

引用: 袁圣强, 翟光华, 毛凤军, 等. 叠合裂谷盆地风险勘探案例剖析——以尼日尔 Termit 盆地 Agadem/Bilma/Tenere 区块为例 [J]. 中国石油勘探, 2022,27(6):63-74.
Yuan Shengqiang, Zhai Guanghua, Mao Fengjun, et al. Risk exploration in superimposed rift basin: case studies of Agadem/Bilma/Tenere blocks in Termit Basin, Niger[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(6):63-74.

叠合裂谷盆地风险勘探案例剖析 ——以尼日尔 Termit 盆地 Agadem/Bilma/Tenere 区块为例

袁圣强¹ 翟光华² 毛凤军¹ 肖坤叶¹ 郑风云¹ 何 伶² 程顶胜¹ 李早红¹ 姜 虹¹

(1 中国石油勘探开发研究院; 2 中国石油国际勘探开发有限公司)

摘 要: Esso 等多家国际油公司在尼日尔 Termit 盆地勘探 36 年, 未获商业开发储量规模而退出。中国石油通过技术评价和商务一体化结合, 于 2003 年进入 Termit 盆地, 制定“分步走”勘探策略, 一方面在盆地已有发现的西部进行滚动勘探落实储量, 另一方面通过攻关核心地质问题, 明确主力含油气层系和勘探方向。研究认为: (1) Termit 盆地为发育两期裂谷和两期坳陷的叠合裂谷盆地, 且在晚白垩世遭受海侵, 与中西非地区其他陆相裂谷盆地有所差异; (2) 古近系下部砂泥岩互层与上部区域性泥岩构成主力储盖组合; (3) 建立了海陆叠合裂谷油气成藏模式, 指导发现了 4 个亿吨级油田群, 勘探获得巨大成功, 成为海外自主勘探的又一典型成功案例。形成 3 个启示: (1) 技术评价和商务一体化运作为尼日尔区块获取的重要原因; (2) 陆相裂谷石油地质理论和技术的成功应用是 Termit 盆地勘探成功的前提; (3) 建立 Termit 盆地成藏模式是勘探获得重大突破的主因。

关键词: 叠合裂谷; 尼日尔; Termit 盆地; 风险勘探; 案例分析; 自主勘探

中图分类号: TE122.11 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2022.06.007

Risk exploration in superimposed rift basin: case studies of Agadem/Bilma/Tenere blocks in Termit Basin, Niger

Yuan Shengqiang¹, Zhai Guanghua², Mao Fengjun¹, Xiao Kunye¹, Zheng Fengyun¹, He Ling², Cheng Dingsheng¹, Li Zaohong¹, Jiang Hong¹

(1 PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development; 2 China National Oil and Gas Exploration and Development Co., Ltd)

Abstract: Esso and other international companies had conducted exploration in Termit Basin for 36 years and withdrawn since no commercial reserves were discovered. In 2003, CNPC participated in the petroleum exploration in Termit Basin and implemented the exploration strategy of “step-by-step” by integrating the technical evaluation and business operation. On the one hand, the progressive exploration in the western part of the basin with discoveries was conducted to determine the proven reserves, and on the other hand, the main oil-bearing series and exploration orientation were defined by studying on the core geological problems. The results show that: (1) Termit Basin was a superimposed rift basin experienced two stages of rift and two stages of depression and suffered transgression in the Late Cretaceous, showing different characteristics from other continental rift basins in Central and Western Africa; (2) The main reservoir and cap rock assemblage was formed by the interbedded sandstone and mudstone in the Lower Paleogene and the regional mudstone in the Upper Paleogene; (3) The hydrocarbon accumulation mode in marine and continental superimposed rift basin was continuously researched and established, supporting to discover four oilfield groups with reserve level of hundred million tons, which was a typical successful case of overseas independent exploration. The

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目“海外复杂裂谷盆地精细勘探关键技术研究”(2021DJ3103)。

第一作者简介: 袁圣强(1982-), 男, 河南许昌人, 博士, 2009年毕业于中国科学院研究生院, 高级工程师, 现主要从事中西非裂谷系盆地沉积和石油地质研究及勘探部署工作。地址: 北京市海淀区学院路 20 号中国石油勘探开发研究院, 邮政编码: 100083。E-mail: yuansq@petrochina.com.cn

收稿日期: 2022-10-08; 修改日期: 2022-11-10

implications include: (1) The integration of technical evaluation and business operation is an important reason for block acquisition in Niger; (2) The application of petroleum geology theory and technology of continental rift basin is the prerequisite for successful exploration in Termit Basin; (3) An appropriate hydrocarbon accumulation mode in Termit Basin is the key factor for achieving the major exploration breakthrough.

Key words: superimposed rift, Niger, Termit Basin, risk exploration, case study, independent exploration

0 引言

1961 年 10 月, Soc Prosp/Expl Petr Alsac 公司在尼日尔 Djado 盆地钻探了尼日尔第一口风险探井(野猫井) Kourneida-1, 未获油气发现。1970 年, 尼日尔政府首次对外公开区块招标, 并签署了第一个区块合同(原 Agadem 区块)。1970—2006 年间, 多家国际油公司(以美国油公司为主)先后在 Agadem 区块(包括 Termit 盆地主体)进行了 36 年勘探, 累计投资约 3.5 亿美元, 完成了 30825km 航磁及 17000km 二维地震采集, 钻探井 20 口和评价井 5 口, 发现 7 个油气藏, 3P(证实+概算+可能)地质储量为 2980×10^4 。由于所发现储量在地处撒哈拉沙漠腹地的尼日尔无法效益开发, 并且合同到期, 根据合同规定不转开发的区块到期将无偿退还政府, 因此多家国际油公司无偿退出^[1]。根据 Agadem 区块井位等部署推测, 前作业者基本认识到了 Termit 盆地的含油性, 但许多地质问题尚未解决: (1) 对于 Termit 盆地的油气成藏规律认识不足, 包括烃源岩发育特征; (2)

未认识到主力成藏组合和次要成藏组合特征; (3) 认为 Termit 盆地油气资源潜力有限, 对规模发现没有信心。这些问题同样也是中国石油进入后面临的挑战。

2022 年底, 中国石油走向海外即将满 30 年, 进入尼日尔也即将满 20 年^[2]。本文通过系统回顾尼日尔 Agadem/Bilma/Tenere 区块(简称 A/B/T 区块)前作业者和中国石油的勘探历程, 总结其成功的经验和认识, 形成一个海外自主勘探的案例, 以期对“走出去”提供借鉴和参考。

1 区域地质特征

在前寒武纪, 非洲的克拉通之间由泛非造山带连成古大陆^[3]。Termit 盆地是发育在前寒武系结晶基底之上的西非裂谷系中—新生代盆地(图 1), 发育了一套厚达 8~9km 的白垩系—第四系的陆相/海相沉积岩, 钻井揭示的基底岩性有花岗岩、片麻岩、片岩、伟晶岩等, Termit 盆地西部揭示的花岗岩基底年龄为 $190\text{Ma} \pm 7\text{Ma}$ ^[4]。该盆地的形成与冈瓦纳大陆解体、南大西洋裂开和印度洋开启有关, 同时泛非基底构造

