

# 南沙海域南部第三纪三角洲演化与油气聚集

雷志斌<sup>1</sup>, 杨明慧<sup>1,2</sup>, 张厚和<sup>3</sup>, 廖宗宝<sup>3</sup>, 张少华<sup>1</sup>, 罗晓华<sup>1</sup>

(1 中国石油大学(北京) 地球科学学院)

(2 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室; 3 中海油研究总院)

**摘要** 利用钻井、测井及地震资料,重建了南沙海域南部第三纪三角洲沉积的时空演化,并讨论了主控因素。研究表明,自晚渐新世—上新世,研究区三角洲在平行岸线方向(NE—SW)自西向东从西巴兰断层西侧向东侧迁移;在垂直岸线方向(NW—SE)则整体表现出从陆向海进积推进。这一演化过程主要受控于古南海自西向东“剪刀式”俯冲引起的造山带的迁移和海平面的升降。并且发现研究区烃源岩、储层和圈闭具有分期、分带特征。通过综合分析,在研究区划分出3个与三角洲有关的油气聚集区,即曾母盆地巴林坚三角洲油气聚集区、文莱—沙巴盆地巴兰三角洲油气聚集区、梅丽干—冠军三角洲油气聚集区。

**关键词** 南沙海域; 曾母盆地; 文莱—沙巴盆地; 三角洲沉积; 沉积演化; 油气聚集

中图分类号: TE122.3<sup>\*1</sup> 文献标识码: A

## 1 前言

南沙海域南部与婆罗洲西北缘的过渡带上发育曾母盆地和文莱—沙巴盆地(图1a),两个盆地油气富集,经统计,它们占南沙海域油气地质储量的比例均为92%(图1b),其中,三角洲与滨岸沉积是优势油气聚集相带。研究区的三角洲主要发育于第三纪,曾母盆地东南部发育渐新世—上新世巴林坚(Balingian, 现译名“巴林基安”)三角洲;文莱—沙巴盆地则在早中新世—上新世相继发育梅丽干(Meiligian)三角洲、冠军(Champion)三角洲和巴兰(Baram)三角洲<sup>[1]</sup>。Sandil<sup>[2]</sup>于1996年提出受古南海向婆罗洲地块俯冲影响,文莱、沙巴地区后期发育三角洲的物源来自克罗克隆起带及早期发育的三角洲,即梅丽干三角洲、冠军三角洲、巴兰三角洲在NW—SE方向上依次由陆向海继承性发育,这种演化模式被广泛接受,直到Torres等<sup>[3]</sup>于2011年根据孢粉年代学等资料提出:冠军三角洲和巴兰三角洲几乎是在中中新世同期发育的,而非先后发育。可以看出前人的研究对三角洲的演化时限仍存在争议。此外,前人恢复了巴兰三角洲

和冠军三角洲的古流域系统,也对冠军三角洲的时空演化进行了概要恢复<sup>[4-5]</sup>,但没有划分沉积亚相。总而言之,前人对本区三角洲演化的研究多限制在中—晚中新世以后各孤立的三角洲内,而针对南沙海域南部三角洲整体,尤其是早期发育的三角洲的演化规律及控制因素尚未进行讨论。因此,本文基于研究区内170口钻井数据分析结果,结合典型地震剖面,分析南沙海域南部渐新世—上新世的三角洲沉积特征、时空演化和控制因素,最后阐明油气成藏要素分期分带特征、油气聚集与三角洲演化的成因关系。

## 2 区域地质背景

南沙海域南部紧邻婆罗洲地块,北接南海,东与巴拉望岛、苏禄海和苏拉威西海相望,西和西北分别为马来半岛、中南半岛(图1c)。婆罗洲陆上的典型构造是横跨沙捞越州、沙巴州的拉羌(Rajang, 现译名“拉让”)—克罗克褶皱冲断带<sup>[6-7]</sup>,它的形成与拉羌海(古南海)关闭消亡有关<sup>[8-10]</sup>。据陆上和海上的区域不整合面及火山弧分布特征分析,该带构造活动可分晚白垩世—始新世的沙捞越造山运动及早中新

收稿日期: 2015-08-21; 改回日期: 2016-06-06

本文受国家科技重大科技专项“大型油气田及煤层气开发”的子课题“南沙海域大中型油气田成藏规律”(编号:2011ZX05025-005-03)资助

雷志斌: 1990年生,中国石油大学(北京)硕士研究生,地质学专业,区域构造及盆地分析、油区构造解析方向。通讯地址: 102249 北京市昌平区府学路18号 中国石油大学(北京)地球科学学院; Email: lei\_zhibin@163.com

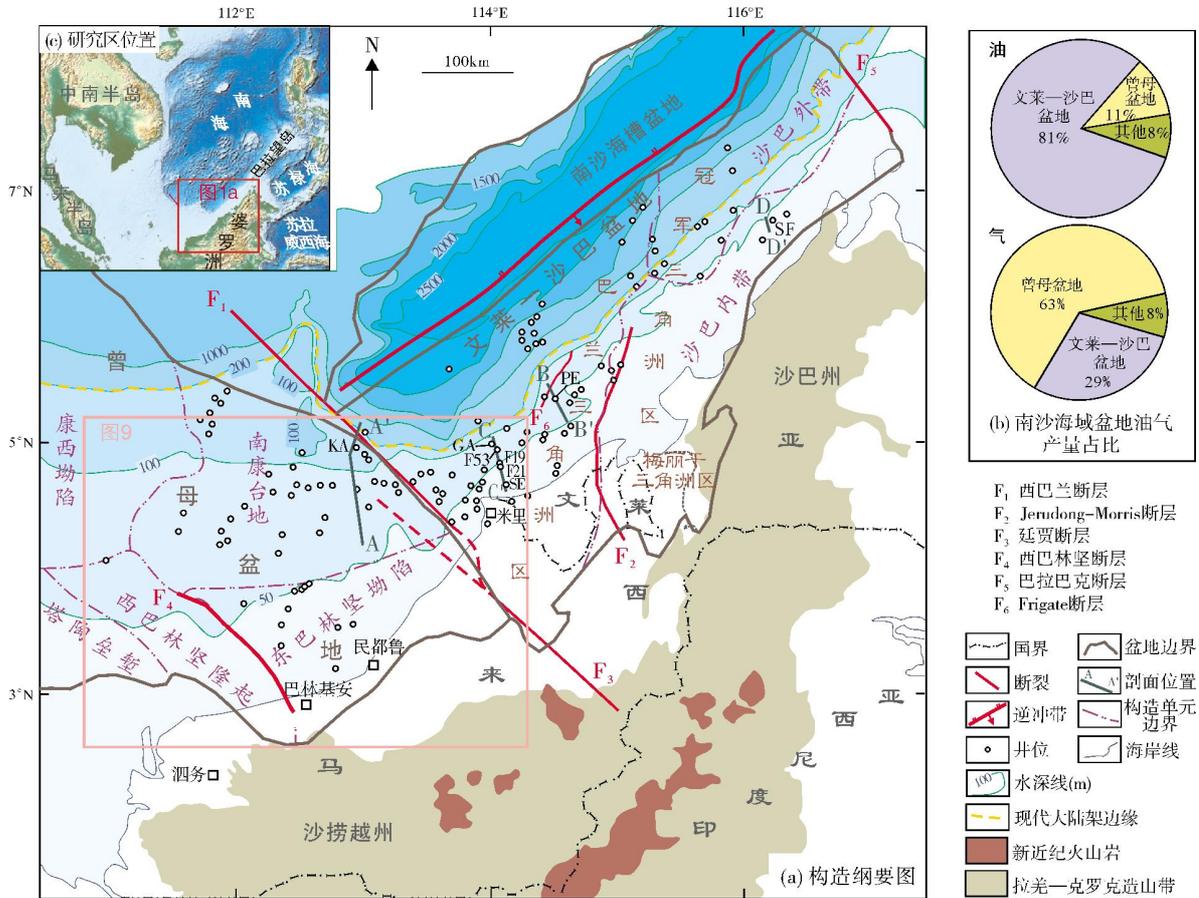


图1 南沙海域南部构造纲要图

世的沙巴造山运动(图2):由晚白垩世—始新世的拉羌群深海浊积岩构成的褶皱冲断带是卢卡尼亚地块与婆罗洲西部沙捞越区碰撞的结果,配套的火山弧为斯赫瓦纳火山;由始新世—早中新世克罗克组深水扇沉积构成的克罗克造山带则是危险地(Dagerous Grounds)地块与婆罗洲北部的沙巴区碰撞的产物,配套的火山弧为沙巴—卡加延火山弧<sup>[11-17]</sup>。克罗克组深水扇是东南亚最大的古近纪独立沉积单元<sup>[18]</sup>,最大沉积厚度大于8 km;而晚渐新世—上新世发育的滨岸、三角洲沉积,最大沉积厚度大于12 km<sup>[19]</sup>。

