

文章编号: 0253-2697(2023)06-0873-29 DOI:10.7623/syxb202306001

研究动态

世界油气形成的三个体系

邓运华 杨永才 杨婷

(中海油研究总院有限责任公司 北京 100028)

摘要: 油气是由沉积盆地内岩石中的有机质生成的。通过对全球含油气盆地进行深入、系统研究,认识到全球油气田的分布很不均匀,油气只在少数沉积岩层段内富集成藏。油气分布具有明显的“源控”性,寻找新的含油气盆地必须首先寻找烃源岩。沉积盆地内生物生长所需的营养物质主要来源于河流,河流注入沉积盆地的营养物质控制了生物繁衍程度,进而控制了烃源岩的有机质丰度,而烃源岩有机质丰度控制了沉积盆地的油气生成量和油气资源富集程度。地球上油气主要分布于河流—湖泊体系、河流—海湾体系和河流—三角洲体系,其中,河流—湖泊体系是地球上重要的含油领域。湖相石油主要是由湖泊中的藻类死亡后形成的沉积有机质生成,藻类生长主要取决于河流注入湖水中的营养物质,这些营养物质可以促进裂谷期藻类生长,为优质烃源岩的形成提供保障。河流—海湾体系是全球海相石油分布的主要场所。海湾是河流的入海口,河流带来丰富的矿物质促进了藻类等水生生物生长并大量繁殖,且海湾相对闭塞,均有利于有机质保存。世界上分布最广、储量最多的天然气是由煤系烃源岩生成的煤型气,河流—三角洲体系是煤型气的主要分布场所。河流带来的泥沙是高等植物生长的肥沃土壤,河流—三角洲平原上的原生高等植物为煤系气源岩的形成提供了雄厚的物质基础;三角洲储层发育,储-盖配置好,有利于天然气富集成藏。

关键词: 烃源岩;沉积盆地;石油;天然气;河流—湖泊体系;河流—海湾体系;河流—三角洲体系

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Three systems of the oil and gas formation in the world

Deng Yunhua Yang Yongcai Yang Ting

(CNOOC Research Institute Company Limited, Beijing 100028, China)

Abstract: Oil and gas are generated from organic matters in the rocks of sedimentary basins. Through an intensive and systematic study of global petroliferous basins, it is recognized that the distribution of global oil and gas fields is highly uneven, and most of oil and gas are enriched and accumulated in a few strata of sedimentary rocks. The distribution of oil and gas is significantly controlled by source rock, so that it is necessary to search for the source rocks initially before discovering new petroliferous basins. The nutrients required for biological growth in the sedimentary basins primarily come from rivers, and the nutrients flowing from rivers into the sedimentary basins control the degree of biological reproduction, and then control the abundance of organic matters in the source rocks, which decides the amount of oil and gas generated and the degree of enrichment of oil and gas resources in the sedimentary basins. Oil and gas are mainly distributed in the three systems on the earth, i. e., the river-lake system, river-gulf system and river-delta system. Specifically, the river-lake system is an important oil-bearing area on the earth. Lacustrine oil is mainly produced by sedimentary organic matters from the algae died in lakes. The growth of algae depends mainly on the nutrients that come from the rivers and flow into the lakes, and these nutrients can facilitate the growth of algae in the rift period and provide a guarantee for the formation of high-quality source rocks. The river-gulf system is the main distribution location of global marine oil. Gulfs are the estuary of rivers, which brings abundant minerals for rivers to promote the growth and proliferation of algae and other aquatic organisms; moreover, the gulfs are relatively isolated, which are conducive to the preservation of organic matters. In fact, boasting of the biggest reserves, the coal-type gas generated from coal-measure source rocks is the most widely distributed in the world and is mainly distributed in the river-delta system. The sediments brought by the river provide fertile soil for the growth of higher plants, and the native higher plants on the river-delta plain provide a solid material basis for the formation of coal-measure gas source rocks. The delta stratum reservoir is well developed with good reservoir-caprock configuration, which is beneficial for natural gas enrichment and accumulation.

Key words: source rocks; sedimentary basins; oil; natural gas; river-lake system; river-gulf system; river-delta system

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05023,2017ZX05032)资助。

第一作者: 邓运华,男,1963年2月生,1988年获北京石油勘探开发研究院硕士学位,现为中国海洋石油集团有限公司副总地质师兼中海油研究总院有限责任公司副总经理、中国工程院院士,长期从事海上油气勘探研究和技术管理工作。Email:dengyh@cnooc.com.cn

通信作者: 杨永才,男,1978年9月生,2008年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中海油研究总院有限责任公司地球化学资深工程师,主要从事油气地球化学与海外油气勘探研究工作。Email:yangyc@cnooc.com.cn

引用:邓运华,杨永才,杨婷.世界油气形成的三个体系[J].石油学报,2023,44(6):873-901.

Cite: DENG Yunhua, YANG Yongcai, YANG Ting. Three systems of the oil and gas formation in the world[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(6): 873-901.

油气勘探是一项高科技、高风险、高投入的行业。伴随着计算机技术的发展,油气勘探技术也在快速发展,人类对地下几千米地质情况的认知也在逐步提高。但是油气藏形成于数百万年之前、几千米之下的地壳深处,全世界油气勘探行业的平均探井商业成功率目前只有约20%,而一口探井的花费少则上千万人民币,多则20亿人民币(超深水探井)。如此昂贵的探井,却有80%的概率是一无所获,难怪人们常说油气勘探是世界上最大赌注的赌博。因此,提高勘探成功率是油气勘探家永恒追求的课题。

油气是沉积岩中的有机质在较高温度下转化生成的,从理论上讲,有沉积岩的地方就可能有油气藏。但是地球表面约98%的地方发育有沉积岩或沉积物,发育油气藏的地方却非常少,油气藏面积占地球表面积不到1%。而且地球上油气分布极不均衡,勘探家们也一直在苦苦探寻油气的分布规律。

中国油气资源丰富,石油可采资源量约为 $258 \times 10^8 \text{ m}^3$,但中国人口众多,人均石油资源量只有全球人均资源量的1/4。为了适应中国经济发展对油气需求量增加的需要,中国油气公司纷纷走向国外进行油气勘探,通常有两类海外矿区:第1类是成熟区,即油气地质条件已有井证实并已发现了油气田的盆地,这类矿区风险较小,但发现大油田的机会也较少,并且进入的门槛也很高;第2类是新区,尚未有井证实油气地质条件,这类矿区风险大,但有可能找到大油气田,且进入门槛低。地球表面积达 $5.1 \times 10^8 \text{ km}^2$,哪里才可能有油气?哪些区块有勘探潜力而哪些没有潜力?用什么方法和技术来评判这些区块?带着这些疑问,笔者进行了15年的探索,并取得了一些新认识,有些观点虽与经典的油气地质思想不同,但期望可以丰富油气地质认识、指导油气勘探。

20世纪90年代,世界上存在着油气的有机成因与无机成因两种观点,但随着科技的发展和大量实际资料的获取,油气地质学家们逐步取得了共识,即油气是有机成因,是由沉积岩中的有机质在热力作用下转化生成。因此,沉积岩中有机质的数量就决定了油气生成量,在不考虑保存条件的情况下,有机质的数量取决于沉积期水生生物的发育程度,而生物的发育程度又取决于营养物质、温度、水体清洁度。在相似纬度地区,水体的温度是相近的,多数情况下海水、湖水也是清洁的,所以生物的发育主要取决于营养物质,这一点与农民种庄稼需要施肥料、养鱼虾要放饲料的道理相同。

水生生物的繁盛程度主要取决于营养物质,而前人对营养物质的来源研究很少,相关教材中仅提到大洋上升流是海洋生物生存的营养来源。针对这些问题,笔者带领团队对全球主要含油气盆地(波斯湾、西西伯利亚、墨西哥湾、北海、中大西洋、东非海岸、古特提斯、锡尔特等)进行了系统分析,发现这些盆地在主力海相烃源岩沉积期均为海湾环境,盆地紧邻大陆,三面为陆地,只有一个方向与大海相通,大洋上升流不可能到达这些海湾盆地。进一步研究认为,是河流带来的营养物质汇入海湾促进了水生生物的大量繁殖。与海相盆地相比,湖相盆地只是面积较小,其营养物质供给本质是一样的。湖泊里不可能有大洋上升流,其内部水生生物生长的营养物质来源只能是河流。现代海洋中藻类极度繁殖造成的“赤潮”“蓝潮”等实例研究也表明海洋生物生长的营养物质来自河流。河流是湖泊、海洋中水生生物生长的主要营养物质来源,而河流所流经的出露区的母岩岩性控制了河水中营养物质的丰富程度,进而决定了水生生物的繁盛程度、沉积岩中的有机质丰度、油气的生成量、盆地油气富集程度。世界上的油气主要分布在河流—湖泊体系、河流—海湾体系、河流—三角洲体系中。

1 三个体系控制油气分布的理论基础

无机成因者认为,油气是地幔碳、氢元素在高温高压作用下形成的;有机成因者则认为,油气是地球表面生长的生物死亡之后没有被氧化破坏,经深埋藏并随着地温增高而热演化生成的。大量油气勘探实践证明,已发现的油气田全部位于沉积盆地内部或盆地边缘。油气的有机成因论已被绝大多数石油地质学家所公认。但也有少量甲烷是深部岩浆在高温高压作用下无机形成的,并沿大断裂或伴随火山及岩浆侵入作用运移至浅层富集,即少数甲烷是无机成因。

1.1 生物的数量决定油气生成量

石油和天然气是沉积岩中的有机质在高温作用下生成的,沉积岩中有机质越多,生成的油气也越多,反之,沉积岩中有机质越少,生成的油气也越少。

沉积岩中有机质丰度取决于沉积期有机质的数量和保存条件。沉积环境对于有机质的保存至关重要。一般认为,深水—半深水湖泊、海湾及潟湖环境的有机质保存条件较好,沉积有机质丰度较高,有利于烃源岩的发育。

油源岩中有机质丰度主要取决于原地生长的藻

类,气源岩中有机质丰度则取决于原地生长的高等植物。油源岩和气源岩中的干酪根类型及组分、生成产物、产物被母岩所吸附的量以及产物排出效果均不同,因此两类源岩的有机质丰度的判别标准不同,这是油气地球化学研究的主要成果,在勘探实践中十分重要,但是往往容易被石油公司的勘探技术人员所忽视。

烃源岩的位置控制了油气藏的分布,要找油气田首先必须找烃源岩,即“定凹探边”“定凹探隆”。中国老一辈石油地质学家不仅首次提出了陆相生油理论,而且在实践中创立了“源控论”,对世界石油地质理论的发展做出了杰出贡献。在油气藏形成的“生、储、盖、圈、运、保”6个条件中,“生”是核心,只要生成了油气必定能聚集成藏,若没有构造圈闭,油气会在非构造圈闭内聚集,若没有好储层则油气会在差储层里聚集,甚至可在烃源岩里聚集形成页岩油气藏,因此,油气生成对油气成藏最重要。在油气勘探实践中,科研人员对油气生成量、有机质丰度的认识一直在不停地探索,认识也在不断加深,并越来越符合客观实际。

1974年,Tissot等^[1]通过模拟实验研究提出沉积岩中总有机碳(TOC)含量大于0.5%时才是有效的油源岩,TOC含量小于0.5%时,生成的石油只能满足油源岩的吸附量,不能排出石油。在20世纪90年代,地质学家解放思想,对世界一些含油气盆地进行了油气生成条件研究后指出,将TOC含量等于0.5%作为有效烃源岩丰度的下限值太高,认为TOC含量在0.3%就能成为有效烃源岩,并认为海相碳酸盐岩的泥质含量低,吸附能力弱,其有效烃源岩的TOC含量下限值可能更低(0.2%)。这些新认识使得有效烃源岩数量大幅度增加,原来认为的无效烃源岩变成了有效烃源岩,增加了不少资源量,扩大了油气勘探的领域。但是在该认识指导下进行的勘探效果很不理想,钻了不少干井。

进入21世纪,随着油气勘探的深入和资料的积累,越来越多的油气地质学家和地球化学家倾向于认为,工业性油气藏的主要贡献者可能是生烃坳陷内厚度不一定很大但有机质丰度很高(通常干酪根类型较好),并且已经成熟的优质烃源岩,而不一定是坳陷广布的、厚度大但有机质丰度并非很高的烃源岩,即“优质烃源岩控藏”^[2-4]。张林晔等^[4]认为,济阳坳陷亿吨级的大油田均与优质烃源岩有着密切关系。尤其是在中国陆相复杂断陷盆地,岩性、岩相变化快,油气运移距离短,“优质烃源岩控藏”对这些盆地的勘探实践有着更现实的指导意义。许多学者研究表明,优质烃源岩对于济阳坳陷、东濮坳陷油气成藏(特别是对于岩性油气藏)具有重要的控制作用。

关于优质烃源岩,目前国内外学者在针对其发育的古气候、古沉积环境、显微组分特征、时空分布及主控因素、识别与预测等开展了大量研究,对于优质烃源岩的判识标准也趋于一致,即TOC含量大于2.0%。勘探实践证明,国内外许多盆地中的大油气田均与优质烃源岩发育相关。

1.2 营养物质控制生物的数量

油气的生成量受控于烃源岩中有机质的丰度。在不考虑保存条件情况下,烃源岩中有机质丰度取决于生物的数量,而生物的数量(即生物繁盛程度)又取决于生物生长的温度、水体清洁度和营养物质的浓度。通常情况下,相近纬度的水体温度相近,且水体的清洁度相似,因此,营养物质控制了生物的数量。湖泊和海洋中水生生物(尤其是藻类)生长的主要营养物质是磷和氮,当这些营养物质浓度增加时,藻类会大量繁殖,现代海洋、湖泊中生物的生长是很好的例证。中国北部的渤海是一个内海,夏季常出现大面积的赤潮,即红藻大量繁殖将海水“染红”的现象,造成海水严重污染,导致鱼、虾等大量生物死亡。渤海赤潮主要分布在辽东湾、渤海湾和莱州湾3个海湾,而这3个海湾是辽河、大凌河、绥中河、海河、黄河的入海口,也即5条河流的入海口正是5片赤潮的主要分布区(图1),在渤海其他海域并无赤潮,直接证实河流带来大量生物生长所需营养物质是发生赤潮的原因。

油气的烃源岩形成于海洋与湖泊两种环境。湖泊的周围是陆地,陆地上经物理风化和化学风化的物质由河流带入湖泊,为水生生物生长提供了主要营养物质。在海洋的岸边附近,尤其是海湾地区,众多河流带来了陆地风化的物质,为海洋生物生长提供了主要营养物质,而远离陆地的广海区,营养物质少,生物不发育,形成的沉积岩有机质丰度很低,该认识已被很多大洋钻探(Ocean Drilling Program,ODP)所证实。

在南海,距现今海岸线约500 km处,钻探了大洋钻探1148井,该井完钻深度为859 m^[5],自上而下钻遇了全新统、更新统、上新统、中新统及渐新统。其中,0~458 m段(全新统一中新统)是典型的深海半远洋沉积物,沉积物分布均匀,缺乏明显的沉积构造,泥岩中有机质丰度低,TOC含量一般小于0.25%,干酪根类型为Ⅲ型,显微组分以木质体为主。458~472 m段为滑塌层段,由重力搬运再沉积的生物碳酸钙黏土沉积物组成。472~859 m段(渐新统)为灰绿色钙质泥岩,生物扰动强烈。有机质丰度中等—好,TOC含量一般在0.5%~1.0%,干酪根类型为Ⅱ型和Ⅲ型,显微组分以壳质体、孢质体以及木质体为主。通常认为纯粹的海相沉积中有机质组分以藻类、无定形为主,镜

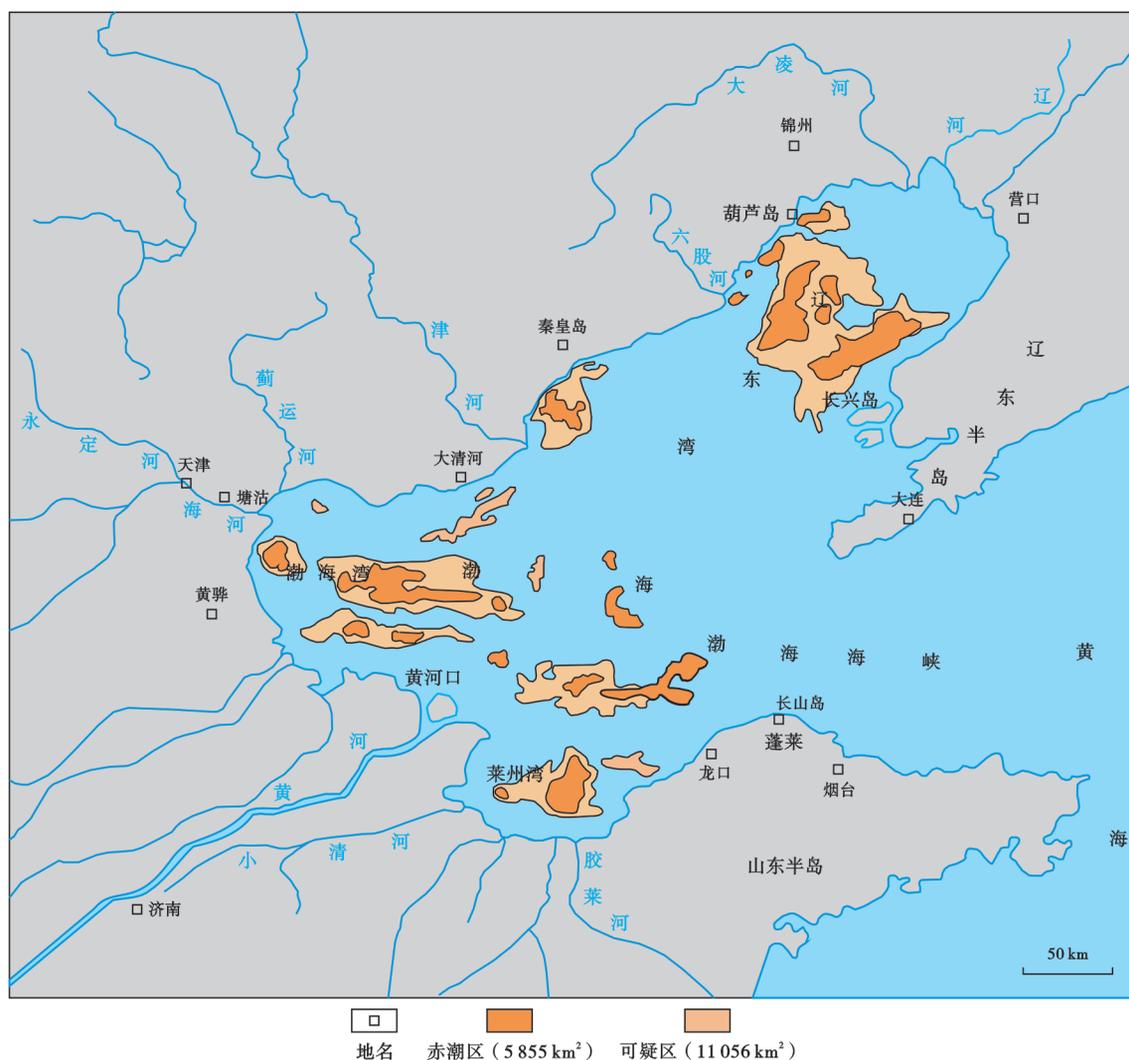


图1 渤海海域赤潮卫星遥感解析图(据文献[6])

Fig. 1 Satellite remote sensing analysis of red tide in Bohai Sea

质组、壳质组、惰质组很少,干酪根类型应是I型、II₁型。但大洋钻探1148井的实际资料恰恰相反,深海沉积中有机质组分以壳质组、惰质组为主,其为随风吹来或随海水漂流带来的陆源有机组分,而原地生长的水生生物却较少。这与传统认识相差较大。

1.3 河流是营养物质的主要来源

湖泊及海洋中生物的生长需要大量营养物质,天然降水注入湖泊和海洋时几乎不含营养物质。经过深入研究认为,湖泊和海洋中生物生长需要的营养物质来自于河流。源远流长的水系,流域广阔,支流携带经物理、化学风化而成的矿物质,汇入干流,注入湖泊(图2)或海洋,保障水生生物生长。

河流给湖泊带来了丰富的营养物质,是湖泊中水生生物生长的必要条件,而不是充分条件。如果湖泊较小,可容空间增速较慢,陆源碎屑物供给充足,湖泊处于过补偿沉积,沉积速度大于沉降速度,水体浑浊,