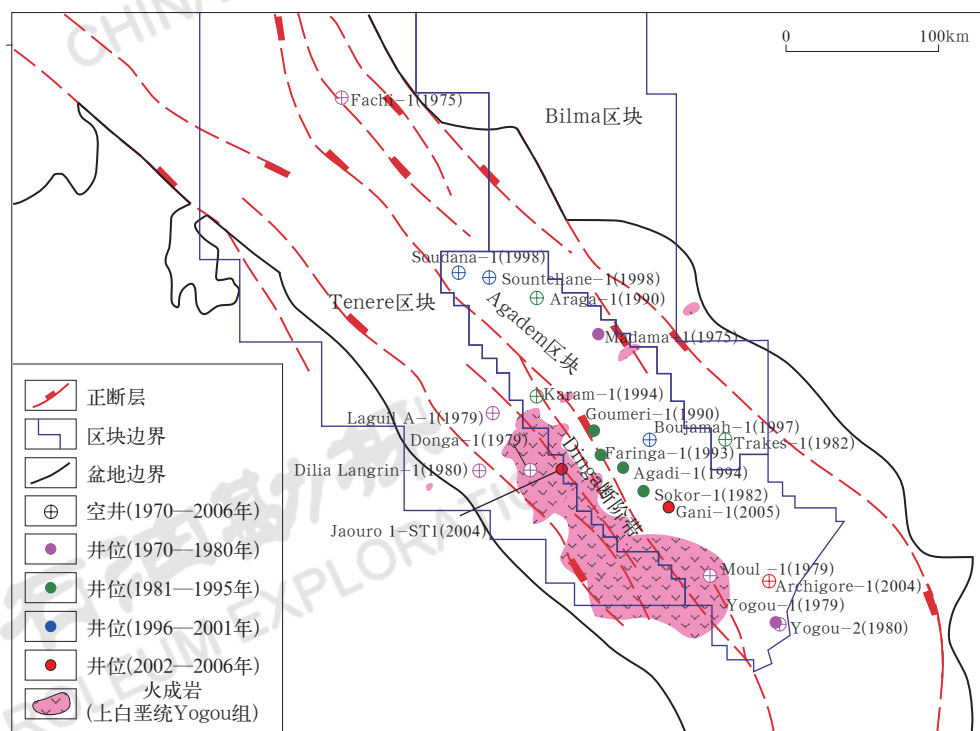


图 1 Termit 盆地构造纲要及钻井位置图(据文献[4]修改)

Fig.1 Structural outline of Termit Basin with well location (modified after reference [4])

可能对其走向和构造有显著的影响^[5-6]。Termit 盆地早期火山活动不发育，但晚白垩世—古近纪火山活动发育，火成岩年龄通常小于 85Ma^[4]，部分年龄在 62Ma 左右^[7-8]。Genik 提出 Termit 盆地发育三期裂谷^[4]，中方研究认为其发育两期裂谷和两期拗陷^[9-13]，从下到上发育了下白垩统（K₁），上白垩统 Donga 组、Yogou 组（细分为 YS1 段、YS2 段和 YS3 段）、Madama 组，古近系 Sokor1 组、Sokor2 组和新近系（图 2）。Termit 盆地沉积环境经历了陆相—海相—陆相的演变过程^[9,14-18]，Donga 组和 Yogou 组以海相砂泥岩沉积为主^[19]，形成了不同于中西非其他主要含油气盆地的上白垩统海侵沉积层序^[20-21]。

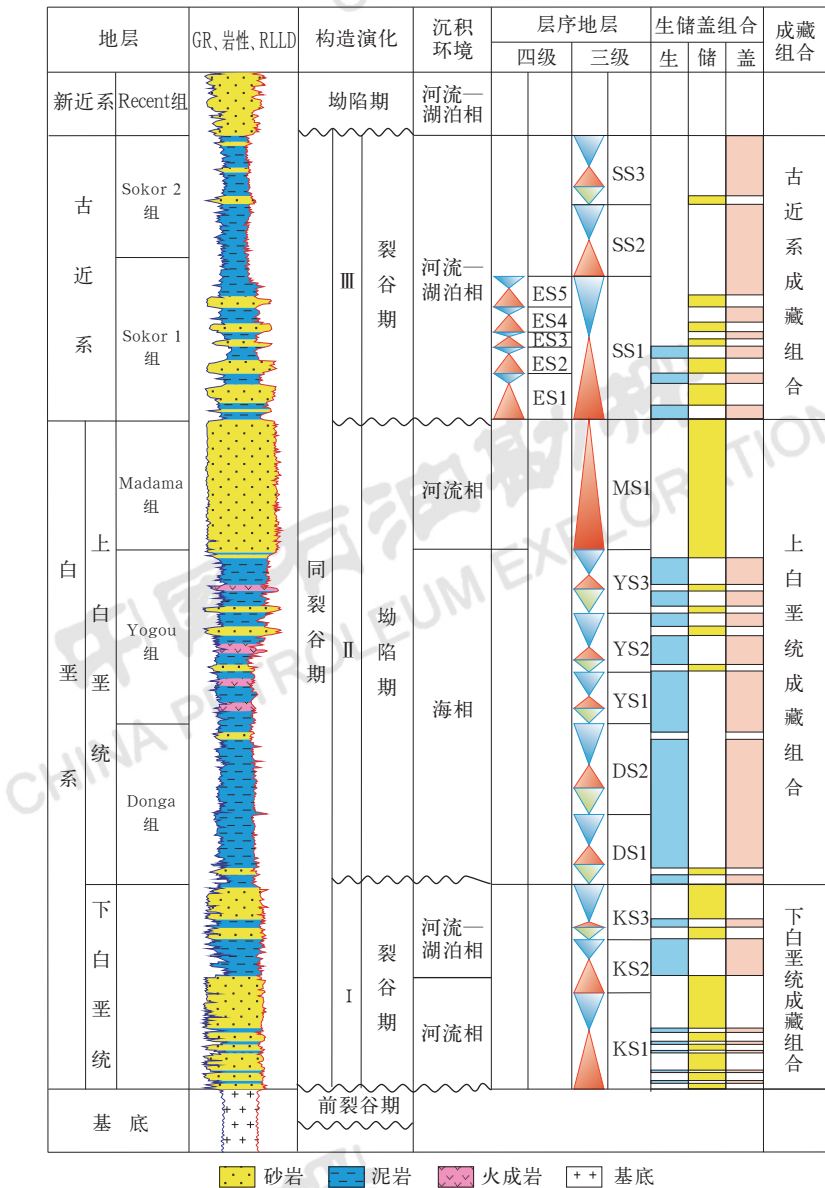


图 2 Termit 盆地地层综合柱状图 (据文献 [9,11] 修改)

Fig.2 Comprehensive stratigraphic column in Termit Basin (modified after reference [9,11])

2 油气勘探历程

2.1 前作业者勘探阶段

中国石油进入尼日尔进行勘探作业之前，尼日尔 A 区块进行过多轮次的作业者变更和合同重新签订，

后进一步划分了 B 区块和 T 区块。油气勘探总体可分为 4 个阶段（图 3a）。

2.1.1 早期阶段（1970—1980 年）：Texaco 公司和 Esso 公司先后成为 A 区块作业者，风险探索为主

Texaco 公司和 Esso 公司是首批进入尼日尔进行勘探的国际油公司。1970 年 1 月，两家公司联合中

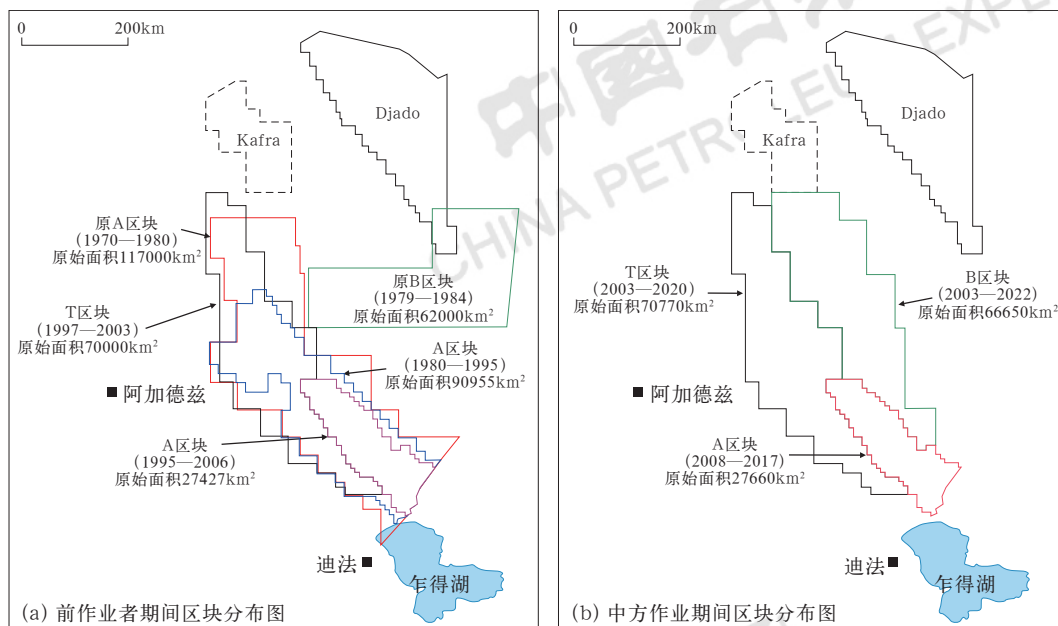


图3 尼日尔 A/B/T 区块范围变化示意图 (部分数据来自文献[22])

