

奥连特盆地隐蔽油藏高效滚动勘探开发方法技术及应用 ——以厄瓜多尔14和17区块为例

王光付¹,李发有¹,孙建芳¹,徐海¹,张亚雄¹,冯玉良²,丁峰¹,叶双江¹,陈诗望¹,吴洁¹,孙钰¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 102206;2. 中国石化国际石油勘探开发有限公司,北京 100029)

摘要:厄瓜多尔14和17区块位于奥连特盆地前渊带,主要含油层系为Napo组的M1,U和T段。现已开发油田进入高含水阶段,资源接替面临挑战。通过基于趋势面驱动的叠后地震数据连片一致性处理、时-频衰减高精度合成记录标定和解释及各向异性变速成图,精细刻画了低幅度构造,发现了一批低幅度构造油藏。采用分频迭代去噪拾取薄层弱反射系数,以其重构的叠后宽频有效信号为约束,采用相控波形非线性反演,定量预测了埋深3 000 m的2~5 m厚潮汐水道砂岩,发现了多个M1超薄层岩性油藏。依据区域水动力条件、低幅度构造油藏油-水界面趋势及油藏能量特征,发现了LU水动力油藏并滚动扩边。通过观察大量岩心薄片,发现海绿石在石英砂岩储层中呈胶结物和颗粒两种赋存状态,建立了海绿石双组构测井解释体积模型,评价并识别了UT低电阻率油藏。基于热带雨林地表和隐蔽油藏特点,按照“整体部署、分批实施、跟踪评价、及时调整”的策略,实现滚动勘探、评价和快速建产,探井和评价井成功率大于90%。

关键词:水动力成藏;低幅度构造;低电阻率油层;勘探开发策略;隐蔽油藏;奥连特盆地;厄瓜多尔

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Efficient progressive exploration and exploitation technology for subtle reservoirs in the Oriente Basin and its applications to blocks 14 and 17 in Ecuador

WANG Guangfu¹, LI Fayou¹, SUN Jianfang¹, XU Hai¹, ZHANG Yaxiong¹, FENG Yuliang², DING Feng¹,
YE Shuangjiang¹, CHEN Shiwang¹, WU Jie¹, SUN Yu¹

(1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China;

2. International Petroleum Exploration and Production Corporation, SINOPEC, Beijing 100029, China)

Abstract: In blocks 14 and 17 of Ecuador, both situated in the foredeep zone of the Oriente Basin, the main oil-bearing strata comprise the M1, U, and T members of the Napo Formation. The developed oilfields in these blocks have entered a high water-cut stage, posing challenges to resource replacement. The trend surface-driven, post-stack consistent processing of seismic data, the time-frequency attenuation-based calibration and interpretation of high-precision synthetic seismograms, and anisotropic-variable-velocity mapping, are jointly applied to finely characterize low-amplitude structures, with many low-amplitude structural reservoirs discovered. Thin layers' weak-reflection coefficients, determined through frequency-division iterative denoising, contribute to the reconstruction of effective post-stack broadband signals. With these signals as constraints, we quantitatively predict 2- to 5-m-thick tidal channel sandstones at a burial depth of 3 000 m through a seismic phase-controlled nonlinear inversion of waveforms, identifying several ultra-thin lithologic reservoirs in the M1 member. Based on regional hydrodynamic conditions, the oil-water contact trends of low-amplitude structural reservoirs, and the energy characteristics of reservoirs, we determine hydrodynamic oil reservoirs in the LU member and perform step-out drilling. The observation of numerous thin sections from cores reveals the presence of glauconites as cements and particles in the quartzose sandstone reservoirs. Accordingly, a dual-component volume model of glauconites for log interpretation is developed, allowing for reservoir evaluation and identification of low-resistivity reservoirs in the UT member. Based on the characteristics of tropical

收稿日期:2023-11-18;修回日期:2023-12-25。

第一作者简介:王光付(1965—),男,博士、教授级高级工程师,油气田开发。E-mail: wanggf.syky@sinopec.com。

基金项目:中国石化科技部基金项目(P23180)。

rainforest surfaces and subtle reservoirs in the subsurface, we achieve progressive exploration, evaluation, and rapid production onstream following the strategy of “overall deployment, batch-wise implementation, tracking and evaluation, and timely adjustment”, with a success rate of over 90 % for both exploration and appraisal wells.

Key words: hydrodynamic hydrocarbon accumulation, low-amplitude structure, low-resistivity oil layer, exploration and exploitation strategy, subtle reservoir, Oriente Basin, Ecuador

引用格式:王光付,李发有,孙建芳,等. 奥连特盆地隐蔽油藏高效滚动勘探开发方法技术及应用——以厄瓜多尔 14 和 17 区块为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 243–255. DOI: 10. 11743/ogg20240117.

WANG Guangfu, LI Fayou, SUN Jianfang, et al. Efficient progressive exploration and exploitation technology for subtle reservoirs in the Oriente Basin and its applications to blocks 14 and 17 in Ecuador[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 243–255. DOI: 10. 11743/ogg20240117.

隐蔽油藏概念最早由卡尔(1880年)提出,主要指较难发现和识别的油气藏,如不受背斜构造控制、构造和储层形态各异、成因不明,以及常规技术手段难以预测的非构造油气藏^[1]。随着油气勘探开发研究的深入和技术水平的提升,隐蔽油气藏的内涵扩大为:在现有勘探方法和技术水平的条件下,较难识别和描述的油气藏类型,通常泛指所有非构造圈闭油气藏,它涵盖了地层、岩性、古地貌(形)、复杂断块、低幅度平缓背斜和水动力等油藏类型^[2–3]。奥连特盆地是南美大陆西部的前陆盆地之一,面积约 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$,是厄瓜多尔的主要含油气盆地。盆地勘探始于 20 世纪 40 年代,在勘探早期主要油气发现以围绕南北向大型断层发育的长轴背斜油藏为主;60—70 年代相继发现了 Shushufindi, Aguarico, Sacha 以及 Auca 等大型背斜油藏,主力含油层系包括 Napo 组 U 和 T 层以及 Hollin 组。厄瓜多尔 14 和 17 区块位于该盆地中部前渊带,含油气地层 Napo 组为海—陆过渡相沉积,随着勘探开发程度的提高以及近年来滚动勘探开发方法和技术的突破,发现了低幅度构造、水动力、低电阻率油层和超薄层岩性等油藏,证实了奥连特盆地发育大量类型复杂的隐蔽油藏。

1 区域地质概况及工区勘探开发历程

1.1 区域地质概况

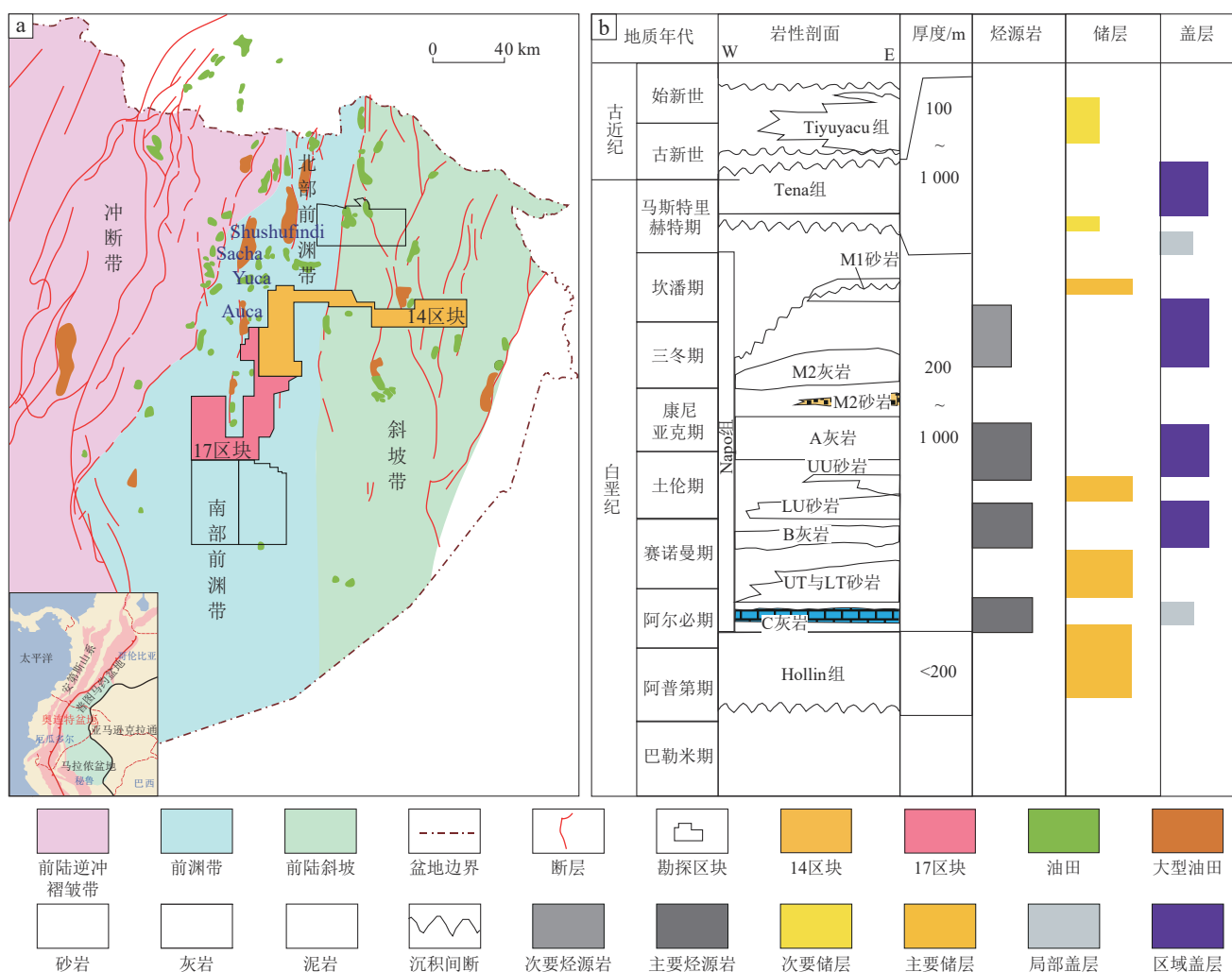
奥连特盆地西临南美洲科迪勒拉造山带,东临圭亚那地盾,北接哥伦比亚普图马约盆地(Putumayo Basin),南接秘鲁马拉依盆地(Maranon Basin),三者共同组成一个次安第斯(Sub-Andes)前陆盆地群^[4–5]。盆地经历了晚古生代—中生代侏罗纪同裂谷期,白垩纪裂谷后热沉降期和晚白垩世—新生代前陆盆地 3 个演化阶段。在晚白垩世—新生代的前陆阶段,盆地受挤压作用控制,其早期的正断层发生反转和走滑,这是斜

