

陈建宏, 肖菲, 栾锡武. 东南亚地区裂谷作用对油气成藏组合的控制[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(3): 20-29.

CHEN Jianhong, XIAO Fei, LUAN Xiwu. Control of rifting on hydrocarbon plays in Southeast Asia[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(3): 20-29.

东南亚地区裂谷作用对油气成藏组合的控制

陈建宏¹, 肖菲^{2*}, 栾锡武^{2,3}

(1 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590; 2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237;

3 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237)

摘要: 东南亚地区发育 100 多个新生代沉积盆地, 这些沉积盆地经历了不同程度的裂谷作用。为了指导东南亚油气勘探, 通过对盆地构造-沉积演化进行分析, 系统研究了东南亚地区盆地油气成藏组合的要素特征, 并探讨了裂谷作用对油气成藏组合的影响。研究结果认为: 东南亚地区盆地构造-沉积演化经历了同生裂谷早期、同生裂谷晚期、后裂谷早期和后裂谷晚期 4 个裂谷作用阶段。根据裂谷作用阶段和在相应裂谷作用阶段形成的储层类型, 从深到浅划分出 4 套油气成藏组合: 深部成藏组合、下部成藏组合、中部成藏组合和上部成藏组合。深部成藏组合发育同生裂谷早期湖相浊积砂岩、湖相冲积扇储层, 下部成藏组合发育同生裂谷晚期海进时期河流-三角洲砂岩储层, 中部成藏组合发育后裂谷早期海相碳酸盐岩储层, 上部成藏组合发育后裂谷晚期海退时期河流-三角洲砂岩储层。其中, 中部成藏组合发育的后裂谷早期海相碳酸盐岩储层勘探潜力最大。

关键词: 裂谷作用; 成藏组合; 油气勘探; 构造演化; 东南亚

中图分类号: P618.13; TE122

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.323

0 引言

东南亚油气资源非常丰富, 拥有大量待发现的常规油气资源以及非常规油气资源, 是当前全球油气勘探开发最活跃的地区之一^[1-4]。据统计, 东南亚石油和天然气探明资源量分别为 5.858×10^6 t 油当量和 8.733×10^6 t 油当量; 石油和天然气待探明资源量分别为 52.7×10^8 t 油当量和 73×10^8 t 油当量^[5], 这些油气资源主要分布在该区发育的 100 多个新生代沉积盆地^[6-8]。前人对该区的盆地类型、油气地质条件以及沉积特征取得了丰富的研究成果: 如杨福忠等^[9]通过对东南亚 14 个主要含油气盆地进行研究, 将东南亚地区油气成藏组合划分为中生界成

藏组合、前古近系基底成藏组合、古近系成藏组合和新近系成藏组合; 陈龙博等^[10]通过对苏门答腊弧后盆地油气成藏组合进行研究, 认为苏门答腊弧后盆地的油气成藏组合受不同阶段裂谷作用的控制; 姚永坚等^[11]通过对东南亚主要含油气盆地沉积、构造特征的研究, 提出东南亚发育始新统、渐新统和中新统 3 套烃源岩; DOUST^[12]从有助于油气勘探的角度出发, 将东南亚新生代沉积盆地的沉积相划分为湖相、近海相、开阔台地相、深水相 4 大类型。但东南亚地区油气成藏组合研究以及裂谷作用与油气成藏组合二者之间的关系稍显薄弱和不足。鉴于此, 本文在前人研究成果的基础上, 通过对盆地构造-沉积演化进行系统分析, 研究东南亚地区盆地油气成藏组合的要素特征, 并探讨裂谷作用对油气成藏组合的影响, 以期为该区的油气勘探提供更充分的地质依据。

1 地质背景

东南亚地区位于欧亚板块的东南部, 东西两侧分别为太平洋与印度洋, 南邻大洋洲, 面积约为 $1.0 \times$

收稿日期: 2021-12-23

资助项目: 中国东盟海洋地震数据平台与研究项目(12120100500017001); 国家自然科学基金(92055211)

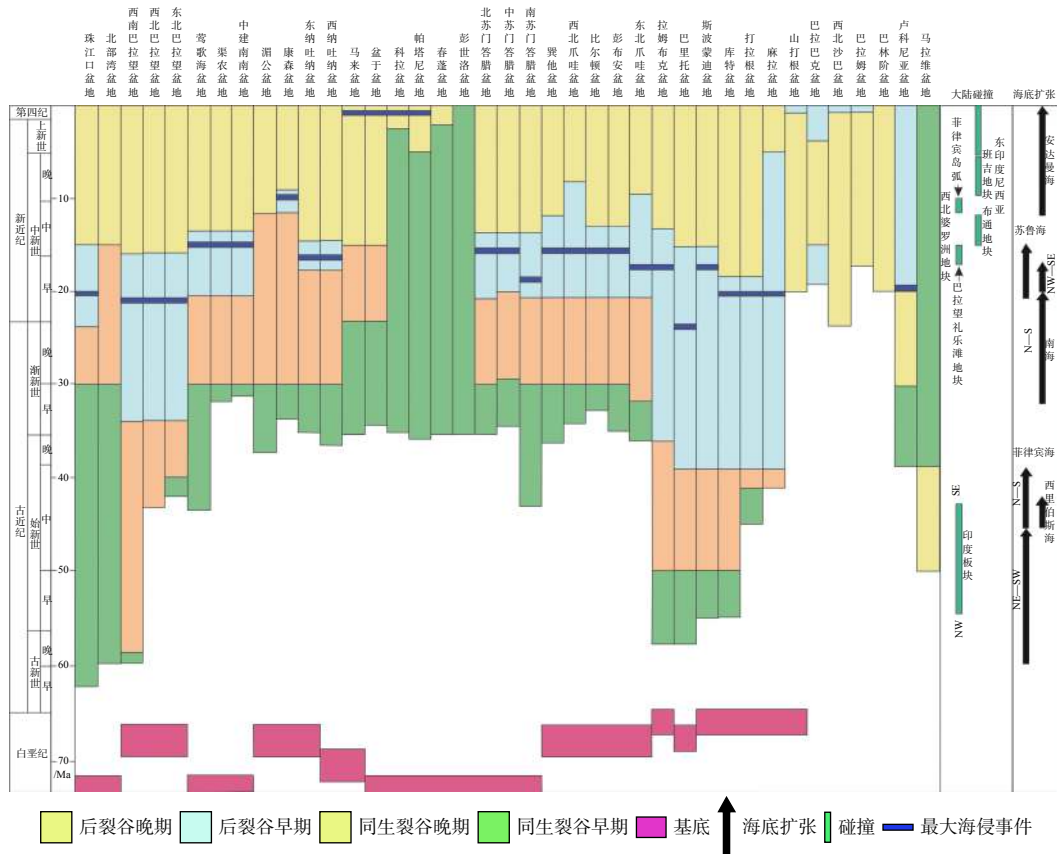
作者简介: 陈建宏(1996—), 男, 硕士, 主要从事地震资料解释和海洋地质方面的研究工作。E-mail: jianhongchen126@163.com