Fig.3 Exploration rights scope changes of A/B/T blocks in Niger (part of data from reference[22])

标原 A 区块, 权益各占 50%, Texaco 公司为作业者。区块面积为 117000km^2 (图 3a), 合同模式是常规资源勘探许可, 勘探期为 1970—1977 年。1977 年, 通过股权变更, Esso 公司成为作业者, 权益占 75%, Texco 公司权益占 25%^[22]。

1970—1980 年, 共采集二维地震资料 3937km , 在 A 区块共钻探风险探井 8 口, 7 口位于 Termit 盆地 (图 1)。1975 年 Madama-1 井在 Termit 盆地首次发现了古近系 Sokor1 组油藏, 1979 年 Yogou-1 井在盆地首次发现了上白垩统 Yogou 组油藏, 其余井失利, 成功率为 25%。

早期阶段部署的探井是围绕主力凹陷周边高部位的凸起区和斜坡区进行钻探, 总体是以白垩系为主要目的层, 基本揭示了所有沉积地层 (其中 3 口井钻遇基底), 推测其目的是探索整个盆地的含油气性, 以风险探索为主。

2.1.2 盆地古近系 (上组合) 探索获突破 (1980—1995 年): Elf 公司为 A 区块和 B 区块作业者

1980 年 12 月, 通过股权变更, Elf 公司入股并成为 A 区块作业者, 权益为 33.33%, 伙伴有 Esso 公司和 Texaco 公司。区块面积为 90955km^2 (图 3a), 合同模式是常规资源勘探许可。1980—1985 年, 义务工作量为采集二维地震资料 1500km 和钻井 2 口。1985 年, Texaco 公司退出, 政府重新签署了区块合同, 区块面积为 72681km^2 , 合同模式是常规资源勘

探许可, Elf 公司持股 62.5%, 仍为作业者, 伙伴是 Esso 公司。1993 年, Elf 公司在 A 区块持股比例变更为 50%, 为作业者。

1979 年, Elf 公司获得了原 B 区块合同, 权益为 100%, 区块面积为 62000km^2 (图 3a), 合同模式是常规资源勘探许可。1981 年, AG 公司入股 B 区块 25% 权益, Elf 公司权益变为 75%, 至 1984 年合同结束, B 区块未实施实物工作量。

1980—1995 年, Elf 公司在 A 区块共采集二维地震资料 7843km , 钻探风险探井 / 评价井 11 口 (探井 6 口、评价井 5 口, 图 1)。探井在西部 Dinga 断阶带上组合 Sokor1 组发现 5 个油气藏, 针对下组合 Yogou 组钻探 1 口评价井 Yogou-2 井, 失利。

期间钻井以古近系为目的层, 在 Dinga 断阶带获得一定程度的发现, 是前作业勘探发现的高峰期。该阶段成功的原因推测是吸取前期教训, 探索和发现了上部成藏组合含油气性。

2.1.3 继续甩开探索上组合, 收效甚微 (1995—2001 年): Esso 公司再次成为 A 区块作业者

1995 年 11 月, 尼日尔政府将原 A 区块重新划分为 A 区块、B 区块和 T 区块 (图 3a)。通过作业者变更, Esso 公司再次成为新划分 A 区块作业者, 工作权益为 80%; Elf 公司为合作伙伴, 权益为 20%。A 区块面积为 27427km^2 , 合同模式是常规资源勘探许可。勘探期为 1996—2006 年, 义务工作量为钻井

3口和完成投资6600万美元。1998年,Elf公司正式退出,Esso公司拥有A区块100%的权益。

1997年,TG World公司获得T区块100%权益,区块面积为70000km²(图3a),合同为勘探许可,合同期为1997—2007年,分为4+3+3年。至2003年中方进入,TG World公司未在T区块实施实物工作量。

1995—2001年,Esso公司担任A区块作业者期间,采集二维地震资料1800km,钻井3口(图1)。3口井目的层均是古近系,探索了盆地北部隆起带和东部构造,均失利,古近系探索受挫,显示前作业者未认识到其成藏规律。

2.1.4 发现少量油气,勘探进入低谷期(2001—2006年):Petronas公司成为A区块作业者

2001年6月,Petronas公司承诺独家新完成3口探井工作量,获得A区块50%的工作权益并成为作

业者,Esso公司为合作伙伴。区块面积和合同模式等未调整。2005年1月,Esso公司再次成为作业者,和Petronas公司各拥有区块50%的权益,2006年两家公司正式无偿退出A区块。期间Petronas公司主导钻探了Jaouro-1-ST1、Archigore-1和Gani-1等3口探井(图1),目的层是古近系,2口井位于盆地西部Dinga断阶带,发现两个小规模油藏;1口井位于盆地西南部Yogou斜坡,失利。

根据探井部署可以看出,Petronas公司以Dinga断阶带为勘探目标,未敢于大规模甩开勘探,同时在Yogou斜坡探索失利。根据后来中国石油对于成藏的认识,Yogou斜坡因为断层断距小,油气不利于运聚到上组合Sokor组,上组合含油性差,应以Yogou组自生自储成藏组合为主。中国石油在该地区以Yogou组为目的层发现了一个亿吨级油田群^[23](图4),反映出Petronas等国际油公司对于成藏规律认识的不足。

