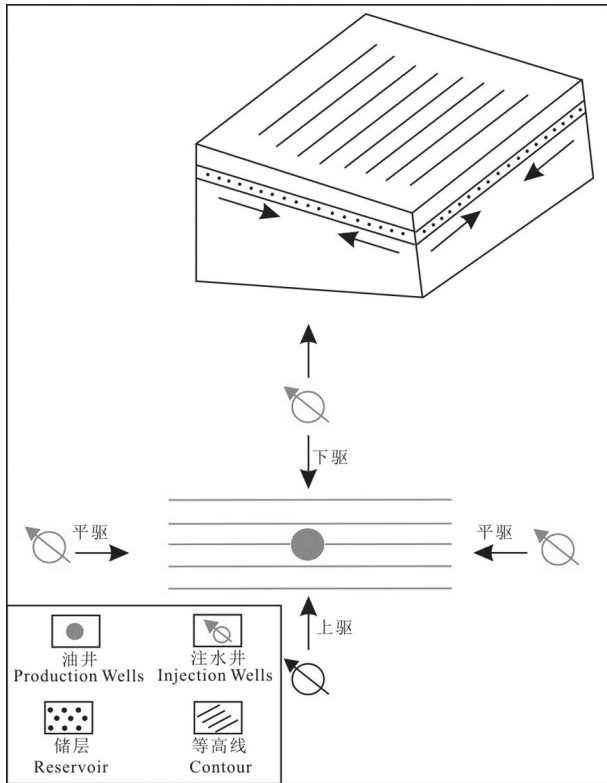


图7 斜面微构造水驱油方向示意图(等高线单位为m)
(据李兴国,1993)

Fig.7 Schematic diagram of water displacement direction of inclined plane micro-structure (contour line unit m)
(after Li Xingguo, 1993)

在进行辽河盆地西部凹陷某区于楼油层单层砂体边界刻画和井间预测时,主要在研究区扇三角洲沉积成因模式指导下,充分挖掘密井网上岩性、电性和精细测井二次解释物性成果等,来开展工作,取得了较好效果(图8)。从本质上来讲,要实现单砂体精细刻画和预测的目标,首先应该对其沉积成因模式有深刻的认识,然后就是井震等各种信息的深度挖掘和充分结合(温立峰等,2010;陈欢庆等,

2018; Hawie et al., 2018, Lageweg et al., 2018)。需要特别指出的是,由于目前多数油田已进入开发中后期,都具有密井网资料,所以许多研究者认为只需要利用密井网资料刻画砂体即可,不需要重视开发地震资料。笔者认为,这种想法是极其错误的。由于多数油田开发目的层储层均为陆相沉积,储层相变快,非均质性强,砂体规模小。密井网一般井距达到百米级,但储层规模在平面上往往小于井距,所以单靠井网资料来刻画储层,会出现很大问题。而开发地震资料不但可以使研究者对储层在宏观上的发育规律有清晰的认识,而且可以为井间储层预测提供有力支撑。同时依靠开发地震中地震属性切片或反演成果,可以刻画纵向上米级厚度储层在空间上的分布规律,这些都是密井网资料无法实现的。因此在开发中后期砂体刻画工作中,研究者应该充分重视地震资料的使用和信息的挖掘。

3.3 裂缝表征与地质建模问题

裂缝表征对于开发中后期油藏,特别是低渗透油藏具有至关重要的意义。但是受研究水平和方法技术的局限,目前世界范围内还没有一种定量方法能实现裂缝的准确表征。分析发现,裂缝的表征和裂缝地质建模存在一系列问题,传统的岩心和镜下薄片观察、测井解释等方法,已经很难满足目前裂缝研究的现实需求,应该充分利用微地震监测、示踪剂和生产动态等资料(Shakiba et al., 2018; Elahi et al., 2018; Stockmeyer et al., 2018)。笔者认为,最根本和最现实的解决方法还是以成因分析为基础,充分利用机理实验、物理模拟和数值模拟手段,建立裂缝三维空间分布模型,表征裂缝。笔者在进行准噶尔盆地西北缘某区克下组砾岩储层裂缝研究时,对镜下薄片和扫描电镜等资料中裂缝发育特征进行了详细分析(图9)。利用镜下薄片和扫描电镜资料可以很直观地获取裂缝

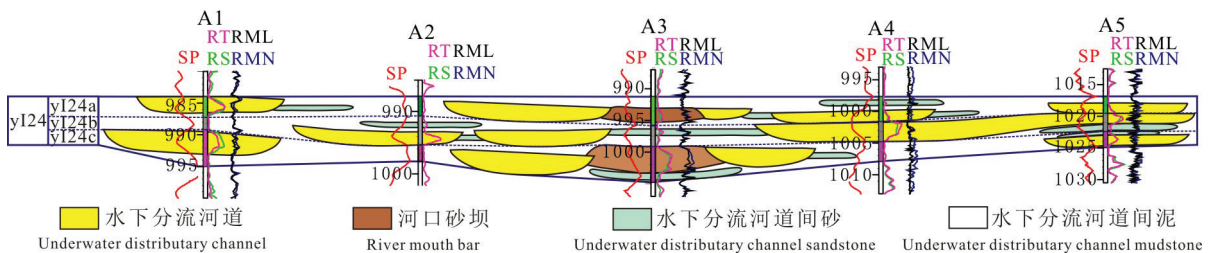


图8 辽河盆地西部凹陷某区于楼油层单层砂体空间发育特征(平行物源方向)

Fig.8 Spatial development characteristics of single sand body in Yulou oil-bearing layer in one area of west depression of Liaohe Basin (parallel source direction)

发育特征信息,但是资料丰富程度有限,而且只是一孔之见,还需要结合地震和测井等资料综合分析。同时,许多裂缝是伴随着不同规模的断裂系统发育的,靠近断层的部位,裂缝的发育程度大大提高。因此在进行裂缝刻画时,应该充分考虑断层精细解释的成果,尽量保证裂缝刻画成果与断裂解释成果在空间上发育规律的一致性。

3.4 碳酸盐岩缝洞型储层定量预测问题

碳酸盐岩缝洞型储层定量预测十分困难也是目前精细油藏描述研究遇到的突出问题(Rahimi et al., 2017;刘遥等,2018)。由于储层埋藏深、地震资料品质受限,目的层段井资料较少,碳酸盐岩缝洞型储层定量预测十分困难。以塔里木盆地碳酸盐岩储层预测为例,油藏埋深较深,一般可以达到甚至超过5000 m,因此地震资料的品质十分有限。而在井资料应用方面,一般能够取到岩心的位置都并非缝洞型储层物性最好的位置,导致利用测井资料刻画储层发育规律时,很难找到适合的岩心资料来标定,井资料的应用也受到限制。笔者认为,要解决碳酸盐岩缝洞型储层定量预测的难题,需要基于地质、钻测井、地震和动态资料,井震联合反演,利用地质建模方法求取有效储集空间参数,预测缝洞型储层。最重要的是在井标定的基础上,充分挖掘地震资料信息,刻画碳酸盐岩缝洞体。同时可以利用数值模拟等方法进行缝洞体刻画和剩余油刻画等研究(赵艳艳等,2019)。笔者曾经对天津蓟县铁岭组灰岩缝洞发育特征进行过详细的野外考察(图10),工作中详细观察了灰岩中缝洞体的发育位置、规模特征以及在空间上的变化特点。通过野外露头的详细考察,可以对碳酸盐岩缝洞型储层地质成因有比较深刻的认识,为储层定量预测奠定坚实基础。

3.5 复杂储层测井解释仍需持续攻关

复杂储层地质条件控制因素多,岩性变化大,非均质性,利用常规的测井解释方法很难准确识别岩性,解释流体。针对复杂砂砾岩储层的基本地质特征,青海油田探索创新复杂储层测井解释技术,初步取得了一定的进展,主要包括以下3方面内容:①利用中子孔隙度 ϕ_N 、密度孔隙度 ϕ_T 可以实现泥质、泥砂质组分的含量区分,解决GR无法区分岩性的问题。②通过有效孔隙度计算与渗透率的修正,实现有效储层的划分。③利用电阻率比值

