

沙特阿拉伯油气地质特征及资源现状

潘海滨,赵丽娅

(中国石油天然气勘探开发公司,北京 100034)

摘要:沙特阿拉伯油气资源世界排名首位,所处盆地在地史上经历了前寒武纪盐盆发育、古生代碎屑岩发育、晚二叠世—三叠纪浅海陆架发育、侏罗纪—白垩纪陆架盆地发育和新生代盆地定型共 5 大阶段,孕育了二叠系、侏罗系和白垩系 3 大套成藏组合,为巨型油气的富集创造了良好的条件。深层古生代、老油田低孔低渗储层以及非常规油气藏将是中国石油公司谋求上游合作的有利方向。

关键词:沙特阿拉伯;构造演化;成藏组合;油气储量

中图分类号:TE122

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2017.06006

沙特阿拉伯油气资源丰富,据 Wood Mackenzie 数据,石油储量 2 330 亿桶(1 bbl=0.14t),居世界第 1 位;天然气储量 5.43 万亿 m³,居世界第 4 位^[1],仅次于美国(包括页岩气)、俄罗斯、伊朗和卡塔尔。沙特也是世界上油气产量最大的国家,2015 年石油日产量 1050 万桶,天然气日产量 2.5 亿 m³,储采比超过 45 a。

前人对包括沙特在内的中东地区油气地质特征做过分析,但针对沙特阿拉伯的油气地质研究则较少,一方面原因是沙特油气上游不对外开放,公开资料不多;另一方面是中国石油公司在沙特油气业务份额不大,基础性的研究较少。然而,在沙特油田采出程度不断提高,开采难度逐渐加大的今天,未来不排除沙特参照周边中东国家的成功经验,改革目前的油气政策,开放原油上游领域,引入类似伊拉克服务合同模式或伊朗回购合同模式。因此,加深对沙特油气地质和资源现状的研究具有一定的现实意义。笔者以沙特油气新项目合作招标资料为基础,广泛查阅中外文献和数据库,利用构造地质学、沉积地质学、储量评价

等知识,探讨了沙特阿拉伯油气地质特征和油气资源现状。

1 油气地质概述

沙特阿拉伯在板块构造上属于阿拉伯板块,面积超过 200 万 km²,长期处于构造背景稳定的克拉通内裂谷和被动大陆边缘,发育了连续单一的巨厚沉积岩,包括碎屑岩、碳酸盐岩和蒸发岩,最厚处高达 5 000 m 以上。阿拉伯地台内部的次级构造运动受深部基底断裂及其再活动的影响,在构造上总体呈现宽阔的南北向长轴状简单背斜,为巨型油气资源的富集创造了良好的条件^[2]。

1.1 区域构造

总体上,阿拉伯地台由覆盖在结晶基底上的古生代克拉通盆地组成。在晚二叠世到早三叠世期间,伴随特提斯洋的张开和被动陆缘的发育,形成中生代盆地,并在陆架边缘 2 000 km 宽、4 000 km 长的范围内沉积了厚达 3 000 m 的巨厚碳酸盐岩。后期构造运动对之前的沉积和分区进一步刻画,最终形成了现在的巨型含油气圈闭。

区域上,阿拉伯板块南部和东南部以大洋转换断层为界,北部和东部边界以活动的板块汇聚边缘为界,即北部在土耳其以比特里斯(Bitlis)缝

收稿日期:2017-02-06

基金项目:中国石油海外勘探开发公司科技创新项目

作者简介:潘海滨(1984—),男,工程师,主要从事海外油气合作工作。E-mail: panhaibin@cnpcint.com

合线为界,东部在伊朗、伊拉克以扎格罗斯褶皱带为界,两者均是阿拉伯板块俯冲到欧亚板块之下的背景中形成(图 1)。板块西北部则以处于转换走滑断裂带的死海为界。

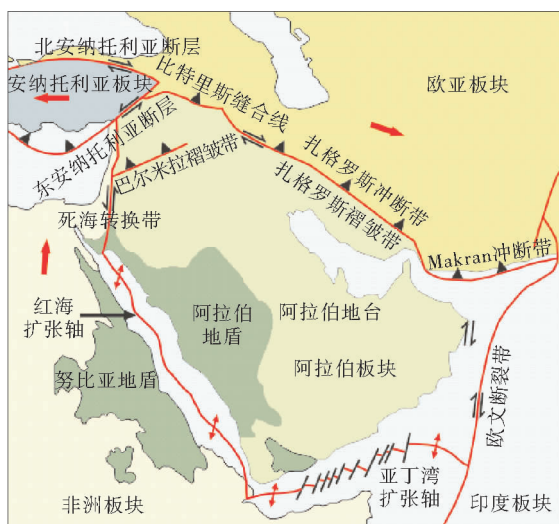


图 1 阿拉伯板块边界范围 (据文献[3])

