

引用格式:袁井菊,王光付,李发有,等.里奥-德雷盆地泥岩底辟演化及其对中深层S5油气成藏的控制[J].油气地质与采收率,2025,32(1):71-80.

YUAN Jingju, WANG Guangfu, LI Fayou, et al. Mudstone diapir evolution and its control on hydrocarbon accumulation in middle-deep layer S5 in Rio Del Rey Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2025, 32(1): 71-80.

里奥-德雷盆地泥岩底辟演化及其对中深层 S5油气成藏的控制

袁井菊¹,王光付¹,李发有¹,彭兆蒙¹,丁一萍¹,陈占坤¹,于欣瑶²

(1. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 中国石油大庆油田分公司 第二采油厂,黑龙江 大庆 163000)

摘要:喀麦隆里奥-德雷盆地发育泥岩底辟,盆地浅部地层受泥岩底辟控制发育断块和断背斜油气藏,已进入开发中后期,中深层S5(简称S5)由于前期研究程度低和油气富集规律认识不足,探井成功率低,资源接替面临挑战。通过开展区域沉积、构造、油气成藏特征,尤其是区域构造演化平衡剖面研究发现,里奥-德雷盆地泥岩底辟是来源于深部巨厚的古新统Akata泥岩,其活动时间始于始新世末期至今,局部控制早中新世的S5三角洲前缘砂体沉积范围,砂体与泥岩底辟及其伴生断层易形成构造-岩性或断块圈闭,圈闭形成时间早于Akata泥岩生油期,泥岩底辟和断层为油气运移提供通道,生储运聚组合有利于在泥岩底辟周缘S5形成油气藏。但对盆地S5已钻井失利原因进一步分析后发现,泥岩底辟周缘存在油气差异聚集特征,由于泥岩底辟长期活动并刺穿S5地层,因而油气容易沿泥岩底辟活动通道向上逸散,导致直接接触泥岩底辟的第一排构造-岩性圈闭保存条件变差,难以形成油气藏,在第一排构造-岩性圈闭钻探的多口探井也均未获得成功;而泥岩底辟控制下的第二排断块构造带(二台阶构造带)构造圈闭则可以依靠上倾断层遮挡成藏,不受泥岩底辟后期活动影响,是S5油气富集的有利场所。在此基础上,2018—2023年中国石化在第二排构造带上相继部署2口探井均获得成功,并达到商业发现级别,进一步证实了泥岩底辟对里奥-德雷盆地中深层油气成藏的控制作用,且泥岩底辟控制下的二台阶构造带是未来有利勘探区带。

关键词:泥岩底辟;构造演化;二台阶构造带;油气成藏;里奥-德雷盆地

文章编号:1009-9603(2025)01-0071-10

DOI:10.13673/j.pgre.202410021

中图分类号:TE121

文献标识码:A

Mudstone diapir evolution and its control on hydrocarbon accumulation in middle-deep layer S5 in Rio Del Rey Basin

YUAN Jingju¹, WANG Guangfu¹, LI Fayou¹, PENG Zhaomeng¹, DING Yiping¹, CHEN Zhankun¹, YU Xinyao²

(1. SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing City, 100083, China;

2. No.2 Oil Production Plant, CNPC Daqing Oilfield Company, Daqing City, Heilongjiang Province, 163000, China)

Abstract: The Rio Del Rey Basin in Cameroon develops mudstone diapirs. Due to the control of mudstone diapirs, oil and gas reservoirs of fault blocks and fault anticlines are developed in the shallow strata of the basin and enter into the middle and late stages of development. The success rate of exploratory wells in middle-deep layer S5 is low, and resource replacement is facing challenges due to poor previous research and insufficient understanding of oil and gas accumulation law. The regional sedimentation, structures, and hydrocarbon accumulation characteristics, especially the balanced profile of regional tectonic evolution, were researched, and it was found that mudstone diapirs in the Rio Del Rey Basin were derived from the thick Akata mudstones of the Paleocene series in the deep part, and their activity time began from the end of Eocene to present. It locally controlled the deposition ranges of the sand body in the front of the S5 delta in the early Miocene. Sand bodies, mudstone diapirs, and associated faults were

收稿日期:2024-10-20。

作者简介:袁井菊(1971—),女,湖北荆门人,高级工程师,博士,从事油气勘探方面的研究工作。E-mail: yuanjj.syky@sinopec.com。

通信作者:王光付(1965—),男,安徽庐江人,正高级工程师,博士。E-mail: wanggf.syky@sinopec.com。

基金项目:中国石化科技部项目“喀麦隆Rio del Rey盆地Nguti浊积岩有利目标评价”(2019P20072-4)。

easy to form structural-lithological and fault-block traps, which were formed earlier than the oil-generating period of Akata mudstone. Mudstone diapirs and faults provided channels for oil and gas migration, and the combination of source-reservoir-transportation-accumulation was conducive to hydrocarbon accumulation around mudstone diapirs in S5. However, the reasons for the drilling failure of S5 were analyzed in the basin, and there were differences in oil and gas accumulation characteristics around mudstone diapirs. Oil and gas easily escaped upward along the activity channel of mudstone diapirs due to the long-term activity of mudstone diapirs and its penetration into S5, resulting in poor preservation conditions for the first row of structural-lithological traps directly contacting mudstone diapirs and thus making hydrocarbon accumulation difficult. Previous drilling in multiple exploratory wells on the first row of structural-lithological traps also failed. The second row of structural traps (two-step structural belt) controlled by mudstone diapirs could be trapped by updip faults, which were not affected by the later activity of mudstone diapir, and they became favorable places for oil and gas enrichment in S5. On this basis, Sinopec successively deployed two exploratory wells in the second row of structural belts from 2018 to 2023, and oil discovery reached a commercial level, which further confirmed the control effect of mudstone diapirs on middle-deep hydrocarbon accumulation in the Rio Del Rey Basin, and it proved that the two-step structural belts under the control of mudstone diapirs were favorable exploration belts in the future.