坡带低幅度构造形成的主要动力学机制。在平行安第斯造山带的方向上,可将奥连特盆地自西向东划分为冲断带、前渊带和斜坡带 3 个二级构造单元(图 1a),盆地构造特征整体西陡东缓。同时,受安第斯褶皱造山和盆地南北段差异演化影响,北部沉降幅度小,前渊特征不明显,以反转构造发育为特征;南部沉降幅度较大,接近前渊构造变形带。

奥连特盆地在晚白垩世凹陷期主要为海—陆过渡相沉积体系,发育 Hollin 组、Napo 组的 T、U 和 M1 段 4 套主要砂岩含油层系(图 1b)。Hollin 组为河流相沉积,砂岩厚度较大,全盆地广泛发育,为油气运移重要的输导层。T、U 和 M1 段为 3 套海进沉积旋回,自东向西从近端到远端展布。在盆地东部主要以水下河口湾^[6]和水下三角洲前缘^[7]等沉积体系为主,而向西转换为前三三角洲、河口湾远端和陆棚环境沉积。盆地主力烃源岩为 Napo 组页岩,发育南北两个生烃中心,其埋深较大,且仍处于生油窗内,生烃中心距离研究区约 100 km。区域大型断裂和连续分布的砂体组合是油气大规模长距离运移的主要输导体系,具体为相对连续发育的 Hollin 组砂岩和 Napo 组 T 段砂岩有效沟通生烃灶,南北走向的区域反转断裂系统及其长轴断背斜控制了油气运移的主要方向。M1 段上覆稳定广泛沉积的 Tena 组页岩为区域性盖层。

1.2 厄瓜多尔 14 和 17 区块勘探开发历程

奥连特盆地厄瓜多尔 14 和 17 区块早期勘探阶段,围绕西部大型构造 Auca 油田开展背斜延伸构造滚动评价工作,2011 年相继在 LU 和 LT 层获得工业油流,发现 TN 油田。新区甩开勘探阶段,落实了一批低幅度构造圈闭,由于热带雨林地表复杂和单个勘探潜力目标规模小,风险大,因而未开展钻井活动。2014 年以来低油价促使勘探工作者转变思路,围绕近油田设施,进行精细油藏描述研究,开展低幅度构造精细刻画、储层评价和超薄储层预测等系列技术攻关,滚动勘探发现



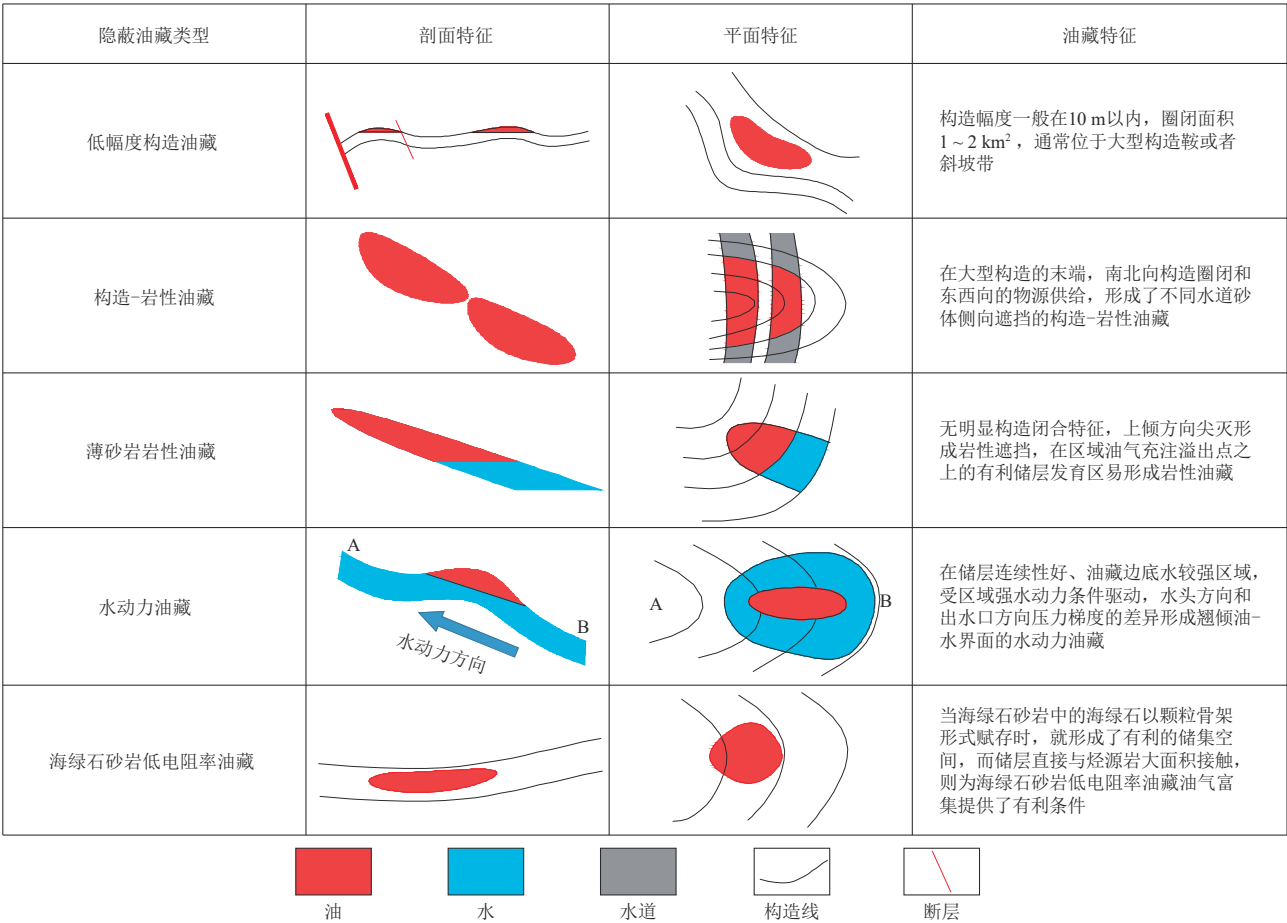


图2 厄瓜多尔14和17区块隐蔽油藏类型及发育模式

Fig. 2 Types and hydrocarbon accumulation model of subtle reservoirs in blocks 14 and 17 of Ecuador

2.2 构造-岩性油藏

Napo组物源方向均来自于盆地东部的圭亚那地盾,自东向西依次表现为河流-潮控三角洲-浅海相沉积体系,在研究区M1等砂岩段以河口湾远端、三角洲前缘和前三角洲沉积相为主,受潮汐作用影响较大,主要为潮汐水道沉积,砂体厚度薄,横向变化快^[8]。东西向的不同分支物源体系水道砂体形成了砂体间侧向遮挡,与油田区南北向的长轴背斜构造交叉,成为形成构造-岩性圈闭的有利条件。区域油气充注溢出点之上,优质储层发育区往往为局部油气富集高产区,在前渊带形成以南北向构造控制、东西向水道间物性条带遮挡的M1岩性油藏。

2.3 水动力油藏

盆地内发育厚度大且连续性较好的Napo组砂岩储层,受区域构造高差的控制,储层内的水体处于持续流动状态,导致多级构造脊的水头和出水口间产生较大的水动力压差,油-水界面向出水口方向倾斜。从