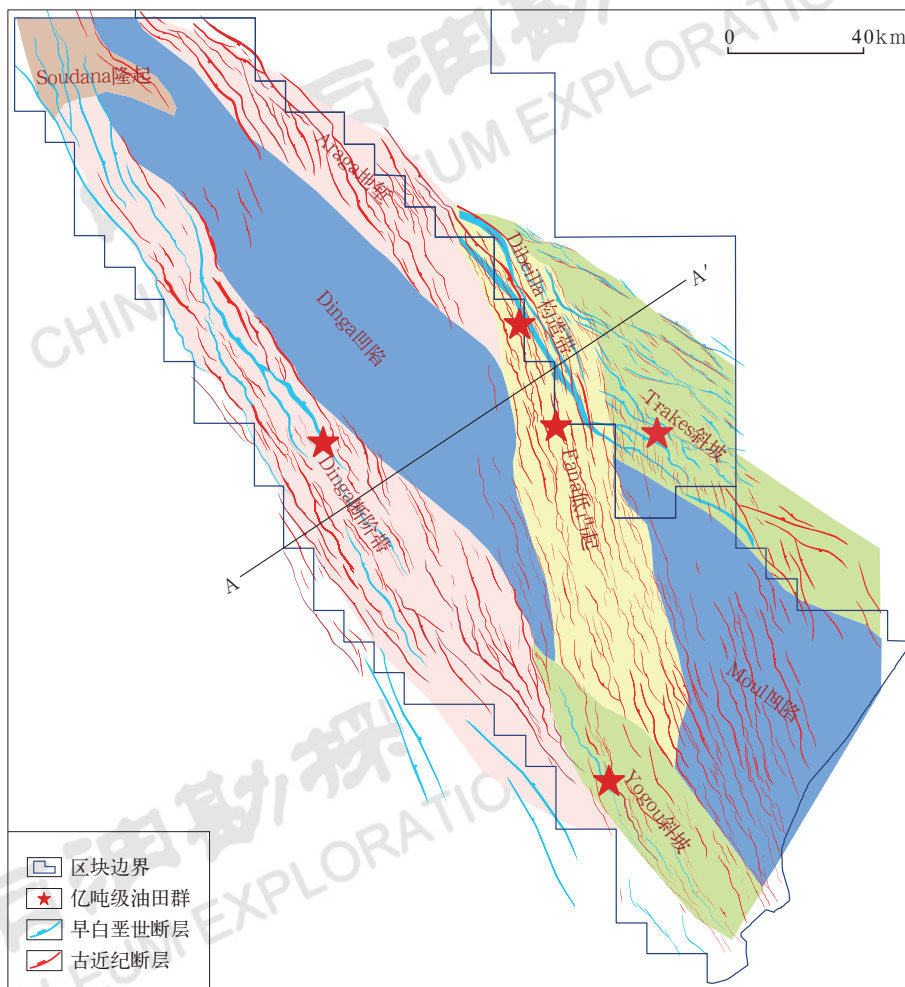


图4 Termit盆地主要含油气区带分布图

Fig.4 Distribution of main oil and gas areas in Termit Basin

2.1.5 前作业者勘探认识局限性与勘探面临挑战

经过前作业者 36 年勘探,基本摸清了 Termit 盆地的二级构造单元和地层沉积层序。认识到 Termit 盆地发育两套成藏组合,分别针对白垩系和古近系成藏组合进行了勘探,并在全盆地主要构造带进行甩开勘探,但未锁定主力目的层,发现集中在 Dinga 断阶带,认为其他区带成藏概率低,反映前作业者对于盆地主力成藏组合认识不清,对于盆地其他新区带潜力缺乏信心。由于成藏机理认识不深入,造成许多部署钻井目的层错位而失利。最典型的案例之一是 Elf 公司 1982 年钻探的 Trakes-1 井,目的层是针对上白垩统,未获油气发现。2020 年中国石油在同一个断层另一侧的上升盘针对古近系目的层进行钻探,获得了商业发现。另外, Termit 盆地多期裂谷叠置,构造结构复杂、破碎,以发育反向断块和断垒为主,圈闭识别难度大,使得中国石油进入后要取得规模油气发现面临诸多挑战。

2.2 中国石油区块评价获取与重大突破

2003 年初,中国石油通过对 Termit 盆地进行初步评价,认为该盆地具有与苏丹 Muglad 盆地等相似的盆地演化和成藏地质条件,属于陆相裂谷盆地范畴。一是认为 Termit 盆地具备基本的石油地质条件,主拗陷埋藏深(超过 8000m),具有勘探潜力;二是认为发现主要集中在盆地西部陡坡带,广大东部和南部缓坡带地区尚未突破,勘探领域广;三是中国石油在陆相裂谷盆地勘探有丰富经验和技術优势。因此积极推动技术和商务一体化运作,在 2003 年先进入覆盖 Termit 盆地外围的 T 区块和 B 区块(图 3b),2008 年获得涵盖 Termit 盆地主拗陷的 A 区块。

2.2.1 技术商务一体化和接触战略见成效,2003 年获取 B/T 区块,进行初步探索

2003 年底,通过股权变更,中国石油进入 T 区块并获得 80% 的权益, TG World 公司权益为 20%。2004 年,中方正式与政府签署区块合同,中方为作业者,区块面积为 70770km²,为矿税制合同,勘探期为 4+3+3 年。第一勘探期为 2004—2008 年,延长了 2 年,义务工作量为采集二维地震资料 1500km 和钻井 3 口,期间进行钻探和区域地质研究探索;2011 年,因未获勘探发现, TG World 公司彻底退出 T 区块,中方权益为 100%,并进入了第二勘探期。第二勘探期退出区块面积的 50%,义务工作量为采集二维地震资料 1000km 和钻井 4 口;2016 年进入第三

勘探期,义务工作量为钻井 1 口。期间因不可抗力力和勘探潜力等与政府谈判,勘探期有所补偿。2020 年因未获商业油气发现中方最终退出 T 区块,共采集二维地震资料 6702km,钻井 8 口。

2003 年底,中国石油进入 B 区块(图 3b),权益为 100%。2004 年,中方正式与政府签署 B 区块合同,区块面积为 66650km²,为矿税制合同,勘探期为 4+3+3 年,开发期为 15 年,可延长 10 年。第一勘探期义务工作量为采集二维地震资料 1000km;第二勘探期义务工作量为采集二维地震资料 1000km 和钻井 1 口;第三勘探期义务工作量为采集二维地震资料 500km 或三维地震资料 100km² 和钻井 2 口。期间通过与政府谈判,申请了勘探延长期,最终勘探于 2022 年到期。2020 年在 B 区块发现一个亿吨级油田群(Trakes)。

2.2.2 抓住时机,成为 A 区块作业者,地质研究攻关和勘探并行,获规模勘探突破

2008 年 6 月,中国石油与尼日尔政府正式签署合同成为 A 区块作业者,权益为 100%,根据地质认识和分步走战略,进行滚动和风险勘探。区块面积为 27660km²,合同模式为产品分成,勘探期为 4+2+2 年,开发期为 25 年,可延长 10 年。第一勘探期 4 年,义务工作量为采集二维地震资料 600km、采集三维地震资料 220km² 和钻井 11 口,退地 50%;第二勘探期 2 年,义务工作量为采集二维地震资料 1500km、采集三维地震资料 100km² 和钻井 4 口,退地 50%;第三勘探期 2 年,义务工作量为采集二维地震资料 1500km 和钻井 3 口,勘探到期退出。期间,因为不可抗力勘探期补偿了 1 年。中国石油于 2017 年 6 月 A 区块勘探到期,全面转入开发。期间,2013 年 8 月 23 日中国石油向台湾中油股份有限公司(简称台湾中油, OPIC) 出售 A 区块 20% 的权益。根据合同规定,尼日尔政府在 A 区块进入开发期有权参股 15%,开发期内中国石油权益为 65%(作业者), OPIC 权益为 20%,尼日尔政府权益为 15%。至 2017 年 A 区块勘探到期转开发,新发现 3 个亿吨级油田群。

2.2.3 中方在尼日尔 A/B/T 3 个区块完成工作量

2003—2022 年间,中国石油针对尼日尔 A/B/T 3 个区块实施了大量实物工作量,其中 A 区块 2017 年勘探到期转开发, T 区块 2020 年勘探到期未获商业储量发现退出, B 区块 2022 年勘探到期转开发。中国石油在尼日尔累计完成二维地震资料采集约 24728km、三维地震资料采集近 13500km²、时频电

磁采集 2122km, 共完钻探井/评价井 228 口, 新发现油气藏 130 多个 (75% 位于 A 区块, 25% 位于 B 区块), 其中亿吨级油气区带 5 个。2011 年 11 月, A 区块一期油田 (EEA1, 含 3 个断块) 建成投产, 年产能 为 100×10^4 t 石油, 已稳产 11 年。目前二期油田 450×10^4 t 年产能正在建设中, 预计 2023 年建成投产。

3 盆地油气富集特征

针对前作业者在 Termit 盆地勘探研究中的认识盲区, 中国石油基于陆相裂谷地质理论和被动裂谷盆地地质理论^[23], 进行攻关研究, 提出新的地质认识, 促进 Termit 盆地勘探大发现。

3.1 储盖组合

研究认为 Termit 盆地发育多套储层, 包括下白垩统砂岩、上白垩统砂岩、古近系 Sokor1 组和新近系砂岩。在上白垩统 Donga 组下部、Yogou 组上部和古近系 Sokor1 组储层中有工业油气流发现。通过对 3 套主要含油储层的岩石类型进行统计, 认为 Termit 盆地储层的岩石类型较为单一, 主要为石英砂岩。古近系 Sokor1 组储层以不等粒石英砂岩、细粒石英砂岩为主; 碎屑组分主要为石英、长石、岩屑, 其中石英平均含量达 85%, 成分成熟度高, 偶见少量长石, 储层发育原生孔隙和部分次生孔隙, 平均面孔率为 16%^[24]。上白垩统储层岩石以细粒石英砂岩为主, 含少量不等粒石英砂岩, 分选中等—差, 磨圆差; 碎屑组分主要为石英、长石、岩屑, 石英含量可达 90% 以上, 成分成熟度高, 储层发育原生孔隙和部分次生孔隙, 平均面孔率为 12.5%^[25]。总体分析, 两套储层的碎屑组分基本一致。

Termit 盆地主要发育上白垩统和古近系盖层, 其中古近系 Sokor2 组为区域盖层。通过测井评价, 认为上述两套盖层均为有效盖层。Sokor2 组泥岩盖层物性封闭能力强, 且普遍存在异常压力; Yogou 组和 Donga 组以泥岩为主, 为 I—II 类盖层, 均可有效封盖油气^[26]。