Key words: mudstone diapir; structural evolution; two-step structural belt; hydrocarbon accumulation; Rio Del Rey Basin

底辟构造是指地壳深部塑性岩层在外力作用下发生流动、上拱而产生的构造。有关底辟构造的研究已具有近百年的历史。研究表明,某些岩层在应力作用下将像流体或黏性固体一样流动,这些岩层包括蒸发岩、黏土岩、泥岩、泥炭、泥灰岩及火成岩,但最普通、最重要的是蒸发岩(盐岩)和泥岩底辟构造。底辟向上运动是相对于周围地区的沉积岩而言的。沉积岩通常随着沉积盆地的发展而下沉,只有当底辟向上生长快于周围沉积物的沉降时,才具有绝对的向上运动^[1-3]。在早期的研究中,前人对盐岩底辟的形成及其演化进行了分析探讨,普遍认为底辟包括沉积建造、构造抬升建造、重力扩展和区域性挤压4种成因机制。

近年来,底辟构造因其复杂变形过程及其与油气资源的生烃、排烃、运移和聚集等关系极为密切而受到地质学家的广泛关注,成为研究的热点^[4-7]。据前人研究,非洲西海岸尼日尔三角洲发育2组泥岩底辟,即西部尼日尔三角洲主体泥岩底辟和东部里奥-德雷(Rio Del Rey)盆地泥岩底辟,呈对称状态分布,构造剖面形态基本相同^[8]。里奥-德雷盆地位于尼日尔三角洲盆地东部边缘,油气资源非常丰富,是目前中国石化集团在西非地区的重点资产分布区之一。该区域构造复杂,平面上呈SN走向,平行发育多个泥岩脊,对其发育的几何形态、形成机理开展相关研究工作,普遍认为里奥-德雷盆地泥岩底辟的形成主要受重力滑动作用控制,活动期次与中新统三角洲大规模发育期相关^[9-11]。

多年勘探实践表明,泥岩底辟活动在里奥-德雷盆地油气聚集过程中具有非常重要的作用,不仅控制沉积储层的分布,也为深层油气运移提供了有利的聚集场所。为此,笔者较系统地分析了里奥-德雷

盆地的泥岩底辟构造特征、构造演化历史及其对S5沉积和油气成藏的影响,提出泥岩底辟控制下的第二排断块构造带(二台阶构造带)是油气有利富集区,并利用勘探实践的应用实例进行了验证,以期为中国石化在该地区或类似地质情况地区的油气勘探开发提供指导作用。

1 区域地质概况

里奥-德雷盆地地理位置位于喀麦隆南部浅海海域,区域构造上属于尼日尔三角洲盆地东北缘的一个次级盆地,为古新世至现今持续发育的新生代海退三角洲被动大陆边缘盆地。

该盆地新生代自下向上发育3套地层,分别是阿卡特组(Akata)泥岩、阿格巴达组(Agabada)互层的砂岩和泥岩、贝宁组(Benin)砂岩,上述3套地层均为穿时地层单元^[12]。其中位于底部的阿卡特组为古近纪至新近纪的穿时地层,发育巨厚海相泥岩,夹有少量的Oongue、Isongo、Nguti浊积砂岩;阿格巴达组为新近纪的穿时地层,发育早中新世S5、S6—S11三角洲前缘砂-泥互层和S12前三角洲沉积(以泥岩为主),晚中新世S1—S3三角洲前缘砂-泥互层和S4前三角洲沉积,上新世S0.5—S0.9的三角洲前缘砂-泥互层和前三角洲沉积;贝宁组为新近纪的穿时地层,发育上新世—全新世的三角洲前缘沉积,以砂岩为主,但因缺乏盖层而不能形成圈闭。

研究区烃源岩为阿卡特组泥岩,有机质丰富,是盆地主力烃源岩,发育Ⅱ型干酪根,姥鲛烷/植烷值为1.6~1.9,目前未收集到里奥-德雷盆地总有机碳含量数据,尼日利亚地区总有机碳含量平均为1.68%(最高为2.2%)。储层分别为Oongue、Isongo、

Nguti 浊积砂岩, S6—S11、S5、S1—S3、S0.5—S0.9 等三角洲前缘砂体。区域盖层为阿卡塔组泥岩, S12、S4 和 S0.5 前三角洲沉积的泥岩; 主要油气发现位于阿格巴达组的砂岩^[9](图1)。

从勘探开发上来讲, 盆地浅层 S0—S1 是主要开发层系, 截至 2023 年, 盆地已钻井 783 口, 其中评价

井 248 口, 已发现油田大多进入开发中后期, 含水率超过 90%, 浅层面临资源接替难题。盆地 S5 已钻井约 150 口, 其中 2019—2023 年中国石化在 S5—S6 钻探 3 口探井, 2 口井获得成功。盆地 S5 以下地层由于前期研究程度低和油气富集规律认识不足, 勘探程度和探井成功率较低, 是目前重点滚动评价和勘

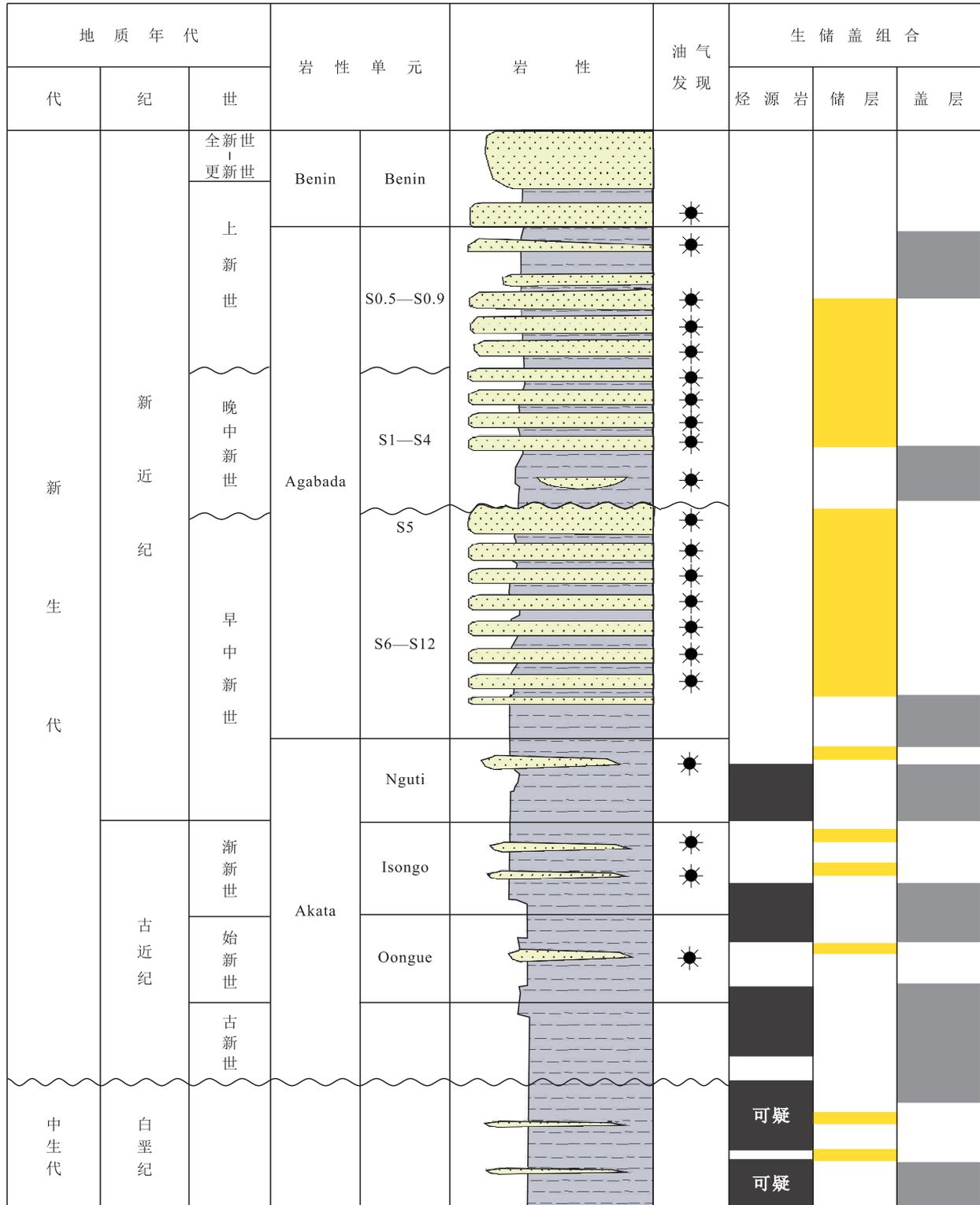


图1 里奥-德雷盆地地层综合柱状图(据文献[9]修改)