由于上述两期构造运动活动时间及影响范围不同,研究区地层的侧向相变十分剧烈,导致不同地区的地层划分方案仍存在差异,目前共分为沙捞越区、文莱区和沙巴区三套划分方案。各区地层又分陆上露头及海上钻遇的沉积旋回,后者包括沙捞越旋回、文莱旋回和沙巴旋回(图2)。陆上露头和海上沉积旋回地层在研究区内可以大致追踪并互相对比。

### 3 三角洲演化

曾母盆地与文莱—沙巴盆地是在俯冲挤压背景下形成的前陆盆地<sup>[29]</sup>。曾母盆地南部的二级构造单元南康台地中南部和东巴林坚拗陷内发育巴林坚三角洲;文莱—沙巴盆地巴兰三角洲区发育巴兰三角洲,而沙巴内外带发育梅丽干三角洲和冠军三角洲(图3)。

#### 3.1 晚渐新世(29.3~23.3 Ma)

本期婆罗洲受卢卡尼亚地块与婆罗洲地块碰撞拼合事件(即沙捞越造山运动)影响,拉羌群深海浊积岩自泗务地区向东沿NW—EW持续隆升,形成拉羌造山带的泗务褶皱带,该带东侧则发育了一系列的、由古南海俯冲消减而引发的、弧形分布的火山(图3a)。造山带东北侧的曾母盆地在本期处于浅海沉积环境;而文莱—沙巴盆地仍处于深海、半深海沉积环境,并

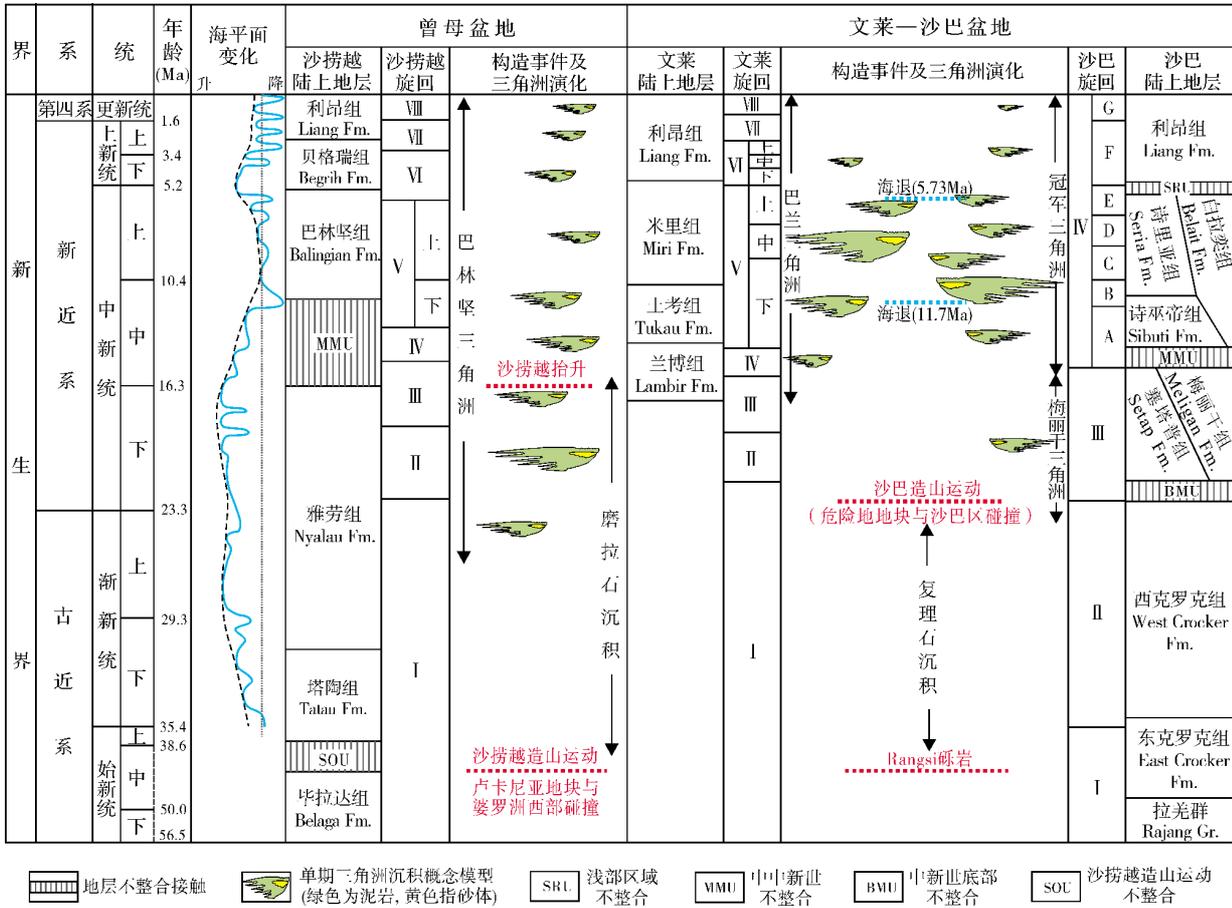


图2 南沙海域南部曾母盆地、文莱—沙巴盆地主要构造事件与三角洲演化(据文献[1, 13, 17, 20-28]编绘)

伴有复理石沉积(图2)。由于该期构造活动频繁且岸线距物源区较近,因此曾母盆地发育扇三角洲沉积,粒度较粗,成分成熟度和结构成熟度较低,多发育向上变粗的反韵律,单期沉积厚度超过200m。

巴林坚三角洲 晚渐新世巴林坚区的岸线与现今岸线近乎垂直,海水向东北方向逐渐变深(图3a)。本期隆起的泗务褶皱带,尤其是其西北部的Penian隆起遭受风化剥蚀,经河流搬运至东侧海岸,形成早期的巴林坚三角洲<sup>[30]</sup>。该期三角洲平原亚相在现今陆上民都鲁地区出露有雅劳组下段,该段地层含砂量高,且夹有泥岩夹层;在民都鲁西侧,发现有煤线。三角洲前缘和前三角洲亚相在海上钻遇沙捞越旋回I顶部(图2)。三角洲平面整体展布呈扇形,主要分布在滨浅海环境(图3a)。

### 3.2 早中新世(23.3~16.3 Ma)

受古南海“剪刀式”俯冲引发的沙巴造山运动影

响,沙巴地区克罗克组深水扇沉积开始隆起,形成克罗克造山带,沙捞越拉羌造山带进一步隆升。自此,婆罗洲陆上造山带的主体开始逐渐由沙捞越向沙巴迁移。值得注意的是,古地磁研究表明,婆罗洲在18~16.5 Ma期间发生了持续的逆时针旋转<sup>[32-33]</sup>。受此影响,本期海岸线的走向和古南海俯冲导致的火山岛弧走向都发生了逆时针旋转。曾母盆地仍处于滨浅海环境;文莱—沙巴盆地处于半深海环境,仅盆地南部的陆上部分被抬升至滨浅海环境,与沙巴造山带相依,开始接受三角洲沉积。本期构造活动依旧频繁,因此两盆地内仍主要发育扇三角洲沉积,粒度较粗,成分成熟度和结构成熟度较低,单期沉积厚度在侧向上变化较大,平均厚度近千米。

巴林坚三角洲 虽然本期海平面上升了,但由于造山带强烈隆升,还是造成了海平面相对下降,岸线明显向海推进。巴林坚区的岸线走向仍为NW—SE,但在民都鲁则由NW转变为近EW向(图3b)。三