则不利于水生生物生长,且湖水浅也不利于死亡后生物的保存,因而不能形成有效烃源岩。中国渤海湾盆地太行山东南部的北京凹陷、石家庄凹陷、保定凹陷等就是例证。沙河街组沉积期,这些凹陷离太行山剥蚀区较近,大量的粗碎屑物快速堆积,盆地沉积速度大于沉降速度,表现为过补偿沉积^[7-9],不利于生物的发育且保存条件差,沉积岩有机质丰度低,是非烃源岩,勘探实践证明这些凹陷带油气不富集。

海洋是扩大的湖泊,海洋中生物生长的营养物质主要来自河流,但海底地形比湖泊复杂,海底火山活动也可以为附近生物的生长提供营养物质。海底火山通常位于大洋中,海域非常广阔,营养物质容易被稀释,少数特殊的海相沉积盆地内,海底火山和大洋上升流带来的营养物质保障了水生生物生长,生物死亡后有机质得以保存,形成优质烃源岩。但是世界上多数海相含油盆地内有机质来源是海湾内水生生物,海湾中

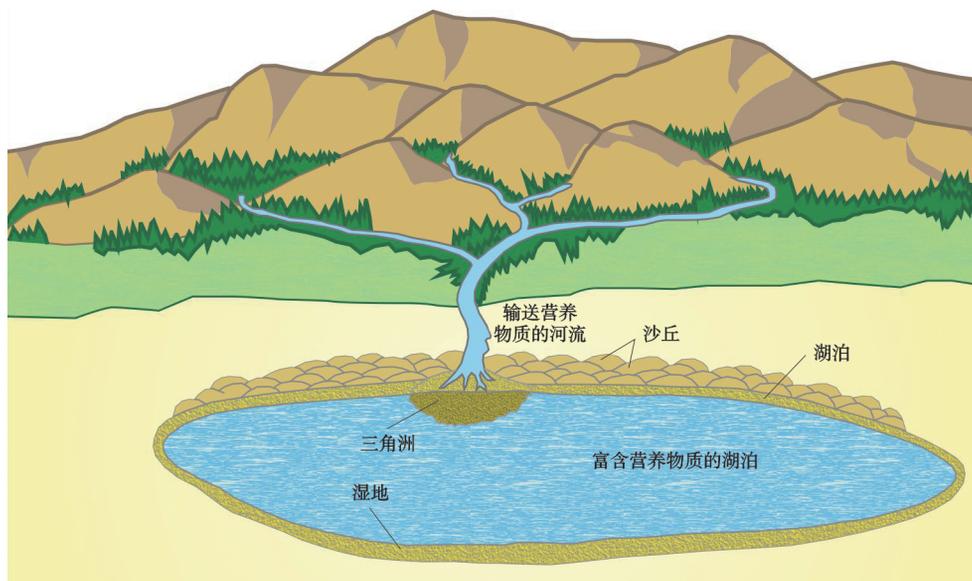


图2 湖泊营养物质富集模式

Fig. 2 Nutrient enrichment model in lake

生物生长的营养物质来源于河流。著名的波斯湾盆地、西西伯利亚盆地、墨西哥盆地、马拉开波盆地、北海盆地、西非大西洋盆地、苏尔特盆地、三叠盆地、四川盆地等海相含油盆地,已发现的石油储量约占世界已发现海相石油储量的90%。这些盆地在烃源岩形成时都是海湾,而不是开阔的大洋盆地,大洋上升流不能到达海湾,因此,其烃源岩中有机质来源于水生生物(主要是藻类),水生生物生长的营养物质来源于河流。

河流是三角洲的物质来源,源远流长的河流带来了丰富的泥沙,这些泥沙在入海口沉积,形成了三角洲主体和大片的平原,平原土壤肥沃,加之海边气候湿润,适于植物的生长。这些三角洲平原、河流平原、沼泽上生长的草本、灌木等植物死亡后被薄层水覆盖,处于半还原环境,发生腐泥化、泥炭化而形成煤、碳质泥岩、暗色泥岩,成为煤型气的有效气源岩。海岸三角洲平原上生长的高等植物死亡后形成煤、碳质泥岩、暗色泥岩(三者合称为煤系烃源岩),是煤型气的主力烃源岩。根据成因分类,天然气可分为生物气、油型气和煤型气。截至2016年,世界已发现的天然气以煤型气最多,中国已发现天然气的70%、世界已发现天然气的60%均来自煤系烃源岩。煤系烃源岩主要形成于海岸—三角洲环境^[10],例如:澳大利亚西北大陆架的北卡那封盆地、布劳斯盆地、波拿巴盆地,澳大利亚南部的大澳大利亚湾盆地,东南亚的库泰盆地,俄罗斯的萨哈林(库页岛)盆地,伊朗的南里海盆地,埃及的尼罗河三角洲盆地,中国的鄂尔多斯盆地、珠江口盆地、曾母盆地等,其主力气源岩均形成于海岸—三角洲环境。

1.4 世界含油气盆地临近大陆板块边缘分布

随着勘探程度的增加,世界油气勘探的难度越来越大。深水—超深水已经成为油气勘探的重要领域,2010年以来全球60%的新发现大油气田都分布在深水—超深水区,人类对地球上油气分布的认识越来越清晰。大量勘探结果揭示,全球油气主要分布在大陆边缘海相盆地和大陆内部湖相盆地(是指烃源岩形成时所处盆地的类型,而非现今位置)。统计可知,世界上已发现油气的70%分布于大陆边缘盆地,20%分布于大陆内部的湖相盆地。这种分布规律是由烃源岩的形成条件,即生物的生长环境、营养物质的来源等决定的。烃源岩中的有机质来源于生物,生物的繁盛程度取决于营养物质浓度,而营养物质主要来源于陆地。陆地上的母岩经过物理、化学风化的产物经河流溶解和搬运,注入湖泊与海洋,其中的矿物质是水生生物生存的营养,碎屑物质沉积后形成的砂、泥层是肥沃的土壤,成为陆源植物生长的有利地区。广阔的大洋盆地不利于烃源岩的形成,油气不富集,这主要是由于其远离陆地,缺乏营养物质的来源。

海底火山可产生一些水生生物生长所需的营养物质,但大洋水体太大,这些营养物质被稀释后不利于生物的大量繁殖。人类对弧前盆地已进行了大量的基础研究和勘探实践,结果表明这些盆地几乎都不富集油气,主要原因是弧前盆地离陆地太远,没有大河流注入,只有小的火山岛提供少量营养物质,导致水生生物不发育、沉积岩中有机质丰度太低。大洋盆地比弧前盆地离陆地更远,营养物质浓度更低,生物更不发育,沉积岩中有机质丰度更低,这已被很多大洋钻探所证

实。而且大洋有机质的显微组分是以镜质体、惰质体为主,属于Ⅲ型、Ⅱ₂型干酪根;这与大洋盆地中有机质主要来自水生生物、干酪根类型为腐泥型的传统认识相矛盾。近来大洋钻探分析结果揭示,广海沉积物中的有机质是海水、风搬运来的少量不易被破碎的陆源植物碎片、孢子等,属于Ⅲ型干酪根。

开阔的海岸盆地不利于油源岩的形成。开阔的海岸盆地虽然离陆地近,可能有大型河流的注入,并带来丰富的矿物质和大量泥砂,利于陆源高等植物在三角洲的生长、死亡后经腐泥化、丝质化形成煤、碳质泥岩等优质气源岩,但其与大洋之间无阻隔,海水交流充分,河流带来的矿物质迅速被稀释,不利于水生生物的生长,加之开阔海岸盆地风浪大,浪基面深不利于有机质的保存,因此开阔的海岸盆地沉积岩中无定型组分含量低,TOC含量随沉积水体加深而变低。因此,开阔海岸盆地不发育油源岩,可形成河流—开阔海岸三角洲含气体系。

2 河流—湖泊体系是陆相石油分布的主要场所

世界上湖相含油盆地主要分布于中国的东部和中部、印度尼西亚的西部、非洲大陆及大西洋两岸。据不完全统计,世界已发现石油储量中,湖相生成油约占30%。

2.1 河流—湖泊体系沉积特征

2.1.1 湖盆的构造与沉积演化

作为含油盆地,湖相盆地在构造与沉积演化上还是有一定的相似性,一般都经历了早期湖泊开始形成、中期强盛发展、后期淤积消亡3个阶段,分别对应早期初始断陷、中期强烈断陷、晚期拗陷构造演化阶段,同时断层活动强度表现为“弱—强—弱”,湖水深度表现为“浅—深—浅”,沉积物粒度表现为“粗—细—粗”。断陷湖盆的形成多与正断层有关。在湖盆形成的早期,由于正断层活动,下盘上升,上盘下降,形成地面高差,在上盘低洼处积水,湖泊开始发育,该阶段湖水面积小、深度浅,周边短物源很多,以洪积扇、冲积扇沉积为主,暗色泥岩少,烃源岩不发育。随着控盆边界大断层活动增强、断距增大,湖水深度和面积均增大,在湖盆边缘为滨—浅湖区,中间为半深湖—深湖区,并且在缓岸区常有源远流长的河流入湖形成三角洲、扇三角洲,在陡岸区发育近岸扇,在湖泊中心发育浊积扇,该阶段是盆地演化最重要的阶段,被称为“主成盆期”,最重要的沉积特征是半深湖—深湖亚相暗色泥岩发育,构成湖盆的主力烃源岩;三角洲、扇三角洲、近岸扇、浊积扇则是自生自储成藏组合中的储层。之后断层活动减弱,进入拗陷发展阶段,湖盆的沉降速率小于沉积速

率,表现为过补偿沉积,可容空间减小,湖水变浅,该阶段以浅湖—滨湖—三角洲—河流沉积为主,暗色泥岩减少,砂岩增多,烃源岩不发育,是储集层和盖层的主要形成期。

每一个湖盆都会经历形成—发展—消亡3个阶段,但每个湖盆的演化历史都不相同。有的湖盆只经历了一期“断陷—断拗”的演化过程,只发育一套烃源岩,如非洲的多塞奥盆地在早白垩世断陷、晚白垩世拗陷只发育下白垩统烃源岩;有的湖盆却经历了两期或多期“断陷—断拗”演化过程,发育两套或多套烃源岩,如渤海湾盆地的黄河口凹陷经历了始新世和渐新世两期“断陷—断拗”发展阶段,发育有两个沉积旋回,每个沉积旋回都经历了断层活动强度“弱—强—弱”、湖水深度“浅—深—浅”、沉积物粒度“粗—细—粗”的沉积构造演化过程,发育始新统中段(沙河街组三段)和渐新统中段(沙河街组一段、东营组三段)两套烃源岩和多套生—储—盖组合,石油地质条件更加优越。

2.1.2 沉积速率与沉降速率对烃源岩的控制作用

湖相烃源岩形成的重要条件是湖盆的沉降速率大于沉积速率,即湖泊处于欠补偿沉积状态,可容空间增大,湖水变深。由于湖盆的沉降主要受边界正断层的控制,边界断层活动强烈,则上盘下降快、湖水变深、面积增大,河流入湖后在湖盆周边形成的三角洲、扇三角洲、近岸扇也越发育。湖中广大水域水体清洁、透光性好,利于藻类等水生生物生长。藻类死亡后沉至湖底,由于湖水深,湖底缺氧,为半还原—还原环境,利于有机质保存。目前已发现的湖相含油盆地中,无论是中国的松辽盆地、渤海湾盆地,还是印度尼西亚的中苏门答腊盆地、中非的迈卢特盆地、东非的东非裂谷西部盆地、大西洋两岸的桑托斯盆地和加蓬盆地等,这些盆地的主力烃源岩都形成于控盆断层强烈活动期,湖盆的沉降速率大于沉积速率,为欠补偿沉积。因此,盆地强烈断陷期是湖相含油盆地形成的最重要时期。

在湖盆形成早期,控盆断层断距较小、活动较弱,湖水面积小且深度浅,周边短距离河流及水道多,陆源碎屑供给充分,沉降速率与沉积速度相当,湖盆发育补偿性沉积,该阶段水体较污浊,藻类不发育,且湖水含盐度低,通常为淡水湖。湖盆发育中—后期,河流带来的矿物质在湖中逐渐富集,才有可能形成含盐度较高的半咸水湖或咸水湖。因此,早期湖泊湖水的含盐度低,不利于有机质保存,形成的泥岩有机质丰度较低且干酪根类型较差,这是湖泊沉积的共同特性。

世界上中生代—新生代湖相盆地的结构特点是凹凸相间,一个盆地内发育有很多个凹陷和凸起。例如

渤海湾盆地内有52个凹陷、49个凸起,迈卢特盆地内有5个凹陷、1个凸起。盆地发育阶段,每一个凹陷就是一个湖泊,烃源岩仅分布于凹陷内;凸起则是剥蚀区,不发育烃源岩,仅在盆地演化后期的拗陷阶段沉积浅湖亚相—河流相砂泥岩,可成为储层或盖层。通常情况下,处于盆地周边的凹陷,由于其邻近盆外大隆起,陆源碎屑供给太多,欠补偿沉积的范围小、时间短,生油条件相对较差;而位于盆地中间的凹陷,受其四周凸起、凹陷的阻挡,盆外物源难以到达,欠补偿沉积的范围大、时间长,利于形成优质烃源岩。渤海湾盆地的渤中凹陷、辽中凹陷、黄河口凹陷、歧口凹陷均处于盆地中心,其优质烃源岩厚度大、分布广,生油条件明显优于盆地周边的凹陷。

2.1.3 河流性质与湖相烃源岩的发育

湖相烃源岩中的有机质主要来源于湖水中的水生生物(以藻类为主)。水生生物的繁盛程度受控于湖水中营养物质的浓度,而营养物质来源于河流,天然降水中基本不含营养物质。源远流长的河流与短源河流,长期流淌的河流与季节性河流,流经火成岩、正变质岩的河流与流经沉积岩、副变质岩的河流,河水中矿物质(磷、钾等元素)的含量不同,对湖水中水生生物生长的作用也不同。

长年流淌的河流通常是源远流长的河流,不仅给湖泊带来较稳定的水源和营养物质,且其水中营养物质丰富、水体清洁,利于藻类生长。而季节性河流具有阵发性,流淌距离较短,河床坡度大,水流急,多雨季节流量大,干旱季则断流,对湖水供给不稳定,且水体较浑浊,水中营养物质浓度低,不利于藻类生长。因此,大型三角洲发育的湖泊里水生生物繁盛,有利于形成优质烃源岩,而冲积扇、洪积扇发育的湖泊则不利于藻类生长和优质烃源岩形成。湖盆形成早期以洪积扇、冲积扇沉积为主,湖盆发育晚期以河流沉积为主,湖水浅、面积小,均不利于藻类生长。只有湖盆演化中期的湖泊水域大、湖水深,发育源远流长的河流—三角洲沉积体系,最有利于藻类的生长和形成优质烃源岩。

河流流经不同岩石类型的出露区,不同矿物质溶解后随流水进入湖泊后对藻类繁盛程度产生不同影响。如果河流主要流经富含磷、钾等营养元素且易发生物理与化学风化的火成岩和正变质岩(如玄武岩、安山岩、花岗岩、混合花岗岩等)出露区,则流水中会溶解大量的矿物质,有利于注入的湖泊内藻类大量繁殖。如果河流主要流经磷、钾等营养元素含量低,钙、镁元素和泥质含量高的沉积岩和副变质岩(如灰岩、白云岩、泥岩、砂岩、石英岩、大理岩等)出露区,则河水入湖后不利于藻类生长。

2.2 河流—湖泊体系生物地球化学特征

根据生物的生长环境、生物类型以及有机质保存条件的不同,可以将河流—湖泊体系划分为河流—三角洲平原、滨—浅湖、半深湖—深湖3种沉积相带,这3种沉积相带在生物发育特点和烃源岩特征方面存在明显的差异。

2.2.1 不同沉积相带生物特征

滨—浅湖区的水体深度为0~10 m,风浪较大,湖底位于浪基面之上。河流入湖后,河水携带的矿物质、有机质成为湖泊底栖浮游生物的主要营养来源。滨—浅湖中底栖生长的螺、蚌等发育,游动的鱼、虾等也较多,而浮游的藻类等低等水生生物因风浪大难以长期在该区域生长。此外,河水中携带的陆源植物碎片也在滨—浅湖区沉积下来,成为有机质的重要来源。滨—浅湖区水体较浅、风浪较大、水中含氧高,有机质保存条件较差,易于腐烂的鱼、虾、蚌等动物尸体常被破坏,而易于保存的陆源植物碎片、孢子等得以保存。半深湖—深湖区是湖泊中心,湖水深度大于10 m,湖底均在浪基面之下。河流带来的碎屑物质对半深湖—深湖区影响较小,该区域水体清洁、透光性好,河水中溶解的矿物质可扩散至深水区,适于浮游生物尤其是藻类的生长,鱼、虾等动物也较发育。半深湖—深湖区湖底缺氧,为半还原环境,鱼、虾死亡之后,尸体沉入湖底被泥质覆盖后,可保存于沉积岩中。由于漂浮至半深湖—深湖区的陆源植物碎屑少,因此,该区域主要发育I型、II₁型干酪根,无定形组分高,是最优质的烃源岩。

相较于海水,有机质在淡水湖泊中的保存对水深的要求更严格,这是因为细菌、微生物在淡水中更容易生长,其大量繁殖会改造和破坏有机质,因此,淡水湖泊只有满足深度较大、水体分层及对流作用弱等条件,湖底缺氧时,有机质才能得以保存。在淡水湖泊的浅水区有机质很难保存,但在海水以及半咸水—咸水湖泊中,由于水体含盐度较高,细菌生长受限,即使水体较浅,也有利于有机质保存,且有机质中易于被细菌破坏的脂肪类、蛋白质类也能保存下来,因此,相较于淡水湖泊,含盐度较高的湖泊及海水中更易形成II₁型干酪根。渤海海域始新世中期(沙河街组三段沉积中期)的湖水最深,形成的烃源岩最厚(500~1500 m),但干酪根类型以混合型为主;而渐新世中期(沙河街组一段沉积期)的湖水较浅,形成的烃源岩厚度虽相对较薄(50~200 m),但干酪根类型好,以II₁型为主,生油能力更强。分析发现,沙河街组一段沉积期渤海海域发育有湖相碳酸盐岩、油页岩等“特殊岩性段”,表明该期湖水含盐度较高,有利于脂肪类、蛋白质类的保存,

形成的烃源岩产油率也较高。

2.2.2 不同沉积相带地球化学特征

河流—三角洲平原适宜陆源高等植物生长,一些植物碎屑会随河流进入湖泊,植物的镜质体、惰质体等成分不易被破坏,虽然处于氧化环境,但其被泥沙掩埋后仍可保存下来,形成Ⅲ型干酪根。该型烃源岩有机质丰度变化范围大,TOC含量为0.6%~10.0%,大多数低于2.0%,可生成天然气。

在滨—浅湖区,既有河流带来的陆源高等植物碎屑,也有湖水中生长的生物,但该区水体浅、风浪大,湖底在浪基面以上,整体保存条件差,无定形组分多数被破坏,烃源岩干酪根类型以混合型为主,但腐殖型组分较多,通常为腐泥—腐殖型,有机质丰度也不高,TOC含量通常为0.5%~2.0%,在热演化程度较高的情况下,可生成一定量天然气。

在半深湖—深湖区,水生生物占绝对优势,陆源高等植物输入少,加之湖水深、湖底为半还原—还原环境,有利于有机质保存,干酪根类型以Ⅰ型、Ⅱ₁型为主,有机质丰度较高,TOC含量一般为1.0%~9.0%。通常认为,TOC含量大于2.0%、干酪根类型为Ⅰ型及Ⅱ₁型的烃源岩为优质烃源岩,生油潜力大,是油藏的主要贡献者。石油生成后首先要满足烃源岩内部泥质的吸附,之后,多余的石油才能驱排出烃源岩,经运移聚集形成油藏。Ⅰ型和Ⅱ₁型烃源岩的有机质丰度越高,排油率就越高,更易形成大油田。在很多湖相盆地中,大—中型油田围绕湖盆中心呈环带状分布,油气分布严格受生烃中心控制,如渤海海域渤中地区已发现的油气主要围绕渤中凹陷分布。

2.3 河流—湖泊体系与湖相石油的共生关系

世界上的湖相含油气盆地主要分布于中国、印度尼西亚、非洲和大西洋两岸4个地区,为中生代—新生代陆内裂谷盆地和弧后盆地,油源岩也形成于中生代—新生代。

2.3.1 中国东部新生界

在中国东部的华北板块、扬子板块及华南板块发育了渤海湾、江汉、南阳、苏北、珠江口、北部湾盆地等26个新生代湖相裂谷盆地,单个盆地面积为 $(0.083\sim 25)\times 10^4\text{ km}^2$,目前,已在13个盆地内发现了油气,均为中国重要的一类含油气盆地。中国湖相含油气盆地主要包括准噶尔盆地、鄂尔多斯盆地、松辽盆地、渤海湾盆地、苏北—南黄海盆地、南阳盆地、江汉盆地、珠江口盆地、北部湾盆地等。其中,鄂尔多斯盆地面积为 $25\times 10^4\text{ km}^2$,油源岩是三叠系延长组,厚度为100~400 m,TOC含量平均为1.56%,干酪根类型为Ⅱ₁型、Ⅰ型,截至2010年底,盆地探明石油地质储量为 $20.4\times$