Fig.1 Comprehensive stratigraphic diagram of Rio Del Rey Basin (Modified after reference [9])

探层系,也是盆地各区块未来资源接替的主要层系。

2 泥岩底辟构造特征

2.1 盆地构造特征

非洲西海岸尼日尔三角洲东部的里奥-德雷盆地从北至南划分为3个构造区:后缘伸展构造区、中部泥岩底辟构造区、前缘趾状逆冲推覆构造区^[12-17]。后缘伸展构造区主要发育三角洲同沉积拉张正断层,呈东西向弧形展布;中部泥岩底辟构造区发育泥岩底辟(或泥岩脊)及与泥岩底辟相关的放射状断层,泥岩脊呈南北走向;前缘趾状逆冲推覆构造区发育趾状逆冲断层和逆冲推覆构造,主要呈NE—SW走向,东南部发育火山构造(图2)。

里奥-德雷盆地泥岩底辟构造及沉积建造样式

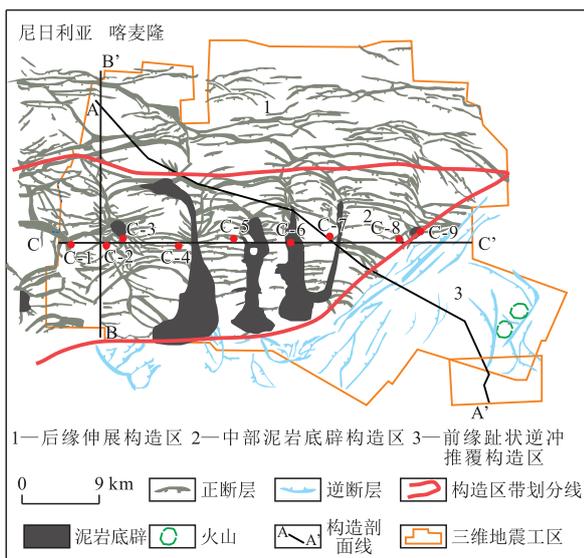


图2 里奥-德雷盆地构造分区及S5沉积时期泥岩底辟分布(据文献[12]修改)

Fig.2 Structural zone division in Rio Del Rey Basin and mudstone diapir distribution during S5 deposition (Modified after reference [12])

分析表明:盆地纵向为退覆式近海三角洲沉积,地层呈明显的三元结构,底部阿卡特组厚层海相泥页岩是泥岩底辟的主要物质来源,厚度为500~4 000 m;中部阿格巴组为进积三角洲前缘沉积,厚度为2 000~2 500 m;顶部贝宁组以砂岩为主,夹少量泥岩。从伸展构造区到趾状逆冲推覆构造区,阿卡特组底部存在一个塑性泥岩滑脱面,泥岩沿此面运动形成泥岩底辟和前方的逆冲推覆断层(图3)。

2.2 泥岩底辟形成机制

通过对里奥-德雷盆地三维地震资料关键构造层的解释、分析和研究(主要是S5、Nguti构造层),依据构造地质学、沉积学与石油地质学的理论,初步确定了里奥-德雷盆地泥岩底辟形成主要与沉积建造、重力扩展和高温高热等3大因素相关。

沉积建造因素 表现为大规模长时间的海侵海退运动和尼日尔河高强度的搬运作用,使盆内沉积了大套泥岩,为泥岩底辟的形成提供了物质基础。该区地层具有穿时性,阿卡特组沉积大套泥岩,既可作为物质来源,也可作为润滑层,减少底辟上涌的摩擦力;同时三角洲扇体规模大且延伸远,海陆间巨大的重力势能差,使沉积物快速堆积,底部泥岩内流体呈欠压实高压状态,为泥岩底辟上涌提供强大的驱动力。

重力扩展因素 表现为盆地基底北高南低的斜坡地形,巨厚三角洲沉积建造发生由北向南的重力扩展或伸展作用,遇上南部洋壳的挡板阻隔,产生水平挤压、水平扭动及断裂,在南部形成趾状逆冲带,在过渡区凹陷轴部产生不协调褶皱或薄弱带,处于超压状态下的泥岩会顺断裂突破地层,释放能量,形成泥岩底辟。

高温高热因素 表现为东南部喀麦隆火山带(图2)产生的高温作用,经基底传导到沉积层,在深部高温场作用下,泥岩物质转变为高塑性黏流体发

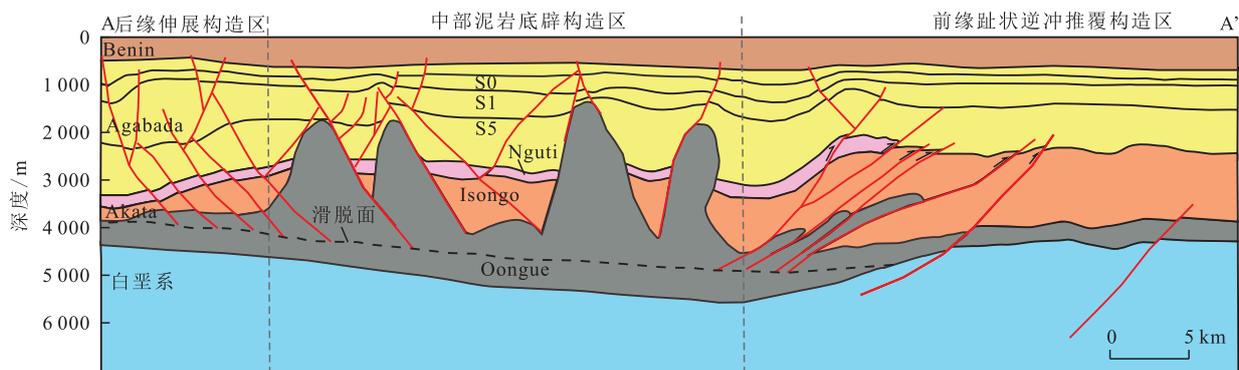


图3 里奥-德雷盆地泥岩底辟构造及沉积建造样式(AA'剖面位置见图2)(据文献[12]修改)

Fig.3 Mudstone diapir structure and sedimentary construction pattern in Rio Del Rey Basin (see Fig.2 for AA' profile) (Modified after reference [12])