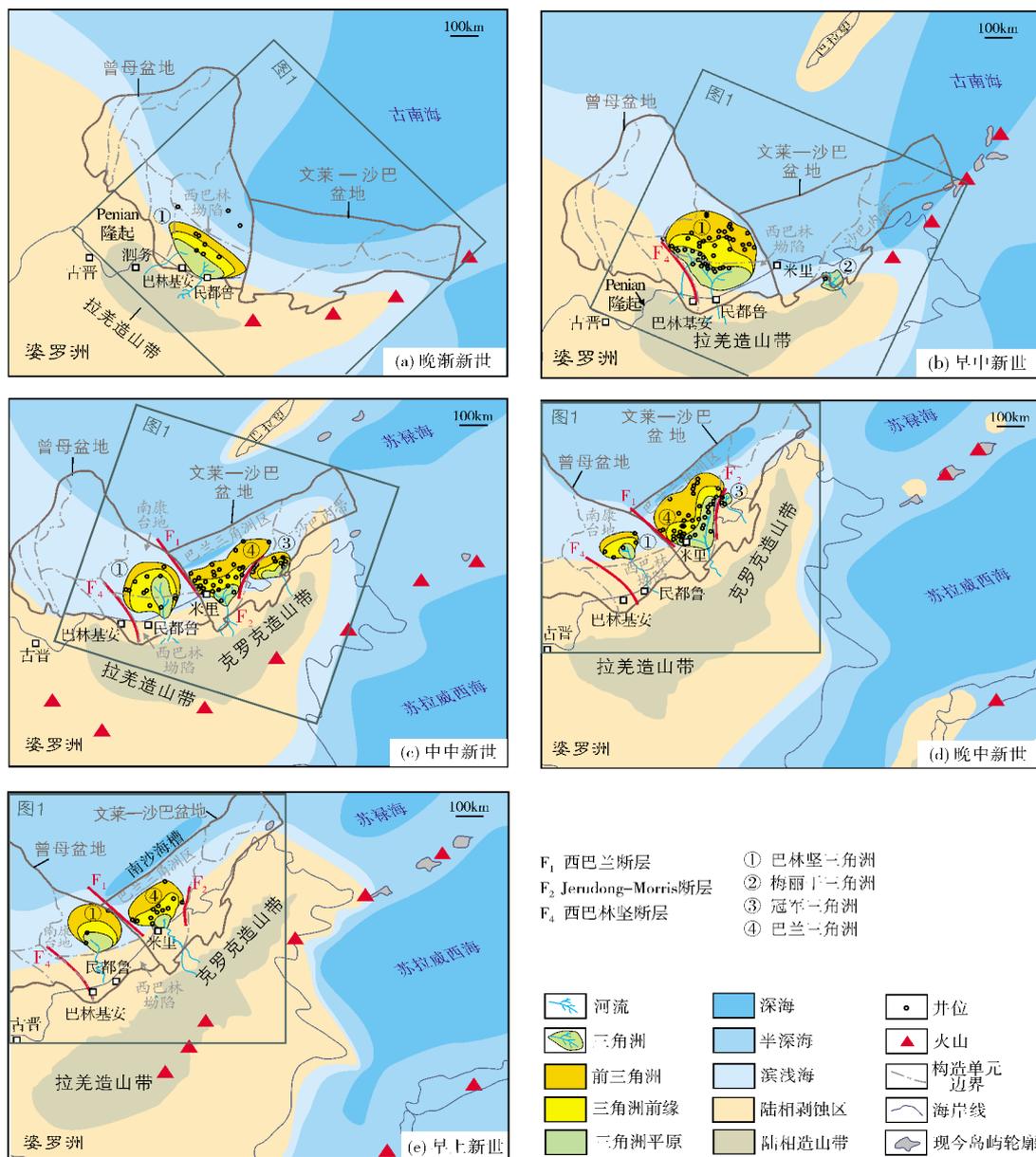


图3 南沙海域南部晚渐新世—早上新世三角洲沉积演化图(婆罗洲的方位据文献[31])

角洲平原亚相在陆上出露雅劳组上段,发育更广泛、更厚的滨岸平原和三角洲平原沉积的煤线;三角洲前缘和前三角洲亚相在海上钻遇沙捞越旋回Ⅱ、Ⅲ(图2),岩性以交错层理砂岩、煤系泥页岩为主。三角洲平面展布仍呈扇形,但较晚渐新世的分布更加广泛,这可能与物源区拉羌造山带的持续隆升有关,总沉积厚度达上千米。

梅丽干三角洲 在沙巴造山运动的影响下,克罗克组深水沉积褶皱抬升,开始遭受剥蚀,新生的河流

向北入海,在滨岸—浅海内侧发育新的三角洲沉积,即梅丽干三角洲。早中新世中期,梅丽干区的岸线呈NE—SW向。受沙巴造山运动的影响,该区由深水碎屑沉积转变为浅水三角洲沉积(图3b)。晚期,由于古南海持续向南俯冲,梅丽干区进一步抬升,梅丽干三角洲隆升遭受剥蚀,并成为后期(冠军)三角洲的物源区。现今在沙巴地区,出露了大量的三角洲相地层,如梅丽干组、塞塔普组,其中梅丽干组以厚层三角洲砂岩为主,夹浅海泥岩沉积;塞塔普组以前三角洲泥岩

为主,夹薄层砂岩。海上未钻遇梅丽干三角洲地层,也说明梅丽干三角洲扇形平面展布范围很小。

### 3.3 中中新世(16.3~10.4 Ma)

该时期的古南海已近乎消失,仅在婆罗洲北侧残留一海槽。曾母盆地、文莱—沙巴盆地则经历了显著的差异构造变动:曾母盆地经历了后裂谷期的断块差异升降<sup>[21,25]</sup>,并快速沉降,在断块高部位发育大规模的碳酸盐台地沉积,三角洲沉积则从断块低部位穿过;而文莱—沙巴盆地以挤压抬升作用为主,克罗克造山带的快速剥蚀为盆内三角洲发育提供了充分的物源。本期两盆地同处于滨浅海环境,区内三角洲沉积总规模达到顶峰,西巴兰断层和Jerudong—

Morris断层将不同的三角洲沉积隔离开,形成了三个独立的沉积中心。

巴林坚三角洲 虽然本期海平面下降了,但由于本区地壳快速沉降,还是造成了海平面相对上升,三角洲退积使得岸线向陆地迁移。沙捞越区岸线由NW向转为NE向,与现今岸线方向大致平行;古河流在民都鲁东北入海形成三角洲(图3c)。在地震剖面中,巴林坚三角洲范围广阔,几乎覆盖巴林坚北部的整个陆棚,部分三角洲沉积甚至从碳酸盐台地之间的槽部穿过,一直抵达陆棚前端的坡折带(图4)。三角洲沉积在陆上未出露;海上钻遇沙捞越旋回IV和V的下部沉积,以三角洲前缘砂岩为主。本期该三角洲沉积厚度达数千米。

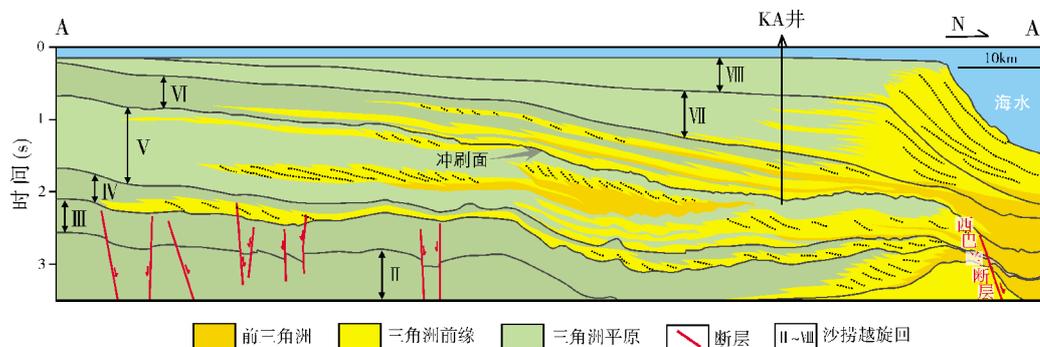


图4 南沙海域南部巴林坚三角洲地震剖面(改编自Kosa<sup>[34]</sup>)

剖面位置见图1

冠军三角洲 沙巴区的岸线方向仍为NE向。克罗克造山带持续发育并沿NE方向延伸至沙巴北部。中中新世不整合面(MMU)将下伏的梅丽干三角洲与上覆的冠军三角洲分隔开<sup>[2]</sup>,表明这两者是前后发育关系。在克罗克造山带北麓发育数条小规模的河流,并沿多个向斜洼地汇聚成水动力条件复杂的三角洲系统,即冠军三角洲(图3c)。三角洲平原在陆上沉积有白拉奕组,砂泥混杂,构成顶积层;三角洲前缘在陆上沉积有诗里亚组,砂泥岩互层,构成前积层;前三角洲在陆上沉积诗巫帝组,以泥岩为主,构成底积层。海上钻遇沙巴旋回IV-A、IV-B,以三角洲前缘沉积为主,夹有浅海沉积。

巴兰三角洲 与冠军三角洲不同,巴兰三角洲的物源来自南和东南方向的沙捞越区,河流在米里东南地区汇入南海,形成早期的巴兰三角洲(图3c)。三角洲沉积在陆上自下而上出露兰博组和土考组,其中,兰博组主要由厚层砂岩组成,底部砂岩分选