$10^8\text{ t}^{[11]}$ 。中国湖相盆地石油资源量为 $917\times 10^8\text{ t}$,约占中国石油资源总量的73%,2017年中国湖相盆地的石油产量为 $1.92\times 10^8\text{ t}$,约占当年中国石油总产量的95%。渤海湾盆地是目前中国产油最多的含油盆地,面积约为 $20\times 10^4\text{ km}^2$,内部划分为6个拗陷(辽河—辽东湾拗陷、渤中拗陷、黄骅拗陷、冀中拗陷、临清拗陷、济阳拗陷)和2个隆起(埕宁隆起、沧县隆起)。受烃源岩分布在拗陷内的控制,盆地内的油田也分布在拗陷内,隆起上基本没有油田。每个拗陷都由若干个凹陷和凸起组成,烃源岩主要分布在凹陷内,凹陷是基本的生油、聚油单元,控制了油田的展布,凸起上不发育烃源岩和油藏。

在渤海湾盆地内,优质烃源岩所在的富油凹陷控制了大—中型油田的分布。渤海湾盆地内富油凹陷包括大民屯凹陷、西部凹陷、辽西凹陷、渤中凹陷、歧口凹陷、黄河口凹陷、莱州湾凹陷、沧东凹陷、饶阳凹陷、东濮凹陷、东营凹陷和沾化凹陷。这些凹陷内部一般发育2~3套优质烃源岩,干酪根类型主要为Ⅰ型、Ⅱ₁型,TOC含量为2.0%~8.0%,烃源岩厚度为200~800 m。在单个生油凹陷内,优质烃源岩并不是均衡分布,平面变化较大,通常在一个凹陷内有1~4个富生油次洼,例如济阳拗陷东营凹陷和黄河口凹陷分别有4个、3个富生油次洼(图3),渤中凹陷和辽中凹陷分别有4个、3个富生油凹陷。富生油次洼的分布最终控制了大油田的展布。渤海湾盆地是一个湖相盆地,内部断层活动时间长,地形起伏变化大,单个砂体的横向分布范围较小,这导致了石油在盆地内部的横向运移距离较其他盆地小(一般为1~20 km),而沿断层的纵向运移距离较其他盆地大(一般为1~5 km,图3)。因此,渤海湾盆地主力油田紧邻生油次洼分布,表现出明显的源控特征。

2.3.2 中国东部中生界

松辽盆地是一个中生代拗陷型盆地,中生代沉积了厚度为8000~10000 m的侏罗系和白垩系。其中,侏罗系分布相对局限,白垩系分布广泛且厚度大,是盆地沉积充填的主体(图4)。

松辽盆地发育断陷期煤系气源岩和拗陷期湖相油源岩两套主力烃源岩。其中,断陷期煤系气源岩包括中—上侏罗统火石岭组和下白垩统沙河子组、营城组的煤、碳质泥岩及煤系地层中的暗色泥岩,拗陷期湖相油源岩包括上白垩统青山口组、嫩江组半深湖—深湖亚相泥质烃源岩。中—上侏罗统煤层的单层厚度薄,为1~2 m,多约为1 m;TOC含量为40.0%~84.4%;低成熟度煤的生烃潜量(S_1+S_2)较高(93.60~129.93 mg/g),高一过成熟度煤的生烃潜量较低(20.00~50.00 mg/g)。

碳质泥岩的 TOC 含量为 10%~40%，生烃潜量为 0.05~14.71 mg/g^[12-13]。中—上侏罗统煤系气源岩的干酪根类型主要为 II₂ 型和 III 型，生气潜力大，是盆地内的优质气源岩，为深部大气田的形成奠定了物质基础。晚白垩世青山口组和嫩江组沉积期，湖盆面积较大，加之湖盆周缘河流带来了丰富的矿物质，湖中轮藻、叶肢介等水生生物大量繁殖。湖底处于缺氧状态，有利于有机质保存，形成了有机质丰富的半深湖—深湖亚相优质烃源岩。青山口组泥岩的 TOC 含量为 0.5%~10.0%，生烃潜量为 2.0~58.2 mg/g；嫩江组泥

岩的 TOC 含量为 1.5%~5.0%，生烃潜量为 2.9~34.1 mg/g。整体上，青山口组和嫩江组烃源岩中无定型组分含量高，干酪根类型主要为 I 型和 II₁ 型，生油潜力大，是盆地内的优质油源岩，为大油气田的形成奠定了良好的物质基础。

松辽盆地发育断陷期和坳陷期两套完全不同的成藏组合：侏罗纪断陷期煤系烃源岩生气，火山碎屑岩储气，储层非均质性强、埋藏深、物性较差，发育深部气成藏组合；白垩纪坳陷期半深湖—深湖亚相暗色泥岩生油，三角洲相、滨—浅湖亚相砂岩储油，储层埋藏较

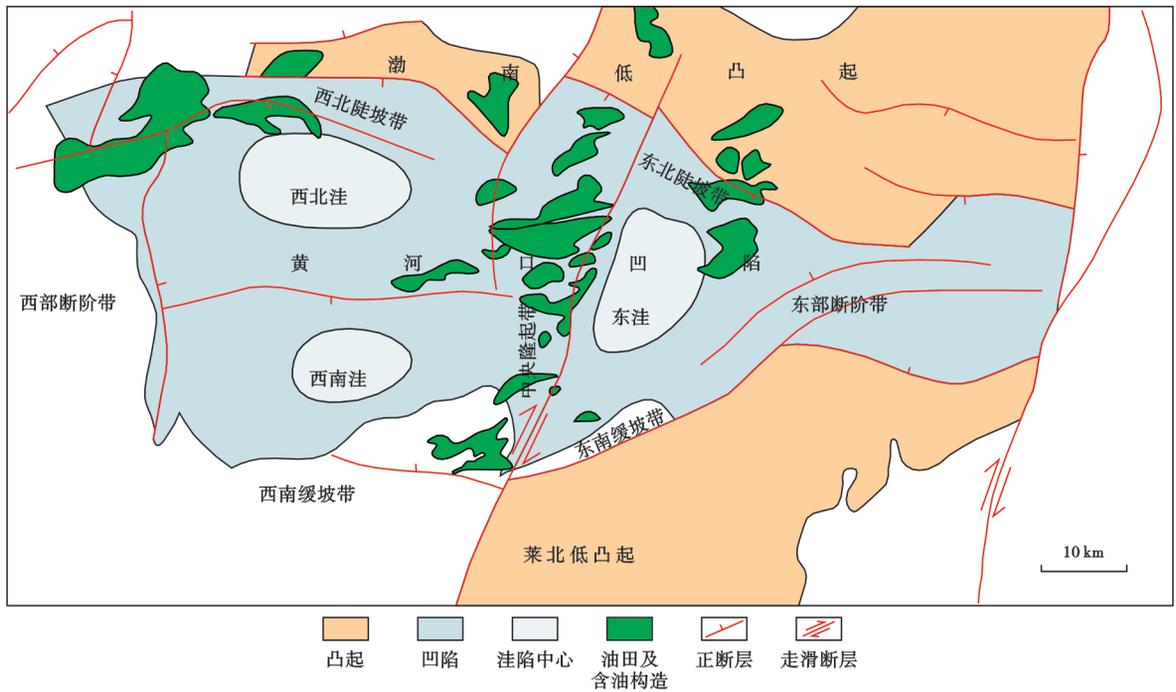
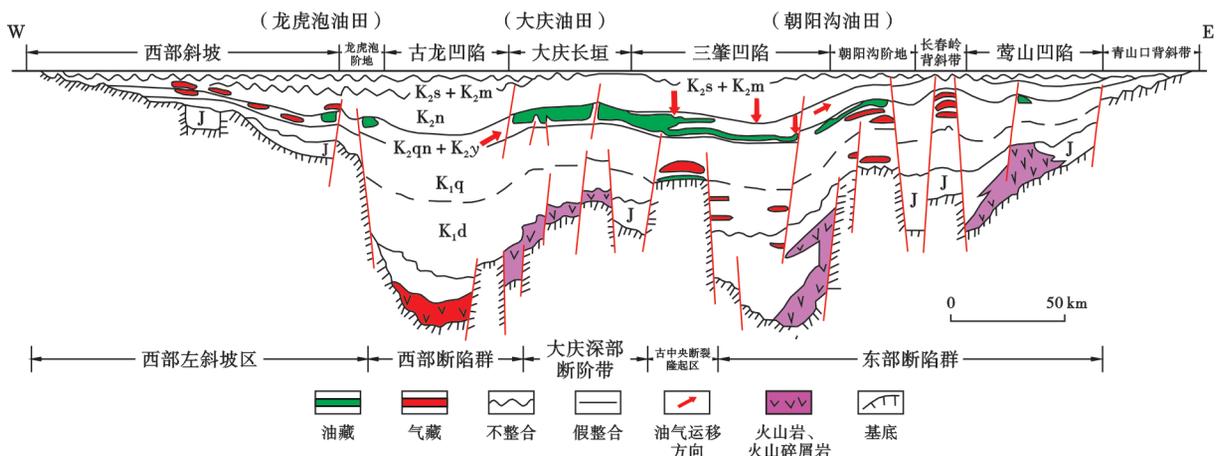


图 3 黄河口凹陷构造单元划分及油田分布

Fig. 3 Structural units and oilfields distribution in Huanghekou sag



注：J—侏罗系；K₁d—下白垩统登楼库组；K₁q—下白垩统泉头组；K₂qn—上白垩统青山口组；K₂y—上白垩统姚家组；K₂n—上白垩统嫩江组；K₂s—上白垩统四方台组；K₂m—上白垩统明水组。

图 4 松辽盆地地质剖面(据文献[14]修改)

Fig. 4 Geological section of Songliao Basin

浅、物性好,发育中—浅层油成藏组合。深部断块、断鼻和中—浅层巨型反转背斜、大面积岩性圈闭是盆地内主要的圈闭类型。松辽盆地石油地质条件优越,湖相泥岩横向分布稳定、厚度大、盖层好,生成的原油性质好。

2.3.3 南大西洋下白垩统

大西洋两岸分布了两排形成于中生代早白垩世的湖相裂谷盆地。侏罗纪,非洲大陆与美洲大陆相连;早白垩世,两个大陆开始裂开,漂移形成了大西

洋。因此,大西洋两岸的湖相盆地在早白垩世彼此相连,石油地质条件相似。巴西东岸的桑托斯(Santos)盆地、坎普斯(Campos)盆地、普第瓜尔(Potiguar)盆地、塞阿拉(Ceará)盆地等与非洲西岸的宽扎(Kwanza)盆地、下刚果(Lower Congo)盆地、加蓬(Gabon)盆地、贝宁(Benin)盆地、科特迪瓦(Cote d'Ivoire)盆地等均为早白垩世湖相裂谷盆地,在湖相裂谷盆地基础上叠加发育了晚白垩世—新近纪被动大陆边缘盆地(图5)。

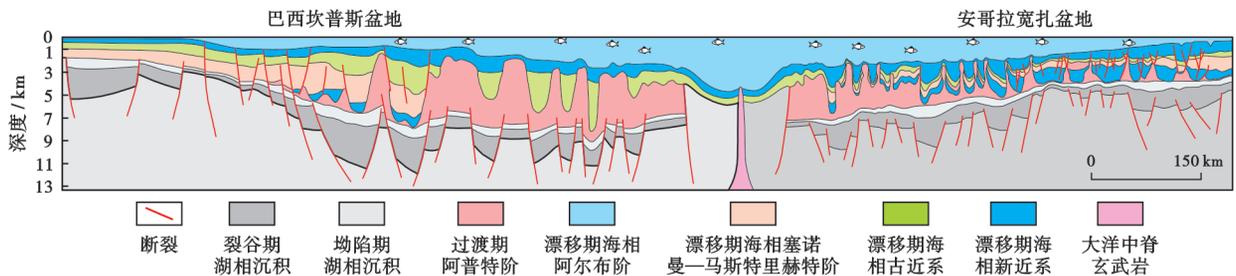


图5 南大西洋两岸区域地质结构剖面

Fig. 5 Regional geological profiles on the passive continental margins of the South Atlantic

桑托斯盆地是世界上油气储量最富集的湖相裂谷盆地之一,面积为 $32.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,下白垩统油源岩的厚度普遍在 $200 \sim 800 \text{ m}$, TOC 含量为 $2.0\% \sim 17.0\%$,干酪根类型为 I 型,已发现的石油可采储量为 $39.57 \times 10^8 \text{ t}$,剩余石油 2P 可采储量为 $81.72 \times 10^8 \text{ t}$,剩余天然气 2P 可采储量为 $34.41 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量,具有很大的勘探潜力。坎普斯盆地发育下部湖相和上部海相两套烃源岩。其中,下部湖相泥岩有机质丰度高、类型好,已生成了大量石油;上部海相泥岩有机质丰度低、类型差,是未成熟的潜在气源岩。钻井揭示坎普斯盆地湖相烃源岩是目前世界上最优质的湖相烃源岩之一。早白垩世中期,坎普斯盆地湖水深、面积大,水体含盐度较高,湖边河流带来了丰富的矿物质(图6),有利于藻类大量繁衍,且藻类死亡后的保存条件好,形成的泥岩有机质丰度高(TOC 含量为 $2.0\% \sim 9.0\%$),干酪根类型好(主要为 I 型),氢指数高达 900 mg/g ,生烃潜力一般大于 10 mg/g 。由于上覆厚盐层的热导率好,地温梯度较低($2.5 \text{ }^\circ\text{C/hm}$),因此,下部湖相烃源岩虽埋藏深,但仍处于生油窗内(R_o 为 $0.8\% \sim 0.9\%$)。油源对比分析显示,大坎普斯盆地已发现的石油全部来自盐下湖相烃源岩。盐上海相烃源岩的有机质丰度低,TOC 含量一般为 $0.5\% \sim 1.5\%$,干酪根以 III 型、II₂ 型为主,且埋藏浅,处于未成熟阶段,为无效烃源岩。桑托斯盆地和坎普斯盆地下部湖相烃源岩干酪根类型主要为腐泥型,无定型有机质含量达 90% ,而上部海相烃源岩干酪根类型主要为腐殖型,无定型含量

普遍低。2000 年以来,全球大量勘探资料揭示,很多盆地海相烃源岩的干酪根类型为低丰度的 III 型,而湖相烃源岩的干酪根类型为高丰度的 I 型,这与传统的认识刚好相反。开阔的广海盆地一般不能形成优质烃源岩,优质海相烃源岩形成于半封闭的海湾。

桑托斯盆地和坎普斯盆地在垂向上都发育上、中、下 3 套成藏组合(图5)。上组合为下生上储型,其下白垩统裂谷期湖相烃源岩生油,上白垩统一古近系为储油层系(包括上白垩统、古新统一始新统、渐新统一中新统 3 期深水浊积砂岩),浅海—半深海相泥岩为盖层,该套组合是盆地最重要的成藏组合,已发现原油储量的 67.5% 均赋存于此组合中。中组合也是下生上储型,储层以下白垩统阿尔布阶海相碳酸盐岩为主,也包括部分三角洲砂体,漂移期海相泥岩是主要盖层,层间的泥灰岩也具有封堵能力,该套组合中发现的原油储量占盆地总储量的 11.7% 。下组合以下白垩统湖相介壳灰岩为储层,裂谷期湖相泥岩为烃源岩,上覆厚层盐岩为盖层,该套组合中发现的原油储量约占盆地总储量的 20.7% ,该套成藏组合是桑托斯盆地最重要的成藏组合。

2.3.4 非洲中部地区中生界

在非洲大陆中部(苏丹、乍得、中非等国家境内)发育众多中生代湖相盆地,如迈卢特、穆格莱德、喀土穆、多赛奥、多巴、邦戈、特米特等盆地,其形成时间、演化历史与中国的松辽盆地相似,均在白垩纪形成了优质烃源岩,盆地内石油富集。白垩纪湖相盆地是非洲

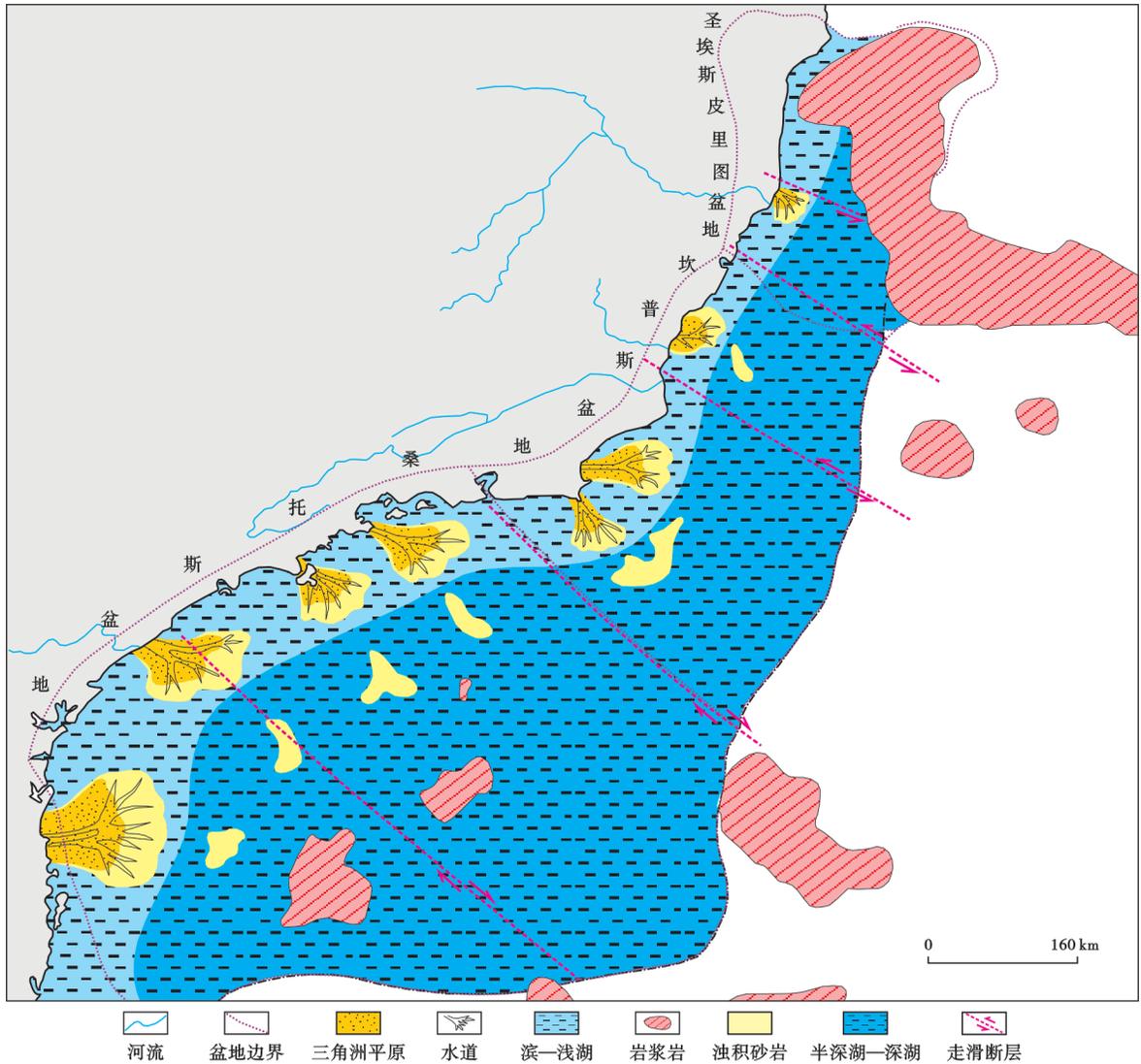


图6 桑托斯盆地和坎普斯盆地强盛裂陷次级阶段沉积相

Fig. 6 Depositional facies in the secondary stages of strong rift period in Santos Basin and Campos Basin

中部重要的产油区,中国石油天然气集团有限公司在迈卢特、穆格莱德、邦戈等盆地发现了许多油田,是中国石油公司在海外勘探最成功的例证。

非洲中部的白垩纪盆地均经历了两期裂陷。其中,第1期裂陷作用最强,主要形成了半深湖—深湖亚相沉积,湖盆周边河流经过古老的火成岩剥蚀区,将溶解的钾、磷等矿物质带入湖泊,加之同期气候温暖,藻类等水生生物繁盛,死亡之后在湖底缺氧环境下得以保存,形成了优质烃源岩(图7)。这些盆地的烃源岩有机质丰度高,如迈卢特盆地烃源岩 TOC 含量为 0.40%~3.24%(平均为 2.08%),穆格莱德盆地烃源岩 TOC 含量为 1.00%~5.00%(平均为 1.30%),多赛奥盆地烃源岩 TOC 含量为 2.00%~13.00%(平均为 2.50%);干酪根类型均为 I 型和 II₁ 型(表 1),生油条件好,为盆地内石油富集奠定了物质基础。