生热流动、热聚集、热扩张、热升压等物理过程,加剧了泥岩底辟的形成。

2.3 泥岩底辟形成与演化期次分析

通过最新的区域构造平衡剖面演化史研究认为,里奥-德雷盆地的泥岩底辟形成可划分为4个主要时期(图4):①泥岩底辟发育幼年阶段。古新统阿卡特塔组至始新统阿卡特塔组 Oongue 和渐新统阿卡特塔组下部 Isongo 沉积末期,沉积和沉降中心靠近盆地北部,泥岩上拱形成穹隆状构造特征。②泥岩底辟生长的成熟阶段初期。渐新统 Isongo 至早中新统 Nguti 沉积末期,沉积和沉降中心靠近盆地中部,在上部阿格巴达组三角洲厚层沉积物快速堆积产生的重力扩张作用下,泥岩层底部形成滑脱面,泥岩底辟进一步上拱,周围产生断裂,刺穿当时正在沉积的 Nguti,控制 Nguti 的沉积范围。③泥岩底辟生长的成熟阶段中期。新近系阿格巴达组 S5 沉积时期,沉积和沉降中心靠近盆地南部,泥岩底辟继续生长,周缘断裂持续发育,部分刺穿当时正在沉积的 S5 并控制沉积范围。④泥岩底辟生长的成熟阶段晚期。新近系阿格巴达组 S1—S0 沉积时期至第四纪,受沉积物重力的持续作用,沉积和沉降中心位于近盆地南部,在泥源层阿卡特塔组泥岩持续供源和东南部自白垩纪以来持续发育的火山热力作用下,部分泥岩底辟继续生长上拱至 S1—S0 顶部,部分刺穿 S1—S0,目前没有发现刺穿第四纪地层。泥岩底辟伴生断层在泥岩底辟侧翼形成多个断块或断鼻。

3 泥岩底辟对 S5 油气成藏的控制作用

3.1 泥岩底辟对 S5 砂体沉积的控制作用

里奥-德雷盆地新近系主要为多套进积型三角洲沉积体系,其中上新统 S0 和上中新统 S1 三角洲砂体在盆地广泛分布,砂体连通性好,发育稳定,为当前盆地开发主力层系。下中新统 S5—S12 三角洲砂体在盆地北部至中部较发育,向盆地南部逐渐尖灭,由于其埋藏较深,钻井较少,勘探程度较低,目前是盆地的主要勘探层系。

整体而言,在北部伸展构造带,三角洲平原亚相较为发育,向南至泥岩底辟构造区,逐渐过渡到三角洲前缘亚相。就 S5 而言,砂岩总体厚度为 10~120 m,盆地北部大部分地区超过 100 m,至盆地南部泥岩底辟地区,砂岩厚度逐渐减薄至 5~15 m。在

S5 沉积时期,沉积物供源主要来自于盆地的北部以及北东方向,随着三角洲向南推进,逐渐由三角洲平原、三角洲前缘亚相过渡到前三角洲和半深海亚相,局部可见深水浊积水道。三角洲前缘亚相水下分流河道以多期正韵律的分流河道叠置为特征,岩性以细砂岩、粉砂质细砂岩为主,多期河道的叠置可形成厚度较大的优质储层。三角洲外前缘沉积砂岩厚度薄、粒度细,前三角洲与海相泥岩均为泥质细粒沉积,特征近似。

在盆地南部泥岩底辟构造区,泥岩底辟(或泥岩脊)分布和沉积物供应都会对砂体的分布产生明显的影响。受泥岩底辟(或泥岩脊)的阻挡和分隔,该地区的沉积物被限制在几个由泥岩底辟(或泥岩脊)界定的独立沉积单元或微盆地中。相对盆地北部而言,盆地南部水下分流河道变窄,砂体的横向连续性变差。由于物源来自于北部和北东部,所有沉积物都从北向南延伸,随着水下分流河道砂体向南逐步推进,在南部泥岩底辟构造区以水下分流河道的末端沉积为主,其次为席状砂、远砂坝等沉积,砂体的厚度也减薄,最终在盆地南端发生尖灭,渐变为海相泥岩(图5)。

3.2 泥岩底辟构造区 S5 砂体分布特征

S5 沉积时期,在泥岩底辟构造区北部,由于受底辟的阻碍较少,砂体在很大程度上横向延伸,三角洲前缘水下分流河道砂体发育较好,可达 50 m 以上。向南部,受到泥岩底辟的约束,S5 砂体在低位收缩到一个狭窄的区域内,源于北部的沉积物被泥岩底辟分隔为独立的沉积区域,其中西部和东部的 2 支水下分流河道向南延伸较远,三角洲外前缘沉积覆盖了南部的大部分地区,沉积厚度约为 0~15 m,总体表现为越靠近泥岩底辟砂体厚度越薄,为 0~5 m(图6)。

S5 砂体物性较好,但受泥岩底辟阻碍影响,物性分布也有差异。2 个泥岩底辟间的凹陷区,砂体较厚,物性也较好,主要为细砂岩-极细砂岩,部分为粉砂质细砂岩、粉砂岩,泥质含量为 9%~20%,孔隙度为 19%~33%,渗透率为 300~1 200 mD,为中高孔-中高渗透储层。邻近泥岩底辟的钻井表明,储层质量变差,泥质含量增加,主要为粉砂岩-泥质粉砂岩、粉砂质泥岩,泥质含量为 20%~40%,孔隙度为 10%~19%,渗透率为 50~200 mD,为中低孔-中低渗透储层。