Fig. 1 Arabic Plates Boundary (from reference [3])

1.2 地史演化

阿拉伯板块最古老部分形成于晚元古代(600~520 Ma BP),一系列岛弧和陆壳残片在泛非克拉通东北边缘聚集后,形成冈瓦纳超大陆。此时阿拉伯地盾主要由火山岩和深成火山岩的单个大洋间岛弧构成,岛弧的每次闭合和碰撞造成构造变形和蛇绿岩仰冲侵位。前寒武纪造山运动以东阿拉伯霍尔木兹盐盆发育、形成 NNE—SSW 向地垒和倾斜断块而结束(图 2)。

古生代晚泥盆世,海西构造运动引起阿拉伯板块中部隆起及板块向东倾斜,使得泥盆纪和更古老岩层出露接受侵蚀,冈瓦纳古大陆边缘东北部从被动陆缘转变为主动大陆边缘。Unayzah 地层的河流相冲积砂充填了海西构造运动形成的侵蚀古地貌。该地层是沙特南部加瓦尔油田在古生代二叠纪 Pre—Khuff 组和阿拉伯半岛中部 Hawtah 油田的主力储层。在这一时期,以南北向挤压为特征的海西造山运动形成中部阿拉伯穹

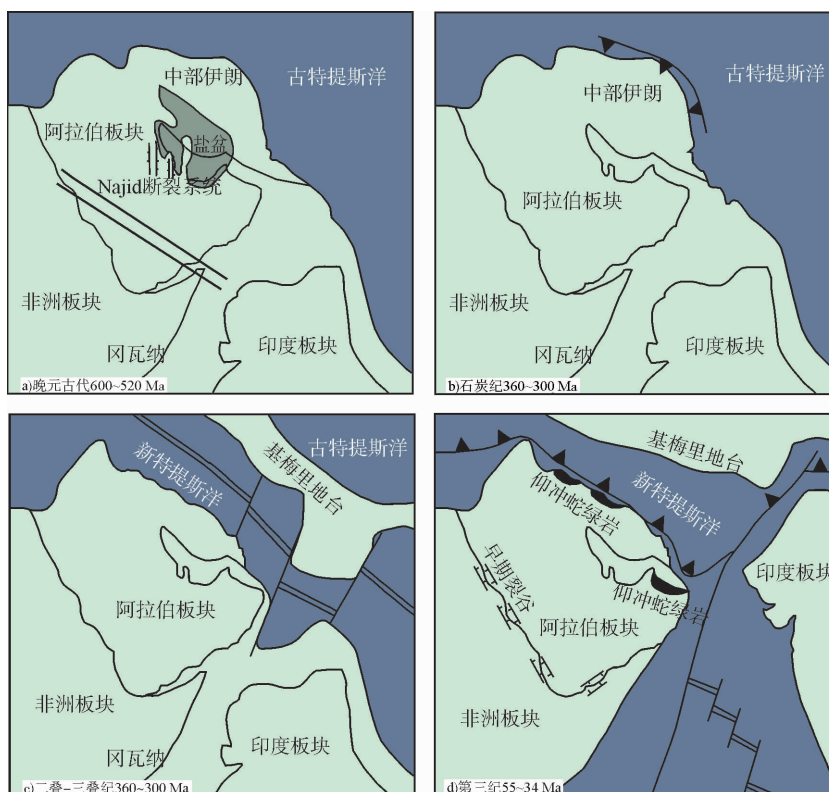


图 2 沙特阿拉伯构造演化简图 (据文献[4])

Fig. 2 Tectonic evolution diagram of Arabic Plates (from reference [4])