由此, Termit 盆地垂向上划分为上、下两套成藏组合, 上组合为古近系成藏组合, 包括下部 Sokor1 组砂泥岩互层段, 上部 Sokor2 组发育区域性泥岩盖层^[24,27]; 下组合为上白垩统成藏组合, 晚白垩世坳陷期发育海进—海退旋回, 海退期形成主力烃源岩及近源成藏组合 (图 2)。

3.1.1 上组合 (主力成藏组合)

古近纪裂谷初始期 Sokor1 组发育三角洲平原河道砂体及三角洲前缘分流河道砂体, 古近纪裂谷深陷期 Sokor2 组湖泊相泥岩为区域盖层^[24]。同时, 研究认为古近纪裂谷层序发育范围小于晚白垩世海侵层序范围, 古近系储盖组合处于烃源岩的有效供给范围内^[28-30]。Termit 盆地古近系 Sokor1 组反向断块发育, 研究认为反向断块中主力储层 Sokor1 组砂岩与 Sokor2 组厚层泥岩段侧向对接, 易形成良好的侧向封堵条件, 结合前作业者钻探认识, 综合确定古近系成藏组合是 Termit 盆地的主力成藏组合^[1,11]。

3.1.2 下组合 (次要成藏组合)

上白垩统成藏组合油气来自 Yogou 组和 Donga 组海相烃源岩。该套成藏组合的储层为三角洲及滨海相砂岩, 主要发育在 DS1 层序及 YS3 层序上部。MS1 层序砂岩缺乏盖层, 不能有效聚集油气, 故该套成藏组合主要储层段为 YS3 层序和 DS1 层序, DS2 层序及 YS2 层序在盆地边缘沉积薄层砂岩, 以自生自储为主 (图 2)。

另外, 下白垩统是否存在成藏组合尚未确定。下白垩统是盆地第 I 期裂谷期, 裂开范围有限, 只在局部凹陷区有沉积, 推测以河流—湖泊相粗粒沉积为主, 总体泥岩不发育。因为深凹区埋藏较深, 可能局部发育泥岩, 是否能够成为有效烃源岩还没有证实, 且埋藏太深, 推测砂岩物性差, 可能不发育有效成藏组合。

3.2 烃源岩

地球化学分析认为 Termit 盆地存在古近系 Sokor1 组、上白垩统 Yogou 组和 Donga 组 3 套泥岩烃源岩^[28-30]。Yogou 组上段 (YS3) 泥岩为中等—好烃源岩, 是主力烃源岩^[31-32], 其总有机碳含量平均达 4.9%, 生烃量达 14.45mg/g (HC/岩石), II₂ 型有机质为主, 镜质组反射率为 0.62%~1.29%。含油气系统分析与模拟显示该烃源岩全盆地大面积成熟, 油气运移具有原地生油、垂向和侧向运移的特征。次要烃源岩包括 Yogou 组下段 (YS1、YS2) 泥岩、Donga 组泥岩 (II₂—III 型有机质为主, 成熟—过成熟) 和古近系 Sokor1 组泥岩 (I—II₁ 型为主, 成熟范围小, 只在 Dinga 深凹区局部成熟)。

含油气系统模拟预测表明, YS3 段主力烃源岩层系生烃潜力较大, 占总生烃量的 96.3%, 以生油为主, Termit 盆地总生烃量为 494.5×10^8 t, 总排烃量为 401.6×10^8 t, 总资源量约为 16×10^8 t, 潜力大, 有

效解决了盆地资源潜力的困扰。通过古生物和沉积环境分析,在上白垩统泥岩中识别出 *Cribrroperidinium cooksoniae*、*Ovocytheridea bashibulakeensis*、*Micula staurophora* 等典型海相化石,证实晚白垩世与世界同步的大规模海侵的存在,结合地震等资料,确定 YS3 段发育海陆混源型烃源岩,且广覆式发育和成熟,有力支撑了盆地资源潜力评估和潜力区带优选。

3.3 油气成藏模式

针对成藏机理不清等问题,研究认为 Termit 盆地白垩纪和古近纪两期裂谷斜向叠置^[11],上白垩统

海相烃源岩广覆式发育,形成大范围生烃灶,与上覆古近系陆相主力成藏组合形成良好源储配置。热史重建与流体势运移模拟发现,盆地白垩纪古地温梯度低(平均为 27.6℃/km),古近纪增高(平均为 35.7℃/km),主力烃源岩在古近纪末期才开始大规模排烃,油气可以通过主力成藏组合下部的 Madama 组厚层砂岩(平均厚度达 600m)和断裂系统进行侧向和垂向运移,在远离凹陷的构造带聚集成藏。古近纪裂谷期盆地在近东西向拉张应力诱导下,发生北西—南东向右旋弱走滑,形成一系列断块圈闭,据此建立了海陆叠合裂谷油气成藏模式(图 5)。

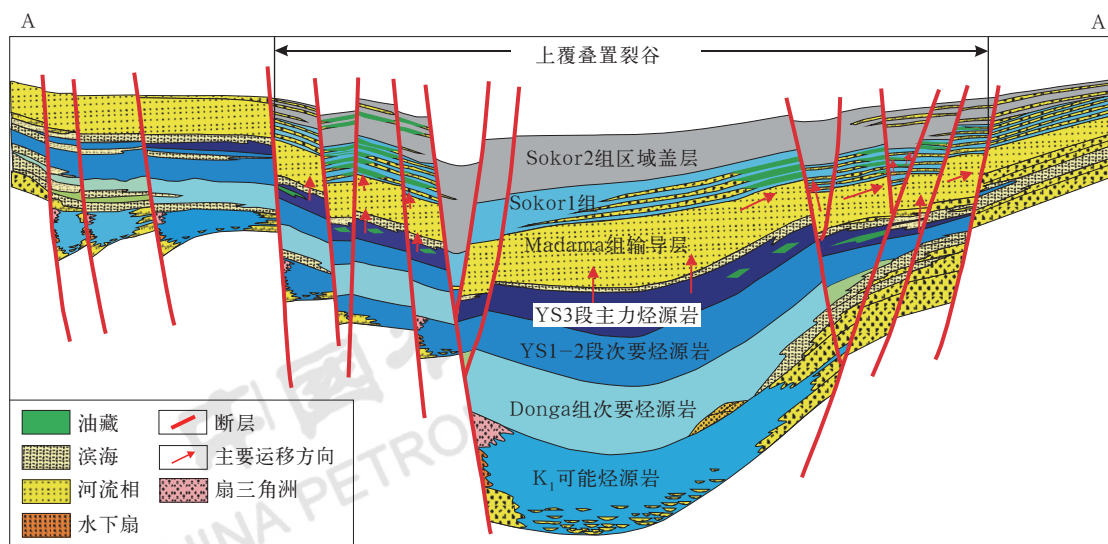


图 5 Termit 盆地海陆叠合裂谷油气成藏模式图(剖面位置见图 4)

Fig.5 Hydrocarbon accumulation mode in marine and continental superimposed rift in Termit Basin (section location is in Fig.4)

在海陆叠合裂谷油气成藏模式的指导下,突破了前作业者勘探认识盲区,指导落实 Dinga 断阶带一个亿吨级区带,在前人失利的 Dibeilla 构造带、中部 Fana 低凸起和东部 Trakes 斜坡等新发现 4 个亿吨级含油区带(图 4)。

3.4 典型油气藏分析

2003 年以来,中国石油在 Termit 盆地共落实 1 个亿吨级和新发现 4 个亿吨级油田群^[1,33-34],除了 Yogou 斜坡亿吨级上白垩统油田群外,其余均为古近系油田群(图 4)。Termit 盆地油气田以断块油藏为主,盆地西侧的部分油田发育气顶油藏。Sokor1 组油藏以反向断块和断垒为主,含油层系以三角洲前缘沉积为主,储层孔隙度为 20%~30%,渗透率为

200~1000mD,属中高孔—中高渗储层;Yogou 组油藏以低幅度背斜和顺向断块为主,储层为海相细砂岩,孔隙度为 8%~25%,渗透率低于 500mD,属中孔—中渗储层,充满度较低,天然能量较为充足。