* 通讯作者: 肖菲(1978—), 女, 助理研究员, 主要从事海洋地质方面的研究工作。E-mail: xiaofei_hds@163.com

10⁷ km², 大地构造处于印度-澳大利亚板块 N 向、NE 向斜向俯冲以及太平洋板块西向俯冲两大俯冲带之间, 经历了板块俯冲碰撞、裂谷、伸展、挤压、走滑等一系列地质作用, 构造非常复杂^[13]。

东南亚地区盆地的构造-沉积演化受印度-澳大利亚板块与欧亚板块之间俯冲碰撞以及海平面升

降变化的控制^[14-19], 经历了不同程度的同生裂谷早期、同生裂谷晚期、后裂谷早期和后裂谷晚期 4 个阶段(图 1)。总的来看, 裂谷作用在巽他大陆南部开始较早, 北部较晚^[20-22]。与此相对应, 在盆地不同部位形成了不同类型的油气成藏组合。



修改自文献 [20-21]

图 1 东南亚地区盆地构造演化及主要地质事件

Fig.1 Tectonic evolution and main geological events in Southeast Asia basins

同生裂谷早期阶段(古新世), 太平洋板块和印度-澳大利亚板块分别向欧亚板块之下俯冲(B 型俯冲), 此时为板块间“软碰撞”阶段^[23], 受弧后伸展作用影响地壳开始裂陷, 位于巽他大陆东南部的盆地开始形成地堑-半地堑结构形态, 盆地主要为湖相泥岩和砂岩沉积。

同生裂谷晚期阶段(始新世), 随着太平洋板块和印度-澳大利亚板块向欧亚板块之下持续俯冲, 前端洋壳逐渐消亡, 板块间由“软碰撞”阶段转为“硬碰撞”阶段(A 型俯冲)^[23], 巽他大陆的盆地广泛发生裂谷作用; 随着裂谷作用的进行, 先前形成的地堑-半地堑结构形态发生合并, 形成规模更大、更对称的结构形态。渐新世发生大规模初始海侵, 盆地主要为河流-三角洲相到浅海相砂泥岩沉积。

后裂谷早期阶段(早中新世), 盆地进入热沉降期, 构造活动急剧减弱, 断裂活动不活跃, 地壳伸展速率减慢或停止伸展。新南海开始打开, 发生大规模海侵作用, 盆地以浅海-半深海相泥岩、碎屑岩和灰岩沉积为主^[24]。

后裂谷晚期阶段(中中新世), 印度-澳大利亚板块与欧亚板块、南沙地块与加里曼丹地块发生强烈碰撞, 地壳遭受区域性挤压、隆升以及构造反转^[25], 盆地中主要发育滨浅海相和河流-三角洲相砂泥岩沉积。

2 油气地质条件

在东南亚发育的 100 多个新生代沉积盆地中,

其中 47 个盆地发现油气, 表明该区优越的油气地质条件^[9]。这些沉积盆地经历了不同程度的裂谷作用, 与此相对应, 盆地先后经历了湖相、海陆过渡相和海相沉积, 在盆地不同部位发育了不同的烃源岩和储集层类型, 形成不同的生储盖组合类型。

2.1 烃源岩

与盆地经历的裂谷作用阶段相对应, 在不同裂谷作用阶段, 盆地中形成了不同烃源岩类型。东南亚盆地的烃源岩类型可划分为 4 套: 同生裂谷早期烃源岩、同生裂谷晚期烃源岩、后裂谷早期烃源岩

以及后裂谷晚期烃源岩。

同生裂谷早期烃源岩由湖相泥页岩组成, 生烃能力最好; 干酪根类型为 I、II 型, 有机质丰度大, 总有机碳 (TOC) 含量为 1%~10%, 氢指数 (HI) 值 >400, 厚度可达几十米^[12,26]。同生裂谷早期湖相烃源岩在东南亚地区的盆地中广泛分布(图 2)。可进一步分为深湖相烃源岩及浅湖相烃源岩: 深湖相烃源岩为富含藻类有机质的泥页岩, 生烃能力强, 主要以生油为主(图 3); 浅湖相烃源岩生烃能力较好, 既能生油也能生气, 但生气能力比生油能力要强一些(图 3)。

