

苏门答腊裂谷盆地构造分带及其成藏模式

黄 众,胡孝林,郭 刚,苗顺德,郭志峰,张 璐

(中海油研究总院,北京 100028)

摘 要:苏门答腊弧后裂谷盆地是印尼乃至东南亚最大的油气产区,由于勘探程度高,近十年来勘探成效差,盆地油气发现进入瓶颈期。为了指明苏门答腊弧后裂谷盆地勘探方向,以盆地构造演化为主线,以构造带为研究对象,在构造特征、构造对成藏模式控制作用等多方面研究的基础上,预测了苏门答腊盆地有利勘探领域。根据构造特征分析,苏门答腊弧后裂谷盆地可划分为近岛弧带、中央反转带和远岛弧带 3 个构造带。近岛弧带以继承性隆起为构造特征,油气主要通过断裂垂向运移,聚集在局部构造高部位生物礁和背斜之中,近岛弧带为旁生侧储型成藏模式,基底潜山圈闭是近岛弧带未来的勘探方向;中央反转带构造样式为挤压反转的半地堑、铲式正断层,中央反转带油气来自底部深凹陷,上部多层系做储层,垂向断层或侧向砂体发育,沟通烃源岩与圈闭,具有近水楼台的优势成藏条件,为下生上储型成藏模式,该带基底潜山圈闭和源内构造—岩性圈闭也具有较好的烃—运—储匹配关系,可能形成好的油气藏;远岛弧带以单斜构造背景为主,局部发育深洼陷,远岛弧带局部洼陷具有一定的生烃能力,该构造带钻井揭示了地层超覆油气藏,但目前勘探程度较低,尚存在较大勘探潜力。

关键词:苏门答腊岛;弧后裂谷盆地;构造特征;成藏模式;有利勘探方向

中图分类号:TE122.3⁺21

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2018.08008

1 前言

苏门答腊弧后裂谷盆地(简称苏门答腊盆地)处于印度尼西亚(以下简称印尼)西部,总面积为 $41 \times 10^4 \text{ km}^2$,整体呈弧形发育于巽它克拉通之上,主要包括北苏门答腊、中苏门答腊、南苏门答腊等 3 个盆地,这些盆地大部分自陆上岛屿向北部

海上延伸,盆地之间以构造隆起相隔(图 1)。

苏门答腊盆地是印尼最大的油气富集区,在该盆地发现了一批巨型油气田,包括米纳斯、杜里 2 个世界级特大油田。根据 IHS 数据库最新统计数据,苏门答腊盆地累计石油可采储量 175 亿桶(bbl),天然气可采储量 85TCF。目前北苏门答腊盆地探井 862 口,油气田 99 个,石油可采储量为 7.3 亿桶,天然气可采储量为 22.5TCF;中苏门答腊盆地探井 859 口,油气田 237 个,石油可采储量为 135.9 亿桶,天然气可采储量为 35.8TCF;南苏门答腊盆地探井 1243 口,油气田 322 个,石油可采储量为 32 亿桶,天然气可采储量为 26.8TCF。此外,盆地带剩余资源量较大,据美国地质勘探局数据统计,苏门答腊盆地

收稿日期:2018-03-02

基金项目:国家科技重大专项“海外重点区勘探开发关键技术”(2017ZX05032)

作者简介:黄 众(1989—),男,工程师,主要从事层序地层学、盆地沉积学及储层预测方向的研究工作。E-mail: huang-zhong5@cnooc.com.cn

带石油待发现资源量可达 9.5 亿桶,天然气待发现资源量 21.1 TCF,该盆地带仍然具有较大的勘探潜力。

虽然苏门答腊盆地带待发现资源量可观,但由于勘探程度高,盆地带近十年勘探成效差,盆地油气发现进入了瓶颈期,为了指明苏门答腊弧后裂谷盆地带勘探方向,通过构造特征、构造对成藏模式的控制作用等几方面研究,将苏门答腊盆地带进行构造分带,进而分析不同构造带油气成藏特征,最终预测苏门答腊盆地带的勘探方向。