隆和加瓦尔背斜构造。

中生代早期(三叠纪到侏罗纪)新特提斯洋开启,非洲板块开始分离,伊朗从阿拉伯板块脱离,逐渐运移至目前的位置。白垩纪晚期,建造性板块边缘(扩张洋脊)在印度洋中部开始发育,并延伸至亚丁湾,红海裂谷带开启,导致阿拉伯板块在白垩纪时从非洲板块脱离^[5]。

晚白垩纪新特提斯洋关闭,在阿拉伯板块北部边缘的地层消亡区域,海底蛇绿岩逆冲至北阿曼大陆地壳上部。晚白垩纪和古近纪板块间的相对运动导致始新世期间阿拉伯板块东北部边缘与欧亚板块的剧烈碰撞。

值得一提的是,中生代晚期至今,阿拉伯板块与伊朗碰撞,在阿拉伯地台北部形成扎格罗斯褶皱带和扎格罗斯前陆盆地。在始新世,板块间的汇聚作用使白垩纪及更早的沉积岩层发生南向的褶皱和冲断,形成数量众多的挤压型构造,这也是扎格罗斯褶皱带和阿拉伯地台东部构造的显著特征。

2 油气盆地特征

沙特阿拉伯油气分布主要由维典—北阿拉伯盆地控制,该盆地几乎覆盖了整个沙特东半部。沙特另一个沉积盆地为红海盆地,但截至目前尚

无商业油气发现。

2.1 维典—北阿拉伯盆地

从二叠纪开始,阿拉伯地台东部边缘经历了多期沉降,积累了大量沉积物。中生代期间,沙特阿拉伯位于阿拉伯陆架和被动陆缘之间,维典—北阿拉伯盆地的主要沉积物是浅海相碳酸盐岩,白垩系三角洲前缘砂岩和始新统三角洲平原砂岩受控于多期海平面升降运动而周期性出现,同时在包括侏罗系 Gotnia 组、始新统 Rus 组和下 Fars 组等岩层发育多期蒸发盐岩^[6](图 3)。

该盆地以发育大型和特大型油气田为特征,同时发育数量众多的次生小型油气藏。在晚第三纪到第四纪,北部扎格罗斯盆地曾受到大面积挤压作用,但该盆地影响却很微弱,巨型背斜得以披覆在深大断层和盐枕或底辟构造上,为巨型油气田的形成奠定了条件。此外,三叠系至中新世盐丘的发育,也为油藏提供了较好的封堵条件。

维典—北阿拉伯盆地发育二叠系含油气系统,侏罗系复合含油气系统和白垩系复合含油气系统 3 个主要含油气系统,层系分布表现为“下气上油”^[7]。上二叠统一下三叠统储集层富集了盆地内 78.9% 的天然气可采储量和 83.7% 的凝析油可采储量,而上侏罗统一下白垩统则富集了盆地内 81.9% 的石油可采储量^[8]。