地震剖面上可见 2 个泥岩底辟之间形成凹陷,从下至上 Isongo、Nguti、S5、S1、S0.7 沉积厚度均受

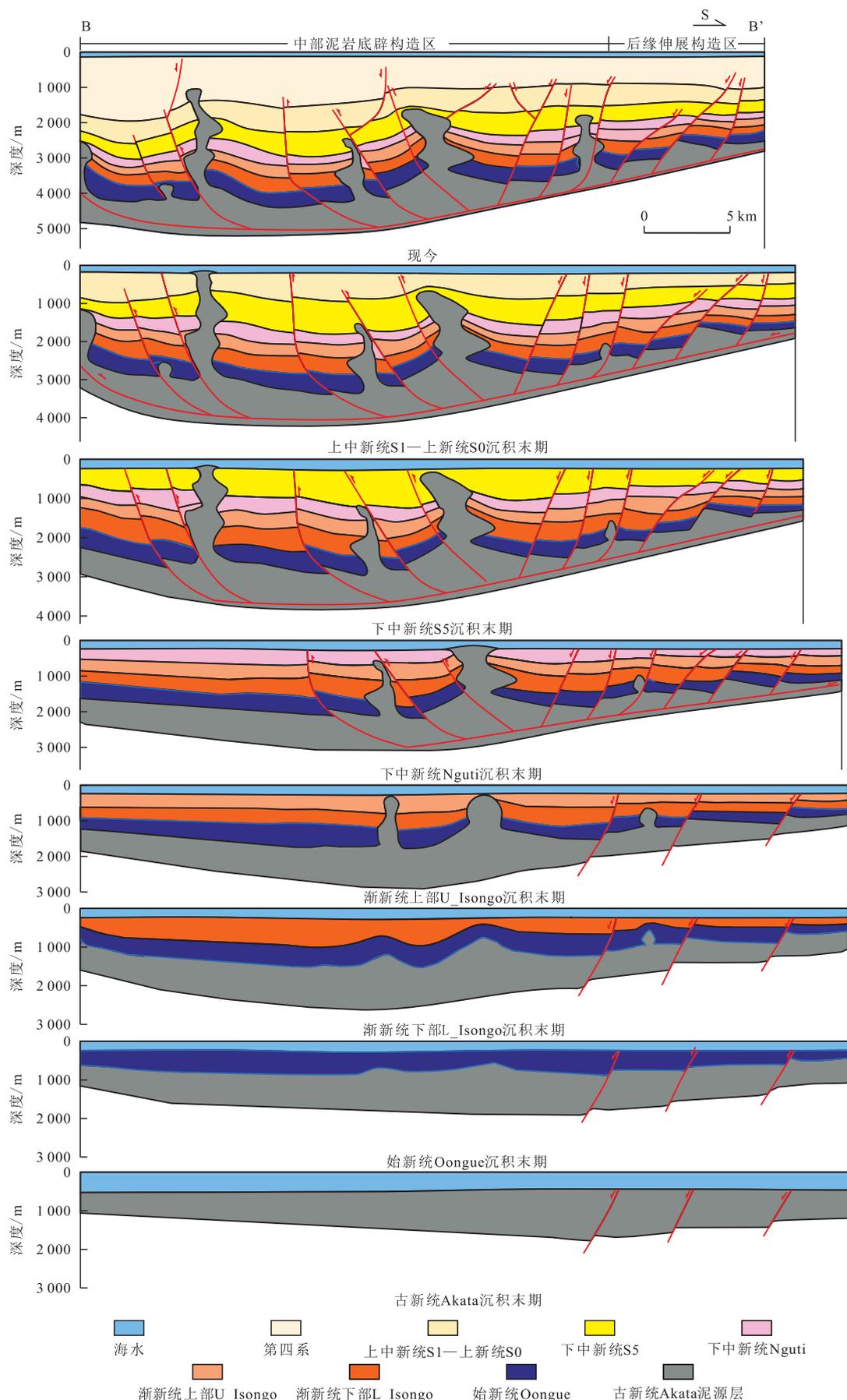


图4 里奥-德雷盆地南北向泥岩底辟构造演化剖面(BB'剖面位置见图2)

Fig.4 Structural evolution profiles of SN-trending mudstone diapirs in Rio Del Rey Basin (see Fig.3 for BB' profile)

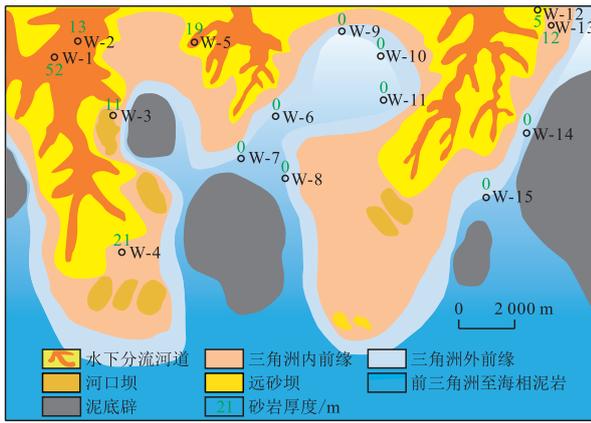


图5 泥岩底辟构造区S5沉积相平面分布
Fig.5 Planar distribution of S5 sedimentary facies in mudstone diapir area

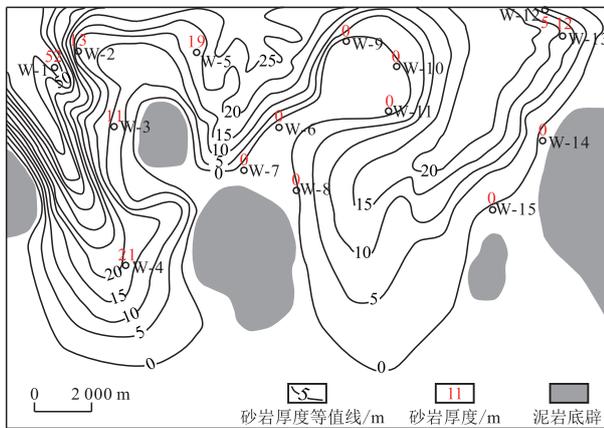


图6 泥岩底辟构造区S5砂岩等厚图
Fig.6 Sandstone isopach map in S5 of mudstone diapir area

到泥岩底辟影响,对S5影响最大,S5厚度在凹陷中心最大,向泥岩底辟方向减薄,可见明显地震上超现象(图7)。

3.3 S5油气成藏模式

里奥-德雷盆地已发现的油气藏与泥岩底辟密切相关。区域油气成藏模式为下生上储,前期勘探和研究证实盆地主要油源来自于古一始新统阿卡塔组泥岩,上部泥岩上拱形成泥岩底辟,下部泥岩也是区域的生油岩,下部泥岩埋深大于3 000 m时进入生-排烃期(图3)。

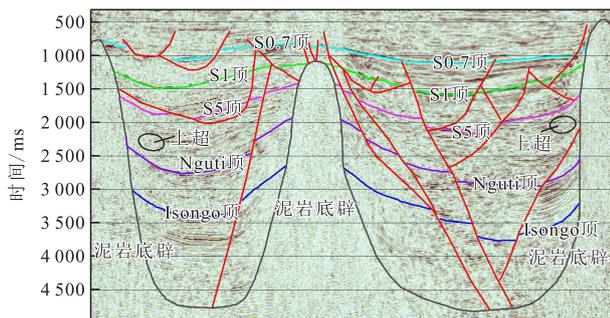


图7 泥岩底辟构造区地震解释剖面
Fig.7 Seismic interpretation profile of mudstone diapir area

自中新世以来,阿格巴达组三角洲快速大量沉积并伴随着泥岩底辟活动形成断裂和相关构造,S5沉积末期阿卡塔组部分埋深已超过3 000 m(图4),开始进入生烃门限,生成的油气沿底辟或伴生断层向上运移^[18-24],加上阿格巴达组内部层间泥岩盖层的封盖作用,在高部位泥岩底辟顶部形成背斜油气藏,伴生的断层可形成断背斜、断块构造油气藏或在泥岩底辟边部形成地层岩性油气藏^[25-28]。