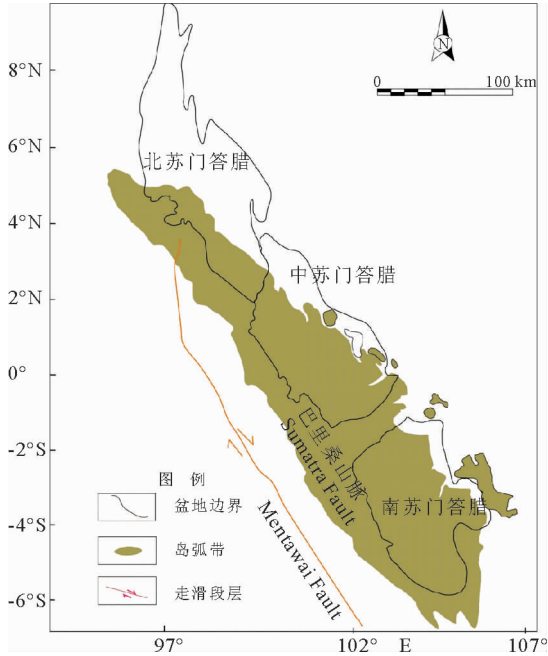


图 1 苏门答腊裂谷盆地带区域位置
Fig.1 Location map of Sumatra rift basin

2 构造带划分及其构造特征

通过对每个盆地内结构的分析以及对盆地重点剖面的结构特征对比,将整个苏门答腊盆地带划分为近岛弧带、中央反转带和远岛弧带 3 个构造带(图 2)。

近岛弧带处于盆地带西南侧或南侧,紧邻苏门答腊走滑带及南部隆起区。该带在继承性隆起上发育,地层分布相对较薄,早期地层不发育,或者仅在局部小凹陷内分布,受南部印度洋板块持续俯冲作用影响,近岛弧带不断隆升,晚期地层遭受严重剥蚀,基底埋藏也较浅。