在湖盆演化过程中,河流流经湖盆周边陆地时将风化形成的碎屑物质带至湖边可形成三角洲、扇三角洲、水下扇,尤其是在两期裂陷之间的回返期,河流、三角洲、扇三角洲发育,形成了优质砂岩储层;再次裂陷期,湖盆又沉积了厚度大、横向分布稳定的泥岩盖层,与下覆砂岩储层构成优越的储-盖组合。泥岩盖层的厚度一般为 180~500 m,砂岩储层的孔隙度为 12.6%~35.2%(平均为 28.0%),渗透率为 2~10 900 mD(平均为 158 mD)。与中国东部中生代—新生代湖相裂谷盆地相似,非洲中部白垩纪湖相盆地发育了披覆背斜、逆牵引背斜、断鼻、断块等构造圈闭,为石油的聚集提供了条件。

非洲中部白垩纪湖相盆地石油资源丰富,目前已在迈卢特盆地、穆格莱德盆地、多巴盆地和特米特盆地分别发现石油可采储量 2.41×10^8 t、 2.75×10^8 t、 $1.46 \times$

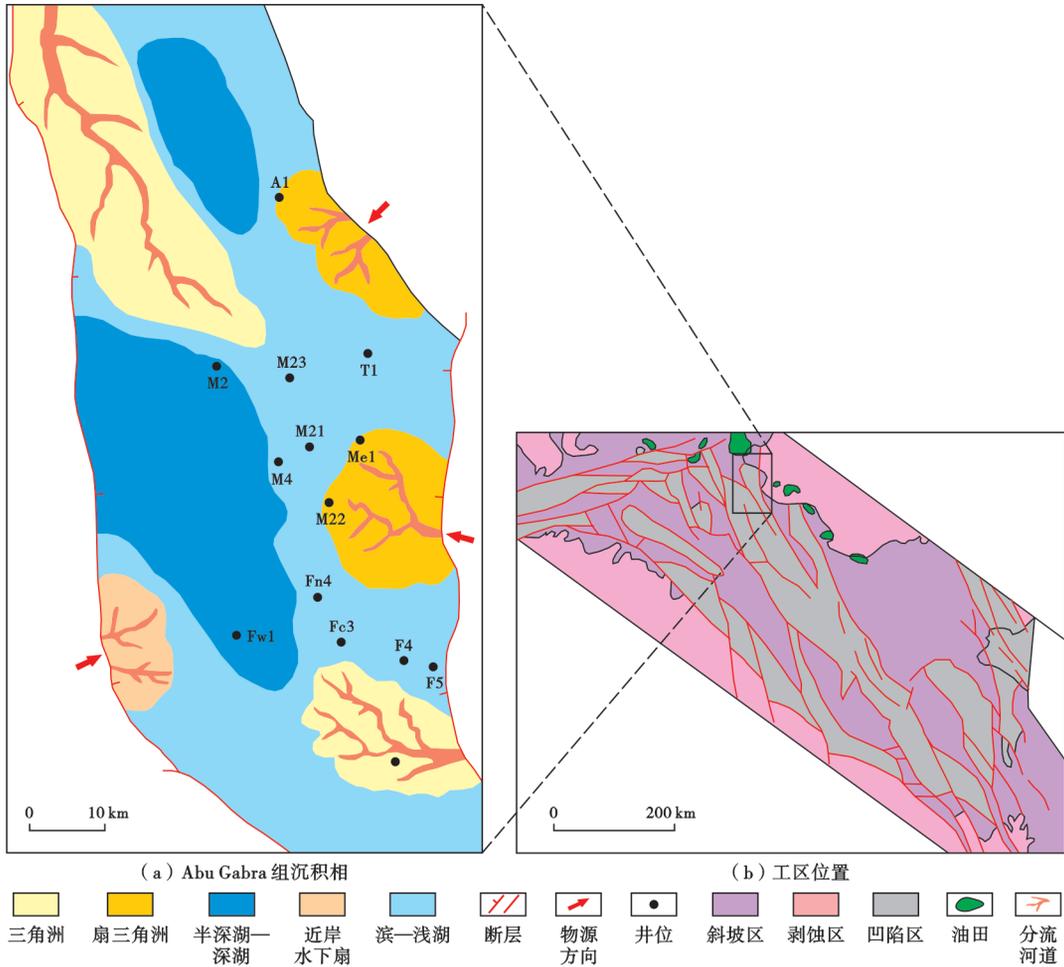


图7 穆格莱德盆地富拉坳陷 Abu Gabra 组沉积体系分布

Fig. 7 Distribution of depositional system of Abu Gabra Formation in Fula depression, Muglad Basin

表1 中非裂谷系盆地烃源岩特征

Table 1 Characteristics of the source rocks of rift basins in central Africa

盆地	主要烃源岩	干酪根类型	热成熟度	TOC/%	证实程度
邦戈	下白垩统湖相泥岩	II ₁ 、I	成熟油窗	平均 1.98, 最高 6.95	证实
多巴	下白垩统湖相泥岩	I、II	成熟油窗	1.00~4.00	证实
多赛奥	下白垩统湖相泥岩	I、II ₁	成熟油窗	2.00~13.00/2.50	证实
萨拉马特	下白垩统湖相泥岩	未证实		未证实	未证实
穆格莱德	下白垩统湖相泥岩	I、II ₁	成熟油窗	1.00~5.00/1.30	证实
麦卢特	下白垩统湖相泥岩	II、I	成熟油窗	0.32~3.24/2.08	证实
喀土穆	下白垩统湖相泥岩	I、II、III		0.32~2.83/1.70	证实

注：“/”之后为平均值。

10⁸t 和 0.26 × 10⁸t。这些盆地仍具有较大的勘探潜力,且非洲中部地区还有一些勘探程度很低的新盆地,具有发现大—中型油田的潜力。

2.3.5 东非裂谷新界

东非裂谷也称“东非大裂谷”,位于非洲东部,是世界上最大的新生代断裂带。东非裂谷北起阿法尔盆地,经过坦桑尼亚克拉通,南至马拉维湖,全长约 3 500 km,宽为 30~150 km,分为东、西两支。东支位于埃塞俄

比亚、肯尼亚和坦桑尼亚境内,南北长为 2 100 km,东西宽为 30~150 km;西支位于乌干达、刚果(金)、卢旺达、布隆迪、坦桑尼亚和马拉维境内,南北长为 2 500 km,东西宽为 50~100 km。东非裂谷内共发育 16 个湖相凹陷(或地堑),各凹陷间凸起(隆起)相隔,其地质特点与中国东部中生代—新生代湖相裂谷盆地相似。东非裂谷 16 个凹陷具有不同的构造特征,形成了相对独立的烃源岩和含油气系统。

东非裂谷西支的艾伯特凹陷的主力烃源岩形成于晚中新世—早上新世强裂陷期,沉积期湖水深、湖域面积大,长轴方向的河流带来了丰富的矿物质,且气候温暖湿润,均有利于藻类等水生生物的生长。藻类死亡后,在湖底易于保存,因此,暗色泥岩中有机质丰度高。凹陷洼陷带 Ngassa-2 井上中新统一上新统(深度为 2325~3 193m)泥岩样品的 TOC 含量为 3.07%~9.80%,干酪根类型为 I 型、II₁ 型,属好—优质烃源岩。艾伯特凹陷北部的长轴缓坡带发育大型河流—三角洲沉积体系,三角洲平原及前缘砂岩是凹陷最重要的储层。三角洲前缘砂岩与凹陷内烃源岩呈指状接触,且接触面积大,可将烃源岩内生成的石油“吸入”至储层中,并向上倾方向侧向运移至斜坡断块圈闭中聚集,形成旁生侧储的成藏模式,生、运、储配置非常好。目前在凹陷北部大型三角洲发育区发现了 Jobi-Rii、Jobi-East、Ngiri、Kasamene 等大一中型优质油田,将成为东非重要的产油区。

2.3.6 印度尼西亚新生界

印度尼西亚的石油主要产自西纳吐纳盆地、北苏门答腊盆地、中苏门答腊盆地、南苏门答腊盆地、西爪哇盆地、东爪哇盆地等湖相盆地。这些盆地的油源岩形成于晚始新世—渐新世。中始新世—早渐新世,盆地主要发育湖相泥质烃源岩,湖泊藻类是该期最重要的有机质来源,烃源岩 TOC 含量为 1%~12%,干酪根以 I 型或 II₁ 型,以生油为主,已发现的石油绝大多数源自裂谷期湖相烃源岩(图 8)。晚渐新世—中新世沉积的三角洲—滨—浅海相的煤、碳质泥岩、暗色泥岩为该区第 2 套烃源岩,其有机质主要来自三角洲平原—沼泽的高等植物,泥岩 TOC 含量为 0.5%~5.0%,煤层 TOC 含量可达 50%,干酪根类型以 III 型或 II₂ 型为主,主要生成大量天然气和少量伴生的轻质原油。印度尼西亚中苏门答腊盆地面积为 $13 \times 10^4 \text{ km}^2$,始新统油源岩的厚度为 100~300 m,TOC 含量为 1.0%~12.0%(平均为 4.4%),干酪根类型为 I 型、II₁ 型。

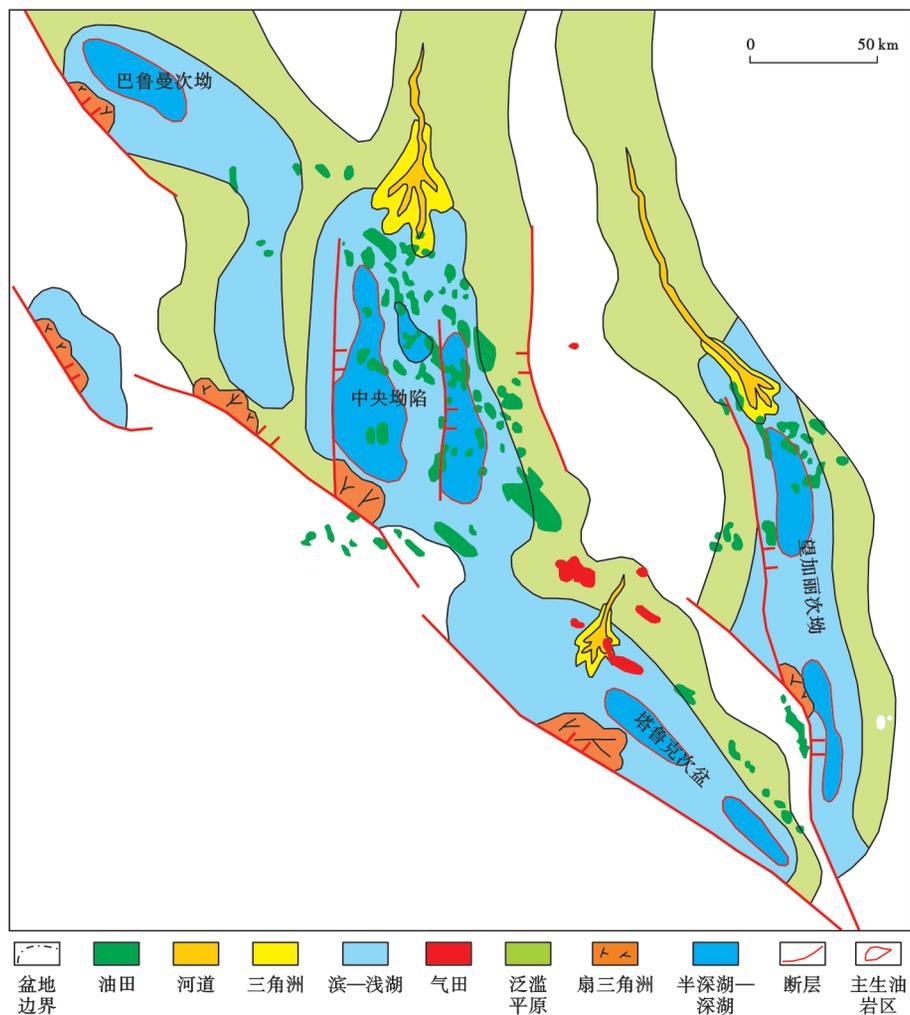


图 8 中苏门答腊盆地油气田与烃源岩分布

Fig. 8 Distribution of the oil and gas fields and the source rocks in Central Sumatra Basin

中苏门答腊盆地发育上、中、下3套储-盖组合,分别对应拗陷期、裂谷期与裂谷前3个演化阶段。上组合的储层为中一下中新统河流、三角洲、滨海相砂岩,储层厚度大、分布广、物性好,孔隙度为25%~40%,渗透率为300~2300 mD;盖层为中一上中新统的浅海相泥岩,储-盖配置好,该套组合是中苏门答腊盆地最重要的一套储-盖组合,已发现的油气储量占盆地总储量的88.14%。中组合为发育于裂谷期的自生自储自盖式组合,储层为始新统、渐新统湖相三角洲、浊积扇砂岩,孔隙度为18%~23%,渗透率为10~120 mD;盖层为半深湖—深湖亚相泥岩,目前在該套组合中发现的油气储量占盆地总储量的11.44%。下组合为上生下储式组合,以裂缝发育的盆地基底花岗岩、石英岩、安山岩、千枚岩储层,以上部湖相泥岩为盖层,在該套组合中发现了少量“潜山”油气藏。中苏门答腊盆地已发现的石油地质储量为 18.58×10^8 t,占整个苏门答腊盆地油气总量的95%。

3 河流—海湾体系是海相石油分布的主要场所

石油可形成于海洋和湖泊两种环境。目前,“陆相生油”理论研究已较成熟和完善,但对于海相烃源岩形成机理与分布特征的认识并不十分清楚。海相烃源岩沉积有机质富集机理和形成模式一直是学术界研究热点问题^[15-20]。

在研究中国及全球海相含油气盆地油气富集规律的过程中,笔者逐渐认识到河流—海湾体系是控制海相石油分布的主要因素,世界海相石油主要分布在河流—海湾体系^[21-23]。海湾常常是大型河流的入口处,河流带入的营养物质在相对封闭的海湾环境中不易被稀释,保障了海湾中生物繁盛^[21-23]。海湾处于半封闭环境,波浪作用相对于广海较弱,能保持较高的营养物质浓度,从而保证水生生物的大量生长;海湾环境也有利于有机质的保存,易于形成优质烃源岩。同时,河流带来的丰富碎屑物的沉降速率快、沉积厚度大,形成的富有机质的烃源岩往往埋深较大,有利于烃源岩的热演化。

3.1 河流—海湾体系沉积特征

河流—海湾体系发育优质海相烃源岩,以倾油为主,其母质生物勃发所需要的营养物质来源于盆地周缘的基底,由河流携带注入。

3.1.1 海相烃源岩发育的沉积环境特征

受河流—海湾体系控制,中东—北非地区在古生代早志留世沉积了一套重要的海相烃源岩。奥陶纪末期—早志留世,波斯湾和北非地区均位于冈瓦纳古陆

北缘,为古特提斯洋的陆表海(宽度约为2000 km),其东、南、西三面均为冈瓦纳古陆,北接古特提斯洋,是一个大型的海湾体系。奥陶纪末期,冈瓦纳古陆南部漂移至南极附近,导致了冰期的出现;晚奥陶世,极地冰川扩大至冈瓦纳古陆并覆盖了阿拉伯板块西部;晚奥陶世末期,冰川融化导致海平面上升。盆地边缘的阿拉伯地盾的河流带来大量富含营养物质的淡水,导致海湾体系大量藻类等低等水生生物繁盛,形成了有机质的高生产力;古隆起导致海湾沉积水体发生分层,形成了有利于有机质保存的缺氧底水环境。笔石更容易在微含氧或亚氧化的水体进食,因而成为志留系热页岩的常见化石。

晚侏罗世,西西伯利亚盆地属于典型的海湾沉积环境,海湾北部出口面临北大西洋—北冰洋,西、南、东三面均为西伯利亚板块的陆地。西西伯利亚盆地主要位于亚热带和温带的温暖湿润气候带内,沉积环境为地势平缓的闭塞海湾环境。在缺氧的海湾盆地,沉积有机质会逐渐聚集在同心圆或牛眼构造模式的深部静水区域,该区域接近烃源岩沉积中心,是沉积物厚度最大的区域^[24]。

3.1.2 海相烃源岩发育的营养物质基础

盆地基底岩性对烃源岩发育和形成具有重要作用。沉积岩的母岩一般为火成岩、变质岩或早先形成的沉积岩,在其形成过程中,母岩含有的营养物质被消耗殆尽,若盆地基底岩性为碳酸盐岩或碎屑岩,无法为藻类发育提供丰富的营养物质,进而影响海相烃源岩的形成与发育。盆地基底岩性为火成岩或变质岩时,可以为藻类提供丰富的磷、铁、锌和镍、钒、钴、钛、锰、铬等微量元素,这是藻类勃发的先决条件,有利于优质海相烃源岩的发育。

波斯湾盆地基底为前寒武系花岗岩,盆地西南部的阿拉伯地盾出露面积为 31×10^4 km²,为波斯湾盆地海相烃源岩的形成与发育提供了丰富的营养物质。西西伯利亚盆地基底为二叠系—三叠系^[25],其中,三叠系岩性主要为基性玄武岩,主要岩石类型为透蛋白石玄武岩,具辉绿结构,发育杏仁构造,常见粒玄武岩—伟晶岩结构,形成于中—晚三叠世。火成岩基底为上侏罗统海相烃源岩发育提供了雄厚的营养物质基础。

北海盆地维金地堑基底由沉积变质岩(包括片岩、石英岩和云英岩)。中侏罗世,北海盆地热隆升,表现为东西向拉张、火山喷发频繁、区域隆升,导致三叠系—下侏罗统广泛剥蚀。热隆起期,盆地中部区域性抬升,形成被中央地堑横切的广阔穹窿,隔断了北极洋与特提斯洋,使得维金、中央和马里湾3个地堑交汇区域的火山活动加剧。同时,在维金地堑南部、埃格尔松

拗陷、挪威沿岸和中央地堑的局部区域也伴有火山活动。火成岩或基底岩性为海相烃源岩发育提供了雄厚的营养物质基础。

3.1.3 海相烃源岩发育的营养物质来源

由于上升流提供的营养物质仅局限分布于开阔的大陆架边缘盆地,因此,淡水河流注入是海湾环境海相烃源岩发育所需营养物质的重要来源。在阿拉伯地盾和北非撒哈拉克拉通识别出众多晚奥陶世古河谷,表明该地区在晚奥陶世—志留纪具有丰富的淡水补给,为优质海相烃源岩的发育提供了丰富的营养物质。

北非迈尔祖格盆地东部边缘的 CDEG-2a 井揭示,下志留统 Tanezzuft 组热页岩沉积于浅海相海岸线边缘,主要分布于古冰川峡谷内。撒哈拉克拉通高地淡水河流注入提供了丰富的锆、钛、铌、铀、镍、钴、钒和锰等微量元素营养盐,为盆地东缘生物生命活动、繁盛提供了必须的营养物质。早白垩世阿普特期,波斯湾盆地周缘地区也发育众多古河流,这些古河流为优质海相烃源岩的发育提供了营养物质。

西西伯利亚盆地发育大量大—中型古河流,河流走向以 SN 向为主,源头源自盆地南部边缘,河流延伸距离长,几乎贯穿整个盆地,流域面积大;而盆地东部、西部边缘的古河流以近 EW 向为主,河流延伸较短,流域面积较小^[26]。钻井揭示了西西伯利亚盆地发育不同类型河流相沉积^[26]。

3.2 河流—海湾体系生物特征

河流—海湾体系内的古生物以海相藻类为主,但随着地质时代的变迁,藻类的种属及其伴生动植物的种属也随之发生变化。

笔石是奥陶纪—志留纪的分带化石,可作为洲际间地层对比的依据。志留纪是单笔石最为繁盛的时代,根据笔石的种属及结构特征,可将早志留世划分为鲁丹期、埃隆期和特列奇期。其中,鲁丹期笔石为直笔石,包括锯笔石、栅笔石、尖笔石等;埃隆期笔石以弯曲状的笔石为主,包括半耙笔石和单笔石;特列奇期笔石以螺旋状的笔石为主,包括螺旋笔石、螺旋奥氏笔石、弓笔石和卷笔石等。早志留世鲁丹期、埃隆期和特列奇期分别对应 1 期热页岩沉积。这 3 套热页岩在全球不同地区都有记录:中东地区伊拉克 Akkas-1 井揭示了鲁丹期和特列奇期热页岩;北非地区利比亚 ESR-1 井揭示了鲁丹期、埃隆期和特列奇期 3 套热页岩;四川盆地仅在川东北镇巴剖面识别出 3 套热页岩,大多数剖面发育鲁丹期和埃隆期两套烃源岩,而川北南江桥亭剖面仅发育特列奇期热页岩。早古生代植物界以海生藻类为主。中东地区鲁丹期—埃隆期热页岩有机质主要由无定形藻类构成,含笔石、壳质体和孢子等。中