而造成各个构造脊上的低幅度构造油藏无统一的油-水界面,呈现水动力油藏特征,增加了低幅构造油藏的勘探难度。

2.4 薄砂岩岩性油藏

盆地M1层砂岩沉积时安第斯造山运动已经开始,造成了控制M1层砂岩沉积的复杂古地貌背景;同时受河流-潮汐-波浪等交织水动力影响,控制砂体沉积因素极其复杂。研究区砂体受潮汐和波浪的改造作用,砂体厚度整体偏薄,储层物性好坏是影响油气富集高产的关键因素。

2.5 海绿石砂岩低电阻率油藏

与常规砂岩油层相比,在富含海绿石矿物的UU和UT层,石英砂岩油层录井油气显示级别低,为相对低的孔隙度和电阻率测井电性特征,没有明显的油-水界面,含油饱和度差异很大,早期勘探依据常规石英砂岩测井解释模型推测其为差油层或油-水同层,因而忽略了海绿石砂岩油层的存在。研究区海绿石砂岩

储层直接与烃源岩大面积接触,为油气富集提供了有利条件。

3 油藏滚动勘探开发技术及应用

3.1 低幅度构造精细解释及成图技术

为提高低幅度构造识别的精度,一般采用分频、构造趋势剩余量、沿层切片和小波变换等方法识别圈闭溢出点,以上方法通常适用于地震数据信噪比高且埋深较浅的厚层砂岩,但针对中-深层的薄层低幅度构造,其识别的闭合度、圈闭范围仍有不确定性^[9-10]。近几年,随着地震采集成本的降低与处理技术的进步,宽方位、高密度的采集与处理可从本质上改善地震资料品质,提高地震资料的绝对分辨能力,有利于进一步落实低幅度构造的预测精度。

工区内地震资料目的层主频约42 Hz,现有叠后资

料难以识别小于5 ms的低幅度构造。针对该问题,通过应用地震反射系数重构、“时-深速度衰减”合成记录标定等技术提高地震资料的绝对分辨率,确保低幅度构造的层位标定与解释精度^[11]。同时,针对从式井网储层靶点密度横向分布不均、速度变化快,难以精细刻画低幅度构造油藏分布范围等难题,通过分析不同测量尺度下各向异性速度的传播机理,研究形成了各向异性速度高精度建模与微构造成图方法。该技术充分利用地震速度谱点分布均匀的优势,以地震成像时间为桥梁,采用“时频衰减标定技术”校正声波测井速度及测井积分时间,使其匹配VSP(垂直地震剖面)旅行速度与时间,获取VSP等效速度-时间标尺,消除因地层垂向各向异性引起的地震速度与VSP速度的差异(Δv)(图3a),得到相互匹配的垂向平均速度体(图3b)。同时,为消除或减弱因地层横向相变引起的沿层速度变化(图3c),利用测井分层速度与地震平均速度的横向校正关系,消除横向速度各项异性对低幅度构造成图的影响(图3d)。

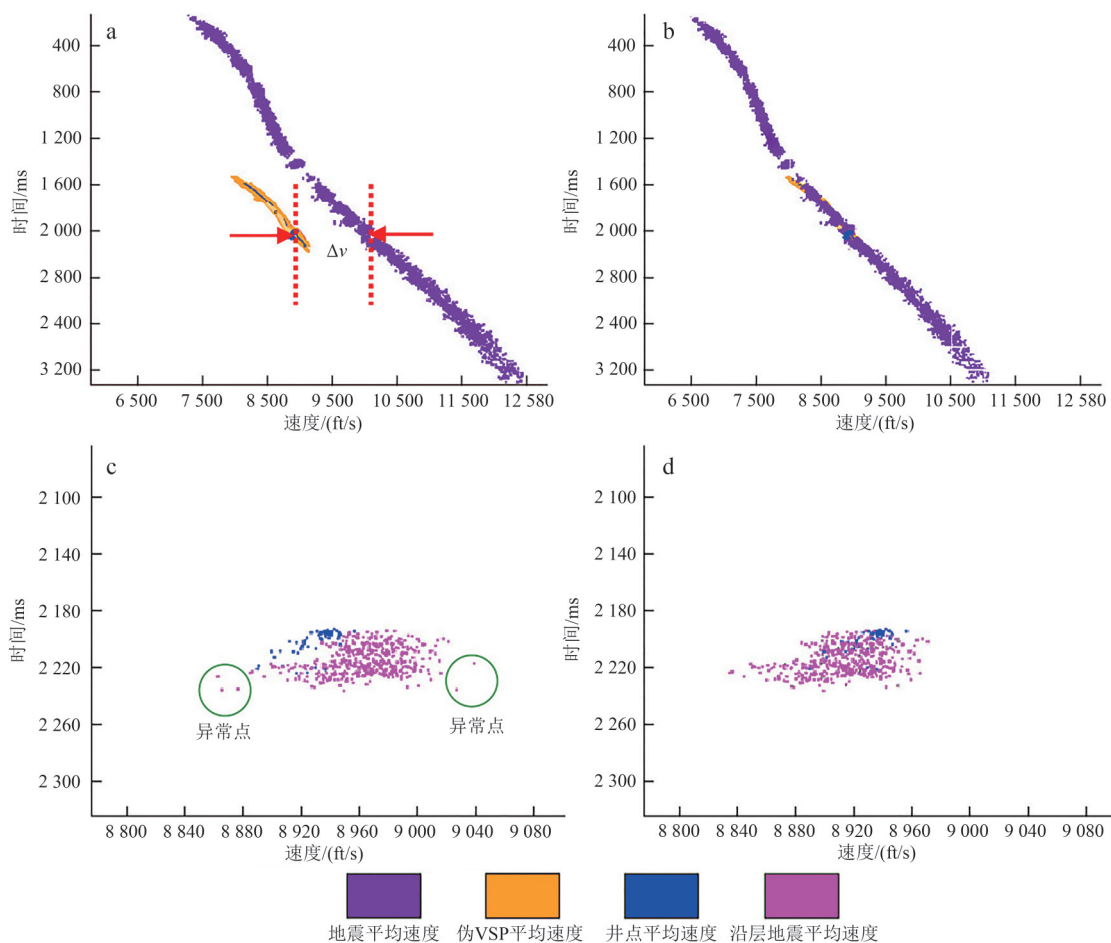


图3 厄瓜多尔14和17区块M1层地震平均速度各向异性校正

Fig. 3 Anisotropy correction for the average seismic velocities of the M1 member in blocks 14 and 17 of Ecuador

a. 伪VSP平均速度;b. 垂向校正平均速度;c. 测井分层平均速度;d. 横向校正平均速度

(Δv 为地震速度与VSP速度的差异。)

对比图4中等 T_0 与常规变速成图,因受S01与W01等井的牛眼速度影响,导致南部非井控区的低幅度构造产生明显畸变(图4b),破坏了等 T_0 (图4a)中的低幅度构造相对关系。而利用各项异性变速成图技术,可消除非均匀井网产生的速度牛眼(图4c中S01井附近),能有效保持等 T_0 与构造图之间的相对构造形态(图4a, c),从而提高时-深域内低幅度构造的预测精度。

在Auca大型背斜构造油田东南翼,利用该技术定量识别了1.5~3.0,1.5~5.0,1.5~10.0和1.5~15.0 m等不同尺度的局部微构造。在M1,LU,LT和UT等层,落实了一批有利低幅度构造圈闭,均获得工业油流。

3.2 水动力油藏判别方法及应用

水动力油藏分为天然形成和油田开发造成的2类^[12]。天然水动力油藏一般具备以下特征^[13]:所处盆地两侧存在较大高差及持续流动的水体,导致水头和出水口压力差异较大;发育较厚储层和区域性的盖层;油藏与盆内正向局部构造相关;油-水界面呈倾斜产状且具有统一的压力系统。奥连特盆地受后期安第斯造山运动的控制,逐渐形成西侧为构造高地,中间前渊带为深洼区,东侧平缓抬升的前陆盆地构造特征,西侧安第斯山系出露的白垩系Napo组与东侧亚马逊平原河流露头高差为1~2 km(图5)。盆地中部前渊区自西向东发育多条构造脊,同一构造脊的走向是近南北向,构造脊内部发育众多低幅度背斜构造(图6)。Napo组LU层储层是区内主要含油层,砂岩连片分布,

净厚度最厚达60 m,主要为中孔、中-高渗储层,上部发育巨厚泥岩盖层。安第斯山脉的雨水不断注入LU层,流经盆地中部前渊带深部储层,再从东部平原地表流出,形成天然的水动力系统。LU层油藏的油-水界面从西北往东南方向逐渐降低,越过前渊带轴部之后又逐渐抬升,呈现倾斜产状,具有天然水动力成藏可能性。

17区块H和HS为南北相邻的2个老油田(图6),开发证实从北向南LU层油藏油-水界面呈现降低趋势(图6),油田依靠天然能量已开发十多年,依然保持接近原始地层压力水平,说明边水充足和天然水动力活跃,具有天然水动力油藏成藏条件。因此,在H油田南部已知油层底面构造线之外,依据鼻状构造形态和油-水界面倾斜趋势,圈定构造油藏外的水动力油藏范围,新增含油面积2.2 km²。据此部署的外扩P3井,钻遇9 m厚油层,日产油57 t。P3井比北部H23井油-水界面深度低7 m(图7),进一步证实该区LU为水动力油藏类型。这一认识对盆地内其他区块LU油藏或其他层位外扩滚动开发具有指导意义。后续在TN油田南部滚动扩边,发现LU层也具有水动力油藏特征。