法建立含油饱和度模型,较好体现储层含油性差异。对于复杂储层测井解释,需要首先开展详细的地质成因分析,认识复杂储层成因机制。同时探索适合具体研究区块和层位的测井方法组合,来解决岩性、物性和流体识别的难题,分层位、分区块建立测井解释模型是目前应用较广的研究思路。笔者在进行辽河盆地西部凹陷某区储层测井物性解释时,分不同的区块和层位来建立测井解释模型,物性解释的精度有很大程度的提高(图11)。对于复杂岩性储层而言,最重要的是对岩性和储集空间的认识,而测井资料是目前最基础和最丰富的资料(钟雨,2017)。所以在进行复杂储层研究时应该充分重视测井资料的解释工作。未来工作的重点应该是分层位、分区块建立各种测井解释模型,提高测井解释精度和符合率。

3.6 水流优势通道识别预测难度大

开发中后期水驱油藏单层突进严重,水流优势通道发育。具体而言,对于陆相沉积储层而言,储层空间上相变快、非均质性强,地下油气水分布规律十分复杂。在实践中,随着开发工作的不断深入,注入水与地下水混合,油气水的分布规律进一步复杂化。而且由于各种开发措施的实施,储层发生一系列敏感性等变化,形成形态各异的水流优势通道,识别预测难度很大。笔者认为,要实现水流优势通道识别预测的目标,需要充分考虑水流优势通道成因机制,对比优选主要成因控制静态和动态因素,优选相关的指标参数,利用特征的数理统计学方法,结合沉积微相、储层非均质性、物性以及矿场资料(生产、示踪剂、产液剖面、吸水剖面)分析,评价和判别优势通道的发育位置和分布规律。水流优势通道的存在,极大地降低了开发中后期油田驱油效率,造成了注水开发油田每年数十亿元注入水无效循环,提高了油田开发成本。未来水流优势通道的刻画和封堵,必将成为精细油藏描述研究中最重要瓶颈问题之一,应该引起众多研究者的充分重视。

3.7 剩余油表征方法单一难以满足生产需要

目前剩余油表征方法主要采用水淹层测井解释和油藏数值模拟等,比较单一,研究成果难以满足生产实践需要。正确的做法应该是需要充分挖掘地质、地球物理、分析测试、动态监测和生产动态等资料信息,利用开发地质学、岩心观察和分析测

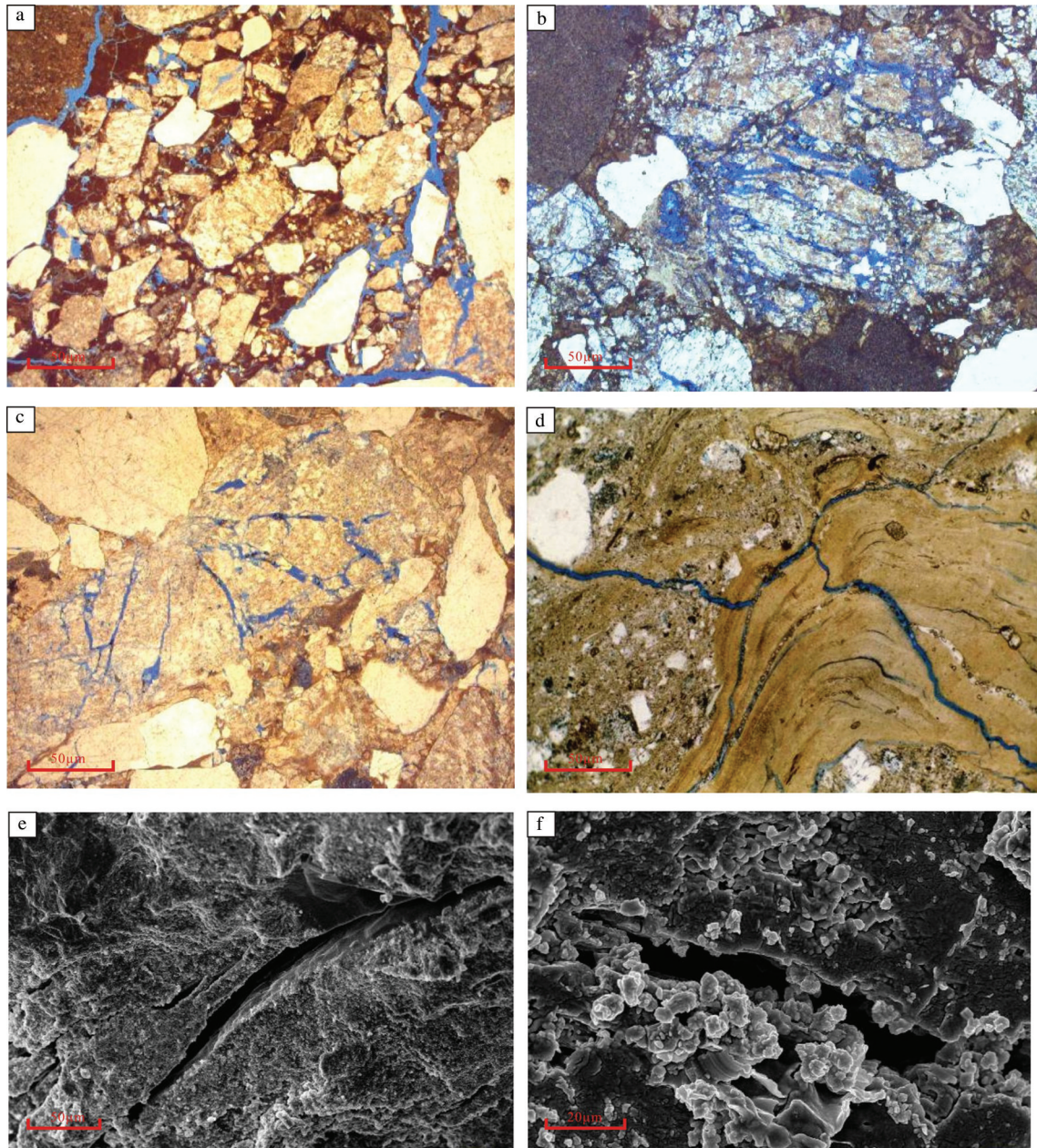


图9 准噶尔盆地西北缘某区克下组砾岩储层裂缝镜下薄片和扫描电镜特征

a—J6井,深度:408.09 m,含泥质砾质砂岩,微裂缝,剩余粒间孔,粒内溶孔;b—J7井,深度:429.07 m,含菱铁矿砾质不等粒砂岩,微裂缝;c—J8井,深度:421.43 m,含灰质砾岩,微裂缝;d—T6井,深度:938.76 m,单片光,含泥质不等粒砂岩,微裂缝;e—J3井,微裂缝,深度:396.09 m; f—J3井,粒间缝与油浸,深度:400.80 m

Fig.9 Thin sections and scanning electron microscope of fractures in conglomerate reservoir of the Lower Karamay Formation in an area on the northwest margin of Junggar Basin

a—WellJ6, depth: 408.09 m, piliaceous pebbled sandstone, microfracture, residual intergranular pore, intragranular dissolved pore; b—WellJ7, depth: 429.07 m, siderite-bearing pebbled sandstone, microfracture; c—WellJ8, depth: 421.43 m, gray-bearing conglomerate, microfracture; d—WellT6, depth: 938.76 m, single light, argillaceous unequal sandstone, microfracture; e—WellJ3, microfracture, depth: 396.09 m; f—WellJ3, Intergranular seam with oil immersion, depth: 400.80 m