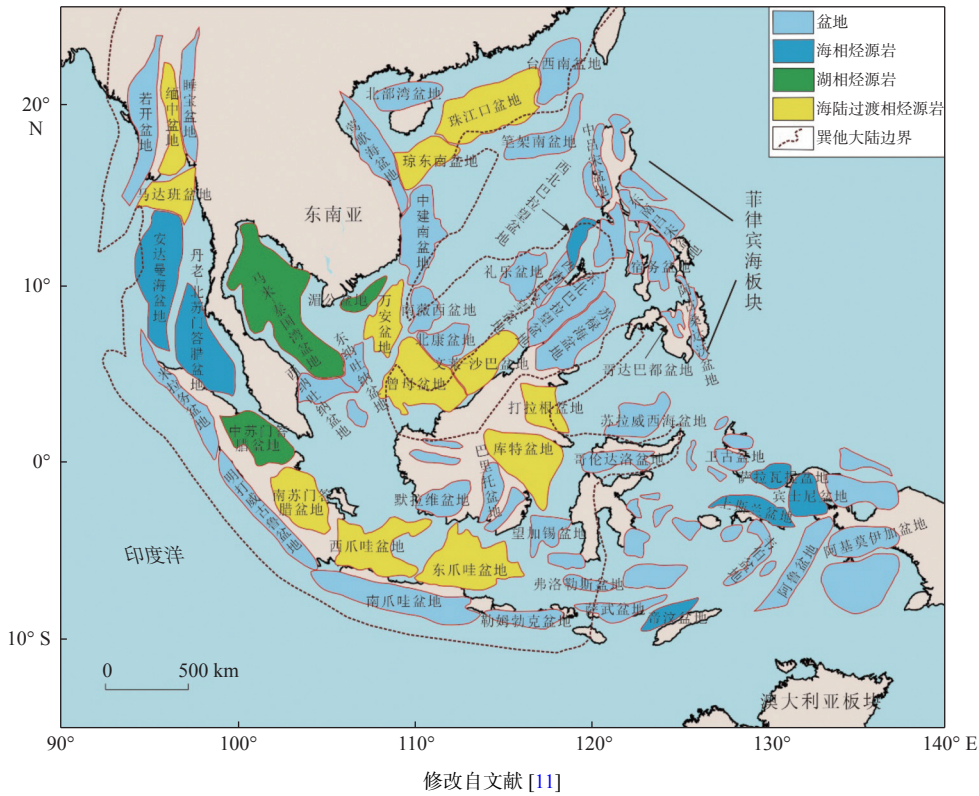


图 2 东南亚地区烃源岩分布示意图

Fig.2 Distribution of hydrocarbon source rocks in Southeast Asia

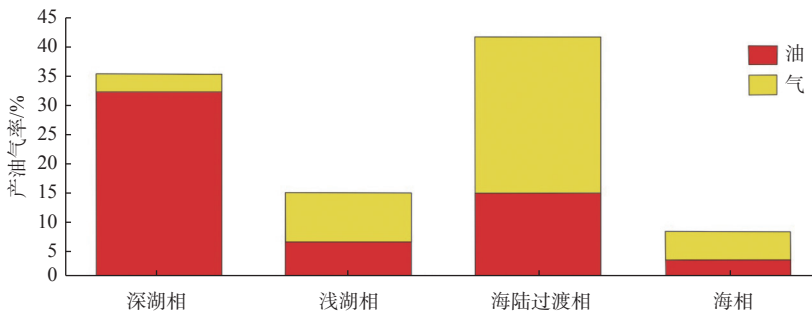


图 3 东南亚地区不同类型烃源岩的产油(气)率^[27]

Fig.3 Hydrocarbon production rate of different types of source rocks in Southeast Asia^[27]

同生裂谷晚期烃源岩由海进环境中形成的河流-三角洲相泥页岩和煤组成, 生烃能力好; 干酪根类型为 II、III 型, 有机质丰度好, TOC 含量可达 80%。同生裂谷晚期海陆过渡相烃源岩分布广, 在东南亚各盆地都有分布(图 2), 以生天然气为主(图 3)。

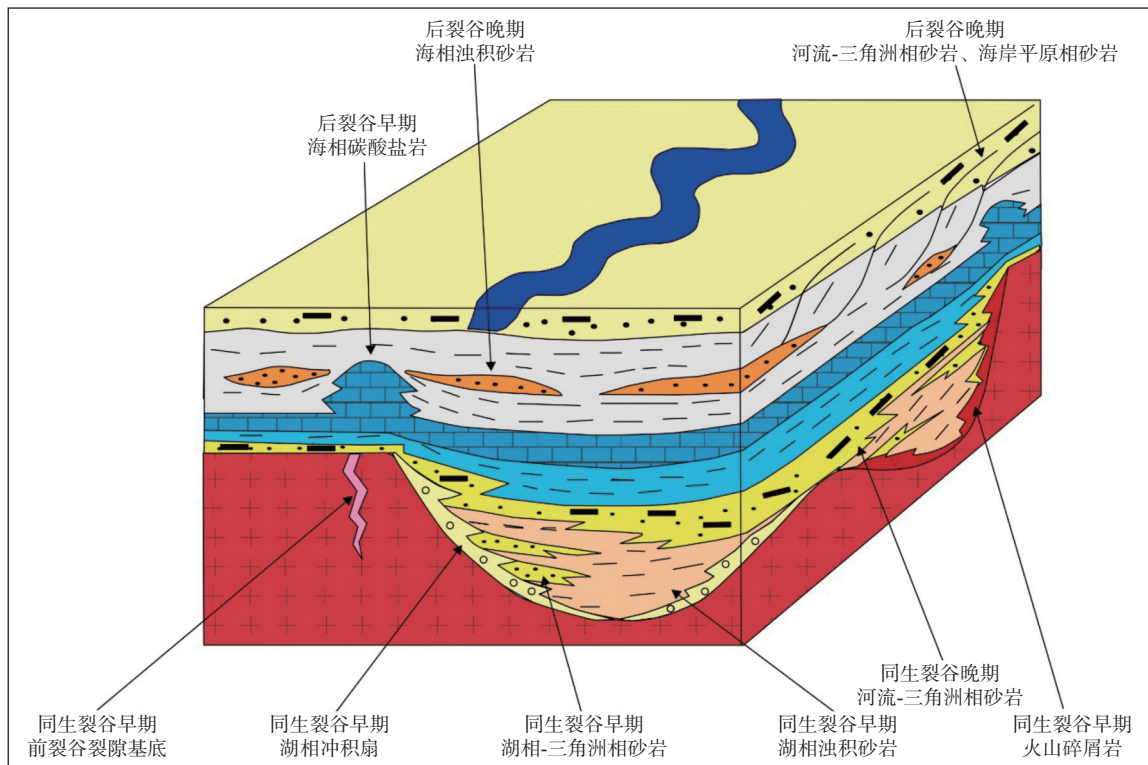
后裂谷早期烃源岩由海相泥页岩组成, 埋深较浅, 成熟度不高, 生烃能力较差; 干酪根类型为 II、III 型, TOC 含量为 1%~1.5%。后裂谷早期海相烃源岩在印度尼西亚地区的盆地较为发育(图 2), 以生天然气为主(图 3)。

后裂谷晚期烃源岩由海退环境中形成的河流-三角洲相泥页岩和煤组成, 生烃能力很好, 干酪根类型为 II、III 型, 可与同生裂谷早期湖相烃源岩相

比^[11]。后裂谷晚期海陆过渡相烃源岩与同生裂谷晚期海陆过渡相烃源岩一样在东南亚各盆地广泛分布(图 2), 既能生油也能生气, 且生气能力要大于生油能力(图 3)。

2.2 储层

储层岩相的发育以及类型受盆地演化过程中不同裂谷作用阶段以及沉积相带的控制^[12,28-29]。根据不同裂谷作用阶段和不同沉积相带形成的储层岩相类型, 将东南亚盆地的储层分为 4 种类型: 同生裂谷早期储层、同生裂谷晚期储层、后裂谷早期储层、后裂谷晚期储层(图 4)。