3.3 超薄砂岩储层综合预测技术

研究工区储层埋深约3 000 m,厚度2~5 m,地震有效带宽8~55 Hz频率上限的分辨能力约20 m。针对常规叠后地震和中等埋深的薄储层预测,通常面临主频低、频带窄和信噪比低等客观因素与技术

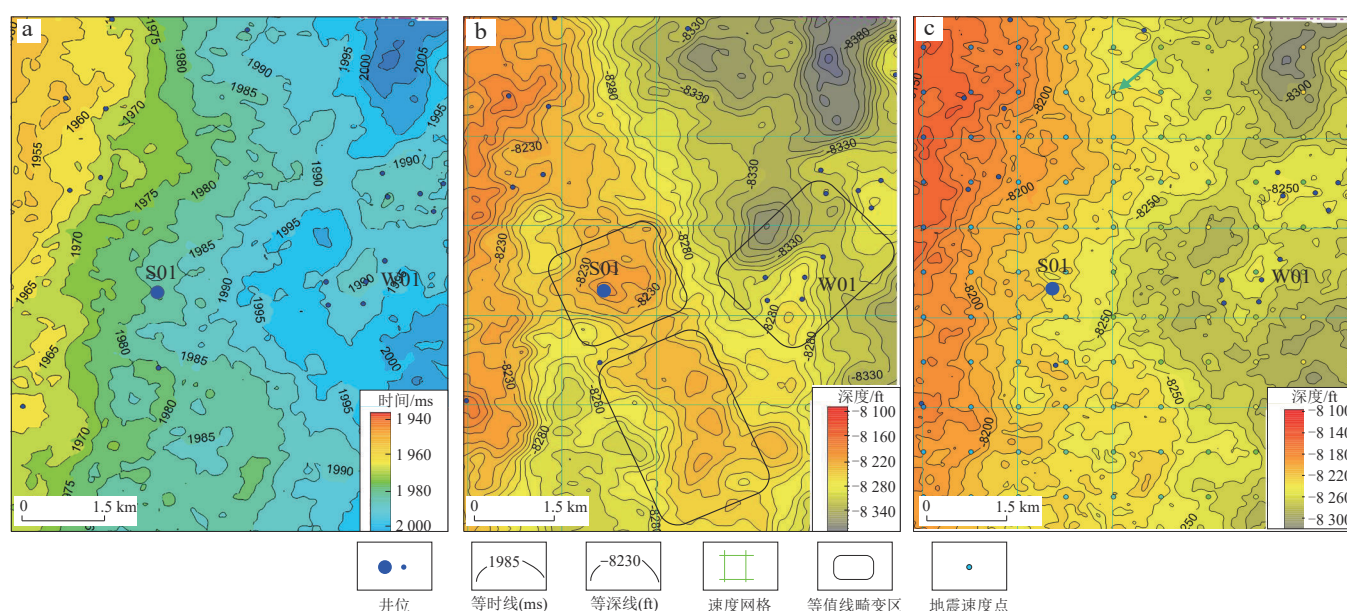


图4 厄瓜多尔14和17区块M1层等 T_0 与构造成图

Fig. 4 Isochron (T_0) map and structural mapping of the M1 member in blocks 14 and 17 of Ecuador

a. 等 T_0 图; b. 传统变速图; c. 各向异性变速成图

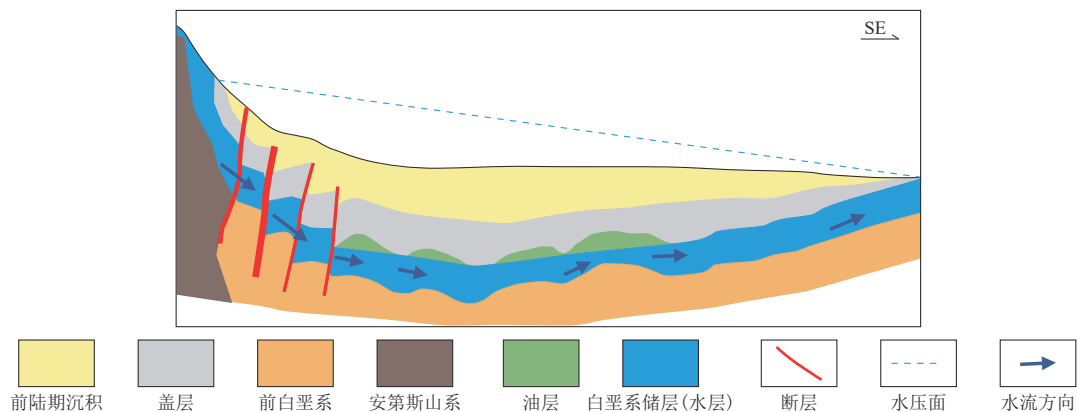


图5 奥连特盆地水动力油藏成藏模式

Fig. 5 Hydrocarbon accumulation model of hydrodynamic oil reservoirs in the Oriente Basin

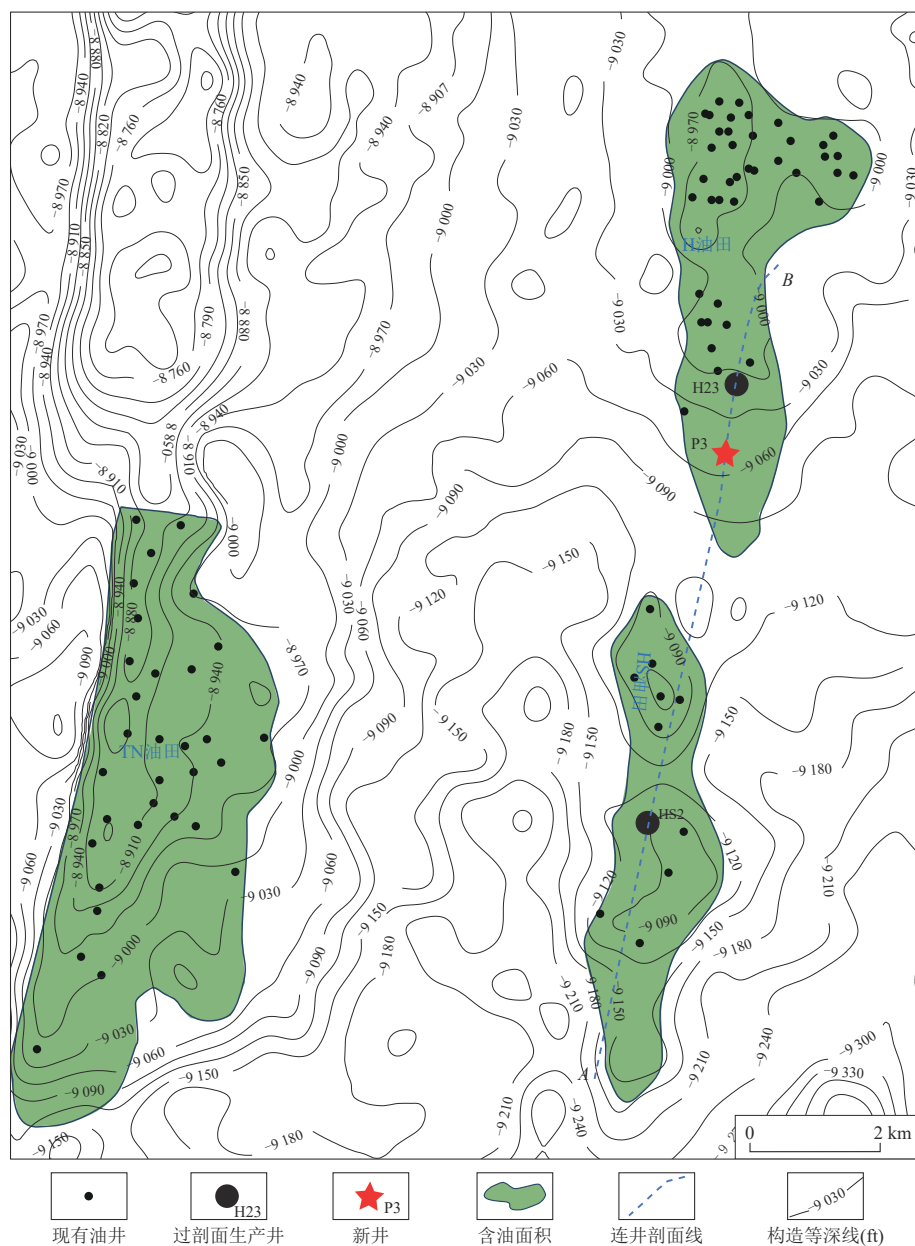


图6 厄瓜多尔17区块LU水动力油藏含油面积

Fig. 6 Oil-bearing areas of hydrodynamic oil reservoirs in the LU member in block 17 of Ecuador