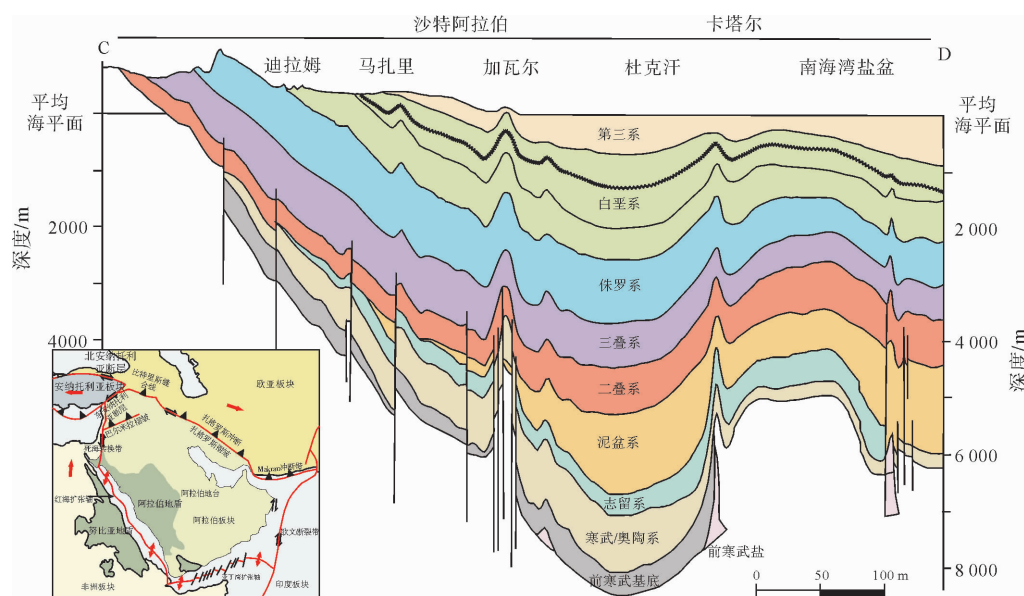


图 3 维典—北阿拉伯盆地剖面

Fig. 3 Cross-section of Widiyan North Arabic Basin

2.2 烃源岩特征

盆地发育志留系、侏罗系和白垩系3套主力烃源岩层系。

下志留统 Qusaiba 组的 Qusaiba 段热页岩已证实是该盆地最重要的气源岩, TOC 含量高达 6.15%, 干酪根为腐泥型, Ro 平均值 $>2\%$, 从晚侏罗世开始生气, 一直持续到晚白垩世。

侏罗系烃源岩为 Dhruma 组灰岩、Tuwaiq 组碳酸盐岩和 Hanifa 组浅海相页岩, 平均 TOC 含量为 4%, 从早白垩世开始生油, 一直持续到晚古近纪。

白垩系烃源岩为 Kazhdumi 组泥灰岩和泥质石灰岩、Wasia 组泥岩, 平均 TOC 含量达 7.3%, 从晚白垩世开始生油一直持续到晚古近纪。

此外, 石炭系 Unayzah 组和二叠系 Khuff 组岩石储层也为盆地生烃提供了小部分烃源岩。

2.3 储集层特征

盆地主要储集层为侏罗系和白垩系碳酸盐岩和砂岩, 其中优势储层为侏罗系 Arab 组地层。

2.3.1 石炭系

Unayzah 组是盆地最老的主力石油储层, 由砂岩和更细的碎屑沉积物组成, 形成于半干旱条件下的风成和湖泊环境。风成沙丘结构广泛发育, 并与细粒的湖泊沉积物互层, 证明其形成于干燥和浅水的沉积环境。砂岩不同程度地被方解石、硬石膏、自生黏土所胶结, 储层在横向上性质差别较大, 孔隙度 $8\% \sim 25\%$, 渗透率 $100 \sim 8\,000$ mD。Unayzah 组地层不整合于 Khuff 组之下, 岩层边界显示有海侵、浅海和蒸发环境的变化。

2.3.2 二叠系

Khuff 组灰岩储层是盆地最重要的天然气和凝析油储层, 主要由白云化的石灰岩组成。在盆地西部以硅质碎屑为主, 向东穿过阿拉伯半岛后逐渐转变为石灰岩、白云岩和硬石膏。沉积环境为浅海陆架—潮坪为主, 表现为浅滩、潟湖和河口坝沉积。原生孔隙发育有限, 次生孔隙在溶蚀作用下相对较为发育, 胶结程度较低, 具体为孔隙度 $1\% \sim 10\%$, 平均值 5% , 渗透率 $(1 \sim 100) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。潮间带的泥岩和硬石膏为 Khuff 组提供了层内封堵的有利条件。

2.3.3 侏罗系

Tuwaiq 组是在浅海大陆架环境下沉积的致密泥灰质, 并与多孔碎屑灰岩互层, 纵向上包括上 Fadhili 组和下 Dhruma 组地层, 二次溶滤作用和晶间孔隙的存在加大了 Tuwaiq 组的原生孔隙度。

盆地东南部的 Hanifa 组由浅海相碳酸盐岩和细粒沥青泥岩组成, 具备很好的自生自储条件。由于地层破裂, 储层渗透率较高, 但原始渗透率较差。

上侏罗统 Arab 组是沙特最大油田加瓦尔油田的最重要储层, 从上而下又分为 A—D4 段, 主要由灰岩、白云岩间杂一些硬石膏组成, 一般认为是在浅海陆架环境下沉积形成。储层孔隙以原生粒间孔和微裂缝为主, 孔隙度为 $5\% \sim 30\%$, 平均 18% , 渗透率 $(5 \sim 1\,000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均 $300 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。Arab C 段是其中地质年代最新的主力储层, 硬石膏作为该段区域盖层广泛发育, 起到很好的封堵作用。Arab D 段的组成与 C 段类似, 差别在于细粒度的岩石比例增加, 且在 NE—SW 走向上硬石膏逐步替代石灰岩。由于具有较粗粒度, D 段是加瓦尔油田最主要的产油层。