修改自文献 [20]

图 4 东南亚地区储层岩相发育示意图

Fig.4 Schematic diagram of petroleum play in Southeast Asia

同生裂谷早期储层主要包括湖相冲积扇、湖相-三角洲相砂岩、湖相浊积砂岩、火山碎屑岩以及前裂谷裂隙基底^[12,20], 储层物性较好, 但单套储层厚度较薄; 同生裂谷早期储层主要分布于越南、泰国以及印度尼西亚西部的沉积盆地。

同生裂谷晚期储层主要是在海进环境中形成的河流-三角洲相砂岩, 储层物性很好, 厚度较大。同生裂谷晚期储层是东南亚地区中分布最广的储

层, 在东南亚大多数盆地都有分布。

后裂谷早期储层主要为早中新世-中中新世大规模海侵发育的海相碳酸盐岩, 储层物性较好且厚度较大。后裂谷早期储层主要分布于印度尼西亚地区的沉积盆地, 发育规模与海侵发生的方向、规模以及年代密切相关。

后裂谷晚期储层主要是在海退环境中形成的河流-三角洲相砂岩、海岸平原相砂岩和海相浊积

砂岩, 储层厚度较大且物性较好, 具有优良的孔隙度和渗透率。后裂谷晚期储层和同生裂谷晚期储层一样分布广, 在东南亚大多数盆地都有分布。

2.3 盖层

东南亚地区盆地中发育了多套层间盖层以及区域性盖层^[29-30], 其中, 层间盖层是在后裂谷晚期多期的海进/海退旋回中发育的海陆过渡相页岩, 区域性盖层是在后裂谷早期发生大规模海侵形成海相页岩。这些层间盖层以及区域性海相页岩盖层对下伏成熟烃源岩生成的油气提供有效封堵。特别是区域性海相页岩盖层, 广泛分布于东南亚地区各盆地, 不仅可以对油气进行有效封堵, 同时阻止了下伏同生裂谷期烃源岩生成的油气运移到上部后裂谷期储层之中, 因此, 可以用来区分同生裂谷期与后裂谷期之间在油气充注、油气运移方式以及生烃能力的差异。

2.4 圈闭

由于东南亚复杂的地球动力学过程以及构造-沉积演化历史, 东南亚地区盆地圈闭类型丰富。在同生裂谷阶段, 由于沉积环境的差异导致沉积相发生变化, 盆地中发育大量地层圈闭如碳酸盐岩隆、生物礁等^[12,31-32]。在后裂谷阶段, 由于印度-澳大利亚板块与欧亚板块发生强烈俯冲碰撞引起的挤压作用, 盆地中形成了大量的构造圈闭如背斜、断层、断背斜、断鼻、裂缝型背斜圈闭等^[12]。

同时, 由于巽他大陆不同区域所受到的构造挤压应力大小不同, 导致形成的主力圈闭类型也有所不同。与巽他大陆南部的盆地相比, 巽他大陆北部的盆地受到的构造挤压应力小, 只经历了轻微的构造反转, 因此, 巽他大陆北部盆地的圈闭类型多以断鼻、披覆背斜为主; 而巽他大陆南部的盆地由于遭受更强烈的构造挤压应力, 构造反转更为明显, 圈闭类型以挤压背斜为主^[21,29]。

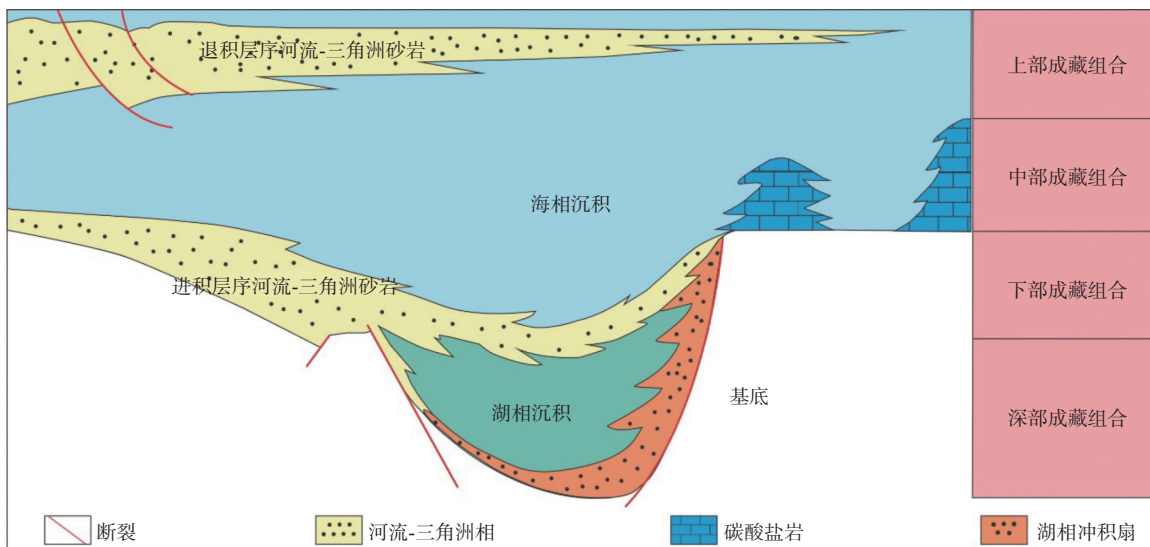
3 裂谷作用对油气成藏组合的控制

成藏组合是指在相似地质背景条件下某一地层内发育的一组远景圈闭或油气藏, 这些远景圈闭或油气藏在油气成藏条件、成藏要素以及成藏特征具有一致性^[33-37]。本文根据裂谷作用阶段以及相应的储层岩相、时代, 把东南亚盆地的成藏组合由下到上划分为4套: 深部成藏组合(同生裂谷早期成藏组合)、下部成藏组合(同生裂谷晚期成藏组合)、中部成藏组合(后裂谷早期成藏组合)和上部成藏组合(后裂谷晚期成藏组合)(图5)。

(1) 深部成藏组合

对应于同生裂谷早期形成的成藏组合, 太平洋板块和印度-澳大利亚板块俯冲于欧亚之下(B型俯冲), 地壳开始伸展裂陷, 盆地中开始形成地堑-半地堑结构形态, 此时盆地中主要充填冲积扇相、湖相到三角洲相的沉积物。