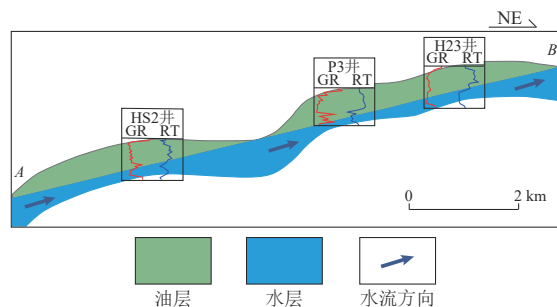


图7 厄瓜多尔17区块H和HS油田LU油藏剖面
(剖面位置见图6)

Fig. 7 Section of the hydrodynamic oil reservoirs in the LU member of the H and HS oilfields in block 17 of Ecuador
(see Fig. 6 for the section location)

挑战^[14-15]。针对地质目标特征和资料情况,探索形成自适应分频迭代去噪提高信噪比技术(图8)、稳态变时频子波与匹配追踪求解薄层反射系数技术(图9a)、压缩感知宽频地震数据重建技术(图9b)以及基

于宽频地震波形与测井高频信息双向约束的薄储层综合预测技术。

利用该技术系列重构宽频地震有效信号,有效克服超薄层地震预测主频低、频带窄、信噪比低的难题,实现薄砂岩地震反射的定性识别(图10a),定性预测吻合率达100%;利用宽频地震反射波形与测井高频信息双向约束实现了2~5 m厚超薄储层的定量反演预测,波形相控反演预测误差1 m左右(图10b)。基于该预测成果,在K油田外围区部署评价井X04井获工业油流,新完钻6口滚动开发井的砂体钻遇率100%,预测厚度误差小于1 m,其中2口井高产,进一步证实超薄砂岩储层综合预测技术的可靠性。

3.4 富含海绿石石英砂岩低电阻率油层评价技术

富含海绿石石英砂岩的主要矿物成分为石英、方解石、海绿石和伊利石。由于海绿石砂岩中高导矿物

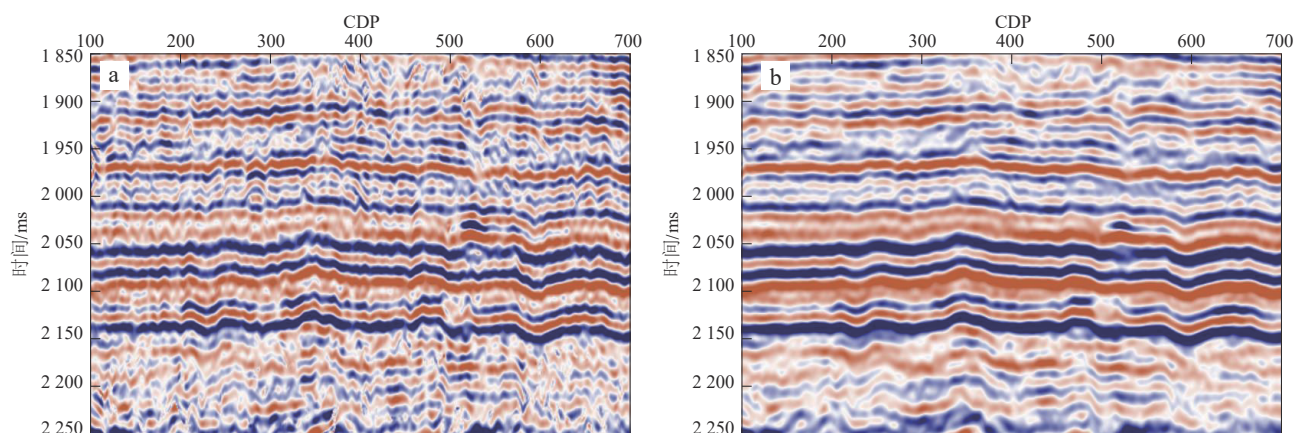


图8 厄瓜多尔14和17区块地震资料去噪前、后对比

Fig. 8 Comparison of pre- and post-denoised seismic data from the in blocks 14 and 17 of Ecuador

a. 原始剖面;b. 去噪剖面

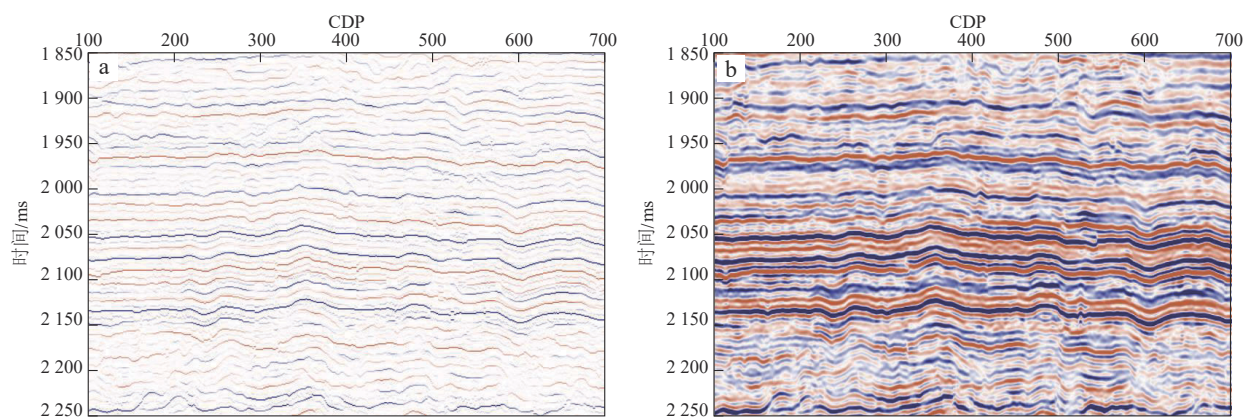


图9 厄瓜多尔14和17区块反射系数与高分辨率地震反射

Fig. 9 Reflection coefficients and high-resolution seismic reflections in blocks 14 and 17 of Ecuador

a. 反射系数;b. 宽频有效信号重建

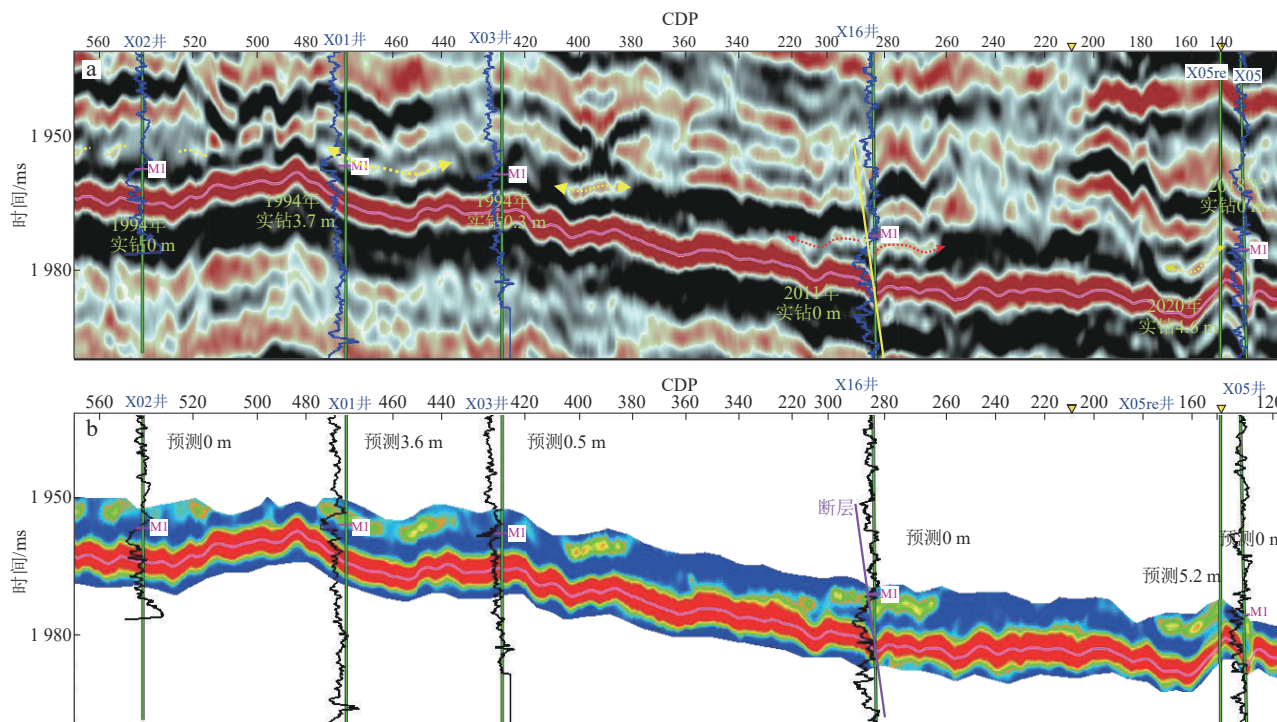


图10 厄瓜多尔14和17区块宽频地震信号重建与波形相控反演

Fig. 10 Reconstruction of broadband seismic signals and phase-controlled waveform inversion in blocks 14 and 17 of Ecuador

a. 宽频地震剖面;b. 宽频地震波形相控反演剖面

的存在,造成油层表现为低电阻率油层特征,常规测井解释方法很难有效加以识别^[16]。通过对工区UT层岩心薄片观察,发现海绿石矿物呈现两种赋存形式:一种是极细粒度、以填充和搭桥等填隙物形式分散在基质孔隙空间中,类似于胶结物,称为分散海绿石;另一种是以粪球粒、球粒等颗粒形式与石英颗粒等基质共同组成矿物骨架,类似于基质颗粒,称为结构海绿石(图11a)。通过建立石英砂岩中海绿石的双组构体积模型(图11b),岩石体积包括孔隙体积(油气和/或水)、黏土矿物(分散海绿石和伊利石)、混合矿物骨架(结构海绿石、石英和方解石矿物)。