Sokor 组主力油田埋深为 1500~2600m,原油重度为 11~45°API,以中轻质原油为主,采收率介于 20%~30%,下面以 Dibeilla 油田群为例进行说明。Dibeilla 油田群以古近系 Sokor1 组为主力油层,埋深为 1000~2500m,埋深适中,以反向断块和断垒为最有利圈闭类型(图 6)。该区紧邻西侧的 Dinga 生油凹陷,发育两期断层,包括早白垩世断层和古近纪断层,且发育继承性大断层,成为沟通油气运移的主要通道,在反向断块上升盘聚集成形成大油田群。

Dibeilla 断块为断鼻构造,局部被反向次级断层

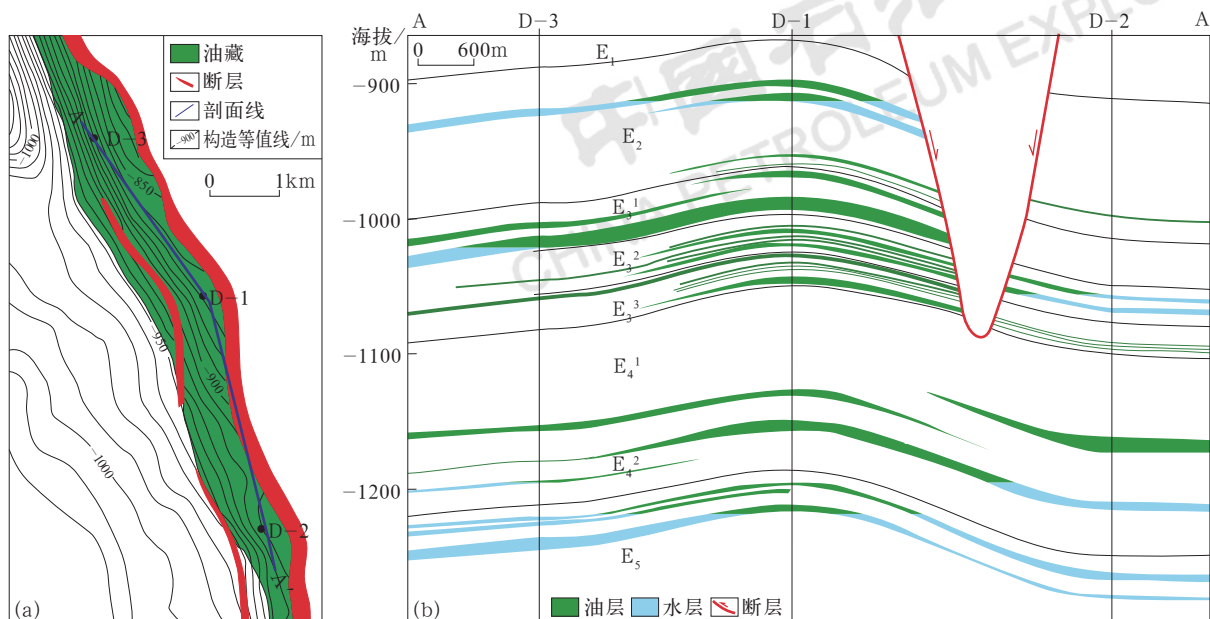


图6 D油田 Sokor1 组油藏平面图 (a) 和剖面图 (b)

Fig.6 Oil reservoir plane map (a) and profile (b) in Sokor1 group in Dibeilla oilfield

切割复杂化；主断层断距为 500~600m，次级断层断距为 30~50m，含油圈闭南北长 9km，东西宽约 700m，含油圈闭幅度为 160m；发现井 D-1 井目的层是 Sokor1 组的 E_2 — E_5 油组，砂层厚、物性好，储层相对发育，为中高孔—中高渗储层。Dibeilla 断块 E_3 — E_4 油组主力油层试油产量高，自喷达到 1500bbl/d 以上。纵向上原油性质有差异，主力油组 E_3 — E_4 为中质原油，密度为 $0.90\text{g}/\text{cm}^3$ ，次主力油组 E_2 为重质原油，密度较高，为 $0.94\text{g}/\text{cm}^3$ 。

4 勘探启示

4.1 坚持技术和商务一体化评价，制定适合的勘探策略，是尼日尔项目成功的基石

自主勘探成功的区块桶油成本低，效益一般均较好，自主勘探的成败对于海外油气项目至关重要^[2,23]。中国石油之所以能够在尼日尔勘探获得成功，技术和商务一体化的密切结合，以及坚持在自己擅长领域进行自主勘探区块获取是重要原因。

海外勘探与国内差别很大，主要体现在时间紧、节奏快、任务重等方面，有明确的勘探期，一般累计不超过 10 年。以 A 区块为例，2008 年 6 月，中方获得 A 区块，按照合同规定勘探期 8 年，分为 4+2+2 年，且 3 年内还要建成 $100 \times 10^4\text{t}/\text{a}$ 的产能、输油管线及炼厂，时间紧、节奏快、任务重。中方专家立足

于长远规划，集思广益，制定了勘探分四步走策略。一是先依托前作业者已有的勘探发现，优先落实老油田及周边圈闭的油气储量规模，为 $100 \times 10^4\text{t}/\text{a}$ 产能建设提供储量基础；二是依托前作业者已有的勘探发现，先重点勘探 Dinga 断阶带，尽快落实该区带古近系的资源潜力；三是甩开评价盆地其他区带，尤其是东部斜坡；四是进一步探索白垩系勘探潜力。按照当初制定的四步走勘探策略，逐步实现了制定的战略目标，为二期 $450 \times 10^4\text{t}/\text{a}$ 产能建设和原油外输提供了储量基础。

4.2 创新地质认识是 Termit 盆地风险勘探突破的核心

中国石油接手后，针对面临的难题，系统开展了盆地构造演化、沉积储层、烃源岩评价、含油气系统模拟和油气运移成藏等研究工作，形成了“Termit 盆地晚期生烃，跨时代运聚，晚期成藏”的地质新认识^[30]。提出晚白垩世坳陷期 Termit 盆地遭受大规模海侵，泥岩全盆地广泛沉积，形成了上白垩统 Yogou 组和 Donga 组烃源岩；此外，由于古近纪裂谷作用较弱，沉积范围小，坐落于上白垩统优质烃源岩之上，形成“断坳叠置、下大上小”的盆地结构特征，供油面积大大增加，晚期生烃和跨时代运移使得上白垩统生成的油气运移到古近系中成藏。打破了前作业者认识局限，从而为后续盆地东部斜坡 Dibeilla 构造带、Fana 低凸起、Yogou 斜坡风险勘探的突破及规模储

量发现提供了坚实的指导。也正是基于这样的创新认识,2019—2022年,中国石油在盆地东缘 Trakes 斜坡勘探获重大突破,发现一个新的亿吨级油田群,距1982年第一口风险探井已走过40年。

4.3 应用和攻关适用的陆相裂谷技术,是促进规模储量快速发现的催化剂

针对 Termit 盆地构造复杂、圈闭破碎等难题,参考经典陆相裂谷盆地勘探理论技术,提出针对性建议。一是应用成熟技术,提出“三维地震资料整体部署、分步实施”策略。根据二维地震资料落实情况 and 石油地质研究认识确定先采集哪一部分,逐步实施,也可

以根据实际钻探情况进行调减或调增,同时保持采集数据参数一致性,降低作业成本,提高圈闭识别精确度。以 Trakes 斜坡为例,同一个区域古近系 Sokor1 组顶构造图二维地震资料解释只发现2个小圈闭,圈闭总面积为 2.3km^2 ,实施三维地震后,新发现圈闭目标26个,圈闭总面积为 126km^2 (图7),充分显示了有规划的整体部署和分步实施三维的重要性。二是攻关形成系列适用技术,包括复杂断块精细刻画技术、相控模式下的分频属性反演技术和低阻油层成因机理研究与综合评价技术等,形成了技术手册和获得了软件著作权,有效解决了勘探中面临的难题,提高了勘探的效率。