该成藏组合烃源岩为同生裂谷早期湖相泥页



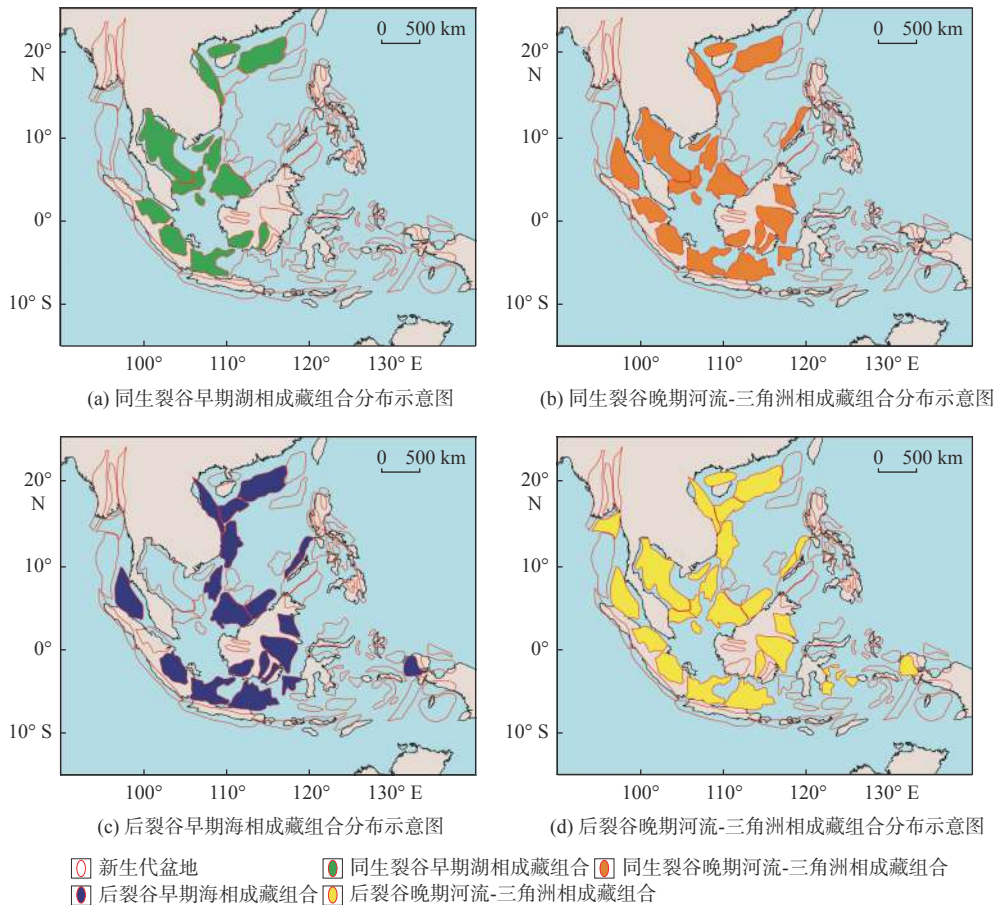
修改自文献 [22]

图5 东南亚地区成藏组合模式

Fig.5 Model of hydrocarbon plays in Southeast Asia

岩, 储层包括同生裂谷早期湖相冲积扇、湖相-三角洲相砂岩、湖相浊积砂岩、火山碎屑岩及前裂谷裂隙基底 5 种储层, 盖层为海陆过渡相泥页岩。油气成藏组合模式为“下生-上储-侧变式”, 下部烃源岩生成的油气直接侧向充注于上部储层形成油气藏^[10,12](图 5)。同生裂谷早期成藏组合以轻质油为主, 油质低蜡、低硫, 姥鲛烷比值 < 3, 属于非海相烃

源岩原油, 主要分布于泰国湾、马来西亚、印度尼西亚地区的盆地(图 6)。以湄公盆地的白虎油田为例, 烃源岩为同生裂谷早期湖相泥岩和煤质泥岩, 储层为同生裂谷早期前裂谷裂隙基底, 盖层以层间盖层为主, 油气通过断裂向上运移到储层中, 目前已累计产油约 1.9×10^9 t, 是湄公盆地产量最大、最重要的油田^[38]。



修改自文献 [20]

图 6 东南亚地区成藏组合分布示意图

Fig.6 Distributions of hydrocarbon plays in Southeast Asia

(2) 下部成藏组合

对应于同生裂谷晚期形成的成藏组合, 太平洋板块和印度-澳大利亚板块在 NWW 向以及 N 向分别与欧亚板块发生硬碰撞(A 型俯冲), 巽他大陆的盆地广泛发生裂谷作用, 盆地主要为河流-三角洲相到浅海相砂泥岩沉积。

该成藏组合烃源岩为同生裂谷晚期河流-三角洲相泥页岩和煤, 储层为同生裂谷晚期海进环境中形成的河流-三角洲相砂岩, 盖层包括层间盖层以及区域性盖层。成藏组合模式为“自生-自储-透镜体”, 油气向邻近的河流-三角洲相砂岩直接充注形

成油气藏^[10,12](图 5)。同生裂谷晚期成藏组合既能生油也能生气, 油质轻质, 低蜡、低硫, 姥鲛烷比值 > 3, 显示很强的陆源植物属性。同生裂谷晚期成藏组合是东南亚地区分布最广的成藏组合, 在东南亚大多数盆地都有分布(图 6)。以中苏门答腊盆地米纳斯油田为例, 烃源岩为同生裂谷早期富含藻类有机质的湖相泥页岩以及同生裂谷晚期河流-三角洲相泥页岩和煤, 储层为同生裂谷晚期河流-三角洲相砂岩, 盖层为海侵时期发育的区域性海相页岩, 油气通过断裂和不整合面进行横向运移, 并在后裂谷期形成的构造圈闭中聚集成藏^[10-11]。米纳斯油

田是东南亚地区目前已发现的最大油田,油气可采储量达 $7.07 \times 10^8 \text{ t}$ [39-42]。

(3) 中部成藏组合

对应于后裂谷早期形成的成藏组合,此时盆地中构造活动急剧减弱,盆地以构造热沉降和拗陷作用为主,后期发生的大规模海侵作用,盆地中主要以海相泥页岩沉积为主,在构造凸起部位发育碳酸盐岩沉积。