好,由几个旋回的波状交错层理组成,顶部砂岩表现为低角度的板状交错层理;土考组以出露褐煤为标志,为三角洲平原亚相。海上钻遇文莱旋回IV、V下部,揭示了该时期发育三角洲相的各个亚相沉积,本期沉积厚度超过千米。

### 3.4 晚中新世(10.4~5.2Ma)

据磷灰石裂变径迹分析,婆罗洲中北部地区晚中新世的地层抬升剥蚀厚度约4~8 km<sup>[7,27]</sup>,该期构造变动记录在浅部区域不整合(SRU)内,并导致前期的三角洲遭受抬升,成为后期三角洲沉积的物源。受此影响,岸线向海方向推进,两盆地都处于滨浅海环境,三角洲沉积主体由曾母盆地迁移至文莱—沙巴盆地,且两盆地内的碎屑岩的成分成熟度和结构成熟度都得到改善。

巴林坚三角洲 平面上,在巴林坚区,岸线向海推进达数十千米,并转变为近EW向,沉积范围较中

中新世时期缩小(图3d)。剖面上,三角洲向陆棚边缘推进,而陆棚上的河流回春,发育下切谷,在底部形成了明显的冲刷面(图4)。三角洲平原在陆上出露的巴林坚组为厚层砂岩、砂砾岩和含化石的泥岩、大量的煤层及含根土岩的褐煤。海上钻遇沙捞越旋回V上部和VI底部,以三角洲前缘沉积为主。

冠军三角洲 岸线走向仍为NE向,但受区域抬升影响,岸线向海推进了数千米。Jerudong—Morris断层继续发育,构成冠军三角洲与巴兰三角洲的分界线,冠军三角洲沉积主体就充填在断层的东南侧(图3d)。陆上发育白拉奕组上部及诗里亚组上部的地层,

岩性与下部地层类似。海上钻遇沙巴旋回IV-C、IV-D和IV-E,以滨浅海沉积为主,三角洲沉积范围变小。

巴兰三角洲 平面上,岸线走向发生轻微的逆时针旋转,古巴兰河从南部陆上造山带携带充足的泥沙,支撑着巴兰三角洲向东北方向快速进积(图3d);剖面显示,本期三角洲以Frigate断层为北界,地层厚度向海明显增厚(图5)。陆上露头为米里组,海上多口钻井钻遇文莱旋回V的中、上部。米里组为河流、三角洲沉积,下部为砂泥岩互层,上部含砂量较高。文莱旋回V的中、上部地层除三角洲沉积外,还有远岸页岩和深水浊积岩,沉积厚度达数千米。

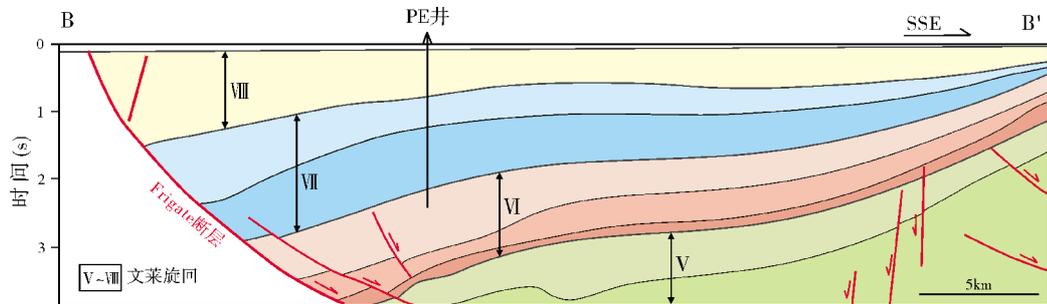


图5 南沙海域南部巴兰三角洲地质剖面(据文献[3]修编)

剖面位置见图1

### 3.5 上新世(5.2~1.6 Ma)

婆罗洲陆上处于造山运动后的后陆抬升阶段,早期陆上沉积遭受抬升成为物源的一部分。受此影响,岸线进一步向海推进,两盆地处于陆相—滨浅海环境,碎屑岩物性得到进一步改善。

巴林坚三角洲 该时期平面上岸线走向近EW,滨岸地区构造抬升使得巴林坚区发生褶皱抬升,成为新的物源区;三角洲继续向海推进,沉积范围较晚中新世稍大,但已不及早中新世时期(图3e),快速堆积使南康台地的部分礁隆被埋在三角洲沉积之下<sup>[34]</sup>。剖面显示,上新世早期由于局部抬升剥蚀,在底部形成了冲刷面,晚期构造平稳,三角洲向海进积(图4)。陆上发育贝格瑞组、利昂组。前者由河流相黏土、砂岩组成,底部为含巨砾的粗砂岩、砂砾岩,厚600~750 m;后者为海陆过渡相沉积,厚约520 m。海上钻遇沙捞越旋回VI、VII,由滨岸平原和三角洲沉积的煤层、具交错层理的砂泥岩组成。

巴兰三角洲 该时期平面上岸线走向基本与现今一致,物源来自南部造山带,钻井显示三角洲在平

行岸线方向上,面积明显缩小,但在垂直岸线方向上依旧向海延伸较远(图3e)。剖面上,三角洲自下而上向海盆方向进积,但始终受制于Frigate同沉积断层,本期三角洲地层厚度达数千米,是巴兰三角洲沉积最厚的一期(图5)。陆上沉积的利昂组较巴林坚区稍厚,达3 000 m;海上的文莱旋回VI、VII为三角洲前缘、前三角洲沉积,规模亦相对较小。

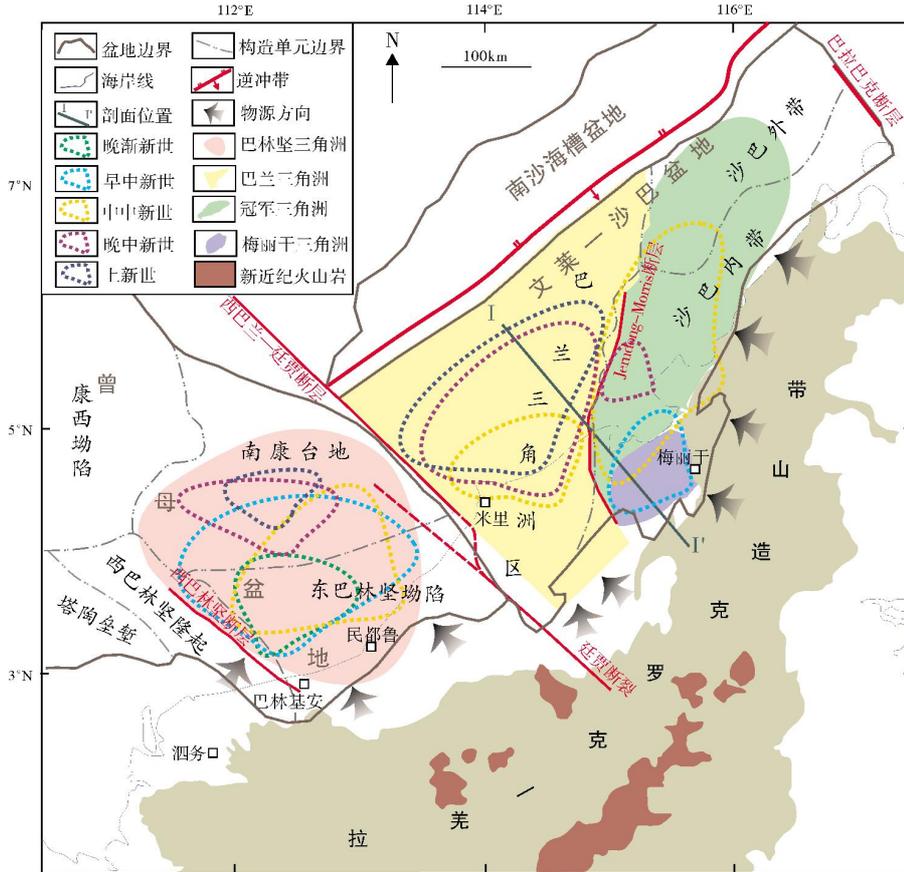
## 4 三角洲演化规律及主控因素

### 4.1 南沙海域南部三角洲沉积演化规律

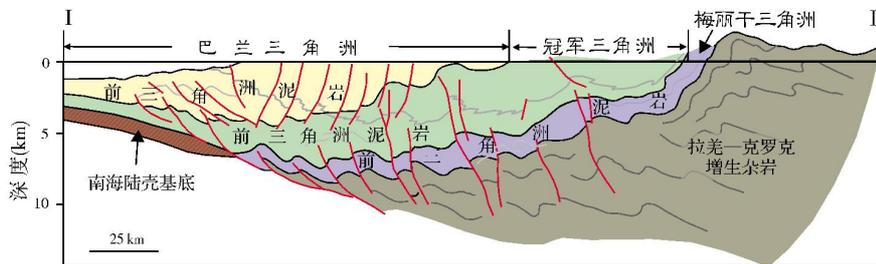
Koopman利用文莱—沙巴盆地野外露头及NW—SE向地震剖面分析,建立了早中新世梅丽干三角洲、中晚中新世冠军三角洲和晚中新世—第四纪巴兰三角洲依次向海推进的继承性发育模式<sup>[2]</sup>(图6a)。然而,这一广泛传播的婆罗洲三角洲演化模式受到Torres等<sup>[3]</sup>的质疑,他们认为,巴兰三角洲与冠军三角洲同期发育。本次研究认为,巴兰三角洲、冠军三角洲是同期发育的三角洲,两者之间不存在接替关系;其一,物源方向不同,巴兰三角洲物源来自南部沙捞越