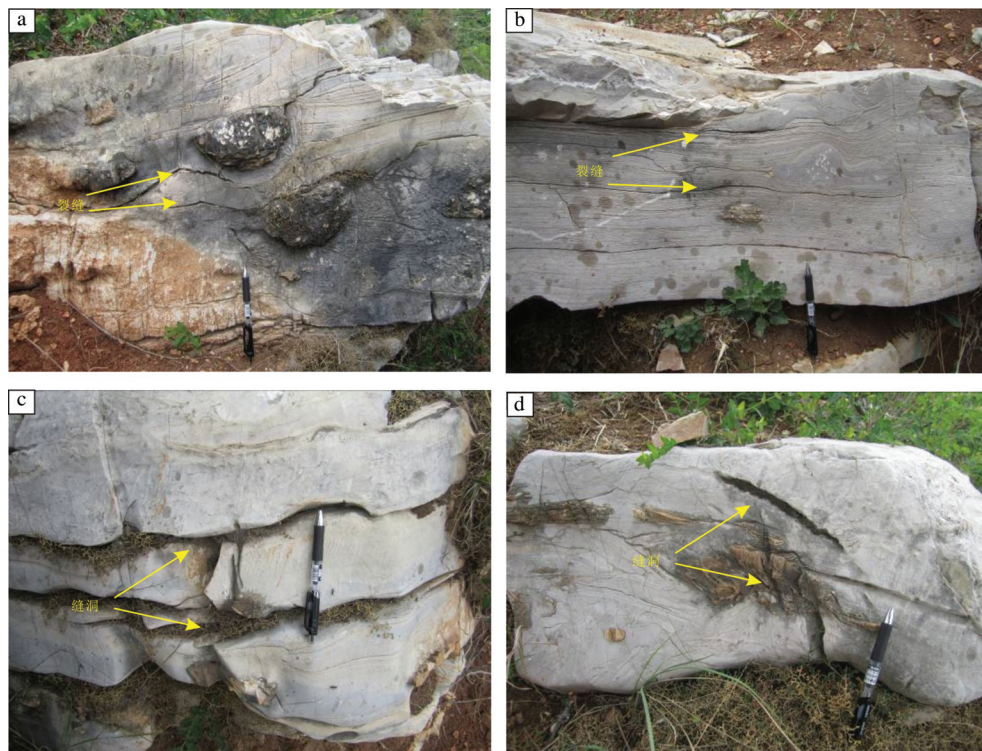


图10 天津蓟县铁岭组灰岩缝洞野外露头特征

Fig.10 Outcrop of fracture cave in limestone of Tieling Formation, Jixian County, Tianjin

试、水淹层测井解释、各种数理统计学、油藏数值模拟、动态监测分析、油藏工程、试井解释方法等,描述剩余油分布特征,为剩余油挖潜提供支持。图12展示的是笔者在研究辽河盆地西部凹陷某区于楼油层剩余油分布特征时,根据测井精细水淹层解释的成果,绘制的不同单井单层油水分布特征饼状图。从图中可以很直观地看出水淹层在空间上的分布位置和厚度等信息,为后续稠油热采开发方式转换提供依据。剩余油的形成是地质、油藏、工程等多方面因素共同作用的结果,因此在剩余油表征时也应该综合考虑这些多种因素。利用多种资料和方法,充分发挥不同资料和方法的优势,相互印证,最终实现剩余油表征的目标。

3.8 精细油藏描述成果管理现状无法满足油描工作需求

精细油藏描述研究的综合性和信息化水平不断提高,需要建立统一的工作平台,但目前精细油藏描述成果管理现状无法满足工作需求。目前在开展精细油藏描述研究时,地质、地球物理、开发动态、方案设计等不同研究方向的研究者基本都是各自利用专业的软件独立开展工作,最多是在编制方

案时大家互相交流,确定最终的开发或者调整措施。这样工作的结果缺点很明显。不但科学性往往得不到保证,同时工作效率很低。如果能够建立一个协同工作平台,各种基础数据和研究成果都能在平台上共享,大家在工作中可以实时交流。这样在提高工作效率的同时可以及时发现问题并解决,减少返工几率。同时不同研究者可以错峰使用各种专业软件,有效提高了软件使用效率,降低了软件购置成本。因此笔者认为需要大力推进精细油藏描述成果管理平台建设,不断提高精细油藏描述成果管理信息化水平,提升精细油藏描述工作效率。对于中国石油而言,大港、大庆、辽河、长庆和新疆等油田在精细油藏描述成果管理平台建设方面已经初见成效,其他油田也在积极推进。精细油藏描述成果管理平台建设可以实现不同时期精细油藏描述成果规范化管理,同时为成果的推广应用提供坚实的数字化基础。

4 精细油藏描述发展方向

4.1 加大地震数据应用力度

构造精细解释方面,精细油藏描述研究中对于

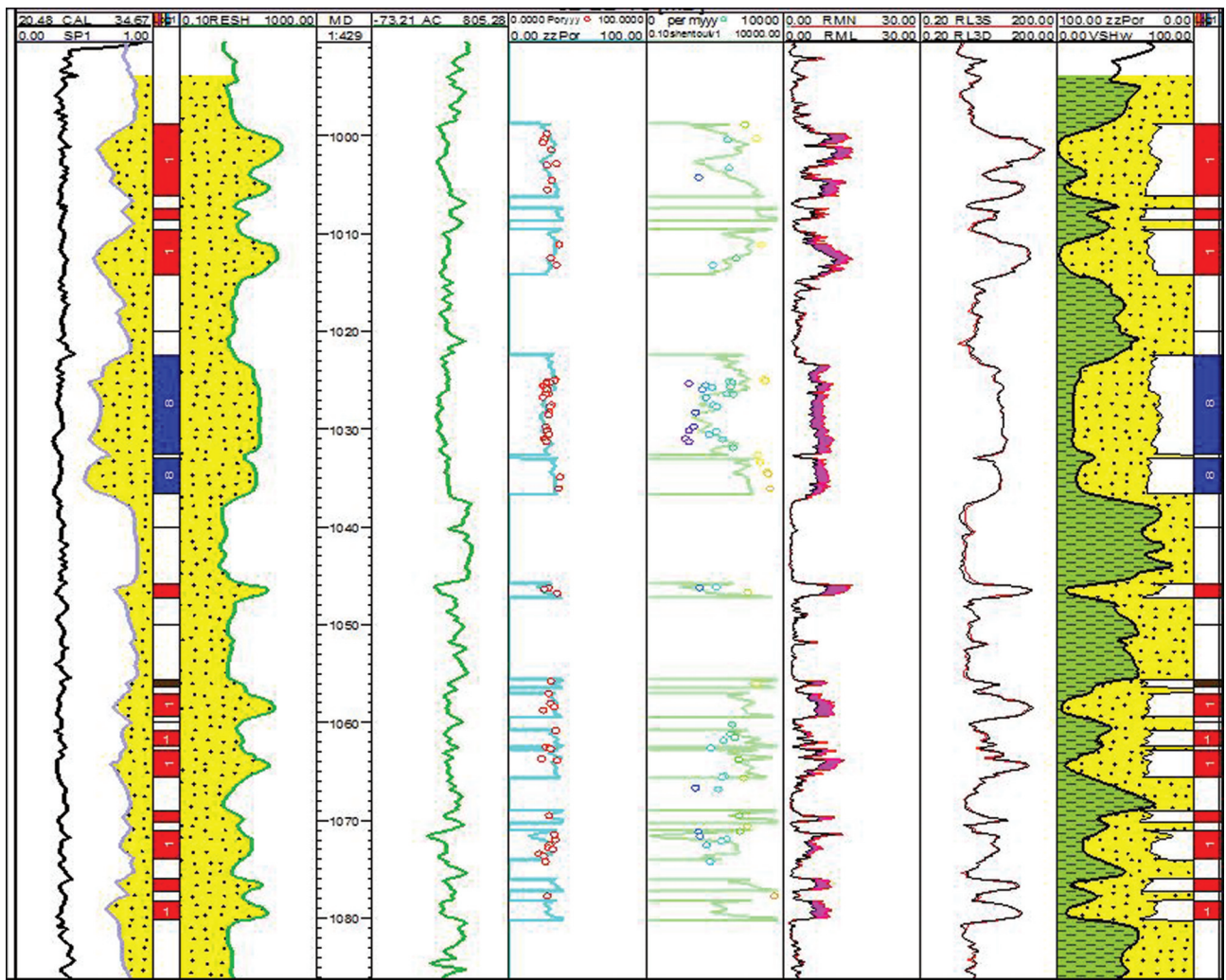


图 11 辽河盆地西部凹陷某区于楼油层测井精细解释成果图

(蓝颜色为测井解释水层,红色为测井解释油层,黄色为测井解释砂岩,绿色为测井解释泥岩)