国四川盆地志留统鲁丹期—特列奇期热页岩含有丰富的藻类,包括红藻(红藻囊)、褐藻、底栖藻席和疑源类等,且笔石丰度高,以螺旋状的笔石为主,包括螺旋笔石、螺旋奥氏笔石、弓笔石和卷笔石等^[20]。

晚侏罗世,全球气候普遍温暖潮湿。波斯湾盆地、墨西哥湾盆地和北海盆地主要位于热带和亚热带气候带内,气候温暖湿润。其中,波斯湾盆地和墨西哥湾盆地的沉积环境为地势平缓的闭塞海湾陆架环境,发育海相碳酸盐岩和蒸发岩系,为海相藻类发育、繁殖和勃发提供了先决条件,形成了上侏罗统优质的富含藻类有机质的海相碳酸盐岩烃源岩。北海盆地主要发育高有机质丰度的海相页岩,其内部也含有丰富的藻类。波斯湾盆地上侏罗统海相碳酸盐岩烃源岩显微组分以藻类为主,可见少量的孢子和花粉;墨西哥湾盆地南部上侏罗统提塘阶海相烃源岩露头样品显微组分以无定形藻类为主;北海盆地上侏罗统钦莫利阶海相烃源岩含大量的无定形藻类组分。白垩纪,波斯湾盆地和墨西哥湾盆地继承了晚侏罗世古气候特征,位于热带和亚热带气候带内,沉积环境为地势平缓的闭塞海湾陆架环境,发育海相碳酸盐岩和蒸发岩系。波斯湾盆地白垩系烃源岩显微组分含大量藻类(包括沟鞭藻类)及其无定形,表明其生源以低等水生生物菌藻类为主;墨西哥湾盆地白垩系烃源岩显微组分也检测出藻类,反映其生源以低等水生生物为主。

3.3 河流—海湾体系与海相石油共生关系

世界海相石油主力产区分布于波斯湾盆地、西西伯利亚盆地、墨西哥湾盆地、北海盆地、马拉开波盆地、南大西洋被动陆缘盆地和锡尔特盆地等,这些富含油气盆地的主力烃源岩形成于河流—海湾体系沉积环境。

3.3.1 古特提斯古生界

古生代,古特提斯洋发育规模巨大的河流—海湾体系,在现今波斯湾盆地、北非古达米斯盆地、三叠盆地、伊利济盆地和中国四川盆地等普遍沉积了被动大陆边缘浅海相烃源岩(图 9),这些盆地均是全球重要的产油气区。

晚奥陶世末期,冰川融化导致海平面上升,在幅员广阔、平坦的冈瓦纳古陆北缘的陆表海陆架发生广泛、大规模海侵,整个中东—北非广大地区沉积了下志留统底部浅海相富有机质热页岩^[27]。热页岩具有高伽马射线值(≥ 150 API),主要形成于缺氧还原环境,TOC 含量 $\geq 2.0\%$,为优质烃源岩^[27-28]。波斯湾盆地中阿拉伯次盆的下志留统底部 Qusaiba 段热页岩通常为暗灰色—黑色薄层静海相页岩,TOC 含量平均为 3%~5%,最高可达 20%,干酪根为 II 型,倾向于生油,含大量壳质组和笔石^[27]。西阿拉伯次盆 Akkas

气田的 Akkas-1 井志留系热页岩的 TOC 含量平均为 5%，最高可达 16%。以自然伽马射线强度值 150 API、TOC 含量为 2% 作为热页岩标准下限值，发现波斯湾盆地志留系热页岩沉积中心位于 Ghawar 油田东南部，最大厚度达 75 m，向卡塔尔隆起逐渐减薄为 15 m，局部减薄至 5 m。中东—北非地区志留系热页岩处于高成熟—过成熟阶段，从波斯湾盆地西南部向东北部，其成熟度逐渐增大。

波斯湾盆地古生界油气系统的储层以泥盆系 Jubah 组砂岩和 Jauf 组砂岩、下二叠统 Unayzah 组砂岩、上二叠统 Khuff 组碳酸盐岩为主，区域盖层为 Khuff 组顶部的膏盐岩。上二叠统 Khuff 组碳酸盐岩是中东地区古生界最重要的储层之一，其原始孔隙度

和渗透率一般较低，但次生孔隙的发育极大地提高了其储集物性，使其成为好—极好的储层。Khuff 组底部的页岩、膏岩是下伏 Unayzah 组储层的直接盖层。从区域来看，波斯湾盆地发育有 4 个志留系 Qusaiba 段页岩沉积中心，位于中阿拉伯次盆的陆地与海域和鲁卜哈利 (Rub Al Khali) 次盆的海域，这 4 个烃源灶达到热演化成熟阶段后排出的烃类向邻近的有利圈闭运移聚集。盆地内的 North 气田是全球第一大气田，其天然气主要来源于志留系热页岩，鲁卜哈利次盆海域的 Zakum、Nasr、Arzanab、Fateh 和 Satrah 等油气田古生界油气也主要来源于志留系热页岩。整体上，中东地区下志留统优质海相烃源岩控制着沉积盆地油气藏分布范围及资源规模。

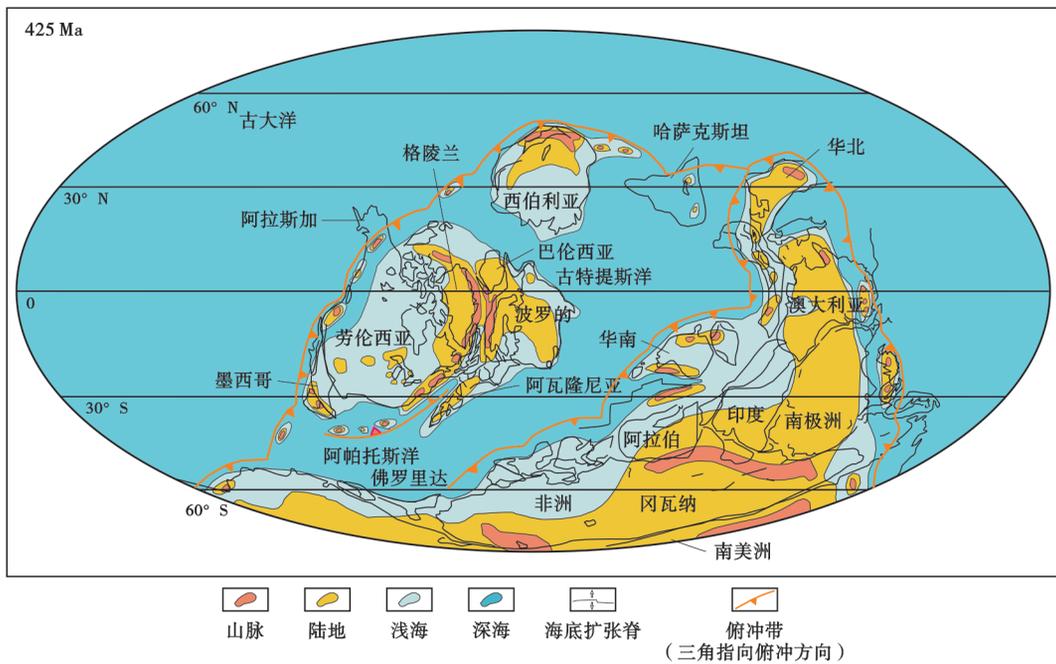


图 9 中志留世 (425 Ma) 全球古地理环境恢复^[29]

Fig. 9 Restoration of global palaeogeographic environment during the Middle Silurian

3.3.2 波斯湾盆地中生界

波斯湾盆地在晚侏罗世—白垩纪发育河流—海湾体系(图 10)，该阶段沉积的海相碳酸盐岩烃源岩是盆地的主力烃源岩。上侏罗统和白垩系烃源岩均具有很高的 TOC 含量，有机质类型为倾油型。其中，上侏罗统烃源岩最大厚度达 150 m，TOC 含量为 3.0%~12.5%，干酪根以 II₁ 型为主；白垩系烃源岩的 TOC 含量多介于 2.0%~8.4%，最高可达 14.0%，干酪根类型以 II₁ 型为主。

垂向上，波斯湾盆地的石油主要分布在中生界和新生界，储层以侏罗系海相碳酸盐岩、白垩系碳酸盐岩与三角洲—滨海相砂岩、古近系—新近系海相碳酸盐岩为主；盖层以上侏罗统膏盐岩、白垩系泥岩、古近

系—新近系泥岩及膏盐岩为主，主力成藏组合为上侏罗统和下白垩统成藏组合。盆地圈闭的形成主要受基底活化隆升、盐拱和扎格罗斯造山控制，圈闭类型包括盐底辟背斜、披覆背斜、挤压背斜和断鼻构造，圈闭类型好、规模大。油气在盆地内主要进行垂向运移和近距离横向运移，断层是最重要的垂向运移通道，砂岩、碳酸盐岩储层和不整合面是主要的横向输导体。区域上，盆地的石油主要分布在波斯湾海域及周边陆上地区，以中阿拉伯次盆、扎格罗斯褶皱带、鲁卜—哈利次盆和阿曼次盆为主，基底拼合隆升形成的挤压构造带、盐拱构造带和扎格罗斯挤压形成背斜带为主要的油气聚集区。全球最大的油田——Ghawar 油田位于波斯湾盆地内基底拼合隆升形成的大型背斜构造带，圈闭

类型为大型长垣隆起形成的背斜，其烃源岩为侏罗系灰泥岩，主力储层为上侏罗统碳酸盐台地颗粒灰岩、鲕粒灰岩，上覆膏盐层具有很好的封盖能力，可采石油储量达 $186.66 \times 10^8 \text{ t}$ 。

田和 Urengoyskoe 气田等巨型油气田。

下白垩统瓦兰今阶、欧特里夫阶与巴雷姆阶储层组合广泛分布于盆地中部、北部和南部，岩性主要为滨—浅海相砂岩、粉砂岩和泥岩，是西西伯利亚盆地 Samotlor 等油田和 Urengoyskoe 等气田的主力产层。上白垩统阿尔布阶—塞诺曼阶储层主要分布于盆地的中北部，是 Urengoyskoe 等大气田的主力产层，内部油气赋存状态以天然气和凝析油为主，上覆的土伦阶泥岩为有效盖层。

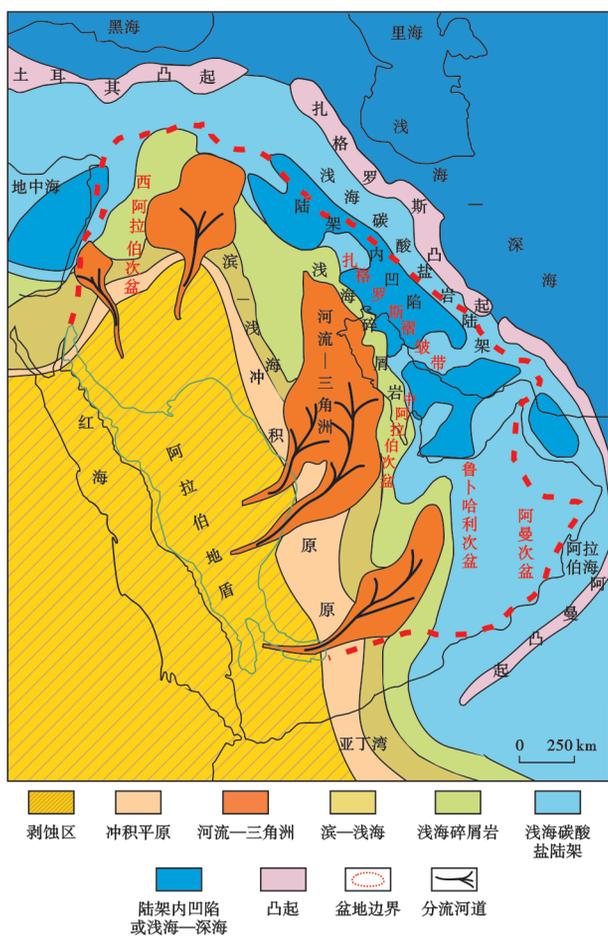


图 10 波斯湾盆地地下白垩统沉积相

Fig. 10 Sedimentary facies of Persian Gulf Basin during the Early Cretaceous

3.3.3 西西伯利亚盆地中生界

西西伯利亚盆地面积达 $400 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，是全球面积最大的含油气盆地，目前已在盆地内发现油气田 859 个，石油可采储量为 $210.75 \times 10^8 \text{ t}$ 。中生代，西西伯利亚盆地主要位于亚热带和温带的温暖湿润气候带内，沉积环境为地势平缓的闭塞海湾环境。上侏罗统巴热诺夫组烃源岩形成于一个大型的、缺氧海湾沉积环境(图 11)，受控于晚侏罗世盆地浅海相和半深海相古地理格局，烃源岩有机质丰度呈同心圆状向盆地中心增高，盆地边缘为 2.0%~3.0%，盆地中心可超过 10.0%，最高可达 40.2%，平均为 5.0%，干酪根为 II₁ 型。

上侏罗统巴热诺夫组海相烃源岩生成的油气在盆地内部大型背斜圈闭聚集成藏，如在盆地中部的 Urengoyskoe 长垣形成了世界上著名的 Samotlor 油



图 11 西西伯利亚盆地上侏罗统沉积相

Fig. 11 Sedimentary facies of Upper Jurassic in West Siberian Basin

3.3.4 墨西哥湾盆地中生界

墨西哥湾盆地是从中生代发育起来的裂谷—被动大陆边缘盆地，盆地面积约为 $130 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，其主力烃源岩上侏罗统—下白垩统烃源岩形成于热带和亚热带气候带内的大型河流—海湾体系(图 12)，沉积环境为地势平缓的闭塞海湾陆架环境，层内发育有海相碳酸盐岩和蒸发岩系。墨西哥湾盆地南部浅水区揭示高有机质丰度的上侏罗统提塘阶烃源岩的 TOC 含量主要为 2.0%~22.8%，热解烃(S_2)含量主要为 12~177 mg/g，达到优质烃源岩标准，氢指数最高达 753 mg/g，为 II 型干酪根。目前在墨西哥湾盆地已发现 624 个油气田，

石油可采储量达 $93.29 \times 10^8 \text{t}$,地球化学特征对比证实,已发现原油储量的 94% 来自侏罗系提塘阶烃源岩^[30]。

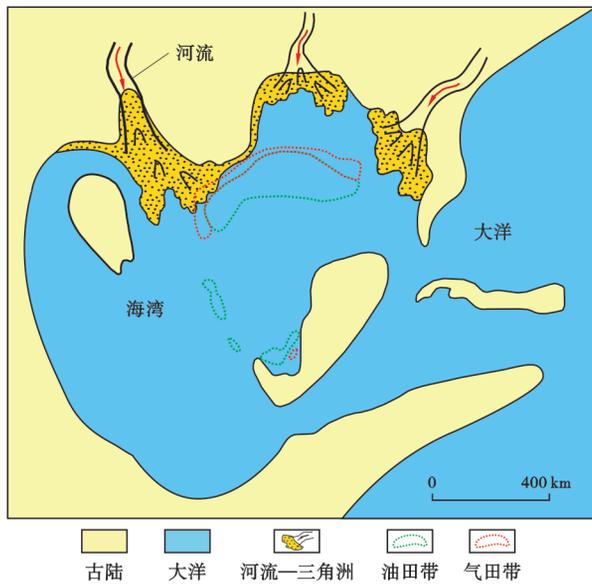


图 12 墨西哥湾盆地上侏罗统河流—海湾体系内油气田分布
Fig. 12 Distribution of the oil and gas fields of the Upper Jurassic river-gulf system in Gulf of Mexico Basin

墨西哥湾盆地主要发育中生界碳酸盐岩和古近系—新近系碎屑岩两类储层,盖层为泥页岩和盐岩。中生界储层多分布于盆地中南部,主要为高能环境的鲕粒滩相灰岩、生物礁灰岩和低能环境的盆地相泥灰岩,后者储集物性不佳,往往需要裂缝改造。古近系—新近系储层主要为河流—三角洲砂岩和深水浊积扇砂岩,是盆地主要的油气贡献层系。墨西哥湾盆地为受复杂盐岩活动影响的被动陆缘盆地,发育逆牵引背斜、挤压背斜、盐底辟构造、断鼻、断块及地层岩性圈闭。靠陆地一侧主要发育高角度的断块或断鼻圈闭;浅水区处于拉张滑脱区,主要发育逆牵引背斜、断块及断鼻圈闭;深水区处于逆冲前缘和盐活动叠加区,主要发育各类复杂盐相关构造和逆冲挤压背斜圈闭,局部发育深水浊积岩性体。盆地具有近源成藏的特点,油气发现都与深大断裂或邻近的盐间微盆密切相关。深大断裂及底辟盐岩是重要的油气垂向运移通道,砂体和碳酸盐岩体是重要的横向输导层,微盆中提塘阶烃源岩排出的油气沿着断裂和盐岩向上就近运移至盐核背斜、盐遮挡圈闭中聚集成藏。

3.3.5 北海盆地中生界

北海盆地在侏罗系烃源岩形成时期发育大型的河流—海湾体系(图 13),在安静、低能、水体流通不畅的浅海陆架海湾闭塞环境内沉积了富含藻类有机质的灰质泥岩和泥质灰岩,形成了侏罗系优质倾油型海相烃



图 13 北海盆地晚侏罗世钦莫利期—早白垩世瓦兰今期沉积环境
Fig. 13 Depositional environments of North Sea Basin during the Late Jurassic Kimmeridgian-Early Cretaceous Valanginian

源岩,是盆地的主力烃源岩。上侏罗统钦莫利阶富有机质海相页岩的 TOC 含量主要介于 2%~12%,氢指数最高可达 800 mg/g,干酪根类型主要为 I 型和 II 型。中侏罗统海相烃源岩为海相页岩、泥岩,TOC 含量主要介于 1.4%~5.0%,最高可达 16.0%。

截至 2010 年,已在北海盆地发现 1444 个油气田,石油可采储量为 $87.53 \times 10^8 \text{t}$ 。构造格局控制了盆地的沉积特征,沉积特征又决定了油气的生、储、盖条件。盆地主要发育 3 套储集层:下部侏罗系滨海相砂岩贡献了已发现石油储量的 62%,单砂层厚度一般为 11~60 m,孔隙度为 12%~31%,渗透率为 100~3 000 mD,是盆地最重要的储集层;中部白垩系三角洲、海底扇砂岩,单砂层厚度为 10~25 m,孔隙度为 14%~21%,渗透率为 120~3 500 mD,其内部已发现的石油储量占盆地总储量的 18%;上部新生代三角洲、浊积扇砂岩,单砂层厚度为 3~18 m,孔隙度为 21%~35%,渗透率为 7.7~2 000.0 mD,其内部已发现石油储量占盆地总储

量的15%。北海盆地的主要储油圈闭类型包括披覆背斜、低辟背斜、断鼻、断块、地层不整合、构造-岩性及岩性圈闭。其中,侏罗系主要发育地层不整合圈闭、盐岩上拱形成的底辟背斜、盐岩遮挡鼻状构造和披覆背斜等圈闭;白垩系主要发育岩性-构造、底辟构造和披覆构造等储油圈闭;新生代古近系以纯岩性圈闭为主。中生代—新生代海相泥岩是盆地内油气藏的良好盖层。盆地油气运移距离较短,一般小于10 km,以沿断层的垂向运移为主,油气藏属于典型的源控型,油气田主要分布于维金地堑、中央地堑和马里湾地堑的内部及邻区隆起(图13),3个地堑的油气富集程度不同,以维金地堑最富,其储量占盆地已发现储量的60%,中央地堑占30%,马里湾地堑占10%。

3.3.6 南大西洋上白垩统

近30年来,南大西洋两岸海域盆地陆续发现一系列大型油气田,包括下刚果盆地 Girassol 油田(发现于1996年,可采储量为 1.22×10^8 t)、Kizomba 油田(发现于1998年,可采储量为 2.79×10^8 t)、科特迪瓦盆地 Jubilee 油田(发现于2007年,可采储量为 2.42×10^8 t)、圭那亚 Stabroek 区块(发现于2017年,可采储量为 1.92×10^8 t)等,引领了全球深水区油气勘探的热潮。这些海相巨型油田的储层为上白垩统或古近系的浊积扇和浊积水道砂岩,水深为500~2000 m;其主力烃源岩为上白垩统塞诺曼阶—土伦阶海相烃源岩。