与克罗克造山带交界附近,而冠军三角洲的物源则来自东部的克罗克造山带;其二,这些三角洲的沉积演化在空间上呈现两个趋势(图6),在平行岸线方向上,三角洲主体由西南部的巴林坚三角洲向东北发展到巴兰三角洲、冠军三角洲,或由西巴兰断层西侧转移至其东侧,在垂直岸线方向上,三角洲

表现出由陆向海的强烈推进,即从早中新世梅丽干三角洲演变到中中新世冠军三角洲(图6b)。由此认为,Koopman模式存在的问题可能与其选取剖面方位不当有关,该剖面依次穿过早中新世梅丽干三角洲、中中新世冠军三角洲和晚中新世巴兰三角洲,难以正确反映3个三角洲之间实际的沉积演化关系。



(b) 各时期三角洲平面叠合图



(a) Koopman 三角洲演化模式(据文献[2],剖面位置见(b)图)

图6 南沙海域南部三角洲时空演化图

### 4.2 三角洲演化的主控因素

研究区三角洲演化与古南海俯冲消亡引发的造

山带迁移和海平面升降有关。

(1) 婆罗洲陆上造山带的构造演化具有从西南向东北迁移的趋势。从婆罗洲西到婆罗洲北发育的地层

沿造山带走向越来越年轻,即由晚白垩世—早始新世拉羌群递变为始新世—早中新世克罗克组<sup>[15]</sup>。这一变化显然与卢卡尼亚地块、危险地地块先后与婆罗洲地块作“剪刀式”碰撞拼贴有关,而且,该碰撞过程影响了研究区三角洲的主体位置及迁移方向。据轻重矿物组分、锆石定年和古水流分析,第三纪曾母盆地和文莱—沙巴盆地的物源几乎全部来自拉羌—克罗克造山带的再旋回作用<sup>[27]</sup>。始新世,卢卡尼亚地块与婆罗洲西碰撞形成拉羌造山带,北缘发育曾母盆地巴林坚三角洲;早中新世以来,危险地地块与婆罗洲东碰撞造山,造山带向东北迁移,三角洲主体随之迁移,文莱—沙巴盆地相继发育早中新世梅丽干三角洲、中中新世冠军三角洲和巴兰三角洲。

(2) Porebski等<sup>[35]</sup>据海平面升降与陆棚三角洲位置的关系,提出了一种动态的三角洲分类方案,它包括低位期陆棚边缘三角洲和高位期内陆棚三角洲等。针对研究区三角洲沉积演化而言,在晚渐新世—中中新世,海平面处于相对高位期,因而发育内陆棚三角洲;至晚中新世—上新世,海平面处于相对低位期,岸线向北(海)推进,三角洲随之向陆棚边缘进积,发育陆棚边缘三角洲。因此,海平面升降变化控制了研究区三角洲在陆棚上向海推进的位置。

此外,研究区第三纪始终位于赤道附近,属热带雨林气候,降雨充足。强烈的风化剥蚀作用提供了大量的沉积物<sup>[36]</sup>,为不同时期的三角洲发育提供了雄厚的物质基础。

## 5 成藏要素分期、分区和分带特征

### 5.1 烃源岩特征

研究表明,研究区烃源岩具有分期、分区特征,受三角洲沉积演化影响,即三角洲平原、前三三角洲亚相是烃源岩发育的有利区带<sup>[37]</sup>。

**烃源岩分期** 研究区烃源岩可分为两期:第一期为晚渐新世—早中新世煤系、泥页岩烃源岩发育期;第二期为中中新世—上新世泥页岩烃源岩发育期(图7)。在第一期,煤系烃源岩比泥页岩生烃潜力高,而前者又以沙捞越旋回 I 顶部,即晚渐新世发育的煤系烃源岩为主导,TOC最高可达70%~85%<sup>[38]</sup>,干酪根类型以Ⅲ型为主, $R_o$ 为0.8%~1.2%, $T_{max}$ 值介于430~480℃,烃源岩处于成熟—高成熟阶段,起始生烃、排烃时间为中中新世,现处于生油末期—生气早

期阶段<sup>[39]</sup>。而第二期烃源岩岩性则以泥页岩为主,主要发育于文莱旋回的V—VI阶段和沙巴旋回的IV—A、IV—B阶段,TOC介于1%~2%,干酪根类型为Ⅲ型,陆上同期烃源岩测试结果显示 $R_o$ 为0.39%~0.48%, $T_{max}$ 值介于401~434℃,即陆上烃源岩处于未成熟阶段,通过埋藏史模型可以推测盆内烃源岩已进入成熟—高成熟阶段,起始生烃、排烃时间为晚中新世—早上新世,现处于生油高峰—生气早期阶段<sup>[40-41]</sup>。

**烃源岩分区** 据钻井资料,曾母盆地烃源岩分布具有“南北分区”特点,“北区”以煤系烃源岩为主,地化特征与第一期烃源岩相似;“南区”以泥页岩烃源岩生油为主(图8a)。而文莱—沙巴全盆烃源岩以泥页岩为主,本次统计表明,泥页岩对全盆油、气储量的贡献率分别达81%、84%,其地化特征与第二期烃源岩一致。

### 5.2 三角洲砂体储层特征

研究区三角洲沉积体中的砂岩储层是南沙海域南部最重要的储层类型之一,主要发育在三角洲前缘亚相内,受三角洲多期“再旋回”影响,砂岩储层物性要明显优于陆相扇三角洲,且其分布具有分期、分带的特征。

**砂岩储层分期** 研究区储集层可分为两期:第一期为晚渐新世—早中新世储层发育期;第二期为中中新世—上新世储层发育期(图7)。第一期储层主要见于沙捞越旋回的I、II、III这三套地层内,自上而下可分为5个主要含油层系,其中第3层系储层孔隙度为10%~35%,有效渗透率大于 $1000 \times 10^{-3} \mu m^2$ ,储集层条件最好。第二期储层主要沉积于文莱旋回的V、VI时期和沙巴旋回IV—C至IV—D时期,其孔渗条件整体较第一期更好。如Boker油田文莱旋回V、VI期储层孔隙度为15%~32%,渗透率为 $(50 \sim 4000) \times 10^{-3} \mu m^2$ ;又如Erb West油田沙巴旋回IV—D层的储层孔隙度为15%~26%,渗透率为 $(30 \sim 3000) \times 10^{-3} \mu m^2$ 。