由于泥岩底辟局部控制早中新世的S5三角洲前缘砂体沉积,砂体与泥岩底辟及其伴生的断层易形成构造-岩性和断块圈闭,圈闭形成时间早于阿卡塔组生油泥岩的生油期,泥岩底辟和断层活动及三角洲砂体为油气运移提供通道,生储运聚组合有利于在S5泥岩底辟周缘形成油气藏,这些认识与前人基本一致。但本次对已钻井研究发现,泥岩底辟周缘也存在油气差异聚集特征:前人钻探的第一排构造高部位针对构造-岩性圈闭探井均未成功。分析原因是由于泥岩底辟长期活动并向上隆起,导致油气沿着泥岩底辟活动通道向上运移或逸散,直接接触泥岩底辟的第一排构造-岩性圈闭,因此保存条件变差,难以形成油气藏(图8)。研究认为泥岩底辟控制下的第二排断块圈闭既处于泥岩底辟周缘油气有利聚集区,同时其上倾断层又可以提供侧向遮挡,受泥岩底辟后期活动影响较小,因而是油气聚集的有利场所。如盆地内前期针对S5多口成功钻探的井C-1、C-4、C-5和C-8,均钻在泥岩底辟侧翼第二排断块构造(二台阶构造带)圈闭(图9)。上述认识进一步更新和细化了泥岩底辟构造区S5油气成藏的地质认识,对于未来S5及其以下受泥岩底辟持续活动影响的中深层勘探具有重要的指导作用。

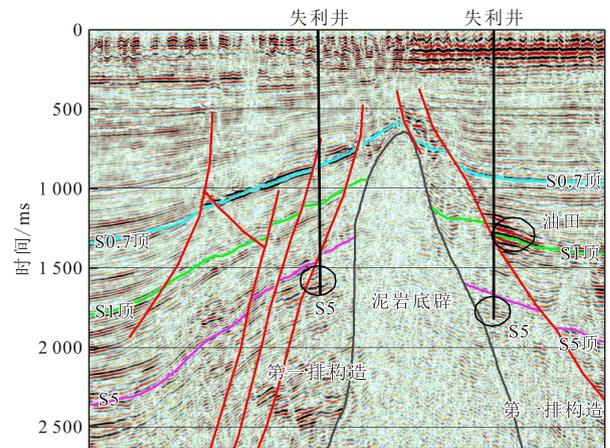


图8 里奥-德雷盆地S5层位与泥岩底辟地震解释及失利井剖面位置
Fig.8 Seismic interpretation of S5 formation and mudstone diapir in Rio Del Rey Basin and location of failed wells

而对于上部S1和S0而言,大部分未被泥岩底辟刺穿,其构造特征表现为泥岩底辟顶部的披覆背斜或断背斜、断块构造,依靠泥岩底辟或侧翼断层运移形成顶部油气藏,如图9中C-2、C-3、C-6井所示。

4 勘探实践

基于以上新认识成果,2018—2023年中国石化国际石油勘探开发喀麦隆公司优选第二排断块圈闭,相继部署2口探井均获得商业油气发现,证实了泥岩底辟对S5油气成藏具有重要的双重控制作用。

在中国石化作业的IMA区块,通过圈闭评价,优选S5第二排断块圈闭分别于2018年和2023年部署的X-10和X-15共2口探井均获得成功,并直接由探井转入开发井生产,测试分别获得350和400 t/d高产工业油流。截至2024年9月,X-10井已累积生产4 a,累积产油量已大于 10×10^4 t,采出程度达40%,含水率为95%;X-15井已生产1 a,最新测试日产油量为400 t/d,不含水,油气比稳定,目前采出程度仅为6%,产量高于预期。

X-10井位于泥岩底辟控制下的东侧第二排断块圈闭,钻遇净油层厚度为15 m,与泥岩底辟之间通过F0断层相连,依靠F0断层侧向封堵成藏,因而不受泥岩底辟后期活动影响(图10a)。X-15井位于泥岩底辟控制下的西侧第二排断块圈闭,钻遇净油层厚度为11 m,依靠东部F1断层侧向遮挡成藏,向西渐变为构造低部位,该井未钻遇油水界面,因此向西还有一定潜力区(图10b)。

X-10和X-15井的成功进一步验证了S5二台阶构造带是有利的油气富集区,也给予了科研人员极

大的启发和信心,未来在里奥-德雷盆地泥岩底辟构造区还有类似的Nguti—S5中深层二台阶构造带圈闭可以进一步探索和勘探。

5 结论

(1)喀麦隆里奥-德雷盆地是尼日尔三角洲的一个次级盆地,南部发育泥岩底辟,泥岩底辟中的泥岩来自于深部古新统阿卡特组泥岩,该泥岩同时也是盆地的生油岩。

(2)里奥-德雷盆地泥岩底辟控制盆地S5沉积,泥岩底辟之间的凹陷区S5沉积最厚,靠近泥岩底辟减薄并沿底辟呈上超超覆沉积,可形成构造-岩性圈闭。盆地泥岩底辟形成的同时伴随着断层活动,发育断块-断鼻等构造圈闭。

(3)S5沉积末期阿卡特组泥岩开始进入生油期,油气生成时间晚于S5构造-岩性圈闭以及断块-断鼻构造圈闭形成时期,泥岩底辟和断层为油气运移提供通道,生储运聚组合有利于S5的油气藏形成。由于泥岩底辟长期活动并向上隆起,直接接触泥岩底辟的第一排构造-岩性圈闭中的油气沿着泥岩底辟通道向上逸散,而与泥岩底辟相隔的第二排断块圈闭则是S5油气富集的有利场所。

(4)中国石化优选S5与泥岩底辟相隔的第二排断块圈闭部署的2口探井均获商业油气发现,前人钻探第一排构造-岩性圈闭均未成功,进一步说明了泥岩底辟对S5油气成藏起着双重控制作用。上述成功勘探实践对于未来里奥-德雷盆地S5及其以下受泥岩底辟持续活动影响的中深层油气勘探具有重要的指导作用,同时也为其他盆地或类似地质情况地区的勘探提供了借鉴意义。

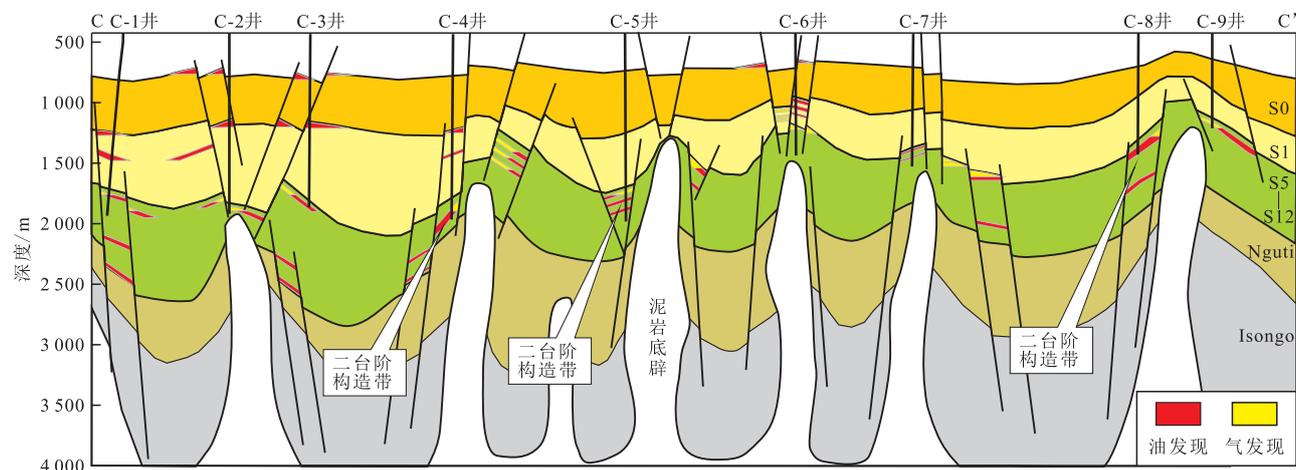


图9 里奥-德雷盆地S5油气成藏模式(CC'剖面位置见图2)