晚白垩世,受控于南大西洋构造演化和沉积充填,南大西洋两岸沉积盆地广泛发育河流—海湾体系沉积的海相烃源岩(图14),是海相石油富集的典型代表。高有机质丰度的塞诺曼阶—土伦阶海相烃源岩生成的油气向上运移至上白垩统或古近系浊积扇、浊积水道和礁—滩相碳酸盐岩之中。浊积水道单砂体层厚一般为0.2~26.4 m,孔隙度为13%~36%,渗透率为50~6830 mD;礁—滩相碳酸盐岩储层单层厚度一般为0.7~206.0 m,孔隙度为5.3%~23.0%,渗透率为0.01~178.00 mD。由于晚白垩世以来南大西洋持续海侵,水体不断加深,在上白垩统、古近系储层之上沉积了厚度大(1000~3000 m)、横向稳定分布的海相泥岩,构成很好的区域性盖层,整体储-盖配置好。早白垩世—晚白垩世局限海半封闭条件下沉积了较厚的盐岩(200~1000 m),在大陆架下倾掀斜和差异压力作用下,塑性盐岩流动,形成了盐底辟构造;重力流砂体之上泥岩厚度较大,且横向稳定,利于构造—岩性及岩性圈闭的形成,因此,在南大西洋两岸盆地内部发育盐底辟构造圈闭、构造-岩性圈闭、岩性圈闭等主要储油圈闭类型,且圈闭规模较大(一般为30~100 km²),有利于形成大—中型油气田。南大西洋中部盐岩活动形成的盐筏、盐株等盐体阻止了油气横向运移,加之海相泥岩厚、分布广,而重力流砂体相对范围小且连通性差,导致该区油气的横向运移距离不大,以沿断裂的纵向运移为主,即烃源岩的位置控制油气田的展布。

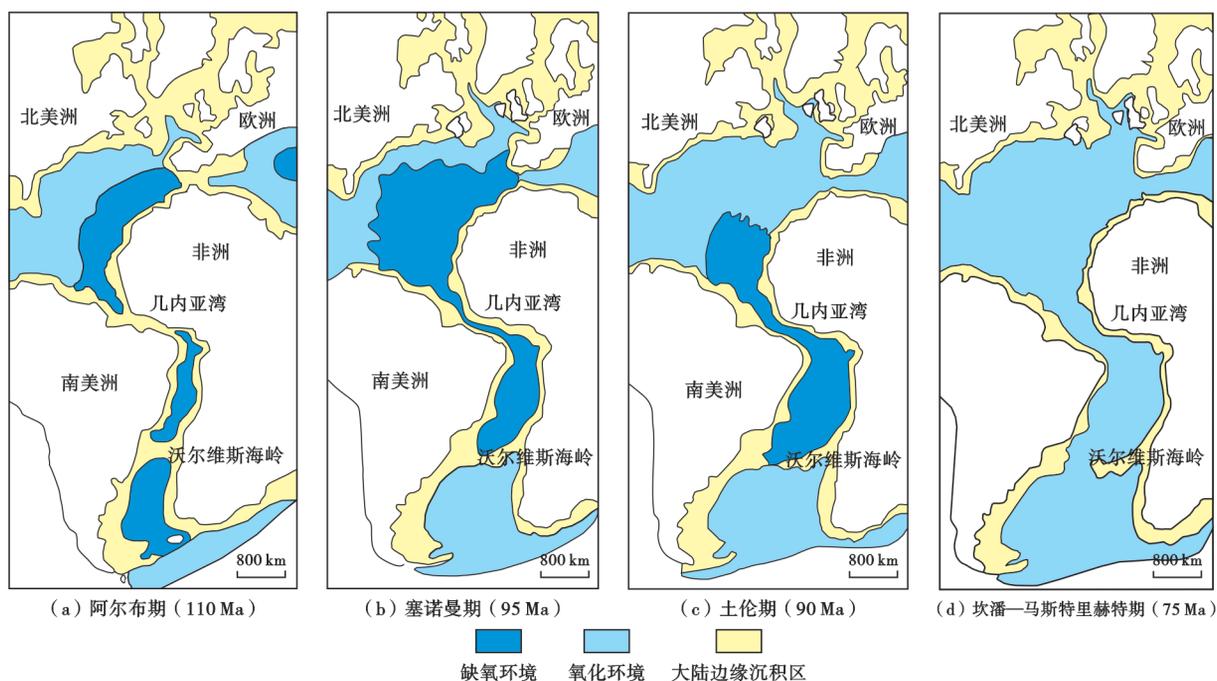


图14 大西洋白垩纪缺氧沉积区分布与演化(据文献[31]修改)

Fig. 14 Distribution and evolution of Cretaceous anoxic sedimentary area in Atlantic

3.3.7 东非地区下侏罗统

东非地区的一系列盆地是近5年来世界油气勘探的热点区域,尤其是鲁伍马(Rovuma)盆地已发现天然气可采储量为 $3.88 \times 10^8 \text{ m}^3$,关于该盆地天然气的成因,早期研究认为是生物气,后期认为是煤型气。随着勘探的深入、资料的积累,碳、氧同位素等地球化学分析资料揭示,鲁伍马盆地已发现的天然气为下侏罗统烃源岩高温裂解成因。早侏罗世,东非地区是一个NE向狭长的海湾(图15),该海湾长为1500 km,平均宽为250 km。在海湾的西南部(现今的鲁伍马盆地处)沉积了局限海泥岩,泥岩下部发育有盐岩、膏岩。该套泥岩的TOC含量为6%,干酪根类型为I—II₁型,泥岩上覆后期沉积的巨厚海相三角洲沉积(厚度可达8000 m),深埋藏的烃源岩干酪根裂解生成了大量天然气,为富气盆地奠定了物质基础。

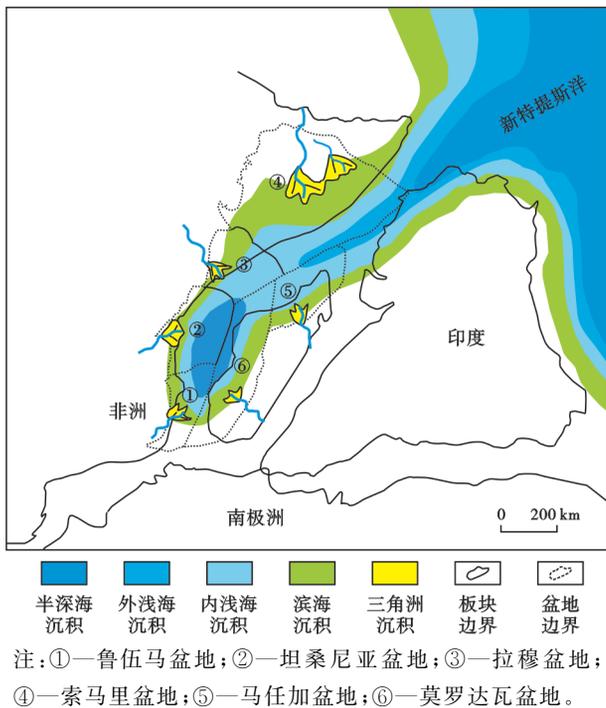


图15 东非地区早侏罗世沉积环境

Fig. 15 Depositional environments of East Africa during the Early Jurassic

3.3.8 锡尔特盆地上白垩统

锡尔特盆地位于非洲北部,是利比亚的主要石油产地,拥有该国80%以上的石油储量,目前已在该盆地发现292个油田,包括21个大油田。锡尔特盆地的主力烃源岩是分布广泛的上白垩统锡尔特页岩,该套烃源岩形成于晚白垩世塞诺曼—土伦期海湾体系的浅海陆架闭塞缺氧沉积环境。锡尔特页岩的TOC含量平均为7%,最高可达12%,氢指数介于300~600 mg/g,干酪根以II型为主,倾向于生油。锡尔特页岩于晚始新

世达到成熟阶段,开始大量生烃,油气以垂向运移和近距离侧向运移为主。上白垩统圈闭以构造圈闭和地层圈闭为主,上侏罗统一下白垩统储层孔隙度介于4%~27%(平均为16%),渗透率介于1~4000 mD(平均为150 mD),其盖层以下白垩统页岩为主;上白垩统浅海相碎屑岩和碳酸盐岩储层的孔隙度介于9%~35%,渗透率介于1~9000 mD,盖层以上白垩统页岩和蒸发岩为主。古近系主要发育构造圈闭和岩性圈闭,古新统灰岩为高孔、高渗储层,孔隙度最高可达40%,渗透率介于100~900 mD,始新统碳酸盐岩储层孔隙度介于8%~30%,渗透率介于1~250 mD,盖层主要为层内的硬石膏、页岩和上覆的泥灰岩、页岩。

4 河流—三角洲体系是天然气分布的主要场所

三角洲盆地是重要的海相含油气盆地类型之一,世界上多数产气区与三角洲伴生。大型河流—三角洲的发育是导致海陆过渡河口区烃源岩多样化的重要影响因素^[21,32-34]。受多种因素的制约,海陆交互区沉积类型多变,烃源岩生源多样,发育了多种类型有机质,影响了油气生成类型、成藏及其分布特征。针对三角洲盆地烃源岩的多样性,以墨西哥湾北部沿海地区、库泰盆地、北卡那封盆地、尼罗河三角洲盆地和巴布亚盆地为例,详细探讨海陆过渡河口区烃源岩沉积特征、烃源岩发育模式及其与天然气的共生关系。

4.1 河流—三角洲体系烃源岩沉积特征

大型河流—三角洲体系的海陆交互区主要发育煤系烃源岩和富含陆源有机质的泥质烃源岩,前者主要发育于三角洲平原—滨海平原沉积环境,后者发育于前三角洲—浅海环境(图16)。

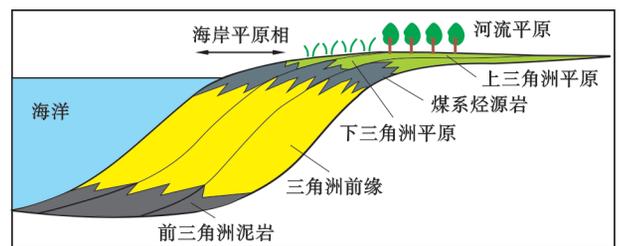


图16 三角洲体系烃源岩分布模式

Fig. 16 Distribution model of source rocks in delta system

4.1.1 三角洲平原—滨海平原环境

三角洲平原—滨海平原沼泽环境中沉积的煤系烃源岩以煤和碳质泥岩为主,有机质来自陆源高等植物。该类烃源岩的形成主要受控于气候、构造、地貌和水文条件等因素的共同作用。其中,气候条件提供了聚煤作用的物质基础,同时影响了植物群落类型,常作为聚

煤盆地形成的区域背景来考虑;构造、地貌和水文条件是具体聚煤盆地形成、演化的主要控制因素,共同制约了盆地的沉积环境特征。不同沉积环境中发育的煤层在规模、空间展布特征和地球化学特征方面存在明显差异。

综合分析认为,低纬度潮湿气候下的大型河控、潮控三角洲平原间湾是煤系烃源岩最为发育的沉积相带。该相带的降雨量大、地势低洼、水体滞留,有利于植被生长,可形成厚度较大、分布稳定的泥炭沉积,且长期的覆水环境、凝胶化作用彻底有利于泥炭发育并最终成煤。如墨西哥湾北部沿海地区古近系、北卡那封盆地上三叠统和库泰盆地中新统一上新统,受河流—三角洲的影响,均发育多套含煤层系,是世界上重要的产煤及产气区。一旦这种均衡状态遭到破坏,泥炭层的堆积也就随之终止,这也是在沉积旋回中,煤层只在一定层位出现的重要原因。

4.1.2 前三角洲—浅海环境

前三角洲—浅海环境沉积的烃源岩以富有机质泥岩为主,受陆地河流和海洋作用的共同影响,有机质的生源多样。在大陆边缘海域,河流不仅可以带来大量的陆源有机质,而且由于河流淡水径流量大,与之相关的“河口”作用极大地影响了陆源物质的输送和埋藏范围。河流流域、河流类型、物源岩性和河口区水动力条件、河口地形变化、河流携带悬浮物质以及海域的沉积速率、水体条件、有机质再悬浮条件等^[35]共同制约了前三角洲—浅海环境中烃源岩的发育。尽管地质时期环境因素难以恢复,但究其根本,古气候、构造活动、海平面变化、古地理环境制约了该环境中富有机质泥岩的发育。

富含陆源有机质的泥岩烃源岩较常见,一般发育于三角洲分流水道径流作用较弱的前三角洲—浅海,或二次搬运形成的海底扇区域。这些区域内不仅容纳了近岸较高初级生产形成的海洋(自生的)有机质,还聚集了河流输入的部分陆源(外来的)有机质。如尼罗河三角洲盆地上渐新统一中新统和巴布亚盆地侏罗系的主力烃源岩均为前三角洲—浅海沉积的混合生源的泥质烃源岩。

4.2 河流—三角洲体系烃源岩发育模式

受河流—三角洲沉积环境影响,海陆过渡相三角洲平原—滨海平原沼泽发育的煤系烃源岩和前三角洲—浅海发育的泥质烃源岩在烃源岩类型、地球化学特征、烃源岩空间展布特征方面具有明显差异。

4.2.1 三角洲平原—滨海平原沼泽煤系烃源岩

煤系烃源岩的地球化学特征复杂,受到成煤植物、沉积环境、沼泽覆水程度、水动力条件、水介质酸碱度、

氧化还原性等因素的综合影响。大型三角洲平原沼泽环境下发育的煤系烃源岩形成于气候温暖潮湿、陆源碎屑物供应充足、古地形平坦且盆地可容空间稳定增长的古地理环境。环境特征影响煤层品质,其中,优质煤层主要发育在地势低缓、土壤含水量相对较高的三角洲平原河道间、河道间湾和废弃河道地区的沼泽环境,以发育木本植物或芦苇苔草植物的中—低位雨养沼泽为主。长期的覆水环境有利于富氢的菌类对高等植物强烈改造、凝胶化过程彻底,在显微组分上表现为基质镜质体及碎屑壳质体的含量较高,且煤样具有富氢的特点,氢指数可达500 mg/g以上,生烃潜力较大。然而,并不是所有三角洲盆地都发育最优质的煤系烃源岩,形成于长期相对偏氧化水体环境的煤层,其显微组分镜质组含量最高、壳质组含量较低,生烃潜力中等。但大型三角洲持续发育,长期稳定的成煤环境中发育的煤层厚度大、分布范围广、横向连续性较好,在很大程度上弥补了品质稍差的问题,可成为三角洲盆地重要的烃源岩。

4.2.2 泥质烃源岩

前三角洲—浅海泥质烃源岩是三角洲盆地普遍发育的烃源岩类型。其中的陆源有机质主要来自冲积平原和三角洲平原地区,陆源植物叶片碎屑、煤屑连同沿海沼泽淡水藻等有机质由内陆地区向河口和浅海迁移。同时,河流携带富营养盐的注入导致海洋中藻类的勃发,河口及邻近海域的有机质含量增高,进一步促进了海源自生有机质的富集。正是由于多种因素的共同作用,形成的烃源岩具有生源多样性,且河流—三角洲作用对其影响深远,导致烃源岩丰度和类型在空间上有明显差异性。研究证明,受海源有机质贡献增多、陆源有机质贡献减小的影响,由陆地向海洋方向烃源岩的生烃能力、生油能力呈现逐渐增高的趋势,进而造成了油气平面差异分布特征。

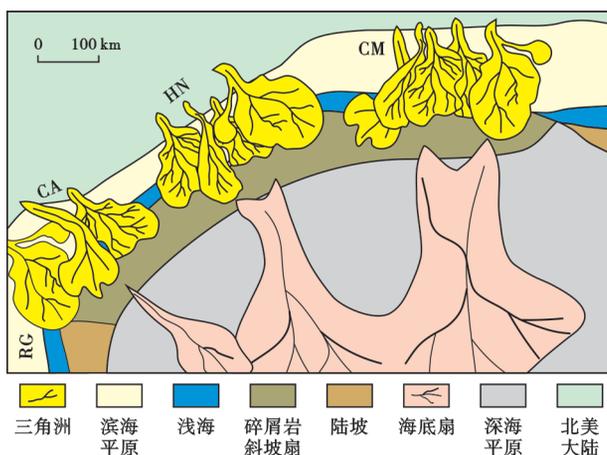
综上所述,前三角洲—浅海环境中发育的烃源岩表现出陆源有机质的海相沉积特征。而有机碳的埋藏作用又主要发生在弱氧化—还原环境条件下,这就决定了多数情况下,受大河影响的大陆边缘海湾、开阔海环境以及大陆边缘前三角洲体系中发育的海相烃源岩的显微组分组合以“镜质组+惰质组”—壳质组为主,且指示有机质生源的生物标志化合物和稳定碳同位素均表现出陆源高等植物明显输入的特征。相较于典型的海相内源型烃源岩,前三角洲—浅海环境中发育的混合型烃源岩的生烃能力有限,但河流携带来的陆源碎屑物质在河口及邻近海域呈厚层堆积,可以弥补烃源岩在品质和丰度方面的欠缺,且陆源碎屑物质快速堆积有利于富有机质泥岩的保存。

4.3 河流—三角洲体系与天然气共生关系

河流—海岸三角洲体系是世界大陆边缘盆地天然气形成的重要区域。数据统计表明,在全球主要的河流—三角洲体系中已发现天然气总可采储量超过 $28.317 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。墨西哥湾北部沿海地区古近系、北卡那封盆地上三叠统、库泰盆地中新统一上新统、尼罗河三角洲盆地上渐统一中新统和巴布亚盆地侏罗系是重要的产气层位,其气源岩均为河流—三角洲体系的混合型烃源岩。

4.3.1 墨西哥湾盆地北部地区古近系

墨西哥湾盆地北部地区是重要的产油气区,20世纪初至今,该地区累积获得油气储量(油当量)超过 $159 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中,古近系油气储量占55%,且多为气藏。古近纪,墨西哥湾盆地北部边缘开始发育多套三角洲—滨岸碎屑岩沉积。在此沉积背景下,三角洲平原沼泽煤系地层成为盆地主要的烃源岩,以 Wilcox 群煤层最为发育。同时,三角洲相优质砂岩储层发育,且生烃中心和储层沉积中心高度重合(图 17),烃源岩生成的油气可就近聚集,利于发育大型油气田。



注:RG—里奥格兰德河流系统;HN—休斯敦河流系统;CM—中密西西比河流系统;CA—卡里佐河流系统。

图 17 墨西哥湾盆地北部地区古近系 Wilcox 群三角洲沉积平面展布

Fig. 17 Distribution of sedimentary facies of the delta of the Wilcox Group of Palaeocene in northern Gulf of Mexico Basin

Wilcox 群(自下而上划分为下 Wilcox 组、中 Wilcox 组和上 Wilcox 组)沉积期,墨西哥湾盆地北部发育盆地最大规模的煤系地层,基本沿着盆地北部及西北部的三角洲平原沉积区分布^[36-37],延伸距离可达 64~280 km。盆内具有工业生产价值的褐煤主要沉积于下 Wilcox 组和上 Wilcox 组,最大厚度可达 5 m,平均厚度多为 2 m。下 Wilcox 组煤层 15 件样品综合分析显示,煤层

有机质丰度较高,TOC 含量一般为 46%~63%(平均为 56%),生烃潜量一般为 130~200 mg/g(平均为 165 mg/g);氢指数一般为 220~320 mg/g^[38];干酪根类型以 II 型、III 型为主。

下 Wilcox 组煤层显微组分包括镜质组、惰质组和壳质组。其中,镜质组含量一般为 56%~85%(平均为 70%~84%^[38]),碎屑镜质体含量明显大于结构镜质体;惰质组含量一般为 2%~21%(平均为 10%);壳质组含量最低,一般为 3%~9%(平均为 6%^[38])。下 Wilcox 组煤层的 H/C 比值相对较低,导致其生成液态烃的潜力较差。煤层 Pr/Ph 比值和 Pr/n-C₁₇ 比值分别为 3.4~6.3 和 1.5~6.5,与陆地富氧环境中的有机质来源一致^[23]。饱和烃气相色谱峰值一般集中在 C₃₁₋₃₄,烃源岩抽提物的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均为 -29.2‰,饱和烃的 $\delta^{13}\text{C}$ 一般为 -29.2‰~-28.8‰,芳香烃的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -27.0‰~-27.6‰。下 Wilcox 组 Indio 煤层有机组分主要为陆相有机质,以 C₃ 植被(被子植物的前期植物)为主,指示其形成于偏氧化的低位、中—低位沼泽环境^[39]。