中央反转带为盆地带中央深凹陷分布区,范围广、面积大,呈下拗上隆特征。该带是苏门答腊

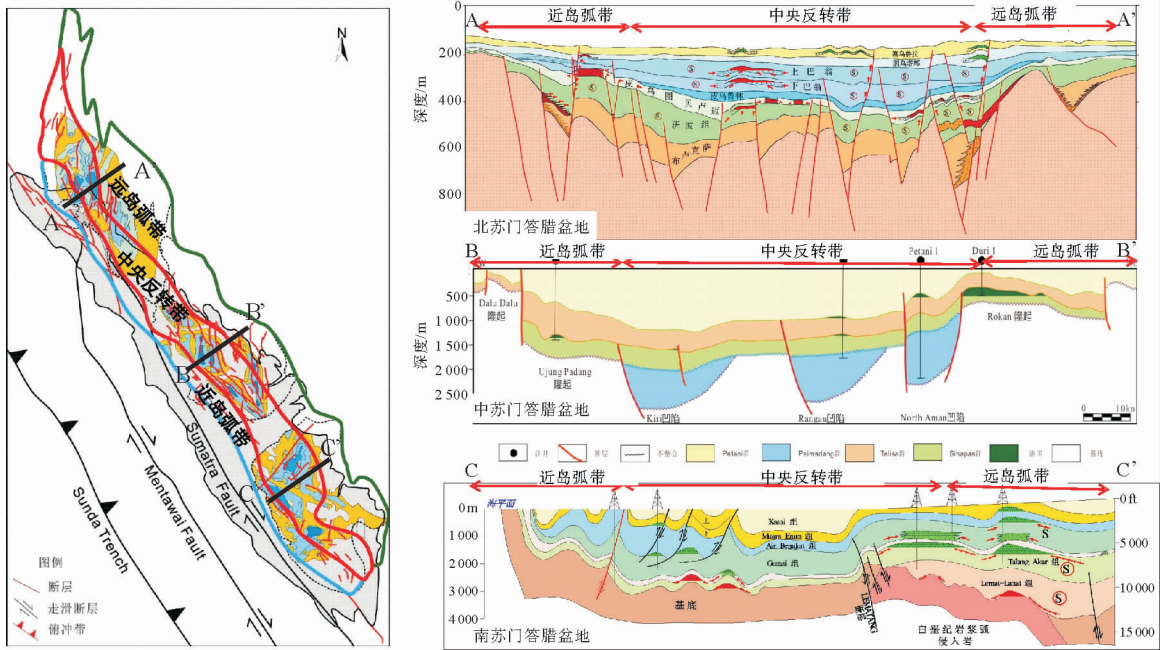


图 2 苏门答腊弧后裂谷盆地带构造分带图
Fig.2 Tectonic map of Sumatra Arc back-rift basin

盆地内勘探活动最多、油气发现储量规模最大的构造带。受断陷期控凹断层控制,中央反转带早期沉积了较厚的地层,发育优质烃源岩,烃源岩上覆发育多套不同类型的储层,晚期受碰撞挤压影响,发生强烈反转及褶皱作用,加上大量沟通油源的断层,将油气运移至浅层成藏。

远岛弧带位于盆地东北侧或北侧,该带基底为继承性发育的单斜,地层由南向北逐渐上超在单斜基底之上。局部地区由于基底断层活动,形成了深洼陷^[8]

3 构造带对成藏模式的控制

3.1 近岛弧带油气成藏模式

其油气生成于中央反转带凹陷之中,以长距离垂向运移为主,为旁生侧储型成藏模式。

近岛弧带主要以断层伴生的继承性古隆起为主要构造样式。该构造带由于后期抬升剥蚀作用,浅部地层受到强烈剥蚀,浅层不利于油气成藏。烃源岩方面,近岛弧带临近中央反转带的陡坡,油气主要依靠中央反转带侧向供给;圈闭方面,主要在继承性古隆起背斜聚集成藏,而基底潜山目前油气发现较少。由于近岛弧带油气藏通常紧邻继承性隆起,发育于深大断裂之上,断裂可以沟通中央反转带凹陷烃源灶,油气通过断裂垂向运移,圈闭主要为与局部构造高相关的生物礁和背斜,成藏条件优越。同时,该带基底潜山圈闭也具有较好的烃—运—储匹配关系,可能形成好的油气藏。

通过对近岛弧带内各种油气藏类型及其已发现可采储量的统计,可以发现共有5种油气藏类型:生物礁、构造、构造—岩性、基底潜山和地层超覆油气藏,其中,生物礁油气藏储量规模最大,占总可采储量的70%以上。以北苏门答腊盆地近岛弧带 Arun 气田为例,该气田沉积于基底古隆起之上,于1977年3月开始生产,总的天然气可采储量为17 TCF,凝析油为800 MMbbl。烃源岩为上渐新统 Bampo 组陆源海相泥岩,储层为下中新统 Peutu 组生物礁灰岩,垂向控凹大断层沟通烃源岩与圈闭,将生成的天然气侧向运移至碳酸盐岩建隆中成藏^[14,15](图3)。

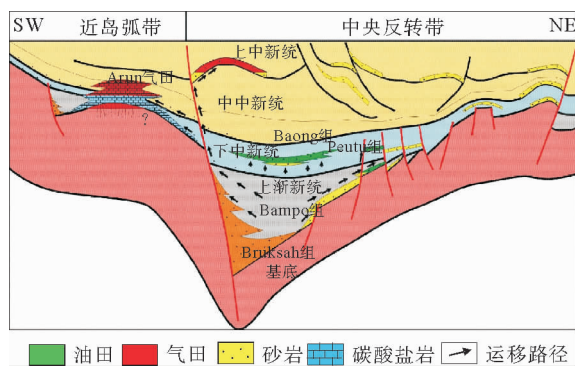


图3 近岛弧带和中央反转带成藏模式

Fig. 3 Hydrocarbon accumulation model of near island arc belt and central inversion belt