Fig.11 Fine logging interpretation of Yulou oil-bearing layer in one area of west depression of Liaohe Basin (blue-water layer interpreted by logging, red-oil layer interpreted by logging, yellow-sandstone interpreted by logging, green-mudstone interpreted by logging)

开发中后期,要求构造等值线间距小于5 m,同时断层需要解释至四级甚至五级等低级序断层,这就需要在工作中进一步加大开发地震资料的应用力度,不断提高构造精细解释准确性和精度。砂体预测方面,目前在精细油藏描述中,应用最多的还是密井网资料,地震资料应用的十分有限。虽然有些开发区块井距可以达到80 m,甚至更小,但是井间砂体预测精度和准确度还是很有限。这种问题的存在极大地制约了砂体井间连通性研究的准确度,不利于开发中后期各种增产措施的实施。同时,地震资料,特别是四维地震资料的应用,还可以对开发过程中剩余油变化规律等进行检测,进一步使得剩余油表征的方法多元化。虽然目前利用四维地震

检测剩余油还存在成本过高、准确性有限等各种问题,但这至少是未来一个很有潜力的发展方向。总结一下,笔者认为加大地震数据在精细油藏描述研究中的应用力度,具体包括构造精细解释、砂体准确刻画和剩余油表征等。一方面需要探索地震数据采集处理和解释方法技术的改进创新,提高地震数据品质和解释效果,另一方面将地震资料与密井网资料紧密结合,重点关注地震叠前反演和地震沉积学等应用。

4.2 重视基础分析测试实验、物理模拟和数值模拟方法应用

各种基础分析测试和物理模拟以及数值模拟实验一直在精细油藏描述中发挥着十分重要的作

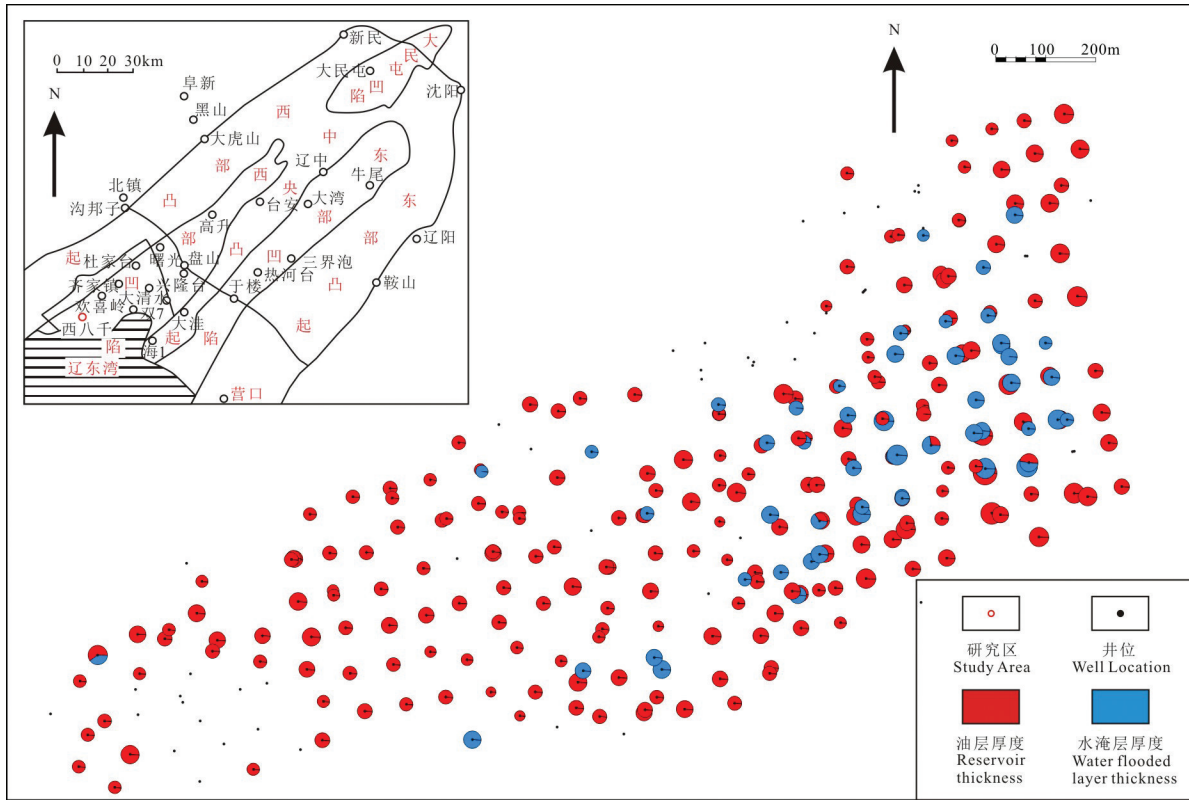


图 12 辽河盆地西部凹陷某区于楼油层单层y111a测井解释水淹层分布特征

Fig.12 Distribution of water-flooded layers interpreted by logging of layer y111a in Yulou oil-bearing layer in one area of west depression of Liaohe Basin

用,对于认识构造(肖凡等,2019)、储层以及油气水分布规律等是必不可少的手段和有效工具。主要包括岩心CT扫描、恒速压汞实验、断层成因机理物理模拟、水槽实验、应力场数值模拟等,充分认识油藏构造、储层和流体等成因机制。具体而言,例如岩心CT扫描对于岩石微观孔隙结构的直观认识(图13)(陈欢庆等,2016),恒速压汞实验对于低渗透储层微观孔喉特征的反映,断层成因机理物理模拟实验对不同级次断层形成过程的再现,水槽实验对于不同沉积相类型沉积过程的等比例实现,应力场数值模拟对于断裂体系形成过程中应力方向与岩石破裂规律关系的研究等。

4.3 优化地质建模算法、探索多点地质统计学等建模新方法并重视模型更新验证

精细油藏描述的最终成果就是建立定量的地质模型,作为油藏模拟和油藏工程,采油工艺等研究的基础(裘亦楠等,1996)。目前应用最广泛的还是基于变差函数拟合的地质建模方法,变差函数主要基于两点拟合不同沉积相类型在空间上的发育

特点。而空间上不同的沉积相特征很可能表现为相同或者类似的变差函数,所以变差函数的局限性十分明显。笔者认为,未来多点地质统计学可以很好地解决这个问题,是地质建模的重要发展方向。多点地质统计学主要利用训练图像来进行空间拟合,建立地质模型。多点地质统计学建模方法的提出始于20世纪90年代。该方法综合了基于像元与基于目标方法的优点,利用训练图像描述空间各点之间的相互关系,显示了很好的应用前景。多点地质统计学是相对于传统的两点地质统计学而言的。多点地质统计学以训练图像为基本工具,着重表达空间中多点之间的相关性,能有效克服传统地质统计学在描述空间几何形态复杂地质体方面的不足。训练图像最大的优势是充分体现了不同沉积微相类型在空间上的定量分布模式,包括不同微相在空间上的叠置样式、规模、不同位置的变化等信息。使得研究者从基于两点的沉积微相平面分布特征把握变为对沉积微相发育特征的三维分布规律认识,认识的程度更加深刻准确(图14)。传统