2.3.4 白垩系

下白垩统下部 Sulaiy 组地层主要由碎屑灰岩在浅海环境下沉积形成, 上部为下 Yamama 组致密灰岩所封盖。

下白垩统下部 Yamama 组由碎屑岩和结晶灰岩在浅海大陆架环境下形成, 包括浅海相鲕粒、球粒、点礁石灰岩和白云质石灰岩。孔隙度 $6\% \sim 23\%$, 平均 14% , 渗透率 $(10 \sim 300) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。该层在伊朗又被称为上 Ratawi 组。沙特的 Zuluf、Marjan 和 Manifa 油田的主要产油层即为 Yamama 组。

下白垩统上部 Biyadh 组砂岩储层沉积于三角洲平原—浅海相三角洲前缘环境, 孔隙度 $10\% \sim 27\%$, 平均 15% ; 渗透率 $(1 \sim 1\,000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均 $300 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。在中东其他地区如伊拉克, 该层又被称为 Zubair 组, 是沙特 Safaniyah 油田的主力产油层。

上白垩统下部 Shuaiba 组是浅海环境下碳酸盐岩在内部陆架盆地的南翼沉积形成, 在此期间构造运动微弱, 为稳定地台沉积环境。岩性组成

是非白云化的碳酸盐岩,包括浮游有孔虫泥岩和碎屑、生物碎屑灰岩等,潟湖相的泥岩微孔隙发育,但渗透性较差。

上白垩统中上部 Wasia 组是浅海环境下的石灰岩、砂岩、页岩沉积形成,包含以下 7 个独立的储层单元: Mishrif (石灰岩)、Ahmadi (石灰岩)、Wara (石灰岩)、Mauddud (石灰岩)、Rumaila (石灰岩)、Safaniyah (砂岩)、Khafji (砂岩)。其中 Mishrif 组石灰岩储层主要为细—粗粒结晶灰岩,沉积环境为浅海潟湖到陆架,分布于伊拉克到阿联酋的构造带上,孔隙度为 15%~25.5%,渗透率为 $(1\sim175)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。产自 Wasia 组的沙特油田主要是 Safaniyah、Marjan 和 Zuluf 等油田。

3 沙特阿拉伯资源现状

3.1 原油储量

沙特阿拉伯原油证实储量 2 330 亿桶,主要集中在少数几个巨型陆上和海上油田中,其中最大的加瓦尔油田储量 582.5 亿桶,约占沙特石油储量的 25%。海上巨型油田 Safaniyah、Zuluf、Marjan、Manifa 和 Berri 占沙特石油储量的另外 25%。陆上 Khurais、Khursaniyah (AFK Group) 和 Shaybah 油田储量占 17%,目前正在开发上产以提升沙特产能。其中,除了 Manifa 油田外,上述在产或待开发油田可以继续生产 10 a 以上。其他石油储量分布在 80 多个规模较小的油气发现中,主要位于该国东部陆上。其中,最重要的油田是包括 Hawtah 和 Nuayyim 油田在内的阿拉伯超轻油油田,于 20 世纪 80 年代末、90 年代初发现于加瓦尔巨型油田的西南部。产出的高品质轻油可掺入在产油田的重油中,以提升油品。另外,处于沙特阿拉伯和其邻国科威特、巴林的联合开采范围内的 Abqaiq 和 Qatif 油田作为沙特生产年限最长的 2 个油田仍拥有较大规模的储量。