Fig.9 Hydrocarbon accumulation modes of S5 in Rio Del Rey Basin (see Fig.3 for CC' profile)

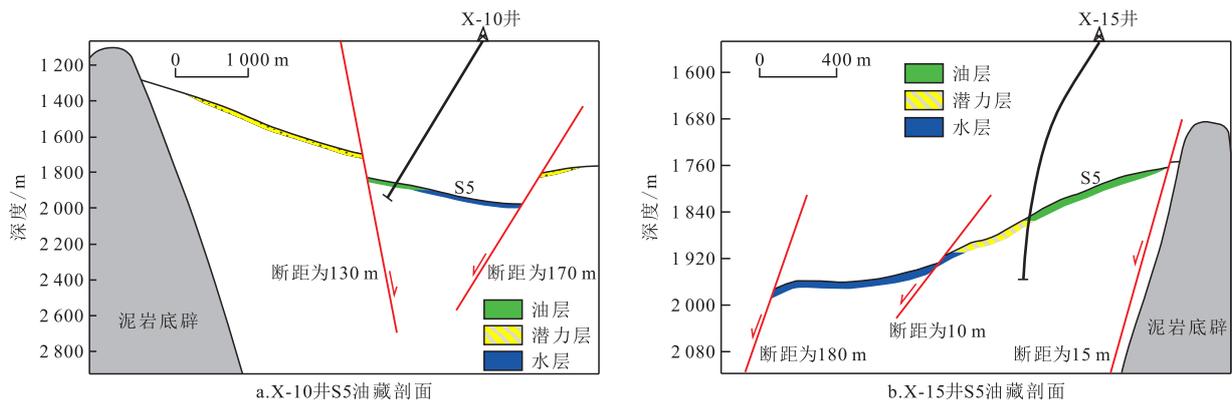


图10 里奥-德雷盆地过X-10和X-15井S5油藏剖面
Fig.10 Reservoir profile in S5 crossing wells X-10 and X-15 in Rio Del Rey Basin

参考文献

[1] 苏玉山,张光亚,王桐,等.尼日尔三角洲的重力滑动构造[J].地质科学,2019,54(2):411-422.
SU Yushan, ZHANG Guangya, WANG Tong, et al. The gravity-slide tectonics in the Niger Delta [J]. Chinese Journal of Geology, 2019, 54(2): 411-422.

[2] 雷雨婷,李江海,王殿举,等.尼日尔三角洲泥底辟形成控制因素及构造演化模式[J].特种油气藏,2019,26(5):44-50.
LEI Yuting, LI Jianghai, WANG Dianju, et al. Controlling factors and tectonic evolution patterns of mud diapir in the Niger Delta [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(5): 44-50.

[3] 邓荣敬,邓运华,于水,等.尼日尔三角洲盆地油气地质与成藏特征[J].石油勘探与开发,2008,35(6):755-762.
DENG Rongjing, DENG Yunhua, YU Shui, et al. Hydrocarbon geology and reservoir formation characteristic of Niger Delta Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(6): 755-762.

[4] 韩杨,蒋文龙,杨海波,等.准噶尔盆地南缘中段侏罗系烃源岩热演化史及其对天然气成藏的影响[J].油气地质与采收率,2022,29(5):49-57.
HAN Yang, JIANG Wenlong, YANG Haibo, et al. Thermal evolution and natural gas accumulation of Jurassic source rocks in middle of southern margin of Junggar Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(5): 49-57.

[5] 侯高文,刘和甫,左胜杰.尼日尔三角洲盆地油气分布特征及控制因素[J].石油与天然气地质,2005,26(3):374-378.
HOU Gaowen, LIU Hepfu, ZUO Shengjie. A study of distribution characteristics of petroleum in Niger delta basin and their controlling factors [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(3): 374-378.

[6] 秦迎峰.松辽盆地三肇凹陷葡萄花油层油气成藏主控因素及成藏模式[J].特种油气藏,2023,30(4):28-34.
QIN Yingfeng. Main controlling factors and reservoir formation mode of oil and gas in the Putaohua Reservoir in Sanzhao Sag, Songliao Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2023, 30(4): 28-34.

[7] 李磊,王英民,张莲美,等.尼日尔三角洲坡脚逆冲带沉积样式及构造控制[J].地球科学,2008,33(5):643-650.
LI Lei, WANG Yingmin, ZHANG Lianmei, et al. Sedimentary patterns and structural control across toe thrust belts, Niger delta [J]. Earth Science, 2008, 33(5): 643-650.

[8] 廖天奇,姚泽伟.非洲西海岸里奥-德雷盆地泥岩底辟平面地质结构特征研究[J].浙江大学学报:理学版,2024,51(2):212-219,260.
LIAO Tianqi, YAO Zewei. Study on the planar structure characteristics of mud diapirs in Rio del Rey basin, West Coast of Africa [J]. Journal of Zhejiang University: Science Edition, 2024, 51(2): 212-219, 260.

[9] 陈占坤,陈瑞,余刚,等.喀麦隆里奥-德雷盆地构造发育特征及其对油气成藏的影响[J].长江大学学报:自然科学版,2022,19(4):13-20.
CHEN Zhankun, CHEN Rui, SHE Gang, et al. Structural characteristics and its influence on hydrocarbon accumulation in Rio del Rey Basin of Cameroon [J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2022, 19(4): 13-20.

[10] 余一欣,王涛,陈占坤,等.尼日尔三角洲里奥-德雷盆地泥岩底辟变形与形成演化特征[J].石油与天然气地质,2021,42(6):1435-1439,1474.
YU Yixin, WANG Tao, CHEN Zhankun, et al. Deformation and evolution of mud diapirs in Rio Del Rey basin, Niger Delta [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1435-1439, 1474.

[11] 苏玉山,陈占坤,李曰俊,等.南大西洋东岸尼日尔三角洲大型重力滑动构造东南缘的断裂和泥构造[J].地质科学,2020,55(2):615-625.
SU Yushan, CHEN Zhankun, LI Yuejun, et al. The faults and shale tectonics in the southeastern flank of the Niger Delta large scale gravity gliding tectonics [J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(2): 615-625.