该成藏组合烃源岩主要为后生裂谷早期海相泥页岩,储层为后生裂谷早期大规模海侵发育的海相碳酸盐岩;盖层为后裂谷早期大规模海侵时期发育的区域性海相页岩盖层,以及后裂谷晚期多次的海进/海退旋回中发育的海陆过渡相层间页岩盖层。成藏组合模式为“下生-上储-生物礁滩体”(图5),下部烃源岩生成的油气向上运移到生物礁圈闭中聚集而成藏。后裂谷早期成藏组合以生气为主,主要分布于东印度尼西亚以及菲律宾地区的盆地(图6)。以北苏门答腊盆地的阿隆气田为例[10],烃源岩为同生裂谷晚期海陆过渡相泥页岩和煤以及后裂谷早期海相泥页岩,储层为后裂谷早期卑图组和贝卢美组碳酸盐岩,该储层物性优良,富含天然气,可采油气储量达 $3.879 \times 10^8 \text{ m}^3$,是北苏门答腊盆地最大的气田[42-43]。

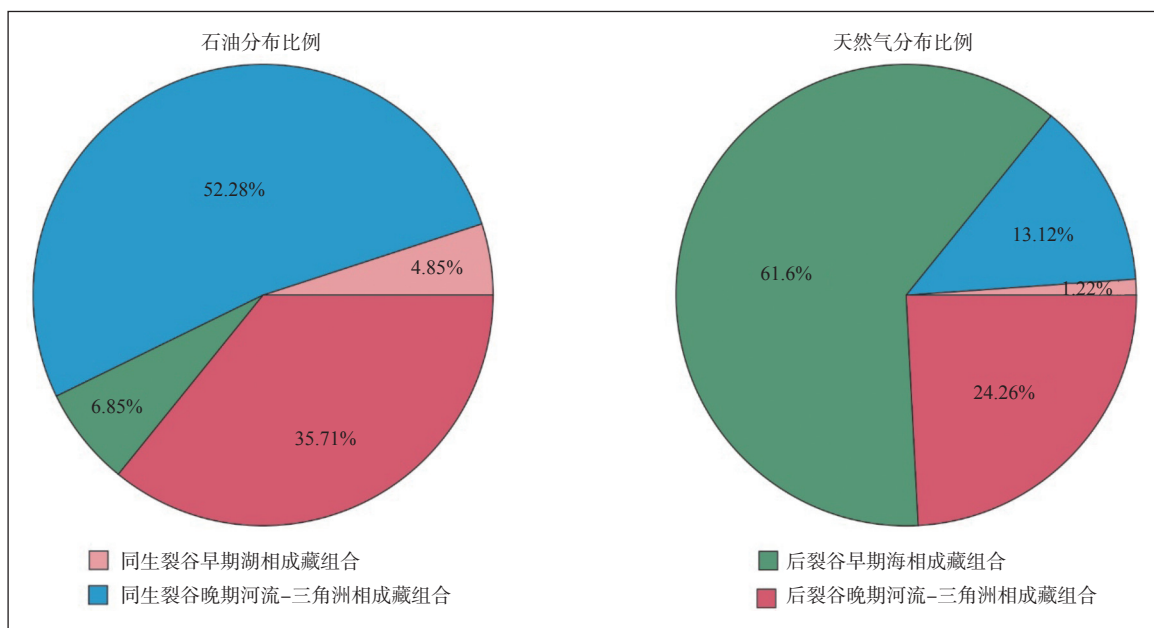
(4) 上部成藏组合

对应于后裂谷晚期形成的成藏组合,中中新世以来,由于印度-澳大利亚板块与欧亚板块以及太平

洋板块与欧亚板块发生强烈碰撞,挤压作用开始成为主导盆地构造演化的主要因素。由于板块间的碰撞引起地壳隆起造山,伴随着海退[44],对隆起地形发生的侵蚀作用,导致盆地中以滨浅海相、河流-三角洲相砂泥岩沉积为主。

该成藏组合烃源岩为后裂谷晚期河流-三角洲相泥页岩和煤,储层为后裂谷晚期海退环境中形成的河流-三角洲相砂岩、海岸平原相砂岩和海相浊积砂岩,海陆过渡相页岩作为有效盖层。油气成藏模式为“下生-上储-断背斜”,下部烃源岩生成的油气通过断裂体系或不整合面运移到上部储层,并在遭受挤压作用形成的构造圈闭中聚集形成油气藏(图5)。后裂谷晚期成藏组合既能生油也能生气,与同生裂谷晚期成藏组合一样广泛分布于东南亚地区各盆地(图6)。在南海南部的文莱-沙巴盆地、万安盆地以及曾母盆地发现了多个以后裂谷晚期成藏组合为主的油气田[44-49]。以文莱-沙巴盆地 Ampa Southwest 油气田为例,烃源岩为同生裂谷晚期海陆过渡相煤系泥岩,储层为后裂谷晚期河流-三角洲相砂岩,该类砂体规模达且连续性较好,以海相页岩作为有效盖层,圈闭以构造圈闭为主。Ampa Southwest 油气田是南海南部已发现的特大型油气田,原油可采储量 $1.8 \times 10^8 \text{ t}$,天然气可采储量 $3.600 \times 10^{12} \text{ m}^3$ [46-47]。

对位于东南亚地区 25 个盆地的 1 007 个油气藏的统计分析(图7)[20]结果表明:同生裂谷早期湖



数据来自文献 [20]

图7 东南亚地区不同油气成藏组合已发现石油和天然气的分布比例

Fig.7 Distribution proportion of discovered oil and natural gas in different hydrocarbon plays in Southeast Asia

相成藏组合发现油气藏 62 个,石油和天然气最终可采储量分别为 0.3×10^9 BBL 和 0.1×10^{12} SCF,分别占已发现石油和天然气总储量的 4.85% 和 1.22%; 同生裂谷晚期河流-三角洲相成藏组合发现油气藏超过 470 个,是发现油气藏数量最多的油气成藏组合,石油和天然气最终可采储量分别为 2.9×10^9 BBL 和 1.4×10^{12} SCF,分别占已发现石油和天然气总储量的 52.28% 和 13.12%; 后裂谷早期海相成藏组合发现 169 个油气藏,石油和天然气最终可采储量分别为 0.4×10^9 BBL 和 6.6×10^{12} SCF,分别占已发现石油和天然气总储量的 6.85% 和 61.6%; 后裂谷晚期河流-三角洲相成藏组合发现超过 306 个油气藏,石油和天然气最终可采储量分别为 2.0×10^9 BBL 和 2.6×10^{12} SCF,分别占已发现石油和天然气总储量的 35.71% 和 24.26%。