古近系 Wilcox 群沉积期,墨西哥湾盆地的大型河控三角洲是新生代重要的成煤环境。受气候和古地貌的影响,Wilcox 群煤系烃源岩主要分布于发育低位、中—低位沼泽木本植物和木本—草本植物的大型河控三角洲平原河道间湾及废弃河道区域沼泽环境。Wilcox 群煤系烃源岩显微组分镜质组含量较高、类脂组含量低,氢指数较低,沉积水体为氧化环境,整体品质一般、生烃潜力中等,但其分布范围广、沉积厚度大,是盆地的主力生气层系。

4.3.2 库泰盆地新近系

印度尼西亚库泰盆地是一个富油气盆地,探明原油和天然气可采储量分别为 $5.65 \times 10^8 \text{ t}$ 、 $1.850 \times 10^{12} \text{ m}^3$,待发现原油资源量为 $6.75 \times 10^8 \text{ t}$ 、天然气资源量为 $1.830 \times 10^{12} \text{ m}^3$,以产出天然气为主。古近纪—新近纪,库泰盆地处于热带气候带,炎热多雨,有利于多类型植物的生长和煤系烃源岩的发育。煤系烃源岩主要分布于马哈坎(Mahakam)三角洲附近,盆地已发现的油气田也主要分布在三角洲附近(图 18),平面上近似呈三角洲朵叶状展布,气源岩和储气层均为三角洲相沉积岩。

库泰盆地的主力烃源岩为中中新统的 Balikpapan 组煤层,包括黑煤和褐煤两类煤层。其中,黑煤发育于上三角洲平原沼泽环境,由乔木植物经过成煤作用形成,TOC 含量为 50%~80%;褐煤发育于下三角洲平原低位沼泽,由细菌、苔藓、蕨类植物的孢子、莎草和沼泽、湖中的少量水藻经成煤作用形成,生烃潜量最高达 288 mg/g。基于前人测试显微组分数据^[40],对库泰盆

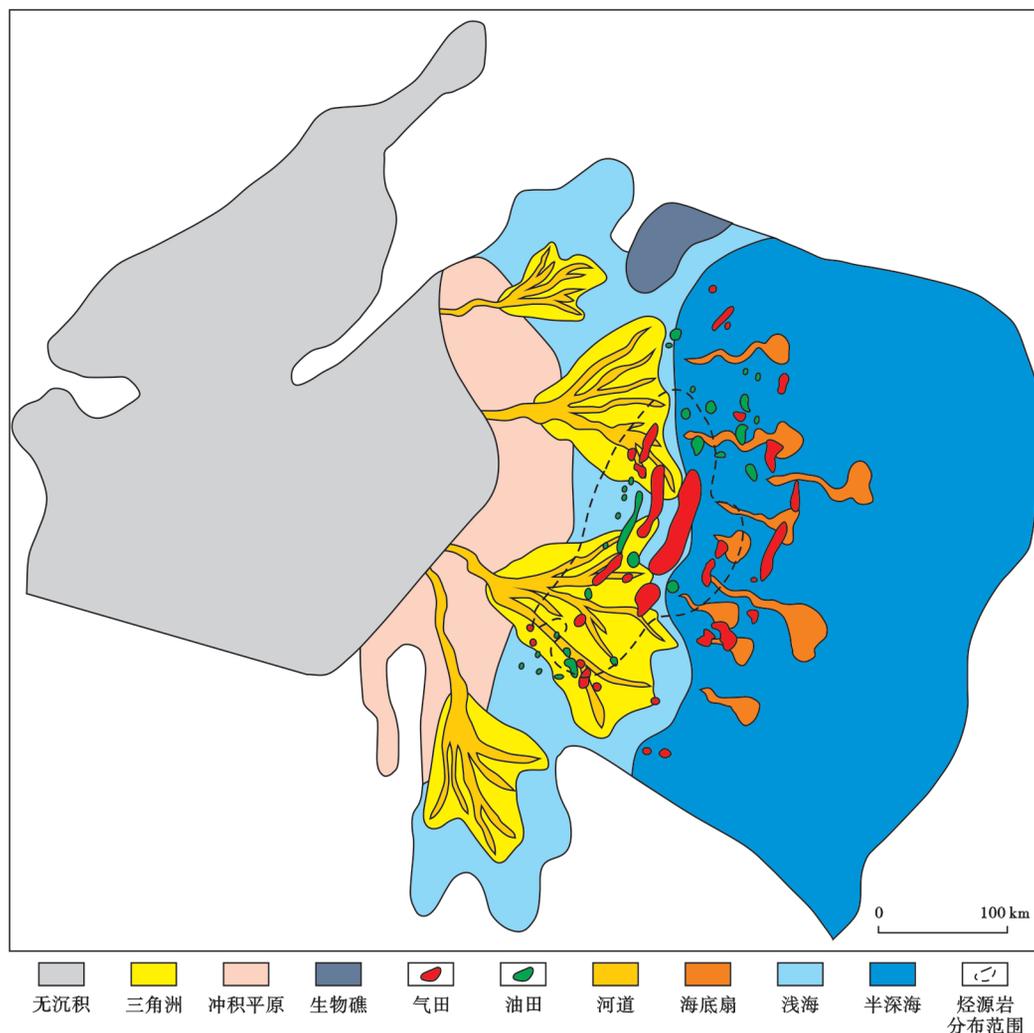


图 18 印度尼西亚库泰盆地中新统三角洲沉积体系与油气田分布

Fig. 18 Miocene delta depositional system and distribution of oil and gas fields in Kutai Basin, Indonesia

地 Bekapai 油田煤样的地下水影响指数 (GWI)、植被指数 (VI)、结构保存指数 (TPI) 和凝胶化指数 (GI) 参数进行了统计。植被指数—地下水影响指数交汇图反映煤层中有机质来源于雨养沼泽中的草本植物 [图 19(a)]。结构保存指数—凝胶化指数交汇图表明沉积期沼泽水介质偏碱性 [图 19(b)]，微生物活动较强，植物在成煤过程中被改造的程度高，整体覆水较深、凝胶化作用彻底，说明泥炭沉积于相对湿润的流水沼泽或湖沼环境。流水沼泽有机相及开阔水体沼泽有机相是形成煤系烃源岩最发育的有机相^[41]。流水沼泽位于下三角洲间湾，水质偏碱性，有利于细菌等微生物繁殖，植物群落主要为富含蕨类植物的灌木和部分裸子植物。富氢的菌类对高等植物改造强烈，凝胶化过程彻底，在显微组分上表现为基质镜质体及碎屑壳质体的含量较高，且煤样具有富氢的特点，氢指数可达 500 mg/g，生烃潜力较大。

4.3.3 北卡那封盆地三叠系

澳大利亚北部、西部和南部海岸发育大型的中生

代—新生代三角洲，天然气资源丰富，已发现天然气储量为 $3.79 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，剩余资源量为 $1.39 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。北卡那封盆地内的倾气型烃源岩多与陆源高等植物的生长和河流携带陆源物质的输入有关，主要为 Mungaroo 三角洲上三叠统 Mungaroo 组的泥炭沼泽沉积，岩性一般为煤、碳质泥岩和暗色泥岩，整体上 TOC 含量较高，是邻近大气田的主要供烃层 (图 20)。

北卡那封盆地 Mungaroo 三角洲烃源岩分布较为广泛，且均具有一定生烃能力，平面上相控陆源有机质分布特征明显：近端三角洲平原烃源岩主要为薄层泥岩夹层，远端三角洲平原烃源岩为富含陆源有机质暗色泥岩、碳质泥岩及广泛分布的薄煤层，三角洲前缘暗色泥岩均可作为烃源岩。不同沉积相带有机质的富集程度、有机质来源、有机质岩石学特征和烃源岩地球化学特征存在较大差异 (图 21)。

近端三角洲平原和远端三角洲平原沉积的暗色泥岩均具有很高的有机质丰度，虽然其在一定程度上均遭受河流冲刷，但保留下来的碳质泥岩的陆源有机质

含量仍很高。特别是远端三角洲平原相带的薄煤层和富含陆源有机质的厚层碳质泥岩发育,碳质泥岩平均 TOC 含量可达 4.11%,主要为中等—好烃源岩,显微组分中惰质组含量较低,是良好气源岩。近端三角洲平原的碳质泥岩不发育,薄层泥岩的 TOC 含量也相

对较高,平均达 1.16%,主要为中等—好烃源岩,局部夹有少量的煤质碎片,烃源岩显微组分中惰质组含量高,生烃潜力不大。三角洲前缘的陆源有机质含量相对较低,烃源岩品质较差,且 Mungaroo 三角洲前缘沉积相带较窄,不能作为该区有利的烃源岩相带。

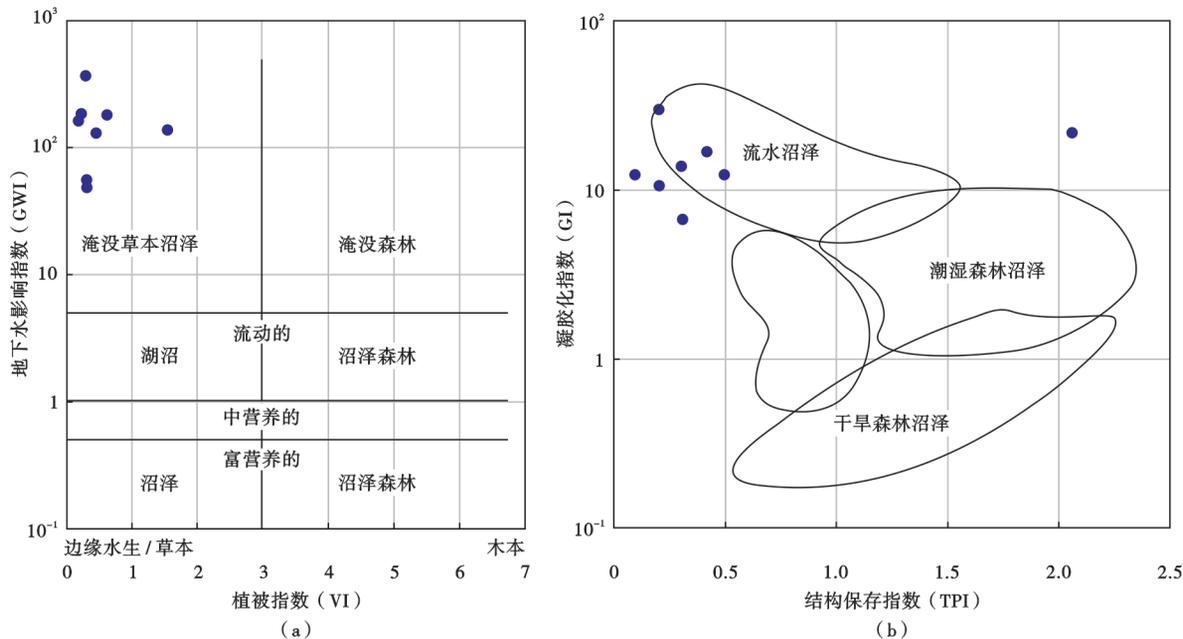


图 19 库泰盆地 Bekapai 煤样的有机相划分

Fig. 19 Organic facies analysis of Bekapai coal samples in Kutai Basin

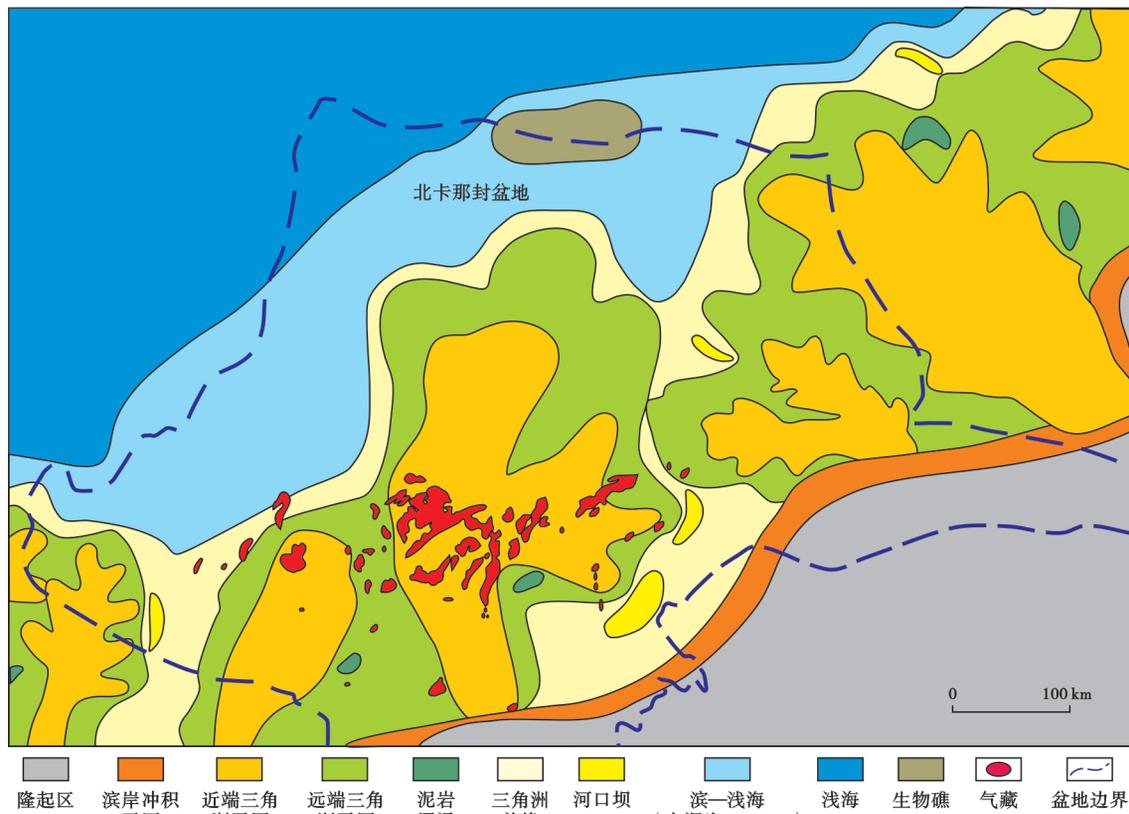


图 20 北卡那封盆地中上三叠统沉积体系和气藏分布

Fig. 20 Distribution of Middle and Upper Triassic sedimentary systems and gas reservoirs in North Carnarvon Basin

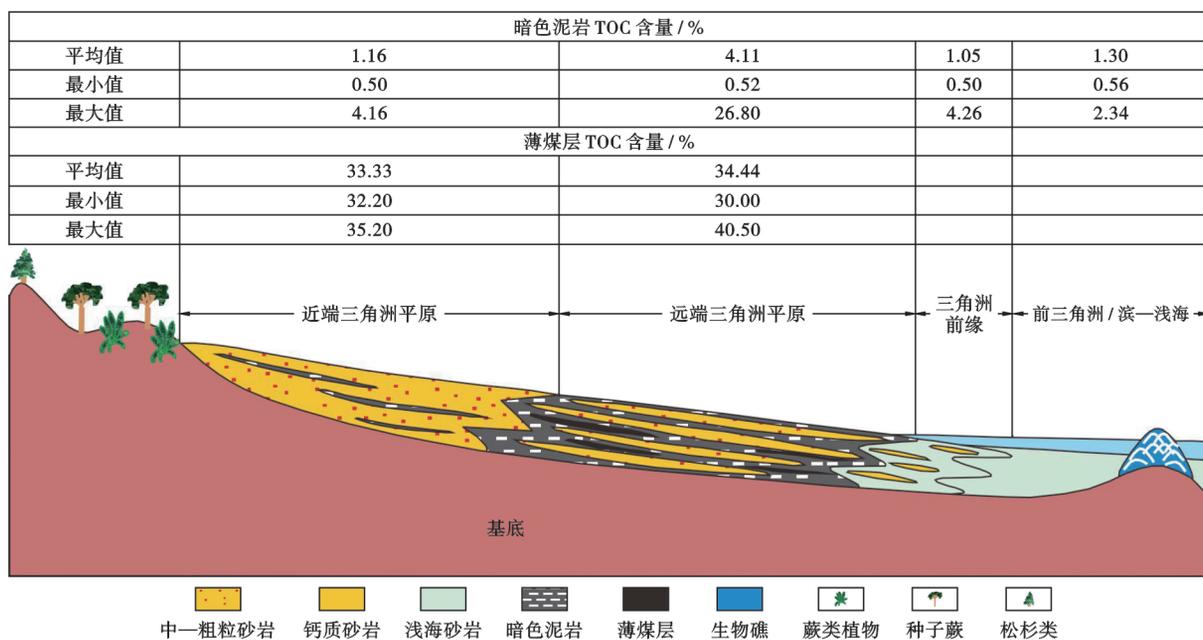


图 21 北卡那封盆地 Mungaroo 三角洲陆源有机质分布模式

Fig. 21 Distribution model of terrigenous organic matter in Mungaroo Delta in North Carnarvon Basin

三角洲不同沉积相带烃源岩干酪根类型也具有一定的差异性。Mungaroo 组煤系烃源岩的有机质主要来自陆生植物,近端三角洲平原和远端三角洲平原主要发育 II₂ 型、III 型干酪根,而三角洲前缘干酪根类型主要为 III 型,仅少数样品落入到 II₂ 型干酪根区域。三角洲前缘为三角洲平原的水下延伸,受海水影响,河流搬运的壳质组在该相带富集。风暴改造作用使该区域富氢组分氧化分解,导致沉积有机质的氢指数偏低,干酪根类型偏向于 III 型。

综合分析 Mungaroo 三角洲不同相带烃源岩的地球化学指标、烃源岩丰度、干酪根类型等,认为远离主水道的泥炭沼泽环境中发育的煤系烃源岩品质最好。这是由于该类烃源岩受平原河流作用影响相对较弱,沉积有机质能够较好保存。岩石样品的显微组分中镜质组含量相对较高,惰质组含量相对较低,生烃潜力高。而且泥炭沼泽中煤层发育,具有平面分布广、垂向厚度大的特点,但连续性差,呈多层叠加样式。整体上,泥炭沼泽中沉积的煤层和煤系烃源岩构成了北卡那封盆地三叠系主力烃源岩。

4.3.4 尼罗河三角洲盆地新近系

尼罗河三角洲盆地是埃及最重要的产气区,新生代尼罗河在地中海南岸形成了大型三角洲,已发现天然气可采储量为 $1.92 \times 10^{12} \text{ m}^3$,剩余资源量为 $6.32 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。尼罗河三角洲盆地油气产出以凝析油和天然气为主^[42],其主力烃源岩为渐新统一中新统富有机质泥页岩(图 22)。该套烃源岩的有机质主要来自陆源

生物,沉积于受河流—三角洲影响的前三角洲及浅海环境。

尼罗河三角洲盆地富含有机质泥页岩是中等—好烃源岩,TOC 含量平均值为 0.7%~2.0%,富含陆源含蜡有机质,具有较高的生烃潜力。渐新统和中新统烃源岩埋深为 3500 m,其有机质来源以陆地木本植物和草本植物碎片占主体,并含有一定量的无定型有机质和海洋浮游生物。盆地原油样品的生物标志化合物分析表明,油源岩主要为陆源有机质齐墩果烷含量较高的烃源岩。正构烷烃 $n\text{-C}_{24-34}$ 的碳数奇偶优势特征不明显,仅个别样品表现出奇数碳优势。Pr/Ph 比值中等—较高,表现为陆源有机质的特征。尼罗河三角洲盆地烃源岩干酪根类型为 III 型,沉积水体为富氧水体^[43]。

盆地原油样品含有丰富的齐墩果烷,表明其来自古近系—新近系烃源岩。齐墩果烷主要来自被子植物,被子植物起源于晚白垩世,直到古近纪—新近纪在全球大部分地区都有发育^[44]。尼罗河三角洲盆地原油样品中 $\text{C}_{19}/\text{C}_{23}$ 三环萜烷比值相对较高^[43],表明沉积期有大量陆源有机质输入。因此,尼罗河三角洲盆地渐新统一中新统烃源岩有机质以陆源有机物占主导^[45]。

4.3.5 巴布亚盆地侏罗系

巴布亚盆地的主力烃源岩形成于侏罗纪,该时期盆地进入被动大陆边缘盆地演化阶段,发育以陆源碎屑岩为主的三角洲沉积(图 23)。侏罗系烃源岩为含砂岩或粉砂岩夹层的暗色泥岩,TOC 含量基本大于 0.5%,其中,中—下侏罗统泥岩的 TOC 含量 >1.0%,