富含海绿石的石英砂岩双组构体积模型为:

$$1 = \Phi_t + V_{\text{伊利石}} + V_{\text{分散海绿石}} + V_{\text{石英}} + V_{\text{结构海绿石}} + V_{\text{方解石}} \quad (1)$$

含水饱和度模型:针对结构海绿石导电是造成低电阻率油层的原因,利用双水模型^[17]计算海绿石砂岩含水饱和度。模型中“水”分为两类:一类是黏土附近的“束缚水”,其导电性主要靠阳离子在黏土表面移动产生,有淡水特征;另一类是远离黏土的“自由水”,其导电性质与岩石中的体积水相同。两部分的水构成岩石的并联导电通道。双水模型电导率方程为:

$$C_t = \frac{1}{\alpha} \Phi^m S_{wt}^n \left(C_w \frac{S_{wt} - S_{wb}}{S_{wt}} + C_{wb} \frac{S_{wb}}{S_{wt}} \right) \quad (2)$$

式中: C_t 为地层电导率,S/m; C_w 为自由水电导率,S/m; C_{wb} 为束缚水电导率,S/m; S_{wt} 为总含水饱和度,%; S_{wb} 为束缚水饱和度,%; Φ 为总孔隙度,%; α , m 和 n 分别是与岩性有关的比例系数、岩石的胶结指数和饱和度指数,无量纲。

通过上述方法,重新建立石英砂岩中海绿石双组构测井解释模型,准确评价储层真实孔隙度。结果发现,UT层测井孔隙度大幅度增加(表1),含油饱和度平均增加了10%,油-水同层的电阻率下限由 $10.0 \Omega \cdot m$ 降低至 $5.5 \Omega \cdot m$,过去常规测井解释含油层升级为油-水同层或含水油层,测试6口井验证,平均单井日初产油50 t,不含水。部署新井X20投产UT层,日产油52 t,不含水。从而证实了UT为低电阻率油层,是本区原油生产接替层系。同时明确了海绿石石英砂岩测井曲线具有“四高一低”的特点,即高伽马值、高密度、高中子孔隙度、高光电截面指数和低电阻率(图12),结合双组构测井解释模型可有效识别隐藏的低电阻率油藏。

3.5 热带雨林隐蔽油藏滚动勘探开发技术策略

受海外油气项目合同模式、资源性质、投资环境和勘探开发时效性等因素制约,追求合同期内产量和效益最大化目标,因此遵照以下原则^[18-20]:①优先动用优

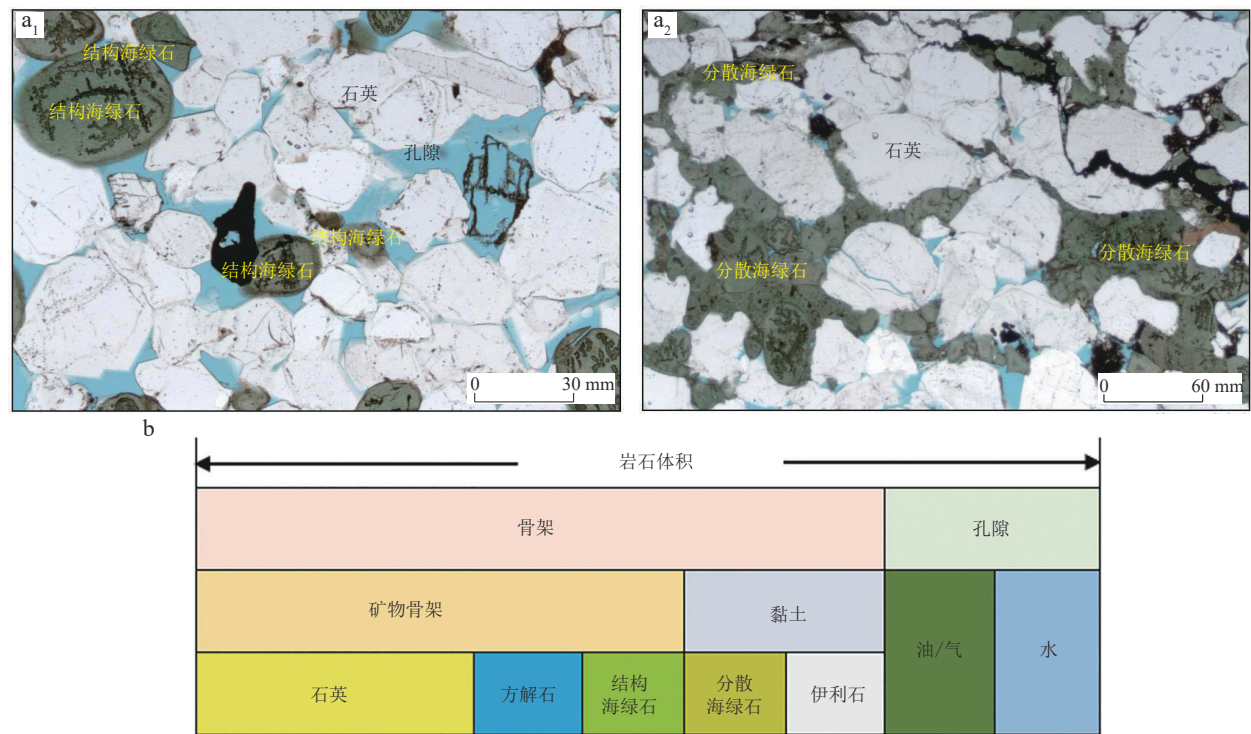


图 11 厄瓜多尔 14 和 17 区块 UT 层海绿石砂岩薄片特征及富含海绿石的石英砂岩双组构体积模型

Fig. 11 Thin section characteristics of the glauconitic sandstones and a dual-component volume model of the glauconite-rich quartzose sandstones in the UT member in blocks 14 and 17 of Ecuador

a₁. TN21 井, 结构海绿石镜下特征, 埋深 10 191. 63 ft; a₂. TN21 井, 分散海绿石镜下特征, 埋深 1 0191. 63 ft; b. 双组构体积模型

表 1 厄瓜多尔 14 区块 W05 井富含海绿石石英砂岩岩心分析和测井评价的孔隙度对比

Table 1 Comparison of porosities derived from core analysis and log evaluation for glauconite-rich quartzose sandstones in well W05 in block 14 of Ecuador

岩心 孔隙度/%	常规测井评价		双组构体积模型测井评价	
	孔隙度/%	绝对误差/%	孔隙度/%	绝对误差/%
15.5	13.9	-1.6	15.7	0.2
18.6	15.3	-3.3	17.8	-0.8
15.2	12.1	-3.1	14.4	-0.8
15.0	12.1	-2.9	14.3	-0.7
14.3	10.0	-4.3	13.6	-0.7
14.3	12.0	-2.3	14.4	0.1

质资源,快速回收成本;②勘探-开发一体化评价,确保合同期内储、产量有效接替;③快速建产和高速开采形成规模效益;④动态调整、实时优化,确定合理产量剖面 and 开发工作量,实现工作量与成本油之间的最佳匹配,达到收益最大化。针对厄瓜多尔 14 和 17 区块热带雨林地表(图 13a),按照“整体部署、分批实施、跟踪评价、及时调整”的策略,通过探井和开发井钻探无缝衔接,同步测试和投产,形成滚-评-建一体化高效滚动开发策略。勘探开发井场平台许可申请和建设早

期,依据钻井平台控制区资源规模,编制“1 口探井、1 口评价井和多口开发井”整体开发方案(图 13b),形成直井、大斜度井、水平井协同开发模式(图 13c),以直井或定向井钻探确定砂体厚度和含油高度、油-水边界和油藏物性参数等,部署大斜度井和水平井同步建产,实现快速规模开发。

由于作业环境面临诸多挑战,采用丛式井场开采模式和短流程集输工艺,地面设施采用集成化、撬装化、模块化成套技术(图 13d)。试油及生产早期,通过采用临时管线及处理设施实现产出液及时外输,确保油田快速建产。在远离中心处理站的井场实施短流程采注工艺,油井产出液经初步处理后,处理水直接现场回注,形成完善的独立注采系统。充分发挥信息化优势加强实时监测管理,通过油田生产监控系统、运行控制系统和生产作业数据管理系统,确保油田生产全过程数字化和智能化,提升油藏管理和开发水平。

通过滚动勘探开发,厄瓜多尔 14 和 17 区块探井和评价井成功率大于 90 %,开发井成功率 100 %,连续十余年储量替代率大于 100 %。探明石油地质储量从 2 800×10⁴ t 增加到 1.2 ×10⁸ t,是收购时的 4.3 倍;石油经济可采储量从 943×10⁴ t 增加到 3 126×10⁴ t,是收购