油气资源是油气勘探的基础,因此,如何精确、有效地去评价油气资源储量就显得尤为重要。发现过程法是国际上非常常用的统计类油气资源评价方法,它是已发现的油气藏为基础,运用概率统计方法去对评价单元的油气资源储量进行预测,适用于勘探程度相对较高的评价单元^[50-51]。运用发现过程法对东南亚油气成藏组合待发现资源量进行预测,认为后裂谷早期海相成藏组合未来勘探潜力最大。

4 结论

新生代以来东南亚盆地发生了广泛的裂谷作用,盆地构造-沉积演化经历了同生裂谷早期、同生裂谷晚期、后裂谷早期和后裂谷晚期 4 个裂谷作用阶段。根据裂谷作用阶段和在相应裂谷作用阶段形成的储层类型,将东南亚盆地油气成藏组合划分为 4 套:深部成藏组合、下部成藏组合、中部成藏组合和上部组合。其中,深部成藏组合发育同生裂谷早期湖相浊积砂岩、湖相冲积扇储层;下部成藏组合发育同生裂谷晚期海进时期河流-三角洲砂岩储层;中部成藏组合发育后裂谷早期海相碳酸盐岩储层;上部成藏组合发育后裂谷晚期海退时期河流-三角洲砂岩储层。在这些油气成藏组合中,中部成藏组合发育的后裂谷早期海相碳酸盐岩储层勘探潜力最大。本文的研究成果不仅指导东南亚地区的油气勘探,同时对其他地区含油气盆地的研究具有重要的参考价值和指导意义。

参考文献:

- [1] 王雪峰,李林,王国雨,等.南海深水盆地油气地质特征及勘探方向[J].海洋地质前沿,2021,37(1):1-10.
- [2] 姚哲,金锋,朱继田,等.琼东南盆地深水区天然气水合物运聚成藏模式[J].海洋地质前沿,2021,37(7):22-32.
- [3] 肖国林,董贺平,杨长清,等.我国近海非常规油气资源勘探态势及其地质有利性[J].海洋地质前沿,2020,36(7):73-76.
- [4] 吴西顺,孙张涛,杨添天,等.全球非常规油气勘探开发进展及资源潜力[J].海洋地质前沿,2020,36(4):1-17.
- [5] 王建强,赵青芳,梁杰,等.海上丝绸之路沿线深水油气资源勘探方向[J].地质通报,2021,40(Z1):219-232.
- [6] 陈建文,梁杰,张银国,等.中国海域油气资源潜力分析与黄东海海域油气资源调查进展[J].海洋地质与第四纪地质,2019,39(6):1-29.
- [7] 张帅,朱雄关.东南亚油气资源开发现状及中国与东盟油气合作前景[J].国际石油经济,2017,25(7):13.
- [8] 宋鹏.琼东南盆地深水区浅层运聚系统及其对天然气水合物成藏的控制[J].海洋地质前沿,2021,37(7):11-21.
- [9] 杨福忠,洪国良,祝厚勤,等.东南亚地区成藏组合特征及勘探潜力[J].地学前缘,2014,21(3):112-117.
- [10] 陈龙博,何登发.苏门答腊弧后盆地裂谷作用对油气成藏组合的控制[J].海相油气地质,2015,20(2):8-14.
- [11] 姚永坚,吕彩丽,康永尚,等.东南亚地区烃源岩特征与主控因素[J].地球科学:中国地质大学学报,2013,38(2):367-378.
- [12] DOUST H. Petroleum systems in Southeast Asian Tertiary basins[J]. Bulletin of the Geological Society of Malaysia, 2017, 64: 1-16.
- [13] 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.
- [14] YATHEESH V, DYMENT J, BHATTACHARYA G C, et al. Deciphering detailed plate kinematics of the Indian Ocean and developing a unified model for East Gondwanaland reconstruction: an Indian-Australian-French initiative[N]. DCS-DST NEWS, 2013-01.
- [15] LONGLEY I M. The tectono-stratigraphic evolution of SE Asia[M]//Fraser A J, Matthews S J, Murphy R W. Petroleum Geology of Southeast Asia. London: Geological Society of London Special Publication, 1997: 311-339.
- [16] LUO Y, ZHAO L F, GE Z X, et al. Crustal Lg-wave attenuation in Southeast Asia and its implications for regional tectonic evolution[J]. Geophysical Journal International, 2021(3): 3.
- [17] ADVOKAAT E L, MARSHALL N T, LI S H, et al. Cenozoic rotation history of Borneo and Sundaland, SE Asia revealed by paleomagnetism, seismic tomography, and kinematic reconstruction[J]. Tectonics, 2018, 37(8): 2486-2512.
- [18] TAPPONIER P, PELTZER G, ARMIJO R. On the mechanics of the collision between India and Asia[M]//COWARD M P, REIS A C. Collision Tectonics: Geological Society. London: Special Publications, 1986: 19, 115-157.