3.2 天然气液 NGL

天然气凝析液,包括液化石油气和凝析油是沙特油气储量的重要组成部分,目前预计在伴生气或者非伴生气藏中有 30 亿桶的 NGL 可实现

经济开发。

3.3 天然气

天然气储量约 5.43 万亿 m^3 ,其中经济可采天然气约 4.29 万亿 m^3 。纯气藏采出程度约 84%~88%;伴生气藏采出程度约 50%~70%。沙特还有 1.43 万亿 m^3 的技术可采天然气储量,暂时还不具备商业开采经济性。沙特阿美公司 (Saudi Aramco) 正计划采用气液分离和回注气体的方式动用这部分储量。

3.4 非常规天然气

沙特非常规天然气包括页岩气和致密气。随着沙特国内经济发展、天然气需求不断增长,沙特政府将非常规天然气开发作为满足天然气需求的重要途径。沙特阿美公司正在对非常规天然气的开发前景进行内部研究,期望借鉴北美页岩气的成功开发经验,加深对本国非常规资源的认识。

4 结论

沙特阿拉伯所处的阿拉伯盆地是古生代—中生代陆缘盆地与新生代大型前陆盆地的叠合盆地,地质史上经历了前寒武纪盐盆发育阶段、古生代碎屑岩发育阶段、晚二叠世—三叠纪浅海陆架发育阶段、侏罗纪—白垩纪陆架盆地发育阶段和新生代盆地定型阶段共 5 大阶段。

沙特阿拉伯境内共发育 3 大套重要的成藏组合,分别为古生界成藏组合、侏罗系成藏组合和白垩系成藏组合。其中,古生界成藏组合富含气和凝析油,而侏罗系和白垩系成藏组合富含油,与中东地区典型的“下气上油”叠置关系相一致。

沙特境内主力盆地的深层古生界地层、老油田低孔低渗碳酸盐岩储层以及其西北部边境地区的非常规将是下一步勘探开发的重点潜力地区,也是中国石油公司寻求与沙特国家石油公司进行上游合作的有利方向。

参考文献:

- [1] Wood Mackenzie. Saudi Arabia upstream summary[R]. Edinburgh: Wood Mackenzie, 2017: 1-43.
- [2] Beydoun Z R. Arabian plate oil and gas: why so rich and so

- prolific? [J]. *Episodes*, 1998, 21(2): 74-80.
- [3] Stern R J, Johnson P. Continental lithosphere of the Arabian Plate: A geologic, petrologic, and geophysical synthesis [J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 101(1/2): 29-66.
- [4] Sharland P R, Archer R, Casey D M, et al. Arabian Plate Sequence Stratigraphy[M] // *GeoArabia. Special Publication 2*. Manama: Gulf PetroLink, 2001. ISBN: 9901-03-08-9.
- [5] Hessami K, Nilforoushan F, Talbot C J. Active deformation within the Zagros Mountains deduced from GPS measurements [J]. *Journal of the Geological Society*, 2006, 163: 143-148.
- [6] 王一帆,白国平. 中阿拉伯盆地油气分布规律和主控因素研究[J]. *沉积与特提斯地质*, 2014, 34(2):104-112.
- [7] 段海岗,周长迁,张庆春,等. 中东油气富集区成藏组合特征及其勘探领域[J]. *地学前缘*, 2014, 21(3):118-126.
- [8] 白国平. 波斯湾盆地油气分布主控因素初探[J]. *中国石油大学学报*, 2007, 31(43):28-38.

PETROLEUM GEOLOGY OF SAUDI ARABIA AND CURRENT RESOURCE STATUS

PAN Haibin, ZHAO Liya

(China Oil and Gas Exploration and Development Company, Beijing 100034, China)

Abstract: Saudi Arabia ranks number 1 in the world in terms of oil and gas resources. In geology, it could be divided into 5 stages of evolution. It started as a salt basin in the time of Precambrian, and then filled with clastic deposits in Paleozoic, shallow marine shelf sediments in Late Permian-Triassic, shelf basin deposits in Jurassic-Cretaceous and basinal deposits in Cenozoic, which gave birth to three major sets of reservoir combinations, including the Permian, Jurassic and Cretaceous reservoirs, and thus created favorable conditions for the accumulation of large amount of oil and gas. Deep Paleozoic reservoirs with low porosity and permeability in some matured fields as well as unconventional oil and gas will be the main targets for Chinese Petroleum Companies to look for in cooperation with Saudi Aramco in the upstream fields.

Key words: Tectonic Evolution; Play; Petroleum Reserves; Saudi Arabia