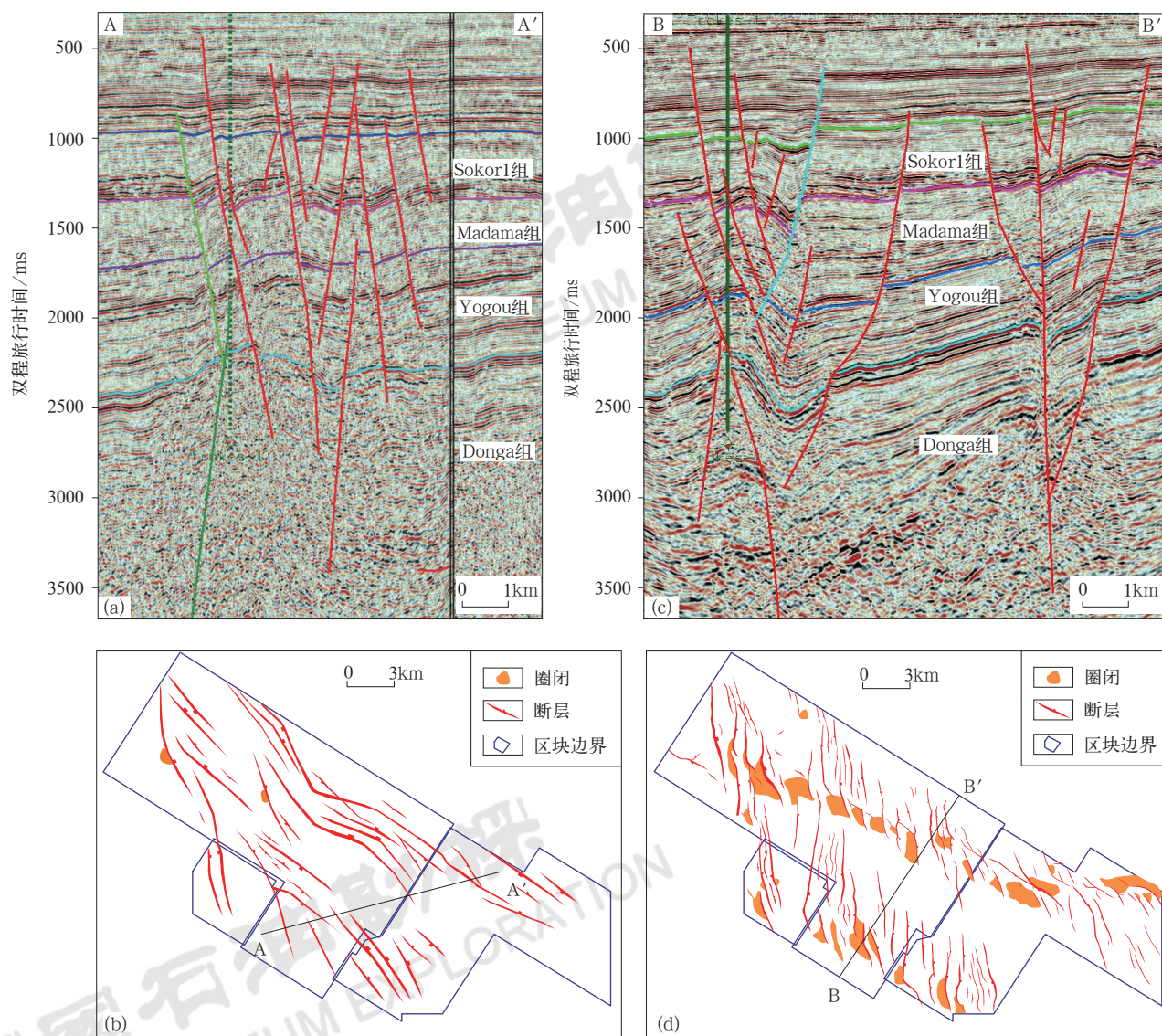


图7 Termit 盆地东缘 Trakes 斜坡二维区 (a 和 b) 与三维区 (c 和 d) 构造解释对比图

Fig.7 Comparison of structural interpretation results in 2D (a and b) and 3D (c and d) seismic areas in Trakes slope in the eastern marginal of Termit Basin

5 结论

中国石油通过高效的技术和商务一体化运作,成功获取了尼日尔自主勘探区块。攻关前作业者认识盲区,快速明确了 Termit 盆地主力烃源岩特征、主力储盖组合并建立成藏模式,为勘探发现奠定基础。同时,遵循海外项目运营规则,按照制定策略和勘探期进行项目高效运作,自主勘探获得成功。尼日尔项目成为中国石油“走出去”自主勘探的又一成功典型案例,不但丰富和发展了被动裂谷盆地石油地质理论,也为未来类似区块的评价、获取和勘探提供参考。

致谢:文章撰写过程中得到窦立荣、张光亚、万仑坤和刘小兵等专家的指点和帮助,在此一并感谢。

参考文献

- [1] 万仑坤,毛凤军,刘计国,等.尼日尔 Termit 盆地高效油气勘探实践与启示[G]//薛良清,潘校华,史卜庆等主编.海外油气勘探实践与典型案例.北京:石油工业出版社,2014:53-67.
Wan Lunkun, Mao Fengjun, Liu Jiguo, *et al.* Practice and efficient oil and gas exploration in Termit Basin, Niger[G]//Xue Liangqing, Pan Xiaohua, Shi Buqing, *et al.*, ed. Overseas hydrocarbon exploration: practice and case studies. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014:53-67.
- [2] 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.
- [3] Martin A K, Hartnady C J H, Goodlad S W. A revised fit of south America and south central Africa[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1981(54):293-305.
- [4] Genik G J. Petroleum geology of Cretaceous-Tertiary rift basins in Niger, Chad and Central African Republic[J]. AAPG Bulletin, 1993,77(8):1405-1434.
- [5] Genik G J. Regional framework structural and petroleum aspects of rift basins in Niger, Chad and the Central African Republic (CAR)[J]. Tectonophysics, 1992,213(1):169-185.
- [6] 张庆莲,侯贵廷,潘校华,等. Termit 盆地构造变形的力学机制[J].大地构造与成矿学,2013,37(3):377-383.
Zhang Qinglian, Hou Guiting, Pan Xiaohua, *et al.* Mechanics of Termit Basin in central Africa rift systems[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013,37(3):377-383.
- [7] 路玉林,刘嘉麒,窦立荣,等.非洲乍得盆地玄武岩 K-Ar 和 ^{39}Ar - ^{40}Ar 年代学及其动力学背景[J].地质学报,2009,83(8):1125-1133.
Lu Yulin, Liu Jiaqi, Dou Lirong, *et al.* K-Ar and ^{39}Ar - ^{40}Ar geochronology of basalts from the Chad Basin, Africa and its geodynamics setting [J]. Acta Geologica Sinica, 2009,83(8):1125-1133.
- [8] 窦立荣,肖坤叶,王景春,等.强反转裂谷盆地石油地质与勘探实践[M].北京:石油工业出版社,2018:19.
Dou Lirong, Xiao Kunye, Wang Jingchun, *et al.* Petroleum geology and exploration practice in strong inversion rift basins[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018:19.
- [9] 刘邦,潘校华,万仑坤,等.东尼日尔 Termit 盆地叠置裂谷的演化:来自构造和沉积充填的制约[J].现代地质,2012,26(2):317-325.
Liu Bang, Pan Xiaohua, Wan Lunkun, *et al.* Polyphase rift evolution of the Termit Basin, eastern Niger: constraints from structural and sedimentary records[J]. Geosciences, 2012, 26(2):317-325.
- [10] Fairhead J D, Green C M, Masterton S M, *et al.* The role that plate tectonics, inferred stress changes and stratigraphic unconformities have on the evolution of the west and central African rift system and the Atlantic continental margins[J]. Tectonophysics, 2013,594:118-127.
- [11] 郑风云,史卜庆,李早红,等.尼日尔 Termit 盆地古近系构造样式及其对油气聚集的控制作用[J].地学前缘,2018,25(2):72-82.
Zheng Fengyun, Shi Buqing, Li Zaohong, *et al.* Paleogene structure styles and their controls on hydrocarbon accumulation in Termit Basin, Niger[J]. Earth Science Frontiers, 2018,25(2): 72-82.
- [12] 张光亚,黄彤飞,刘计国,等.中西非叠合裂谷盆地形成与演化[J].岩石学报,2022,38(9):2539-2553.
Zhang Guangya, Huang Tongfei, Liu Jiguo, *et al.* Formation and evolution of west and central African superimposed rift basins[J]. Acta Petrologica Sinica, 2022,38(9):2539-2553.
- [13] 王涛,袁圣强,李传新,等.西非裂谷系 Termit 窄裂谷盆地地质结构及成因机制[J/OL].石油勘探与开发,2022,49(6):1-11[2022-10-07]. <https://doi.org/10.11698/PED.20220318>.
Wang Tao, Yuan Shengqiang, Li Chuanxin, *et al.* Geological structure and dynamic mechanism of the Termit narrow rift basin in west African rift system[J/OL]. Petroleum Exploration and Development, 2022,49(6):1-11[2022-10-07]. <https://doi.org/10.11698/PED.20220318>.
- [14] Reymont R A. Biogeography of the Saharan Cretaceous and Paleocene epicontinental transgressions[J]. Cretaceous Research, 1980,1(4):299-327.
- [15] 付吉林,孙志华,刘康宁.尼日尔 A 区块古近系层序地层及沉积体系研究[J].地学前缘,2012,19(1):58-67.
Fu Jilin, Sun Zhihua, Liu Kangning. The study on sequence stratigraphy and sedimentary systems of Paleogene in Agadem Block, Niger[J]. Earth Science Frontiers, 2012,19(1):58-67.
- [16] Guiraud R, Bosworth W, Thierry J, *et al.* Phanerozoic geological evolution of Northern and Central Africa: an overview[J]. Journal of African Earth Sciences, 2005,43 (1-3):83-143.
- [17] 汤戈,孙志华,苏俊青,等.西非 Termit 盆地白垩系层序地层与沉积体系研究[J].中国石油勘探,2015,20(4):81-88.
Tang Ge, Sun Zhihua, Su Junqing, *et al.* Study of Cretaceous sequential stratigraphy and sedimentary system in Termit Basin of west Africa[J]. China Petroleum Exploration, 2015,20(4): 81-88.
- [18] 毛凤军,刘若涵,刘邦,等.尼日尔 Termit 盆地及其周缘晚白垩世古地理演化[J].地学前缘,2016,23(3):186-197.
Mao Fengjun, Liu Ruohan, Liu Bang, *et al.* Palaeogeographic