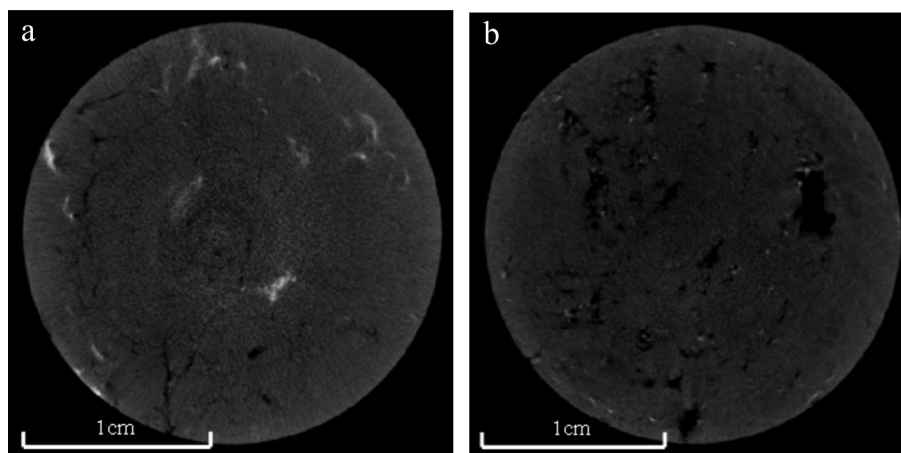


图13 松辽盆地某地区营城组一段不同岩石类型孔隙发育CT扫描特征(据陈欢庆等,2016)

a—绿色流纹质凝灰岩,XS21井,营一段,孔隙度9.2%,密度 2.39 g/cm^3 ,渗透率0.437 MD,孔隙较发育;b—绿灰色流纹岩;XS14井,营一段,孔隙度14.3%,密度 2.26 g/cm^3 ,渗透率1.097 MD,孔隙发育

Fig.13 CT scanning of developed pores in different kinds of rocks of the No.1 Member of Yingcheng Formation in one area in Songliao Basin(after Chen Huanqing et al., 2016)

a—Green rhyolite tuff,Well XS21,one member of Yingcheng Formation, porosity9.2%, density 2.39 g/cm^3 , permeability 0.437 MD, pore development;
b—Greenish-gray rhyolite,Well XS14, one member of Yingcheng Formation, porosity14.3%, density 2.26 g/cm^3 , permeability 1.097 MD, pore development

的地质建模方法中变差函数最大的特点是忠于井点等数据,而多点地质统计学建模中训练图像并不完全忠于井点数据,它只是井数据统计规律的体现。训练图像建立过程中可以充分加入研究者的地质思维,而这在变差函数分析过程中基本是无法实现的。具体而言,精细油藏描述中地质建模研究时,需要根据不同的沉积储层特征不断改进和优化地质建模算法,探索应用多点地质统计学建模技术,根据新增的地质和开发数据,验证和及时更新地质模型,提高地质模型在开发方案编制等生产实践中应用水平。

4.4 推动剩余油描述从定性向量化方向发展

剩余油描述是精细油藏描述十分重要的研究内容,但是目前研究方法比较单一,而且还主要以定性和半定量为主,需要加强量化剩余油描述方法的创新和探索,不断提高剩余油量化研究水平。林承焰(2000)以孤岛油田中一区 and 孤东油田七区中馆陶组河流砂沉积油藏为例,总结出一套剩余油形成与分布的理论、方法和技术,对剩余油挖潜目标进行综合评价和预测,提出挖潜措施及建议,为剩余油挖潜和三次采油提供科学依据,并在该油藏及其他同类油藏中进行推广应用和验证(图15)。笔者认为,应该充分重视地质、测井、岩心、录井、地震、分析测试、动态监测和生产动态等资料信

息挖掘。利用地质综合分析法、密闭取心井和检查井资料分析、水淹层测井解释和判断、油藏数值模拟、动态监测分析、油藏工程分析等方法实现剩余油定量表征。在分析测试资料应用方面,需要不断加大密闭取心井剩余油测试研究。在测井水淹层解释方面,应该注重分区块、分层位建立测井解释模型,不断提高测井解释的精度。同时应该不断加大C/O测井等针对剩余油研究的新式测井方法技术的攻关,在提高研究精度和准确率的同时,不断降低工作成本。在四维地震资料应用方面,应该充分借鉴国外的成功经验,例如英国北海等地区的成熟做法,结合国内不同类型油藏特征,使得四维地震技术能够在国内成功落地,推广应用。油藏数值模拟方面,应该不断优化数值模拟计算方法,利用计算机技术不断发展进步的机遇,充分保留地质建模的信息,提高数值模拟拟合精度。同时应该扩大试井解释方法等在剩余油研究方面的应用,重点提高数据测量基础的准确性。

4.5 攻关非常规油藏精细油藏描述相关问题

非常规油气是指用传统技术无法获得自然工业产量、需用新技术改善储层渗透率或流体黏度等才能经济开采的连续型油气资源(邹才能等,2019)(表4)。近年来,油气勘探发现的资源品味越来越差,非常规油气逐渐成为油气新发现的主体(赵淑

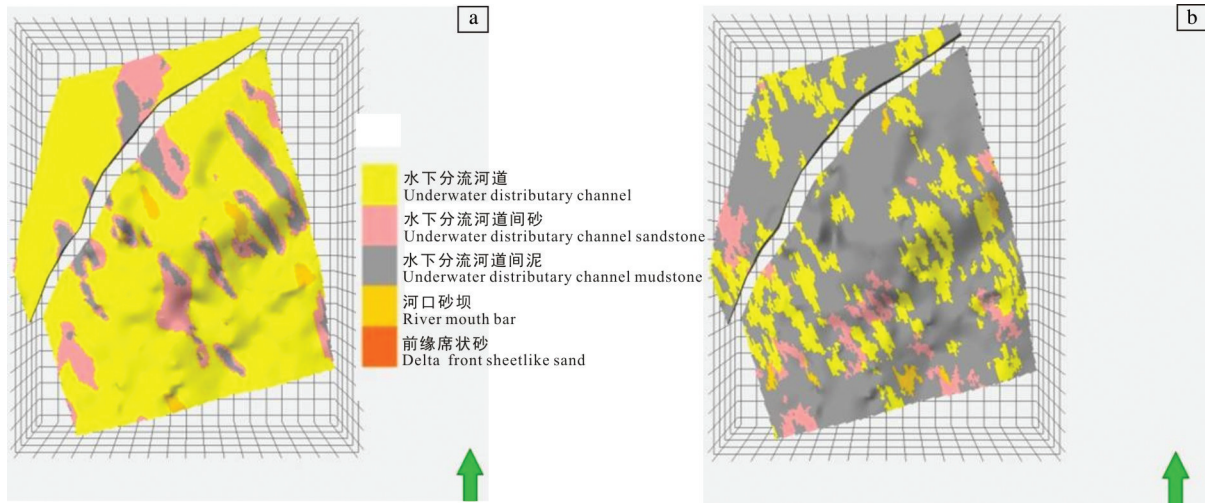


图 14 辽河盆地西部凹陷某区多点地质统计学建模结果与传统的序贯指示模拟结果对比图
a—单层 y112a 多点地质统计学建模结果; b—单层 y112a 传统的序贯指示模拟结果

Fig.14 Comparison of multi-point geostatistics modeling with traditional sequential indicator simulation in one area of west depression of Liaohe Basin

a—multi-point geostatistical modeling of single layer y112a; b—traditional sequential instruction simulation modelings of single layer y112a

震等, 2019)。基于这种现状, 非常规油藏必将成为未来油气开发的主要目标对象(邹才能等, 2011; Kulga, 2018; Behmanesh et al., 2018; Sangnimnuan et al., 2018)。由于非常规油藏从地质特征、开发措施等方面与目前正在开发的常规油藏均有很大的不同, 因此精细油藏描述应该针对非常规油藏的特点, 开展相关的方法技术攻关。具体而言, 就是以裂缝表征为核心, 以室内实验和矿场试验为基础, 攻关致密油、碳酸盐岩、火山岩、变质岩等油藏注气(注聚)等开发新技术新方法。同时制定相应的特色精细油

藏描述技术规范, 为该类油藏效益开发提供支持。

4.6 探索大数据、人工智能等新方法新技术应用

石油工业从勘探到开发, 始终离不开数据的支撑, 特别是精细油藏描述工作, 更是积累了海量数据。如何在精细油藏描述中管理好、应用好这些数据, 必将成为精细油藏描述未来十分重要的发展方向之一。目前国内许多油田也在开展大数据技术在精细油藏描述研究中应用的探索。例如新疆油田探索利用大数据技术进行砾岩储层构型自动化识别, 在提高研究精度的同时也提高了工作效率。张以明

表 4 常规-非常规油气资源形成分布与关键技术表(据邹才能等, 2011; Kulga, 2018; Behmanesh et al., 2018; Sangnimnuan et al., 2018)