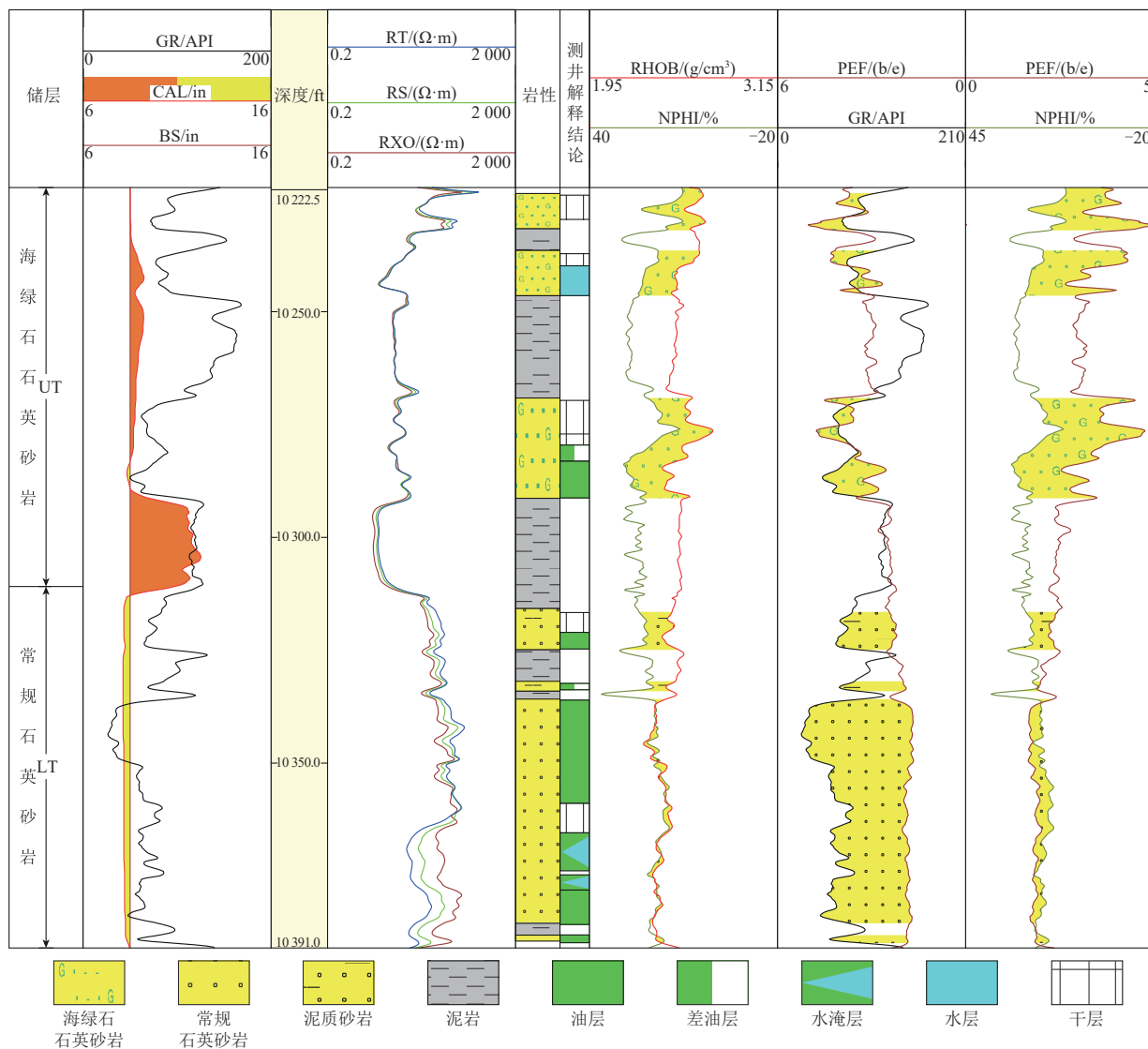


图12 厄瓜多尔14和17区块海绿石英砂岩测井曲线响应特征

Fig. 12 Response characteristics of logging curves of glauconite-rich quartzose sandstones in blocks 14 and 17 of Ecuador

时的3.3倍。原油产量连续16年保持 $(50 \sim 85) \times 10^4$ t, 新井累计贡献产量 608×10^4 t。

4 结论

1) 隐蔽油藏通常是指地层或岩性等油藏或常规技术手段难以识别发现的油藏。奥连特盆地油气聚集规律总体为“远源供烃,断砂输导,构造脊富油”,厄瓜多尔14和17区块位于盆地中部前渊带主要输导断层东部侧翼的低级序构造脊,发育低幅度构造油藏、水动力油藏、超薄层潮汐水道砂岩岩性油藏及富含海绿石的石英砂岩低电阻率油藏等多种隐蔽油藏类型。

2) 复杂类型油气储层评价和预测技术突破是识别和发现隐蔽油藏的关键。通过揭示石英砂岩中海绿

石呈颗粒和胶结物两种结构,建立了测井评价双组体积解释模型,准确求取储层的孔隙度和含油饱和度,从而有效识别低电阻率油层。采用趋势面驱动的叠后地震数据连片地震处理、时-频衰减高精度合成记录标定、解释及各向异性变速成图,实现微型构造形态精细刻画,发现低幅度构造油藏。依据区域水动力条件、油藏油-水界面趋势及油藏能量特征,判断存在水动力油藏。通过分频迭代去噪恢复薄层弱反射系数,以重建的宽频有效信号为约束进行相控波形非线性反演,准确定量预测埋深3 000 m的2~5 m厚潮汐水道砂岩分布,可发现超薄层岩性油藏。

3) 基于工区热带雨林地表和地下零散分布的隐蔽油藏,油气田高效开发需要科学合理的勘探开发策略。将单个钻井平台控制范围内圈闭可采资源量优选排队,按照“整体部署、分批实施、跟踪评价、及时调整”的

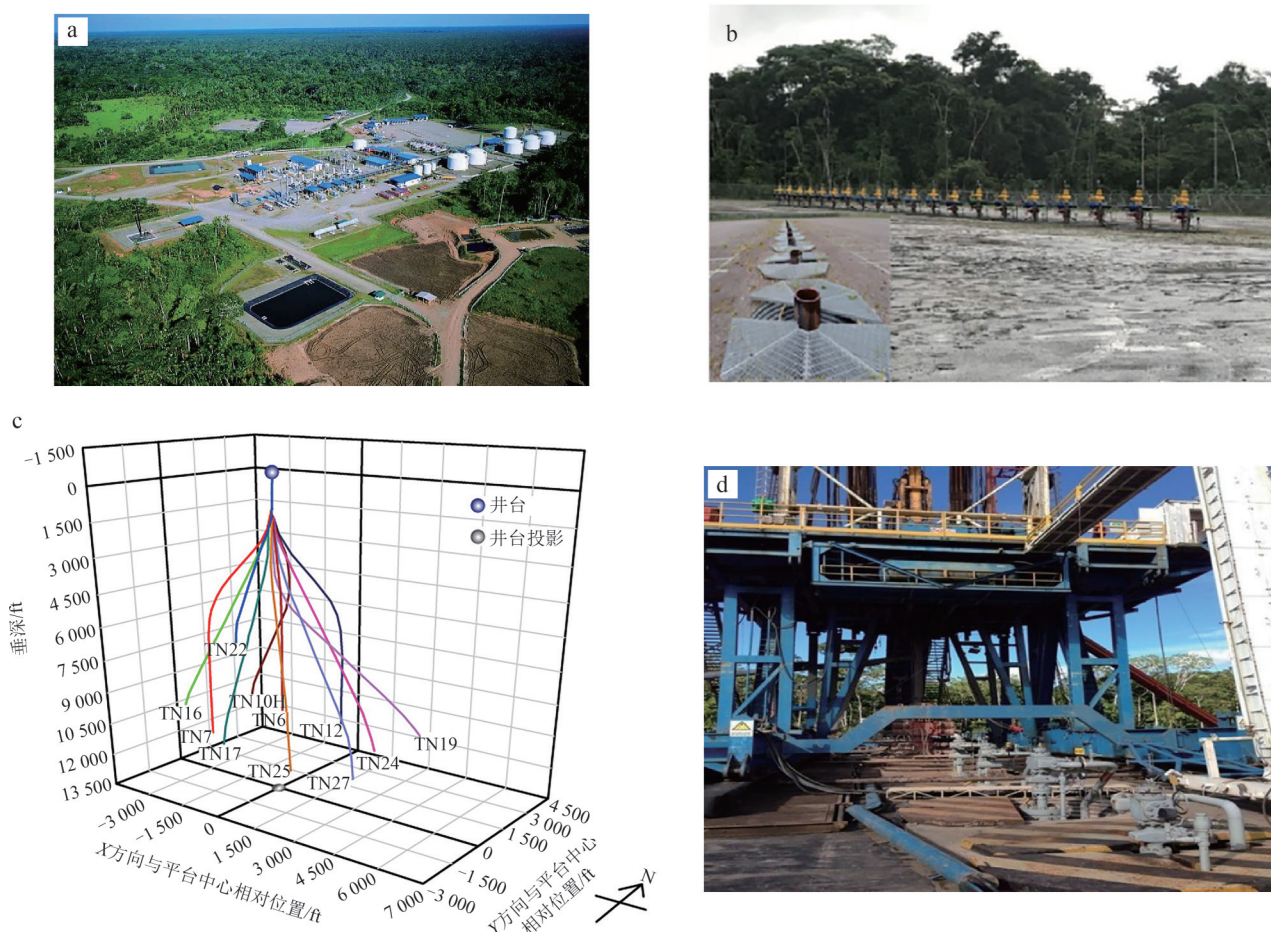


图13 热带雨林地表滚-评-建一体化高效建产配套工程技术

Fig. 13 Supporting engineering technology for efficient, integrated progressive exploration, evaluation, and onstream production of subtle reservoirs on tropical rainforest surfaces