- evolution of the Upper Cretaceous in Termit Basin and its adjacent areas, Niger[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016,23(3): 186–197.
- [19] Liu Jiguo, Chen Jinhui, Zhang Guangya, *et al.* Cretaceous dinoflagellate cyst biostratigraphy in the Facai-well of the Tenere Graben in eastern Niger, Africa[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2020,169:103888.
- [20] 袁圣强, 郑风云, 毛凤军, 等. 尼日尔 Termit 盆地白垩系勘探新层系油气成藏规律[C]. 中国石油学会第九届青年学习交流会优秀论文集. 青岛: 中国石油大学出版社, 2016:102–111.
- Yuan Shengqiang, Zheng Fengyun, Mao Fengjun, *et al.* Oil and gas accumulation law of cretaceous exploration new formation in Termit Basin, Niger[C]. Excellent collection of the 9th Youth Seminar of China Petroleum Society. Qingdao: China Petroleum Press, 2016:102–111.
- [21] 袁圣强, 毛凤军, 郑风云, 等. 尼日尔 Termit 盆地上白垩统成藏条件分析与勘探策略[J]. *地学前缘*, 2018,25(2):42–50.
- Yuan Shengqiang, Mao Fengjun, Zheng Fengyun, *et al.* Analysis of hydrocarbon accumulation condition and exploration tactics of the Upper Cretaceous strata in the Termit Basin, Niger[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018,25(2):42–50.
- [22] IHS Markit. IHS Edin [DB/OL]. [2022–02–28]. <https://ihsmarkit.com/index.html>.
- [23] 窦立荣. 苏丹被动裂谷盆地的油气成藏机理和成藏模式[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2003:1–12.
- Dou Lirong. formation mechanism and formation models of oil and gas pools in the Passive rift basins of Sudan[D]. Beijing: Insitute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2003:1–12.
- [24] 吕明胜, 薛良清, 万仑坤, 等. 西非裂谷系 Termit 盆地古近系油气成藏主控因素分析[J]. *地学前缘*, 2015,22(6):207–216.
- Lv Mingsheng, Xue Liangqing, Wan Lunkun, *et al.* Main controlling factors of Paleogene hydrocarbon accumulation of Termit Basin, west African rift system[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015,22(6):207–216.
- [25] 毛凤军, 刘邦, 刘计国, 等. 尼日尔 Termit 盆地上白垩统储层岩石学特征及控制因素分析[J]. *岩石学报*, 2019,35(4):1257–1268.
- Mao Fengjun, Liu Bang, Liu Jiguo, *et al.* The reservoir characteristics and controlling factors of the Upper Cretaceous sandstones in the Termit Basin, Niger[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019,35(4):1257–1268.
- [26] 李早红, 程小岛, 姜虹, 等. 尼日尔 Termit 盆地低阻油层成因机理及综合识别技术[J]. *地学前缘*, 2018,25(2):99–111.
- Li Zaohong, Cheng Xiaodao, Jiang Hong, *et al.* Genetic mechanism of low-resistivity oil zones and comprehensive identification technology for well logging in the Termit Basin, Niger[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018,25(2):99–111.
- [27] 周立宏, 苏俊青, 董晓伟, 等. 尼日尔 Termit 裂谷型叠合盆地油气成藏特征与主控因素[J]. *石油勘探与开发*, 2017,44(3):330–339.
- Zhou Lihong, Su Junqing, Dong Xiaowei, *et al.* Controlling factors of hydrocarbon accumulation in Termit rift superimposed basin, Niger[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(3):330–339.
- [28] Wan L K, Liu J G, Mao F J, *et al.* The petroleum geochemistry of the Termit Basin, eastern Niger[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014,51:167–183.
- [29] Liu B, Wan, L K, Mao F J, *et al.* Hydrocarbon potential of Upper Cretaceous potential source rocks, Termit Basin, Niger[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 2015,38(2):157–176.
- [30] Dou L R, Bai G S, Liu B, *et al.* Sedimentary environment of the Upper Cretaceous Yogou Formation in Termit Basin and its significance for high-quality source rocks and Trans-Saharan seaway[J/OL]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 142.[2022–10–07]. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105732>.
- [31] 董晓伟, 刘爱平, 钱茂路, 等. 西非裂谷系尼日尔 Termit 盆地烃源岩地球化学特征分析与原油分类[J]. *录井工程*, 2016,27(2):87–92.
- Dong Xiaowei, Liu Aiping, Qian Maolu, *et al.* Geochemical characteristics analysis and classification of crude oil of source rocks in Termit Basin of Niger in west African rift system[J]. *Mud Logging Engineering*, 2016,27(2):87–92.
- [32] 程顶胜, 窦立荣, 张光亚, 等. 中西非裂谷盆地白垩系两类优质烃源岩发育模式[J]. *地质学报*, 2020,94(11):3449–3460.
- Cheng Dingsheng, Dou Lirong, Zhang Guangya, *et al.* Development pattern of two types of exceptional Cretaceous source rocks in the rift systems in west and central Africa[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020,94(11):3449–3460.
- [33] 薛良清, 万仑坤, 毛凤军, 等. 东尼日尔盆地 Termit 坳陷油气富集规律及 Dibeilla-1 井发现的意义[J]. *中国石油勘探*, 2012,17(4):53–59.
- Xue Liangqing, Wan Lunkun, Mao Fengjun, *et al.* Petroleum migration and accumulation in Termit Depression of east Niger Basin and implication for discovery of Well Dibeilla-1[J]. *China Petroleum Exploration*, 2012,17(4):53–59.
- [34] 薛良清, 史卜庆, 王林, 等. 中国石油西非陆上高效勘探实践[J]. *中国石油勘探*, 2014,19(1):65–74.
- Xue Liangqing, Shi Buqing, Wang Lin, *et al.* Achievements of CNPC's high-efficiency exploration of offshore blocks in west Africa[J]. *China Petroleum Exploration*, 2014,19(1):65–74.