[12] 袁井菊,丁一萍,苏玉山,等.喀麦隆里奥-德雷盆地泥岩底辟构造与油气分布规律[J].石油实验地质,2018,40(4):508-512.
YUAN Jingju, DING Yiping, SU Yushan, et al. Mud shale diapir structure and hydrocarbon distribution law in the Rio del Rey Basin of Cameroon [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(4): 508-512.

[13] 程浩,金振奎,余文端,等.苏北盆地溱潼凹陷阜三段浅水三角洲沉积古地貌、古环境恢复[J].油气藏评价与开发,2023,13(3):368-378,402.
CHENG Hao, JIN Zhenkui, YU Wenduan, et al. Sedimentary palaeogeomorphology and palaeo-environment reconstruction of

- shallow water delta in the 3rd member of Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2023, 13(3): 368-378, 402.
- [14] 印森林,唐勇,胡张明,等.构造活动对冲积扇及其油气成藏的控制作用——以准噶尔盆地西北缘二叠系—三叠系冲积扇为例[J]. *新疆石油地质*, 2016, 37(4): 391-400.
YIN Senlin, TANG Yong, HU Zhangming. Controls of tectonic activity on alluvial fan deposits and hydrocarbon accumulation: a case study of Permian and Triassic alluvial fans in northwestern margin of Junggar basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2016, 37(4): 391-400.
- [15] 印森林,吴胜和,陈恭洋,等.同生逆断层对冲积扇沉积构造的控制作用:以准噶尔盆地西北缘三叠系下克拉玛依组为例[J]. *地质前缘*, 2016, 23(1): 218-228.
YIN Senlin, WU Shenghe, CHEN Gongyang, et al. The controlling effect of contemporaneous reverse faults on alluvial fan depositional architecture: a case study of Triassic Lower Karaymay Formation at the northwestern margin of the Junggar Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(1): 218-228.
- [16] 肇玉石,盛春祥.大民屯凹陷泥岩底辟构造的初步分析[J]. *石油地球物理勘探*, 1985, 20(1): 58-65.
ZHAO Yushi, SHENG Chunxiang. Shale diapir characterize of Damintun depression [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 1985, 20(1): 58-65.
- [17] 宋立珩.幔流底辟构造—环西太平洋盆地热动力学分析[J]. *地球科学:中国地质大学学报*, 1996, 21(4): 383-394.
SONG Liheng. Mantle diapir-West Pacific basin thermal structure dynamics analysis [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 1996, 21(4): 383-394.
- [18] 王振峰,何家雄,解习农.莺歌海盆地泥-流体底辟带热流体活动对天然气运聚成藏的控制作用[J]. *地球科学*, 2004, 29(2): 203-210.
WANG Zhenfeng, HE Jiaxiong, XIE Xinong. Heat flow action and its control on natural gas migration and accumulation in mud-fluid diapir areas in Yinggehai Basin [J]. *Earth Science*, 2004, 29(2): 203-210.
- [19] 宫少波,王彦.莺歌海盆地中央底辟带油气成藏条件分析[J]. *石油与天然气地质*, 2000, 21(3): 232-235.
GONG Shaobo, WANG Yan. Analysis on hydrocarbon pool forming condition of central diapiric zone in Yinggehai Sea Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2000, 21(3): 232-235.
- [20] 马晓强,邹婧芸,祝彦贺.鄂尔多斯盆地东北缘临兴东区断阶带致密气富集规律研究[J]. *非常规油气*, 2023, 10(3): 1-7.
MA Xiaoliang, ZOU Jingyun, ZHU Yanhe. Study on enrichment law of tight gas in the fault step zone of Linxing east block, northeast margin of Ordos Basin [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2023, 10(3): 1-7.
- [21] 徐声驰,刘锐,孟鑫,等.基于井眼坍塌角度和坍塌深度预测模型的泥岩水平段井壁稳定性评价方法[J]. *石油钻采工艺*, 2023, 45(2): 136-142.
XU Shengchi, LIU Rui, MENG Xin, et al. Wellbore stability evaluation of horizontal wellbore in mudstone: a method based on wellbore collapse angle and depth model [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2023, 45(2): 136-142.
- [22] 郝雪峰,尹丽娟.陆相断陷盆地油气差异聚集模式探讨——成藏动力、输导、方式的关系[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(6): 1-5.
HAO Xuefeng, YIN Lijuan. Discussion on hydrocarbon differential accumulation mode in continental rift basins-relationship of dynamics, conduit and pattern [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(6): 1-5.
- [23] 李妍蓉,李靖,苏文杰,等.鄂尔多斯盆地伊陕斜坡太原组碳酸盐岩气藏富集规律[J]. *新疆石油地质*, 2023, 44(5): 509-516.
LI Yanrong, LI Jing, SU Wenjie, et al. Natural gas enrichment in carbonate gas reservoirs of Taiyuan formation in Yishaan slope, Ordos Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2023, 44(5): 509-516.
- [24] 吴克强,赵志刚,祝彦贺,等.鄂尔多斯盆地东北缘“双低”致密气藏差异成藏规律及勘探开发关键技术[J]. *中国海上油气*, 2022, 34(4): 43-54.
WU Keqiang, ZHAO Zhigang, ZHU Yanhe, et al. Differential accumulation laws and key exploration and development technologies of “double-low” tight gas reservoirs in the northeastern margin of the Ordos Basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(4): 43-54.
- [25] 王芝尧,钱茂路,苏俊青,等.泥岩底辟成因及对油气成藏的影响——以尼日尔 Termit 盆地底辟区为例[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(1): 39-45.
WANG Zhirao, QIAN Maolu, SU Junqing, et al. Genesis of mud diapir and its impact on hydrocarbon reservoir: a case study of diapir penetration in Niger Termit Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(1): 39-45.
- [26] 陶文芳,葛家旺,雷永昌,等.转换斜坡型辫状河三角洲沉积特征:以珠江口盆地惠州凹陷始新统为例[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(5): 103-114.
TAO Wenfang, GE Jiawang, LEI Yongchang, et al. Depositional characteristics of a relay ramp controlled braided deltaic system: a case study in the Eocene Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin, China [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(5): 103-114.
- [27] 张仲培,张宇,张明利,等.准噶尔盆地中部凹陷区二叠系—三叠系油气成藏主控因素与勘探方向[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(4): 559-568.
ZHANG Zhongpei, ZHANG Yu, ZHANG Mingli, et al. Main controlling factors and exploration direction of Permian to Triassic reservoir in the central sag of Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(4): 559-568.
- [28] 黄文彪,程杰,邵明礼,等.松辽盆地南部深层中-高演化阶段烃源岩品质评价标准探讨[J]. *非常规油气*, 2021, 8(2): 13-23.
HUANG Wenbiao, CHENG Jie, SHAO Mingli, et al. Discussion on organic matter abundance evaluation criteria of source rocks in deep middle-high thermal evolution stage in south Songliao Basin [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2021, 8(2): 13-23.