**砂岩储层分带** 研究发现曾母盆地和文莱—沙巴盆地内主要发育了3个三角洲砂岩储层带,即东巴林坚拗陷和南康台地中南部的巴林坚三角洲储集带、沙巴内带和沙巴外带的梅丽干—冠军三角洲储集带以及巴兰三角洲区的巴兰三角洲储集带(图8b)。

### 5.3 圈闭

研究区三角洲砂岩油气田以构造圈闭为主,

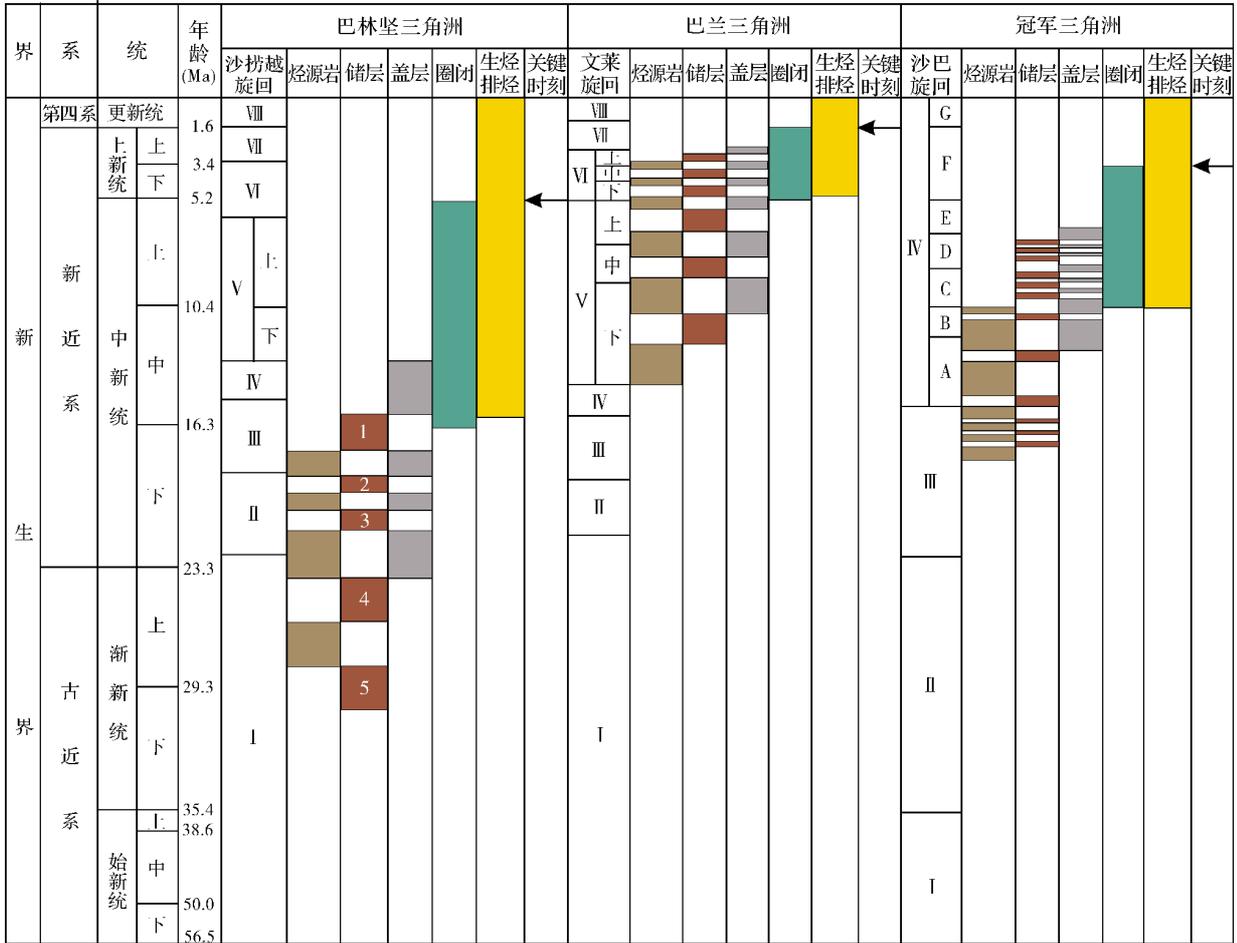


图7 南沙海域南部三角洲沉积成藏事件图

类型包括背斜圈闭、断鼻圈闭和后期改造的泥岩底辟圈闭;局部发育不整合—地层圈闭。这些圈闭的成因多种多样,如基底构造复活控制的盖层变形、三角洲快速堆积在前缘形成的重力滑脱滚动背斜、受挤压应力影响而发育的正反转构造和泥底辟等。

**圈闭分期** 研究区圈闭发育可分为两期:晚渐新世—中中新世构造型圈闭发育期和晚中新世—上新世构造型、复合型圈闭发育期(图7)。第一期受沙撈越造山运动和沙巴造山运动影响,圈闭类型具有显著的构造型倾向,加之三角洲前缘快速堆积,坡度逐渐变得高陡,易引发重力滑动,从而形成滚动背斜及断鼻型构造圈闭。第二期区域构造背景趋于稳定,除三角洲前缘由于快速堆积引发重力滑动,形成滚动背斜及断鼻型构造圈闭外,本期还发育构造—地层复合型圈闭及局部地层型圈闭。此外,Morley等<sup>[42]</sup>

认为,Jerudong断层附近发育两期与泥底辟有关的构造运动,如中中新世的近EW向伸展和晚中新世—上新世的压扭变形,受此影响,区内发育泥底辟构造型圈闭。

**圈闭分带** 研究区圈闭具有显著的分带特征:从滨岸沿着北西向至盆地远洋区,圈闭类型由构造圈闭过渡为地层圈闭,在两者之间发育构造—地层型复合圈闭(图8c)。这样的分带特征与古南海关闭引发的挤压应力场背景有关。

### 5.4 油气聚集区

油气聚集区是受二级构造带或地层岩相变化带制约、互有成因联系且油气聚集条件相似的一系列油气田的分布区<sup>[43]</sup>。前人依据研究区构造演化阶段,在南沙海域南部划分出两类与三角洲沉积有关的含油气系统,即曾母盆地巴林坚区裂谷晚期海侵三角

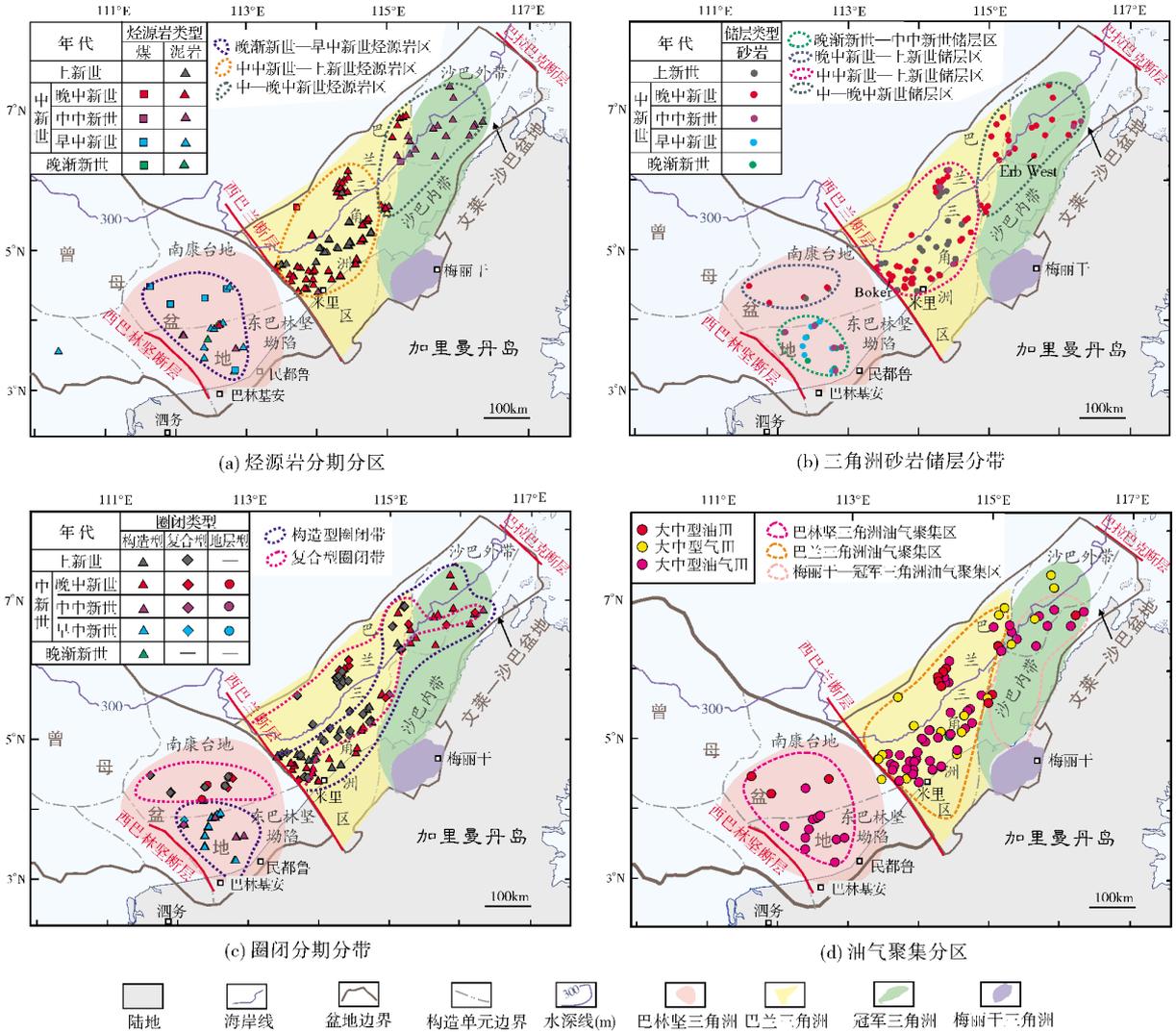


图8 南沙海域南部三角洲沉积成藏要素分布及油气聚集区划分

图中成藏要素数据点位置均源自钻井资料投点

洲含油气系统和文莱—沙巴盆地后裂谷晚期海退三角洲含油气系统<sup>[44-45]</sup>。本次研究结合不同时期的三角洲分布、成藏要素配置及大中型油气田发现,将三角洲砂岩油气聚集区分为三个:巴林坚三角洲油气聚集区、巴兰三角洲油气聚集区和梅丽干—冠军三角洲油气聚集区(图8d)。