Table 4 Formation and distribution of conventional and unconventional oil and gas resources and key technologies (after Zou et al., 2011; Kulga, 2018; Behmanesh et al., 2018; Sangnimnuan et al., 2018)

资源类型	分布特征	聚集类型	聚集形态	聚集机理	聚集方式	资源比例	关键技术	实例
常规油气	单体型	构造油气藏		远源浮力	常规圈闭	20%±	二维或三维地震	松辽盆地长垣白垩系
	集群型	岩性、地层油气藏					直井或水平井	准噶尔盆地西北缘二叠系-侏罗系
非常规油气	连续型	油砂+重油		近源压差	非常规甜点	80%±	三维地震	辽河西斜坡新近系
		致密油					微地震监测	鄂尔多斯盆地三叠系
		页岩油					水平井体积压裂	鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系
		致密气					“工厂化”开采	四川盆地寒武系-志留系
		煤层气+页岩气					源内滞留	
		页岩气						

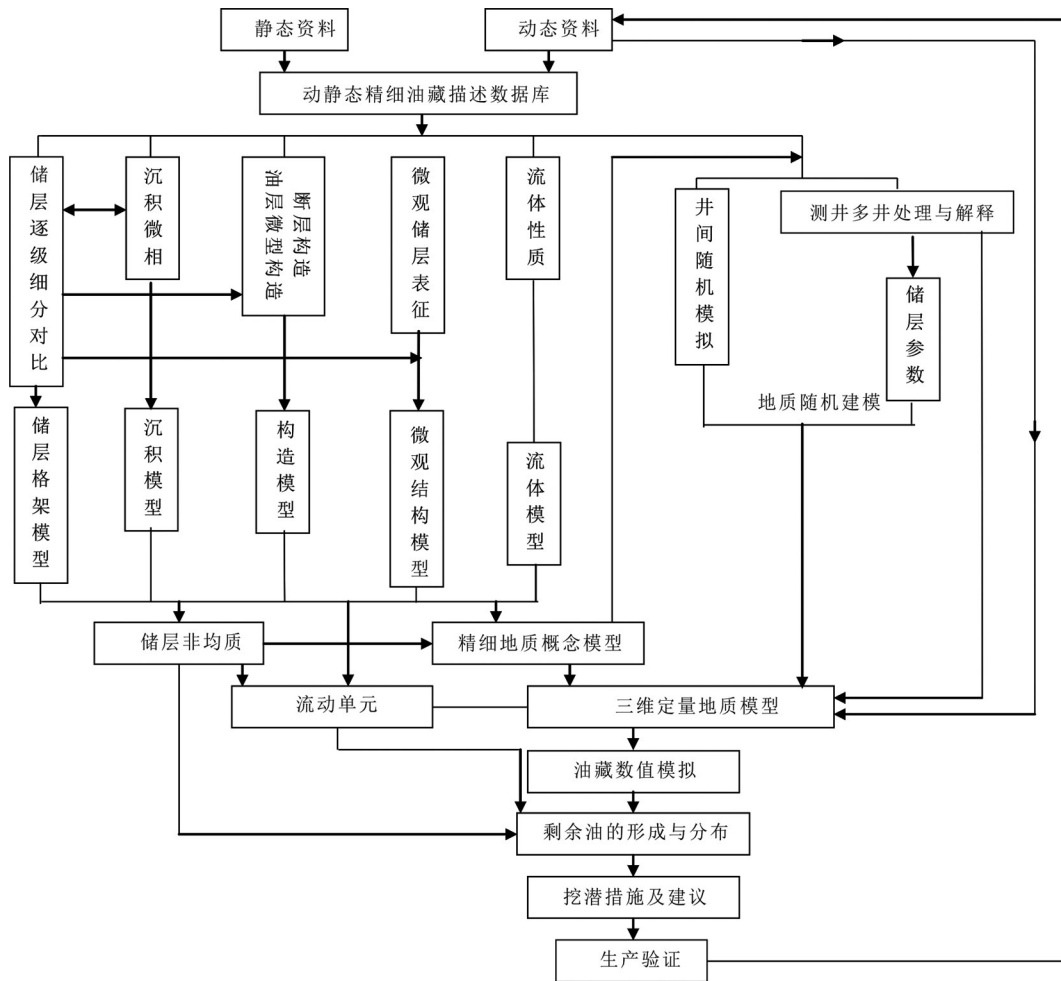


图15 剩余油形成与分布研究流程(据林承焰,2000)

Fig.15 Research procedure for formation and distribution of residual oil(after Lin Chengyan, 2000)

(2018)以华北油田为例,对油气生产大数据分析与应用进行了系统分析。人工智能是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新的技术科学。人工智能技术在各个行业都有很广阔的应用前景,在精细油藏描述研究中也不例外。通过人工智能技术的应用,可以为构造的精细解释、砂体的准确预测、剩余油表征等精细油藏描述核心内容提供自动化、智能化的有效工具。笔者认为,未来应该探索大数据、人工智能等新方法新技术在精细油藏描述中的应用,将这项工作作为精细油藏描述十分重要的发展方向来重点探索攻关。具体而言,就是基于精细油藏描述成果管理平台,利用大数据和人工智能等统计分析和自动学习的优势,充分挖掘地质、地球物理和动态监测以及生产动态资料之间的关系和规律,为低级序断裂体系空间分布规律刻画、井间砂体预测、井间砂体连通

性分析、剩余油表征等提供有效工具。

5 结论

(1)国内精细油藏描述研究进展主要体现在基于开发地震技术的复杂构造精细研究、潜山复杂性识别技术、井震结合储层精细预测技术、特低渗透储层裂缝表征技术、砾岩储层微观孔隙结构分类研究、基于密井网资料隔夹层刻画技术、砾岩油藏水淹层解释技术、油田开发过程中储层变化规律研究、砾岩储层水流优势通道识别技术、低渗透储层定量分类评价技术、断块油藏构型建模技术、多学科剩余油综合表征技术等12个方面。在构造解释、储层预测和剩余油表征等方面取得较大进步,形成了一整套特色方法技术并生产应用。

(2)目前精细油藏描述研究中存在8方面问题,主要包括微构造解释无法满足油田开发需求、单砂

体边界刻画和井间预测难度很大、裂缝表征存在一系列问题、碳酸盐岩缝洞型储层定量预测十分困难、复杂储层测井解释仍需持续攻关、水流优势通道识别预测难度大、剩余油表征方法单一难以满足生产需要、精细油藏描述成果管理现状无法满足油藏工作需求。总体上研究成果的准确度和精度与生产实践需求还有差距,一些关键问题研究综合性不高,成果管理等集成化和信息化水平不高。各油田由于面临的问题不同,研究基础不同,研究水平差异大。

(3)未来精细油藏描述有6方面的发展趋势和方向,主要包括加大地震数据在精细油藏描述研究中应用力度,充分重视各种基础分析测试实验、物理模拟和数值模拟方法在精细油藏描述中的应用,需要优化地质建模算法、探索多点地质统计学等建模新方法、重视地质模型更新验证,推动剩余油描述从定性向量化方向发展,攻关非常规油藏精细油藏描述相关问题,探索大数据、人工智能等新方法新技术在精细油藏描述中的应用。研究资料基础主要是地质、地球物理和开发动态等紧密结合,方法上地质、油藏和工程等一体化综合研究,研究对象需要探索非常规油藏精细油藏描述特色方法和技术。

致谢:项目研究过程中,特别感谢中国石油勘探与生产分公司副总地质师胡海燕教授、吴洪彪副处长、曹晨高级主管和大庆、辽河、新疆、长庆、吉林、大港、冀东、华北、青海、玉门、吐哈、塔里木、南方等油田公司相关领导和专家提供的指导和帮助!