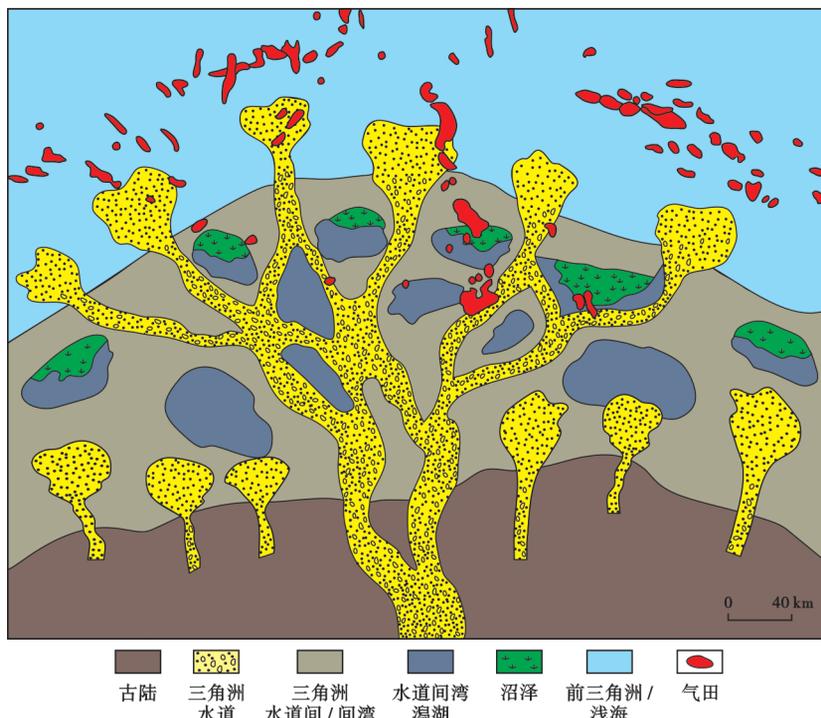


图 22 尼罗河三角洲盆地中新统三角洲沉积体系与气田分布

Fig. 22 Distribution of Miocene delta depositional system and gas fields in Nile Delta Basin

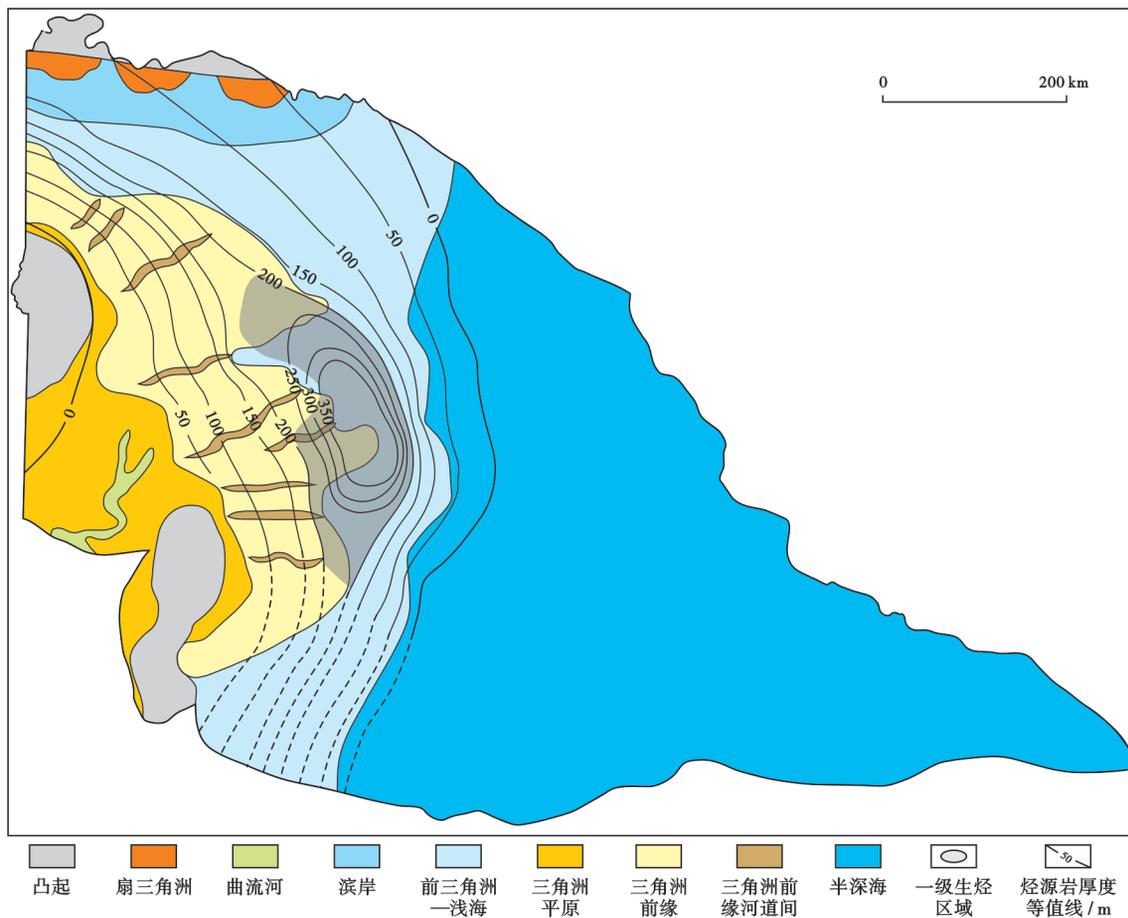


图 23 巴布亚盆地上侏罗统三角洲沉积体系与烃源岩分布

Fig. 23 Distribution of Upper Jurassic delta depositional system and source rock in Papua Basin

烃源岩品质较好,上侏罗统泥岩的 TOC 含量偏低。侏罗系烃源岩生烃潜量大于 1 mg/g,整体属于中等—好烃源岩。

巴布亚盆地侏罗系三角洲沉积发育,不同沉积微相烃源岩的有机质丰度和类型差异明显。其中,三角洲平原亚相烃源岩有机质丰度较低,干酪根以Ⅲ型为主;三角洲前缘亚相烃源岩有机质丰度为中等—高,Ⅱ₂型干酪根含量增加;前三角洲亚相烃源岩有机质丰度较高,干酪根以Ⅱ型为主,具有一定的生油潜力。受沉积环境影响,泥岩厚度和泥地比由陆向海呈逐渐增加的趋势,有机质丰度也显著增高,干酪根类型由Ⅲ型逐渐过渡为Ⅱ型。综合对比表明,巴布亚盆地前三角洲亚相的泥质烃源岩品质最优(图 23)。不同层系烃源岩的品质具有差异性,整体上,沉积微相的转变造成了烃源岩品质在空间上的变化。

5 结论

(1) 油气是沉积盆地内岩石中的有机质生成的烃类。河流是湖泊、海洋中水生生物生长所需主要营养物质的来源,河流流经出露区的母岩岩性控制了河水中营养物质的丰富程度,进而决定了水生生物的繁盛程度、沉积岩中的有机质丰度、油气的生成量、盆地油气富集程度。世界上的油气主要分布在河流—湖泊体系、河流—海湾体系、河流—三角洲体系中。

(2) 河流—湖泊体系是地球上陆相石油分布的主要场所。河流为湖泊提供了主要的营养物质;半深湖—深湖区水体清洁、透光性好,有利于沉积有机质保存,源远流长的河流携带的营养物质可扩散至深水区,适于水生生物生长;湖底缺氧,为半还原环境,可形成干酪根类型好、生油能力强的优质湖相烃源岩。湖相沉积盆地内油气的分布严格受生烃中心控制,大一中型油田围绕湖盆中心呈环带状分布。世界上湖相油气主要分布于中国、印度尼西亚、非洲、大西洋两岸 4 个地区的中生代—新生代陆内裂谷盆地和弧后盆地,油源岩形成于中生代—新生代。

(3) 河流—海湾体系是海相石油分布的主要场所。海湾位于河流入海处,风浪小,河流携带了丰富的营养物质,有利于有机质保存及海相优质烃源岩的发育,烃源岩以倾油为主。世界海相石油主力产区分布于波斯湾盆地、西西伯利亚盆地、墨西哥湾盆地、北海盆地、马拉开波盆地、南大西洋被动陆缘盆地和锡尔特盆地等,这些富含油气盆地的主力油源岩均为大陆边缘的海湾沉积。

(4) 河流—三角洲体系是世界上主要的大气区分布场所。大型河流—三角洲体系发育多种类型的海陆

过渡相烃源岩,其中,煤系烃源岩沉积于三角洲平原—滨海平原,富含陆源有机质的泥质烃源岩沉积于前三角洲—浅海。墨西哥湾盆地北部沿海地区古近系、北卡那封盆地上三叠统、库泰盆地中新统一上新统、尼罗河三角洲盆地上渐统一中新统和巴布亚盆地侏罗系天然气藏的气源岩均为河流—三角洲体系的海陆过渡相烃源岩。

致谢 稿件撰写过程中得到中海油研究总院有限责任公司张敏、李友川、郭刚、解东宁、刘美羽等专家的帮助。在此一并深表谢忱。

参 考 文 献

- [1] TISSOT B, DURAND B, ESPITALIÉ J, et al. Influence of nature and diagenesis of organic matter in formation of petroleum[J]. AAPG Bulletin, 1974, 58(3): 499-506.
- [2] 侯读杰, 张善文, 肖建新, 等. 济阳拗陷优质烃源岩特征与隐蔽油气藏的关系分析[J]. 地质前缘, 2008, 15(2): 137-146.
HOU Dujie, ZHANG Shanwen, XIAO Jianxin, et al. The excellent source rocks and accumulation of stratigraphic and lithologic traps in the Jiyang depression, Bohai Bay Basin, China[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2): 137-146.
- [3] 秦建中, 李志明, 刘宝泉, 等. 海相优质烃源岩形成重质油与固体沥青潜力分析[J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 280-285.
QIN Jianzhong, LI Zhiming, LIU Baoquan, et al. The potential of generating heavy oil and solid bitumen of excellent marine source rocks[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(3): 280-285.
- [4] 张林晔, 孔祥星, 张春荣, 等. 济阳拗陷下第三系优质烃源岩的发育及其意义[J]. 地球化学, 2003, 32(1): 35-42.
ZHANG Linye, KONG Xiangxing, ZHANG Chunrong, et al. High-quality oil-prone source rocks in Jiyang depression[J]. Geochimica, 2003, 32(1): 35-42.
- [5] 邵磊, 李献华, 汪品先, 等. 南海渐新世以来构造演化的沉积记录: ODP1148 站深海沉积物中的证据[J]. 地球科学进展, 2004, 19(4): 539-544.
SHAO Lei, LI Xianhua, WANG Pinxian, et al. Sedimentary record of the tectonic evolution of the South China Sea since the Oligocene—evidence from deep sea sediments of ODP Site 1148[J]. Advances in Earth Science, 2004, 19(4): 539-544.
- [6] 国家环境保护总局. 中国环境状况公报 1998[R]. 北京: 国家环境保护总局, 1999: 9-13.
China State Environmental Protection Administration. China environment state bulletin, 1998[R]. Beijing: China State Environmental Protection Administration, 1999: 9-13.
- [7] 单帅强, 何登发, 张煜颖. 渤海湾盆地西部保定凹陷构造—地层层序与盆地演化[J]. 地质科学, 2016, 51(2): 402-414.
SHAN Shuaiqiang, HE Dengfa, ZHANG Yuying. Tectono-stratigraphic sequence and basin evolution of Baoding sag in the western Bohai Bay Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2016, 51(2): 402-414.
- [8] 张文朝, 崔周旗, 韩春元, 等. 冀中拗陷老第三纪湖盆演化与油气[J]. 古地理学报, 2001, 3(1): 45-54.

- ZHANG Wenchao, CUI Zhouqi, HAN Chunyuan, et al. Evolution of palaeogene lacustrine basins and oil and gas potentials in the central Hebei depression[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2001, 3(1): 45-54.
- [9] 张文朝, 杨德相, 陈彦均, 等. 冀中拗陷古近系沉积构造特征与油气分布规律[J]. *地质学报*, 2008, 82(8): 1103-1112.
- ZHANG Wenchao, YANG Dexiang, CHEN Yanjun, et al. Sedimentary structural characteristics and hydrocarbon distributed rules of Jizhong depression[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(8): 1103-1112.
- [10] 邓运华. 试论中国近海两个拗陷带油气地质差异性[J]. *石油学报*, 2009, 30(1): 1-8.
- DENG Yunhua. Analysis on differences of petroleum type and geological conditions between two depression belts in China offshore[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(1): 1-8.
- [11] 杨华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. *石油学报*, 2013, 34(1): 1-11.
- YANG Hua, LI Shixiang, LIU Xianyang. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(1): 1-11.
- [12] 黎玉战, 傅太华, 王英民. 松辽盆地煤层在地震剖面上的特征[J]. *成都理工学院学报*, 1994, 21(2): 94-99.
- LI Yuzhan, FU Taihua, WANG Yingmin. The coalbed characteristic of Songliao Basin on seismic section[J]. *Journal of Chengdu Institute of Technology*, 1994, 21(2): 94-99.
- [13] 罗霞, 孙粉锦, 邵明礼, 等. 松辽盆地深层煤型气与气源岩地球化学特征[J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(3): 339-346.
- LUO Xia, SUN Fenjin, SHAO Mingli, et al. Geochemistry of deep coal-type gas and gas source rocks in Songliao Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(3): 339-346.
- [14] 李德生. 中国多旋回叠合含油气盆地构造学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 102-115.
- LI Desheng. Tectonics of multi-cycle superimposed petroliferous basins in China[M]. Beijing: Science Press, 2012: 102-115.
- [15] DEMAISON G J, MOORE G T. Anoxic environments and oil source bed genesis[J]. *AAPG Bulletin*, 1980, 64(8): 1179-1209.
- [16] PARRISH J T. Upwelling and petroleum source beds, with reference to Paleozoic[J]. *AAPG Bulletin*, 1982, 66(6): 750-774.
- [17] PEDERSEN T F, CALVERT S E. Anoxia vs. productivity; what controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks? [J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(4): 454-466.
- [18] HUC A Y. Paleogeography, paleoclimate, and source rocks[M]. Tulsa: AAPG Studies in Geology, 1995: 1-55.
- [19] 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 中国海相烃源岩发育控制因素[J]. *地学前缘*, 2005, 12(3): 39-48.
- ZHANG Shuichang, ZHANG Baomin, BIAN Lizeng, et al. Development constraints of marine source rocks in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 39-48.
- [20] 梁狄刚, 郭彤楼, 边立曾, 等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(三): 南方四套区域性海相烃源岩的沉积相及发育的控制因素[J]. *海相油气地质*, 2009, 14(2): 1-19.
- LIANG Digang, GUO Tonglou, BIAN Lizeng, et al. Progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, southern China (Part 3): controlling factors on the sedimentary facies and development of Palaeozoic marine source rocks[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2009, 14(2): 1-19.
- [21] DENG Yunhua. River-gulf system—the major location of marine source rock formation[J]. *Petroleum Science*, 2012, 9(3): 281-289.
- [22] 邓运华. 试论海湾对海相石油的控制作用[J]. *石油学报*, 2018, 39(1): 1-11.
- DENG Yunhua. Discussion on the control effect of gulf on marine petroleum[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(1): 1-11.
- [23] 邓运华, 杨永才, 杨婷. 试论世界油气形成的三个体系[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 101-155.
- DENG Yunhua, YANG Yongcai, YANG Ting. Three systems of oil and gas formation in the world[M]. Beijing: Science Press, 2021: 101-155.
- [24] PETERS K E, WALTERS C C, MOLDOWAN J M. The biomarker guide; volume 2 biomarkers and isotopes in petroleum exploration and earth history[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 751-963.
- [25] ULMISHEK G F. Petroleum geology and resources of the West Siberian Basin, Russia [R]. Denver: U. S. Geological Survey, 2003: 3-47.
- [26] KONTOROVICH A E, KONTOROVICH V A, RYZHKOVA S V, et al. Jurassic paleogeography of the West Siberian sedimentary Basin [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, 54(8): 747-779.
- [27] LÜNING S, CRAIG J, LOYDELL D K, et al. Lower Silurian 'hot shales' in North Africa and Arabia: regional distribution and depositional model[J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 49(1/4): 121-200.
- [28] COLE G A. Graptolite-chitinozoan reflectance and its relationship to other geochemical maturity indicators in the Silurian Qusaiba shale, Saudi Arabia[J]. *Energy & Fuels*, 1994, 8(6): 1443-1459.
- [29] 李江海, 姜洪福. 全球古板块再造、岩相古地理及古环境图集[M]. 北京: 地质出版社, 2013: 10-15.
- LI Jianghai, JIANG Hongfu. World atlas of plate tectonic reconstruction, lithofacies paleogeography and palaeoenvironment[M]. Beijing: Geology Press, 2013: 10-15.
- [30] GUZMAN-VEGA M A, MELLO M R. Origin of oil in the Sureste Basin, Mexico[J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83(7): 1068-1095.
- [31] BROWNFIELD M E, CHARPENTIER R R. Geology and total petroleum systems of the west-central coastal province (7203) [R]. West Africa; U. S. Geological Survey Bulletin, 2006: 1-52.
- [32] 邓运华. 论河流与油气的共生关系[J]. *石油学报*, 2010, 31(1): 12-17.
- DENG Yunhua. Analysis on correlation of river and petroleum [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(1): 12-17.
- [33] DENG Yunhua. River-delta systems: a significant deposition location of global coal-measure source rocks[J]. *Journal of Earth Science*, 2016, 27(4): 631-641.
- [34] 邓运华, 张功成, 刘春成, 等. 中国近海两个油气带地质理论与勘探实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013: 36-101.
- DENG Yunhua, ZHANG Gongcheng, LIU Chuncheng, et al. Petroleum geological theory and exploration practice of the two oil and gas depression belts in offshore China[M]. Beijing: Petrole-

- um Industry Press, 2013; 36-101.
- [35] 胡利民. 大河控制性影响下的陆架海沉积有机质的“源-汇”作用—以渤、黄海为例[D]. 青岛:中国海洋大学, 2010: 10-20.
HU Limin. Sources and sinks of sedimentary organic matter in the river-dominated continental shelves: a case study in the Bohai and Yellow seas[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010: 10-20.
- [36] HOOD K C, WENGER L M, GROSS O P, et al. Hydrocarbon systems analysis of the northern Gulf of Mexico: delineation of hydrocarbon migration pathways using seeps and seismic imaging[M]//SCHUMACHER D, LESCHACK L A. Surface exploration case histories: applications of geochemistry, magnetics, and remote sensing. Tulsa: AAPG Studies in Geology, 2002; 25-40.
- [37] KULL J, KINSLAND G L. Logfacies distribution of the Wilcox coal-bearing interval in North-Central Louisiana: a quick-look technique for coalbed methane resource evaluation[C]//Proceedings of the AAPG Search and Discovery Article, GCAGS Annual Convention Lafayette. Louisiana: AAPG, 2006.
- [38] HACKLEY P C, WARWICK P D, HOOK R W, et al. Organic geochemistry and petrology of subsurface Paleocene-Eocene Wilcox and Claiborne group coal beds, Zavala County, Maverick Basin, Texas, USA[J]. Organic Geochemistry, 2012, 46: 137-153.
- [39] WIDODO S, BECHTEL A, ANGGAYANA K, et al. Reconstruction of floral changes during deposition of the Miocene Embalut coal from Kutai Basin, Mahakam delta, East Kalimantan, Indonesia by use of aromatic hydrocarbon composition and stable carbon isotope ratios of organic matter[J]. Organic Geochemistry, 2009, 40(2): 206-218.
- [40] BOUDOU J P. Chloroform extracts of a series of coals from the Mahakam delta[J]. Organic Geochemistry, 1984, 6: 431-437.
- [41] 程克明, 赵长毅, 苏爱国, 等. 吐哈盆地煤成油气的地质地球化学研究[J]. 勘探家, 1997, 2(2): 5-10.
CHENG Keming, ZHAO Changyi, SU Aiguo, et al. Geological and geochemical studies on coal-formed oil and gas in Turpan-Hami Basin[J]. Petroleum Explorationist, 1997, 2(2): 5-10.
- [42] SHAABAN F, LUTZ R, LITTKER R, et al. Source-rock evaluation and basin modelling in NE Egypt (NE Nile delta and northern Sinai)[J]. Journal of Petroleum Geology, 2006, 29(2): 103-124.
- [43] EL DIASTY W S, MOLDOWAN J M. The Western Desert versus Nile delta: a comparative molecular biomarker study[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 46: 319-334.
- [44] EKWEZOR C M, OKOGUN J I, EKONG D E U, et al. Preliminary organic geochemical studies of samples from the Niger delta (Nigeria) I. Analyses of crude oils for triterpanes[J]. Chemical Geology, 1979, 27(1/2): 11-28.
- [45] SHARAF L M. Source rock evaluation and geochemistry of condensates and natural gases, offshore Nile delta, Egypt[J]. Journal of Petroleum Geology, 2003, 26(2): 189-209.

(收稿日期 2022-10-20 改回日期 2023-02-14 编辑 肖 飞)