- [19] REPLUMAZ A, NEGREDO A M, GUILLOT S, et al. Multiple episodes of continental subduction during India/Asia convergence: insight from seismic tomography and tectonic reconstruction[J]. *Tectonophysics*, 2010, 483(1/2): 125-134.
- [20] DOUST H, SUMNER H S. Petroleum systems in rift basins : a collective approach in Southeast Asian Tertiary basins[J]. *Petroleum Geoscience*, 2007, 13(2): 127-144.
- [21] DOUST H, NOBLE R A. Petroleum systems of Indonesia[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 25: 103-129.
- [22] DOUST H. Placing petroleum systems and plays in their basin history context: a means to assist in the identification of new opportunities[J]. *First Break*, 2003, 21: 73-83.
- [23] HALL R. Australia-SE Asia collision; plate tectonics and crustal flow[J]. *Geological Society London Special Publications*, 2011, 355(1): 75-109.
- [24] WILLIAMS H H, FOWLER M, EUBANK R T. Characteristics of selected Palaeogene and Cretaceous lacustrine source basins of Southeast Asia[M]//Lambiase J J. *Hydrocarbon Habitat in Rift Basins*; Geological Society. London: Special Publications, 1995: 80: 241-282.
- [25] HALL R. Provenance and basement studies of SE Asia. Asia Petroleum Geoscience Conference and Exhibition[C]//APGCE 2015. Houten; European Association of Geoscientists & Engineers, 2015: 1-5.
- [26] PEPPER A S, CORVI P J. Simple kinetic models of petroleum formation. Part 1: oil and gas generation from kerogen[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1995, 12(3): 291-320.
- [27] TODD S P, DUNN M E, BARWISE A J G. Characterizing petroleum charge systems in the Tertiary of SE Asia[J]. *Petroleum Geology of Southeast Asia*, 1997, 126: 25-47.
- [28] 童晓光. 论成藏组合在勘探评价中的意义[J]. *西南石油大学学报*, 2009, 31(6): 1-8.
- [29] DOUST H. The exploration play: what do we mean by it?[J]. *AAPG Bull.*, 2010, 94(11): 1657-1672.
- [30] 王建强, 梁杰, 陈建文, 等. 中国海域基岩油气藏特征及未来勘探方向[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(6): 151-162.
- [31] WILSON M E J. Cenozoic carbonates in Southeast Asia: Implications for equatorial carbonate development[J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 147(3/4): 295-428.
- [32] WIRJODIHARDJO K. Seismic reef expression in the North Sumatra Basin[J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 21(1): 117-144.
- [33] 童晓光, 李浩武, 肖坤叶, 等. 成藏组合快速分析技术在海外低勘探程度盆地的应用[J]. *石油学报*, 2009, 30(3): 317-323.
- [34] GINGER D, FIELDING K. The petroleum systems and future potential of the South Sumatra Basin[C]//Proceedings of the Thirtieth Annual Convention and Exhibition. Jakarta, Indonesia: IPA, 2005.
- [35] 张永刚, 许卫平, 王国力, 等. 中国东部陆相断陷盆地油气成藏组合体[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006, 50-105.
- [36] 马中振, 陈和平, 谢寅符, 等. 盆地成藏组合划分与资源潜力评价: 以南美谱图马约-奥连特-马拉农盆地为例[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(2): 1-9.
- [37] 谢寅符, 马中振, 刘亚明, 等. 以成藏组合为核心的油气资源评价方法及应用: 以巴西坎波斯(Campos)盆地为例[J]. *地质科技情报*, 2012, 31(2): 45-49.
- [38] 郭佳, 杨树春, 胡文博, 等. 南海西部大陆边缘南段油气形成差异性分析[J]. *海洋地质前沿*, 2021, 37(10): 1-7.
- [39] 杨磊. 中苏门答腊盆地石油地质特征与油气勘探潜力[J]. *新疆石油地质*, 2011, 32(3): 329-331.
- [40] CAUGHEY C, DYER J N J, KOHAR A, et al. Seismic atlas of Indonesian oil & gas Fields (Volumes 1, 2, 3)[M]. Indonesian Petroleum Association, Jakarta. 1995.
- [41] Courteney S, Cockroft R, Phoa R S K, et al. Indonesia Oil and Gas Fields Atlas [M]//Indonesian Petroleum Association (IPA) Professional Division Oil & Gas Fields Atlas Sub-Committee. Jakarta: 1989.
- [42] 黄众, 胡孝林, 郭刚, 等. 苏门答腊裂谷盆地构造分带及其成藏模式[J]. *海洋地质前沿*, 2018, 34(8): 61-67.
- [43] JORDAN C F, ABDULLAH M. Arun Field – Indonesia, North Sumatra Basin, Sumatra[M]//FOSTER N H, BEAUMONT E A. *AAPG Treatise of Petroleum Geology, Stratigraphic Traps III*. 1992: 1 - 39.
- [44] 朱光辉, 谢晓军, 邱春光. 弧后走滑拉张盆地石油地质特征与油气勘探潜力: 以缅甸Andaman海域马达班湾盆地为例[J]. *中国海上油气*, 2010, 22(4): 7.
- [45] 兰蕾, 李友川, 王一博. 南海南部海陆过渡相烃源岩的两类分布模式[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(5): 173-180.
- [46] 张强, 吕福亮, 贺晓苏, 等. 南海成藏组合发育特征及勘探潜力评价[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(6): 158-167.
- [47] 张亚震, 裴健翔, 李俊良, 等. 南海南部海域构造—沉积演化及其对区域成藏组合的控制[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(5): 657-674.
- [48] IHS. IHS Oil & Gas Field, Basin Data[DB/OL]. (2019-08-24).
- [49] 倪仕琪, 王志欣, 宋继叶, 等. 南海西南部西纳土纳盆地油气成藏组合分析与资源潜力评价[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(5): 130-143.
- [50] LEE P J. *Statistical Methods for Estimating Petroleum Resources*[M]. Oxford: Oxford University Press, 2008, 198-256.
- [51] ABLBRANDT T S, KLETT T R. Comparison of methods used to estimate conventional undiscovered petroleum resources: World examples[J]. *National Resources Research*, 2005, 12(3): 187-209.

Control of rifting on hydrocarbon plays in Southeast Asia

CHEN Jianhong¹, XIAO Fei^{2*}, LUAN Xiwu^{2,3}

(1 College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China;

3 Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

Abstract: There are more than 100 Cenozoic sedimentary basins developed in Southeast Asia region, and these basins are undergone widespread rifting. To provide guidelines to hydrocarbon exploration in SE Asia, through analysis of the tectonic-sedimentary evolution of the basins, this research on hydrocarbon elements characteristics of the petroleum plays in the SE Asian basins was conducted, and the control of rifting on petroleum plays was discussed. Results show that the tectonic-sedimentary evolution of the basins in SE Asia undergone the early syn-rifting, the late syn-rifting, the early post-rifting and the late post-rifting. According to the rifting stages and reservoir lithofacies, the hydrocarbon plays of basins in SE Asia can be grouped into four different assemblages, i.e., the deeper, the lower, the middle, and upper ones. The deeper plays feature in the early syn-rifting lacustrine turbidites and alluvial fans reservoirs; the lower plays feature in the late syn-rifting transgressive fluvial-deltaic sandstone reservoir; the middle plays feature in the early post-rifting carbonate reservoir; and the upper plays feature in the late post-rifting regressive fluvial-deltaic sandstone reservoir. Among them, the middle plays develop the early post-rifting carbonate reservoir has the most promising exploration potential.

Key words: rifting; hydrocarbon play; petroleum exploration; tectonic evolution; Southeast Asia