a. 14/17区热带雨林地表井场现场照片;b. 多槽口井场平台现场照片;c. 平台式钻井三维绕障设计;d. 推移滑轨式钻井设备及采油树现场照片

策略,采用“1口直探井、1口定向评价井和多口定向或水平开发井”的丛式井场模式,实现快速高效建产和长期增储稳产。该区块隐蔽油藏识别方法技术和地质认识,可为奥连特盆地及国内外其他类似油藏勘探开发提供借鉴。

致谢:厄瓜多尔14和17区块热带雨林复杂地表条件下多类型隐蔽油藏的高效滚动勘探开发,取得显著的经济效益和社会效益,是中国海外油气勘探开发项目成功运营的经典案例之一。针对隐蔽油藏特点和难点,中国石化石油勘探开发研究院安第斯支撑团队持续16年技术攻关并取得突破,需要感谢历届同事坚持不懈的研究,同时感谢厄瓜多尔安第斯公司历届管理团队的大力支持。

参 考 文 献

[1] CARLL J F. The geology of the oil regions of Warren, Venango, Clarion, and Butler counties, including surveys of the Garland

and Panama conglomerates in Warren and Crawford, and in Chautauqua Co., N. Y., descriptions of oil well rig and tools, and a discussion of the preglacial and postglacial drainage of the Lake Erie Country[M]. Harrisburg: The Board of Commissioners for the Second Geological Survey, 1880: 482.

- [2] 庞雄奇,陈冬霞,张俊. 隐蔽油气藏的概念与分类及其在实际应用中需要注意的问题[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(1): 1-8.
PANG Xiongqi, CHEN Dongxia, ZHANG Jun. Concept and categorize of subtle reservoir and problems in its application[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(1): 1-8.
- [3] 庞雄奇,陈冬霞,张俊. 隐蔽油气藏成藏机理研究现状及展望[J]. 海相油气地质, 2007, 12(1): 56-62.
PANG Xiongqi, CHEN Dongxia, ZHANG Jun. Progress and prospect of research on hydrocarbon accumulation mechanism of subtle reservoirs[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2007, 12(1): 56-62.
- [4] DASHWOOD M F, ABBOTTS I L. Aspects of the petroleum geology of the Oriente Basin, Ecuador[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1990, 50(1): 89-117.
- [5] CHRISTOPHOUL F, BABY P, DÁVILA C. Stratigraphic

- responses to a major tectonic event in a foreland basin: The Ecuadorian Oriente Basin from Eocene to Oligocene times [J]. *Tectonophysics*, 2002, 345(1/4): 281–298.
- [6] TANG Mingming, LU Shuangfang, ZHANG Kexin, et al. A three dimensional high-resolution reservoir model of Napo Formation in Oriente Basin, Ecuador, integrating sediment dynamic simulation and geostatistics[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 110: 240–253.
- [7] VALLEJO C, TAPIA D, GAIBOR J, et al. Geology of the Campanian M1 sandstone oil reservoir of eastern Ecuador: A delta system sourced from the Amazon Craton [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 86: 1207–1223.
- [8] 陈诗望, 姜在兴, 滕彬彬, 等. 厄瓜多尔奥连特盆地白垩系 M1 油藏沉积储层新认识[J]. *地学前缘*, 2012, 19(1): 182–187.
- CHEN Shiwang, JIANG Zaixing, TENG Binbin, et al. New understanding of sedimentation and reservoir characteristics of M1 zone in Cretaceous strata of Oriente Basin, Ecuador [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 182–187.
- [9] 徐海, 王光付, 孙建芳, 等. 基于尺度-频率的小波微幅构造识别方法与应用——以南美厄瓜多尔 X 区块为例[J]. *油气地质与采收率*, 2023, 30(4): 98–105.
- XU Hai, WANG Guangfu, SUN Jianfang, et al. Identification method and application of micro-structure based on scale-frequency wavelet in Block X of Ecuador, South America [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2023, 30(4): 98–105.
- [10] 徐海, 孙建芳, 李发有. 三维拼接地震低幅构造闭合差校正方法[C]//中国石油学会石油物探专业委员会, 中国地球物理学会勘探地球物理委员会. 2022年中国石油物探学术年会论文集(上册), 海口, 2022. 涿州: 石油地球物理勘探编辑部, 2022: 506–509.
- XU Hai, SUN Jianfang, LI Fayou. 3D splicing seismic low amplitude tectonic closure difference correction method[C]//Society of Petroleum Geophysicists, Exploration Geophysics Committee of the Chinese Geophysical Society. *Proceedings of the 2022 China Petroleum Physical Exploration Academic Conference (Previous)*, Haikou, 2022. Zhuozhou: Petroleum Geophysical Exploration Editorial Department, 2022: 506–509.
- [11] 王光付, 徐海, 李发有, 等. 超薄砂岩储层预测方法研究与应用——以厄瓜多尔安第斯 14 和 17 区块为例[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(2): 247–263.
- WANG Guangfu, XU Hai, LI Fayou, et al. Predication methods of ultra-thin sandstone reservoirs and their application to blocks 14 and 17 in the Andes, Ecuador[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(2): 247–263.
- [12] 刘卓, 田昌炳, 张为民, 等. 油藏“水动力”压力特征成因——以伊拉克鲁迈拉油田祖拜尔组第四油藏为例[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(6): 722–727.
- LIU Zhuo, TIAN Changbing, ZHANG Weimin, et al. Causes of hydrodynamic pressure distribution: A case of the 4th Pay in Zubair Formation, Rumaila Oilfield, Iraq[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(6): 722–727.
- [13] 王素芬. 倾斜油水界面油藏形成机理及其储量评价研究——以苏丹福北油田 Bentiu 组油藏为例[D]. 成都: 西南石油大学, 2017: 69–90.
- WANG Sufen. Study on formation mechanism and reserves evaluation of titled oil-water contacts reservoir: A case study of Bentiu reservoir in Fula-north Oilfield, Sudan [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017: 69–90.
- [14] 徐海, 都小芳, 高君, 等. 基于波形聚类的沉积微相定量解释技术研究——以中东地区 X 油田为例[J]. *石油物探*, 2018, 57(5): 744–755.
- XU Hai, DU Xiaofang, GAO Jun, et al. Quantitative interpretation of sedimentary microfacies based on waveform clustering: A case study of X Oilfield, Middle East[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2018, 57(5): 744–755.
- [15] 徐海, 樊太亮, 赵夏, 等. 基于矢量中值滤波的 ISS 高密度地震数据去噪方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2013, 48(3): 340–344.
- XU Hai, FAN Tailiang, ZHAO Xia, et al. A deblending method based on vector median filter for ISS high density seismic data[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2013, 48(3): 340–344.
- [16] 林士尧, 张超前, 万学鹏, 等. 奥连特盆地 M 油田海绿石砂岩低阻油层识别方法[J]. *油气井测试*, 2019, 28(4): 38–44.
- LIN Shiyao, ZHANG Chaoqian, WAN Xuepeng, et al. Glauconite sandstone low-resistivity oil reservoir identification in M Oilfield of Oriente Basin[J]. *Well Testing*, 2019, 28(4): 38–44.
- [17] CLAVIER C, COATES G, DUMANOIR J. Theoretical and experimental bases for the dual-water model for interpretation of shaly sands[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1984, 24(2): 153–168.
- [18] 穆龙新, 范子菲, 许安著. 海外油气田开发特点、模式与对策[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(4): 690–697.
- MU Longxin, FAN Zifei, XU Anzhu. Development characteristics, models and strategies for overseas oil and gas fields[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(4): 690–697.
- [19] 穆龙新, 范子菲, 王瑞峰, 等. 海外油田开发方案设计策略与方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2021.
- MU Longxin, FAN Zifei, WANG Ruifeng, et al. *Strategies and methods for overseas oilfield development plans design* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021.
- [20] 窦立荣, 袁圣强, 刘小兵. 中国油公司海外油气勘探进展和发展对策[J]. *中国石油勘探*, 2022, 27(2): 1–10.
- DOU Lirong, YUAN Shengqiang, LIU Xiaobing. Progress and development countermeasures of overseas oil and gas exploration of Chinese oil corporations[J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(2): 1–10.

(编辑 张亚雄)