**巴林坚三角洲油气聚集区** 该区位于曾母盆地东南部,已探明2个油田、1个气田和12个油气田。其中,北区煤质烃源岩成熟度高,生气,南区泥质烃源岩生油;储层为沙捞越旋回I—III的三角洲前缘砂体;圈闭为三角洲前缘受西巴林坚走滑断层等基底构造<sup>[21]</sup>活动影响而形成的背斜构造圈闭(图9)。

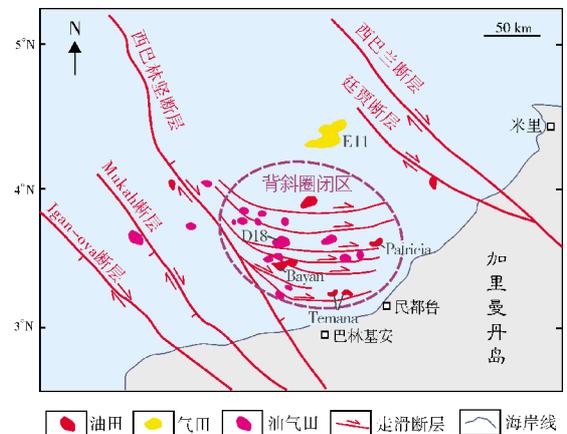


图9 南沙海域南部巴林坚三角洲背斜构造圈闭与油气聚集

巴兰三角洲油气聚集区 位于文莱—沙巴盆地西南部,已探明10个油田、11个气田及30多个油气田。烃源岩以文莱旋回V的前三角洲泥岩为主;储层为文

莱旋回V—VI的三角洲前缘砂岩;油气主要聚集在倾向NW的重力滑动断层形成的断背斜圈闭(图10)及晚中新世—上新世压扭作用形成的背斜圈闭内。

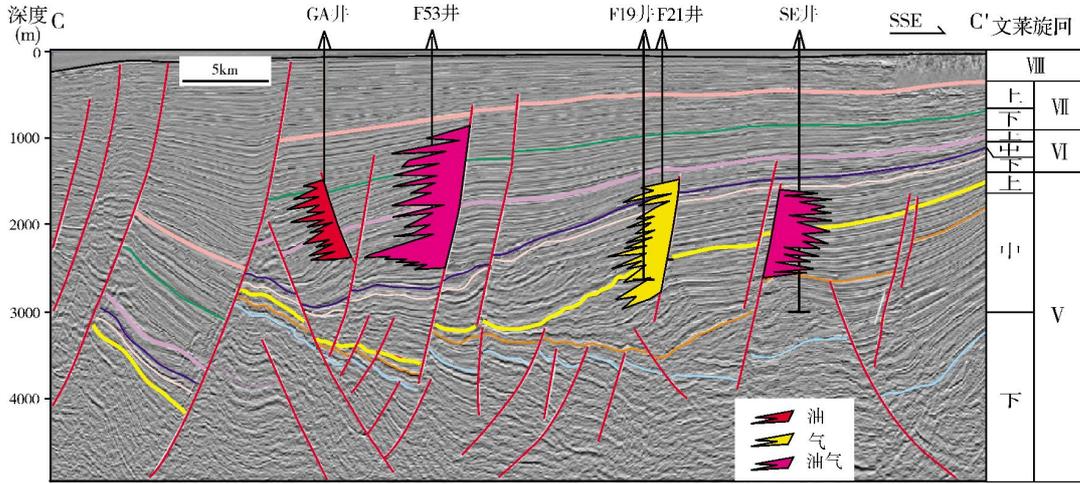


图10 南沙海域南部巴兰三角洲重力滑动构造与背斜圈闭油气聚集(地震剖面据文献[3])

剖面位置见图1

梅丽干—冠军三角洲油气聚集区 位于文莱—沙巴盆地东南部,以Jerudong—Morris断层为界与巴兰三角洲油气聚集区分隔,已探明了3个油田、5个气田和7个油气田。烃源岩以沙巴旋回Ⅲ、

Ⅳ-A、Ⅳ-B的前三角洲泥岩为主;储层为沙巴旋回Ⅲ、Ⅳ-A至Ⅳ-E的三角洲前缘砂岩;油气聚集在挤压应力形成的正反转背斜及泥底辟构造中(图11)。

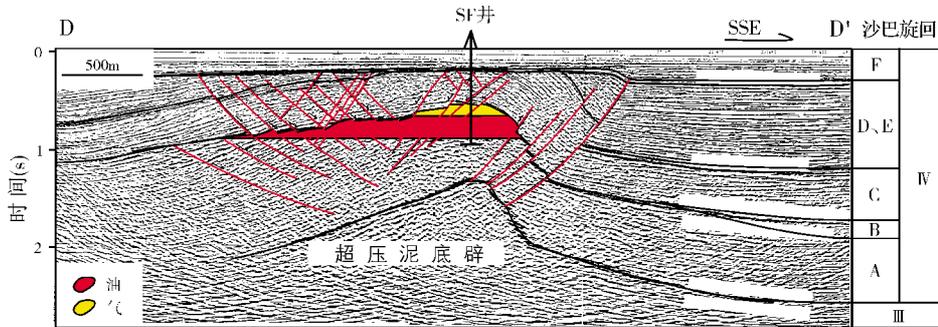


图11 南沙海域南部沙巴地区泥底辟型油气聚集(地震剖面据文献[2])

剖面位置见图1

## 6 结论

(1)南沙海域南部第三纪发育巴林坚、梅丽干、冠军和巴兰等三角洲。在平行岸线方向上,三角洲主体自西南向东北迁移;而在垂直岸线方向上,三角洲由陆向海不断进积。巴兰三角洲与冠军三角洲同期发育,两者之间不具继承关系。

(2)研究区的三角洲沉积演化受控于构造活动、

海平面升降和古气候,即造山带迁移控制三角洲的发育位置,海平面升降则控制三角洲在陆棚上的发育位置。

(3)从成藏要素角度,曾母盆地晚渐新世—早中新世烃源岩以海陆过渡相含煤泥岩为主,文莱—沙巴盆地烃源岩以中晚中新世前三角洲泥岩为主;三角洲砂岩是研究区最重要的储层类型之一;圈闭则以背斜构造为主。研究区与三角洲沉积演化有关的