References

- Aleardi M, Ciabbarri F, Calabro R. 2018. Two-stage and single-stage seismic-petrophysical inversions applied in the Nile Delta[J]. *The Leading Edge*, 7:510-518.
- Alkawai W H, Mukerji T, Scheirer A H, Stephan A. Graham. 2018. Combining seismic reservoir characterization workflows with basin modeling in the deepwater Gulf of Mexico Mississippi Canyon area[J]. *AAPG Bulletin*, 102(4): 629-652.
- Behmanesh H, Hamdi H, Clarkson C R. 2018. Reservoir and fluid characterization of a tight gas condensate well in the Montney Formation using recombination of separator samples and black oil history matching[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 49: 227-240.
- Chen Huanqing. 2019. *Fine Reservoir Description*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- Chen Huanqing. 2019. Influences of heavy oil thermal recovery on reservoir properties and countermeasures of Yulou oil bearing sets in Liaohe Basin in China[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 12: 363.
- Chen Huanqing, Ding Chao, Du Yijing, Wang Jue. 2015. Advances of reservoir evaluation researches[J]. *Advances of Reservoir Evaluation Researches*, 34(5): 66-74(in Chinese with English abstract).
- Chen Huanqing, Hu Haiyan, Wu Hongbiao, Cao Chen, Sui Yuhao. 2018. Advances in remaining oil researches of fine reservoir description[J]. *Science Technology and Engineering*, 18(29): 140-153(in Chinese with English abstract).
- Chen Huanqing, Shi Chengfang, Cao Chen. 2016. Problems with the fine description of reservoirs[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 38(5): 569-576(in Chinese with English abstract).
- Chen Huanqing, Shi Chengfang, Hu Haiyan, Wu Hongbiao, Cao Chen. 2018. Advances in fine description of reservoir in high water-cut oilfield[J]. *Oil & Gas Geology*, 39(6): 1311-1322(in Chinese with English abstract).
- Chen Huanqing, Wang Jue, Hu Haiyan, Du Yijing, Fan Tao. 2018. Depositional characteristics of fan delta deposits and their impacts to reservoir development—An example from Liaohe Basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 38(5):156-170(in Chinese with English abstract).
- Correia G G, Schiozr D J. 2016. Reservoir characterization using electrofacies analysis in the sandstone reservoir of the Norne Field (offshore Norway) [J]. *Petroleum Geoscience*, doi:10.1144/petgeo2015-056.
- Du Qinglong, Song Baoquan, Zhu Lihong, Jiang Yan, Zhao Guozhong. 2019. Challenges and countermeasures of the waterflooding development for Lasaxing Oilfields during extra-high watercut period[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 38(5): 189-194(in Chinese with English abstract).
- Elahi S H, Jafarpour B. 2018. Dynamic fracture characterization from tracer-test and flow-rate data with ensemble kalman filter[J]. *SPE Journal*, 1-18.
- Hawie N, Covault J A, Dunlap D, Sylvester Z. 2018. Slope-fan depositional architecture from high-resolution forward stratigraphic models[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 91:576-585.
- Jumat N, Shalaby M R, Islam M. A. 2017. Integrated reservoir characterization of the Paleocene Farewell Formation, Taranaki Basin, New Zealand, using petrophysical and petrographical analyses[J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, <https://doi.org/10.1007/s13202-017-0420-5>.
- Kulga B., Artun E., Ertekin T. 2018. Characterization of tight-gas sand reservoirs from horizontal-well performance data using an inverse neural network[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 8: 1-19.
- Lageweg W I van de, Feldman H. 2018. Process-based modelling of

- morphodynamics and bar architecture in confined basins with fluvial and tidal currents[J]. *Marine Geology*, 398:35–47.
- Li Qingchang, Wu Mang, Zhao Lichun, Hu Futang, Tang Chengfeng. 1997. *Conglomerate Oilfield Development*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- Li Yang. 2011. Characterization of residual oil accumulation area in terrestrial water drive reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- Li Yang, Liu Jianmin. 2007. *Reservoir Development Geology*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- Li Xingguo. 1993. A comment on the interpretation of mini-structure in a reservoir[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 20(1): 82–90(in Chinese with English abstract).
- Liang Baosheng, Khan S, Puspita S D. 2017. An integrated modeling work flow with hydraulic fracturing, reservoir simulation, and uncertainty analysis for unconventional-reservoir development[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, SPE187963:1–14.
- Liang Wenfu. 2019. Study on potential tapping of high efficiency wells by well-seismic combination in Daqing Changyuan oilfield[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition)*, 34(5): 63–68(in Chinese with English abstract).
- Lin Chengyan. 2000. *Remain-oil Formation and Distribution*[M]. Shandong Dongying: Petroleum University Press(in Chinese).
- Liu Xingdong. 2017. Fine seismic processing and interpreting techniques for the thin and narrow sandbodies in lithologic oil reservoirs[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 36(4): 137–141(in Chinese with English abstract).
- Liu Kouqi, Ostadhassan M, Zou Jie, Gentzis T, Rezaee R, Bubach B, Carvajal-Ortiz H. 2018. Multifractal analysis of gas adsorption isotherms for pore structure characterization of the Bakken Shale[J]. *Fuel*, 219: 296–311.
- Liu Yao, Rong Yuanshuai, Yang Min. 2018. Detailed classification and evaluation of reserves in fracture-cavity units for carbonate fracture-cavity reservoirs[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 40(3): 431–438(in Chinese with English abstract).
- Long Ming, Xu Yanan, Yu Dengfei, Li Jun, Zhou Yanbin, Yang Lei. 2017. Quantitative optimization of water injection for Bohai heavy oil reservoir with bottom water: A case study of the west block of QHD32-6 oilfield[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 29(4): 91–97 (in Chinese with English abstract).
- Medina C R, Mastalerz M, Pupp J A. 2017. Characterization of porosity and pore-size distribution using multiple analytical tools: Implications for carbonate reservoir characterization in geologic storage of CO₂[J]. *Environmental Geosciences*, 24(1): 51–72.
- Qiu Yinan, Chen Ziqi. 1996. *Reservoir Description*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(In Chinese).
- Rahimi R, Bagheri M, Masihi M. 2017. Characterization and estimation of reservoir properties in a carbonate reservoir in Southern Iran by fractal methods[J]. *J. Petrol. Explor. Prod. Technol.*, DOI 10.1007/s13202-017-0358-7.
- Sangnimmuan A, Li Jiawei, Wu Kan. 2018. Development of efficiently coupled fluid-flow/Geomechanics model to predict stress evolution in unconventional reservoirs with complex-fracture geometry[J]. *SPE Journal*, 1–21.
- Shakiba M, Araujo Cavalcante Filho J S de, Kamy Sepehrnoori. 2018. Using Embedded Discrete Fracture Model (EDFM) in numerical simulation of complex hydraulic fracture networks calibrated by microseismic monitoring data[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 55: 495–507.
- Song Baoquan, Sha Zonglun, Mao Wei. 2019. Fine reservoir description and progressive development practice of the complex fault-block oilfield: Taking Tamutsag oilfield as an example[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 38(5): 222–231(in Chinese with English abstract).
- Stockmeyer J, Shaw J H, Billingsley L T, Plesch A, Wales M, Lavin L C, Knox R, Finger L. 2018. Geomechanical restoration as a tool for fractured reservoir characterization: Application to the Permian Basin, west Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 102(1): 103–128.
- Stright D H Jr, Settari A, Walters D A, Aziz K. 2008. Characterization of the Pliocene gas reservoir aquifers for predicting Subsidence on the Ravenna Coast[J]. *Petroleum Science and Technology*, 26: 1267–1281.
- Wen Lifeng, Wu Shenghe, Yue Dali, Li Yanping. 2010. Stratigraphic base-level cycles and sedimentary microfacies of Es₂₋₇ Formation in the Shengtuo oilfield[J]. *Geology in China*, 37(1): 144–151(in Chinese with English abstract).
- Xiao Fan, Su Chaoguang, Wu Kongyou, Ma Yuge. 2019. Identification of the minor faults in Huimin Sag and physical simulation of their formation mechanism[J]. *Geology and Resources*, 28(6): 570–575 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jian, Zhang Yan, Zhao Huitao, Yang Xiao, Hou Yingdong, Luo Shunshu. 2019. Characteristics and evaluation of C-10 reservoir in Zhijing-Ansai Area, Ordos Basin[J]. *Geology and Resources*, 28(4): 364–371(in Chinese with English abstract).
- Yuan Shiyi, Wang Qiang. 2018. New progress and prospect of oilfields development technologies in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 45(4): 657–668(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinliang, Xie Jun. 2011. *Oilfield Development Geology*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- Zhang Yiming. 2018. *Analysis and Application of Big Data in Oil and Gas Production*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- Zhao Shuxia, Sun Shuang, Zhou Yinbang, He Yingfu. 2019. Parameter modeling of low permeability tight reservoir based on fine lithofacies constraint: A case study of C-812 tight sandstone reservoir in No.92 wellblock of Honghe oilfield[J]. *Geology and Resources*, 28(5): 460–469(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yanan, Wu Kongyou, Hao Liangzhu, Dai Yingying, Liu Yuliang, Liu Yanfeng. 2019. Identification and development mechanism of minor faults in petroleum basins: A case study of Jiangjiadian Area in Huimin Sag[J]. *Geology and Resources*, 28(2): 184–192(In