油气聚集区包括曾母盆地巴林坚三角洲、文莱—沙巴盆地巴兰、梅丽干、冠军三角洲等。

致谢：感谢中国海洋石油研究总院为本次研究提供了基础数据。感谢审稿专家及编辑对本文详尽的审阅并提出建设性意见。

#### 参考文献

- [1] Hutchison C S. Geology of North-West Borneo: Sarawak, Brunei and Sabah[M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2005: 1-412.
- [2] Sandal S T. The Geology and Hydrocarbon Resources of Negara Brunei Darussalam[M]. Bandar Seri Begawan: Syabas, 1996: 1-243.
- [3] Torres J, Gartrell A, Hoggmascall N. Redefining a sequence stratigraphic framework for the Miocene to Present in Brunei Darussalam: Roles of local tectonics, eustasy and sediment supply[C]//International Petroleum Technology Conference, 2012: No. 15167. [http://www.iptcnet.org/2011/pages/schedule/tech\\_program/documents/IPTC-15167.pdf](http://www.iptcnet.org/2011/pages/schedule/tech_program/documents/IPTC-15167.pdf).
- [4] James D M D. The Geology and Hydrocarbon Resources of Negara Brunei Darussalam [M]. Muzium Brunei: Bandar Seri Begawan, 1984: 1-165.
- [5] Lambiase J J, Cullen A B. Sediment supply systems of the Champion "Delta" of NW Borneo: Implications for deepwater reservoir sandstones[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013,76: 356-371.
- [6] Bénard F, Muller C, Letouzey J, et al. Evidence of multiphase deformation in the Rajang-Crocker Range(Northern Borneo) from Landsat imagery interpretation: Geodynamic implications [J]. Tectonophysics, 1990, 183(1/4): 321-339.
- [7] Hutchison C S, Bergman S C, Swauger D A, et al. A Miocene collisional belt in north Borneo: Uplift mechanism and isostatic adjustment quantified by thermochronology [J]. Journal of the Geological Society, 2000, 157(4): 783-793.
- [8] Hall R. Reconstructing Cenozoic SE Asia[C]// Hall R, Blundell D J. Tectonic evolution of Southeast Asia (Geological Society, Special Publication No.106). London: The Geological Society, 1996, 106: 153-184.
- [9] Hutchison C S. The 'Rajang accretionary prism' and 'Lupar Line' problem of Borneo[C]//Hall R, Blundell D J. Tectonic evolution of Southeast Asia (Geological Society, Special Publication No. 106). London: The Geological Society, 1996, 106: 247-261.
- [10] Pubellier M, Ali J, Monnier C. Cenozoic Plate interaction of the Australia and Philippine Sea Plates: "Hit -and -run" tectonics[J]. Tectonophysics, 2003, 363(3): 181-199.
- [11] Fyhn M B W, Pedersen S A S, Boldreel L O, et al. Palaeocene-early Eocene inversion of the Phuquoc-Kampot Som Basin: SE Asian deformation associated with the suturing of Luconia [J]. Journal of the Geological Society, 2010, 167(2): 281-295.
- [12] Cullen A B. Transverse segmentation of the Baram-Balabac Basin, NW Borneo: Refining the model of Borneo's tectonic evolution[J]. Petroleum Geoscience, 2010, 16(1): 3-29.
- [13] Cullen A B, Reemst P, Henstra G et al. Rifting of the South China Sea: New perspectives[J]. Petroleum Geoscience, 2010, 16(3): 273-282.
- [14] Madon M, Ly K C, Wong R. The structure and stratigraphy of deepwater Sarawak, Malaysia: Implications for tectonic evolution[J]. Journal of Asian Earth Science, 2013, 76: 312-333.
- [15] Hutchison C S. Oroclines and paleomagnetism in Borneo and South-East Asia[J]. Tectonophysics, 2010, 496(1): 53-67.
- [16] Hall R. Contraction and extension in northern Borneo driven by subduction rollback[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 76: 399-411.
- [17] Spencer J E, Tittley S R. Ores and orogenesis: Circum-Pacific tectonics, geologic evolution, and ore deposits[C]// Hall R. Arizona Geological Society Digest, 2008(22): 245-258.
- [18] Crevello P D. The great Crocker submarine fan: A world-class foredeep turbidite system[C]// Indonesian Petroleum Association(28th Annual Convention Proceedings), 2002, 1: 377-407.
- [19] Morley C K, Back S, Rensbergen P V, et al. Characteristics of repeated, detached, Miocene - Pliocene tectonic inversion events, in a large delta province on an active margin, Brunei Darussalam, Borneo[J]. Journal of Structural Geology, 2003, 25(7): 1147-1169.
- [20] Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic [J]. Science, 1987, 235(4793): 1156-1167.
- [21] Zin I C M. Tertiary tectonics and sedimentation history of the Sarawak Basin, East Malaysia[D]. Durham University, 1996.
- [22] Hasiyah A W. Oil-generating potential of Tertiary coals and other organic-rich sediments of the Nyalau Formation, onshore Sarawak [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 1999, 17(1): 255-267.
- [23] Hageman H. Palaeobathymetrical changes in NW Sarawak during Oligocene to Pliocene[J]. Bulletin of The Geological Society of Malaysia, 1987, 21: 91-102.
- [24] Balaguru A, Lukie T. Tectono-stratigraphy and development of the Miocene delta systems on an active margin of Northwest Borneo, Malaysia[C]// Petroleum Geoscience Conference & Exhibition, Kuala Lumpur, Malaysia, 2012: 23-24.
- [25] Morrison K, Lee W C. Sequence stratigraphic framework of Northwest Borneo[J]. Bulletin of the Geological Society of Malaysia, 2003, 47: 127-138.
- [26] Hutchison C S. Marginal basin evolution: The southern South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21(9): 1129-1148.
- [27] Hall R, van Hattum M W A, Spakman W. Impact of India-Asia collision on SE Asia: The record in Borneo[J]. Tectono-

- physics, 2008, 451(1): 366-389.
- [28] Hall R. Late Jurassic-Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean [J]. *Tectonophysics*, 2012, 570/571(11): 1-41.
- [29] 张功成, 谢晓军, 王万银, 等. 中国南海含油气盆地构造类型及勘探潜力[J]. *石油学报*, 2013, 34(4): 611-627.
- [30] Hassan M H A, Johnson H D, Allison P A, et al. Sedimentology and stratigraphic development of the upper Nyalau Formation (Early Miocene), Sarawak, Malaysia: A mixed wave- and tide-influenced coastal system[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 76: 301-311.
- [31] Hall R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer-based reconstructions, model and animations[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20(4): 353-431.
- [32] Schmidtke E A, Fuller M D, Haston R B. Paleomagnetic data from Sarawak, Malaysian Borneo, and the late Mesozoic and Cenozoic tectonics of Sundaland[J]. *Tectonics*, 1990, 9(1): 123-140.
- [33] Fuller M, Haston R, Lin J L, et al. Tertiary paleomagnetism of regions around the South China Sea[J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1991, 6(3/4): 161-184.
- [34] Kosa E. Sea-level changes, shoreline journeys, and the seismic stratigraphy of Central Luconia, Miocene-present, offshore Sarawak, NW Borneo[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 59: 35-55.
- [35] Porbski S J, Steel R J. Shelf-margin deltas: Their stratigraphic significance and relation to deepwater sands[J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 62(3): 283-326.
- [36] Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans[J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91(1): 1-21.
- [37] Fraser A J, Matthews S J, Murphy R W. Petroleum geology of Southeast Asia [C]// Todd S P, Dunn M E, Barwise A J G. *Geologic Society Special Publication*, 1997, 126: 25-47.
- [38] 王登, 徐耀辉, 文志刚, 等. 曾母盆地东巴林坳陷烃源岩评价及油源探讨[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2013, 32(5): 583-590.
- [39] 杨楚鹏, 姚永坚, 李学杰, 等. 南海南部曾母盆地新生界煤系烃源岩生油条件[J]. *石油学报*, 2010, 31(6): 920-926.
- [40] Togunwa O S, Abdullah W H, Hakimi M H, et al. Organic geochemical and petrographic characteristics of Neogene organic-rich sediments from the onshore West Baram Delta Province, Sarawak Basin: Implications for source rocks and hydrocarbon generation potential[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 63: 115-126.
- [41] Curiale J, Morelos J, Lambiasi J, et al. Brunei Darussalam: Characteristics of selected petroleum and source rocks[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(12): 1475-1493.
- [42] Morley C K, Crevello P, Ahmad Z H. Shale tectonics and deformation associated with active diapirism: The Jerudong Anticline, Brunei Darussalam [J]. *Journal of the Geological Society*, 1998, 155(3): 475-490.
- [43] 张厚福, 方朝亮, 高先志, 等. *石油地质学*[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 1-345.
- [44] Doust H, Noble R A. Petroleum systems of Indonesia [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 25(2): 103-129.
- [45] 杨明慧, 张厚和, 廖宗宝, 等. 南海南沙海域主要盆地含油气系统特征[J]. *地质前缘*, 2015, 22(3): 48-58.

编辑: 黄革萍

## Tertiary Delta Evolution and Related Hydrocarbon Accumulation in the Southern Nansha Area, South China Sea

Lei Zhibin, Yang Minghui, Zhang Houhe, Liao Zongbao, Zhang Shaohua, Luo Xiaohua

**Abstract:** Based on seismic sections, drilling data and logging profiles, the spatial-temporal evolution of the deltas that developing in southern Nansha area during Tertiary sedimentation is reconstructed and the dominating factors controlling development of each delta are discussed. It is indicated that the deltas migrated from the west side of the west Baram fault to the east side of the west Baram fault along the coastline (NE-SW) while they advanced with progradation from the land to the sea in the longitudinal direction (NW-SE) during Oligocene and Pliocene. Such an evolution process is controlled by eustacy and the migration of orogenic belts which is caused from the scissors-typed subduction of the ancient South China Sea. Source rock, reservoirs and traps can be divided into different stages and zones. By synthetic analysis, three zones of hydrocarbon accumulation relative with the evolution of the deltas are divided: the Balingian delta oil-rich zone in Zengmu Basin, the Baram delta oil-rich zone and the Meligan-Champion delta oil-rich zone in Brunei-Sabah Basin.

**Key words:** Delta sediments; Sediment evolution; Hydrocarbon accumulation; Zengmu Basin; Brunei-Sabah Basin; Nansha waters

Lei Zhibin: Master degree candidate at China University of Petroleum (Beijing). Add: College of Geosciences, China University of Petroleum, 18 Fuxue Rd., Changping, Beijing, 102249, China