- Chinese with English abstract).
- Zhao Yanyan, Cui Shuyue, Zhang Yun. 2019. Potential evaluation of residual oil in fractured-vuggy reservoir based on fine history fitting of streamline numerical simulation[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 34(5): 45-51, 56(in Chinese with English abstract).
- Zhong Yu. 2017. Reservoir parameters logging interpretation for E₁ reservoirs in Qigequan oilfield of Qaidam basin[J]. Geological Science and Technology Information, 36(6): 239-244(in Chinese with English abstract).
- Zeng Lianbo, Gao Chunyu, Qi Jiafu, Wang Yongkang, Li Liang, Qu Xuefeng. 2008. Extra-low permeability sandstone reservoir fractures distribution law and seepage action in Longdong area of Ordos basin[J]. Science China(Series D), 38(Supp.), 1: 41-47(in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua, Zhu Rukai, Yuan Xuanjun, Song Yan, Niu Jiayu, Dong Dazhong, Liu Shaobo, Jiang Lingzhi, Wang Shejiao, Zhang Guosheng. 2011. Unconventional Petroleum Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Zou Caineng, Yang Zhi, Zhang Guosheng, Tao Shizhen, Zhu Rukai, Yuan Xuanjun, Hou Lianhua, Dong Dazhong, Guo Qiulin, Song Yan, Ran Qiquan, Wu Songtao, Bai Bin, Wang Lan, Wang Zhiping, Yang Zhengming, Cai Bo. 2019. Establishment and practice of unconventional oil and gas geology[J]. Acta Geologica Sinica, 93(1): 12-23(in Chinese with English abstract).
- 梁文福. 2019. 大庆长垣油田井震结合高效井挖潜研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 34(5):63-68.
- 林承焰编著. 2000. 剩余油形成与分布[M]. 东营:石油大学出版社.
- 刘兴冬. 2017. 岩性油藏薄窄砂体地震精细处理解释技术[J]. 大庆石油地质与开发, 36(4):137-141.
- 刘遥, 荣元帅, 杨敏. 2018. 碳酸盐岩缝洞型油藏缝洞单元储量精细分类评价[J]. 石油实验地质, 40(3):431-438.
- 龙明, 许亚南, 于登飞, 李军, 周焱斌, 杨磊. 2017. 渤海稠油底水油藏精细定量注水研究——以秦皇岛32-6油田西区为例[J]. 中国海上油气, 29(4):91-97.
- 裘亦楠, 陈子琪. 1996. 油藏描述[M]. 北京:石油工业出版社.
- 宋宝权, 沙宗伦, 毛伟. 2019. 复杂断块油田精细油藏描述与滚动开发实践——以塔木察格油田为例[J]. 大庆石油地质与开发, 38(5):222-231.
- 温立峰, 吴胜和, 岳大力, 李艳萍. 2010. 胜二区沙二段7砂组地层基准面旋回与沉积微相研究[J]. 中国地质, 37(1):144-151.
- 肖凡, 苏朝光, 吴孔友, 马玉歌. 2019. 惠民凹陷临北地区小断层识别及形成机理物理模拟[J]. 地质与资源, 28(6): 570-575.
- 喻建, 张严, 赵会涛, 杨孝, 侯英东, 罗顺社. 2019. 鄂尔多斯盆地志靖—安塞地区延长组长10储层特征及评价[J]. 地质与资源, 28(4): 364-371.
- 袁士义, 王强. 2018. 中国石油开发主体技术新进展与展望[J]. 石油勘探与开发, 45(4):657-668.
- 曾联波, 高春宇, 漆家福, 王永康, 李亮, 屈雪峰. 2008. 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(D辑:地球科学), 38, 增刊1:41-47.
- 张金亮, 谢俊编著. 2011. 油田开发地质学[M]. 北京:石油工业出版社.
- 张以明主编. 2018. 油气生产大数据分析与应用[M]. 北京:石油工业出版社.
- 赵淑霞, 孙爽, 周银邦, 何应付. 2019. 基于精细岩相约束的致密低渗透层参数建模研究——以红河油田92井区长8₂致密砂岩储层为例[J]. 地质与资源, 28(5):460-469.
- 赵亚男, 吴孔友, 郝良柱, 代盈营, 刘玉亮, 刘延峰. 2019. 油气盆地内小断层识别及发育机理研究——以惠民凹陷江家店地区为例[J]. 地质与资源, 28(2): 184-192.
- 赵艳艳, 崔书岳, 张允. 2019. 基于流线数值模拟精细历史拟合的缝洞型油藏剩余油潜力评价[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 34(5):45-51,56.
- 钟雨. 2017. 柴达木盆地七个泉油田E13油藏储层参数测井精细解释[J]. 地质科技情报, 36(6):239-244.
- 邹才能, 陶士振, 侯连华, 朱如凯, 袁选俊, 宋岩, 牛嘉玉, 董大忠, 刘少波, 蒋凌志, 王社教, 张国生著. 2011. 非常规油气地质[M]. 北京:地质出版社.
- 邹才能, 杨智, 张国生, 陶士振, 朱如凯, 袁选俊, 侯连华, 董大忠, 郭秋麟, 宋岩, 冉启全, 吴松涛, 白斌, 王岚, 王志平, 杨正明, 才博. 2019. 非常规油气地质学建立及实践[J]. 地质学报, 93(1):12-23.

附中文参考文献

- 陈欢庆著. 2019. 精细油藏描述[M]. 北京:石油工业出版社.
- 陈欢庆, 丁超, 杜宜静, 丁超. 2015. 储层评价研究进展[J]. 地质科技情报, 34(5):66-74.
- 陈欢庆, 胡海燕, 吴洪彪, 曹晨, 隋宇豪. 2018. 精细油藏描述中剩余油研究进展[J]. 科学技术与工程, 18(29):140-153.
- 陈欢庆, 石成方, 曹晨. 2016. 精细油藏描述研究中的几个问题探讨[J]. 石油实验地质, 38(5): 569-576.
- 陈欢庆, 石成方, 胡海燕, 吴洪彪, 曹晨. 2018. 高含水油田精细油藏描述研究进展[J]. 石油与天然气地质, 39(6):1311-1322.
- 陈欢庆, 王珏, 胡海燕, 杜宜静, 樊涛. 2018. 扇三角洲前缘沉积特征及对油藏有效开发的影响——以辽河西部凹陷某试验区于楼油层油藏为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 38(5):156-170.
- 杜庆龙, 宋宝权, 朱丽红, 姜岩, 赵国忠. 2019. 喇、萨、杏油田特高含水期水驱开发面临的挑战与对策[J]. 大庆石油地质与开发, 38(5): 189-194.
- 李庆昌, 吴虻, 赵立春, 胡复唐, 汤承锋著. 1997. 砾岩油田开发[M]. 北京:石油工业出版社.
- 李阳. 2011. 陆相水驱油藏剩余油富集区表征[M]. 北京:石油工业出版社.
- 李阳, 刘建民. 2007. 油藏开发地质学[M]. 北京:石油工业出版社.
- 李兴国. 1993. 对油层微型构造的补充说明[J]. 石油勘探与开发, 20