3.2 中央反转带油气成藏模式

其油气生成于中央反转带凹陷之中,以垂向运移及短距离侧向运移为主,为下生上储型成藏模式。

中央反转带构造样式在裂陷期为半地堑、铲式正断层,反转期为逆冲背斜。中央反转带为弧后裂谷盆地主要烃源岩发育区,具有较好的烃源岩条件;晚中新世时期,由于印度洋板块与欧亚板块的斜向俯冲碰撞加剧,早期形成的NW、NE向拉张断层活化逆冲,为油气垂向运移提供了有利的垂向运移通道;与逆冲断层同时期形成的一系列以褶皱为主的挤压构造,为油气的聚集提供了有利的场所。因此,中央反转带同时具备了一系列油气聚集的有利条件,早期凹陷与晚期逆冲背斜圈闭的构造样式组合,使得油气以中中新统和上上新统成藏为主,例如中苏门答腊盆地源上成藏组合以下一中中新统河流—三角洲砂岩为主要储层,上中新统 Telisa 组海相页岩为区域性盖层,发现油气储量113亿桶,占盆地油气储量74%^[16]。除了源上层系之外,中央反转带的源内层系和源下层系均有发现,并且主要集中在南苏门答腊盆地,而中苏门答腊盆地和北苏门答腊盆地发现较少。

通过对中央反转带内各种油气藏类型及其已发现可采储量的统计,可以发现也发育5种油气藏类型:生物礁、构造、构造—岩性、基底潜山和地层超覆油气藏,其中,构造油气藏储量规模最大,占总可采储量的50%以上。

中央反转带油气藏通常是底部深凹陷供烃,上部多层系做储层,垂向断层或侧向砂体发育,以垂向运移及短距离侧向运移为主,沟通烃源岩与圈闭,主要为下生上储型成藏模式(图3)。同时,该带基底潜山圈闭和源内构造—岩性圈闭也具有较好的烃—运—储匹配关系,可能形成好的油气藏。

中央反转带成藏模式以北苏门答腊盆地中央反转带 Rantau 油田为例,该油田位于盆地南部 Tamiang 深凹陷,发现于 1929 年,圈闭类型为挤压反转背斜。Rantau 油田位于深凹陷之上,晚期挤压导致凹陷上隆形成背斜,且垂向断层发育,将深层油气直接运移至浅层成藏^[17](图3)。

3.3 远岛弧带油气成藏模式

其油气生成于远岛弧带斜坡带深洼发育区,以中—远距离侧向运移为主,为旁生侧储型成藏模式。

远岛弧带以单斜构造背景为主,局部可见洼陷发育。该构造带由于整体埋深较浅,远离中央反转带主要烃源岩,往往烃源岩条件不利。但是,

由于该构造带局部深洼陷的存在,使得远岛弧带局部地区具有一定的生烃能力,例如北苏门答腊盆地 NSO A 气田主要依靠斜坡带深残洼近源成藏。此外在该区钻井揭示了地层超覆油气藏,但目前勘探程度较低,尚存在较大勘探潜力^[18]。

远岛弧带发育生物礁、构造、构造—岩性、基底潜山和地层超覆 5 类油气藏,其中,构造油气藏储量规模最大,约占总可采储量的 70%,生物礁油气藏次之,约占 20% 的储量^[19]。这类油气藏通常发育于单斜背景或局部的基底高之上,烃源岩来自斜坡带的深洼陷,油气运移以不整合面、砂体侧向远距离运聚为主,为旁生侧储型成藏模式。地层超覆油气藏已证实,但整体勘探程度仍较低,具一定的勘探空间。

以北苏门答腊盆地远岛弧带 NSO A 气田为例,该气田发现于 1972 年,总的天然气可采储量为 1.5 TCF。烃源岩为中新统 Baong 组陆源海相泥岩,储层为下中新统 Peutu 组生物礁灰岩,通过不整合面、砂体将生成的天然气侧向运移至碳酸盐岩建隆中成藏^[20](图4)。

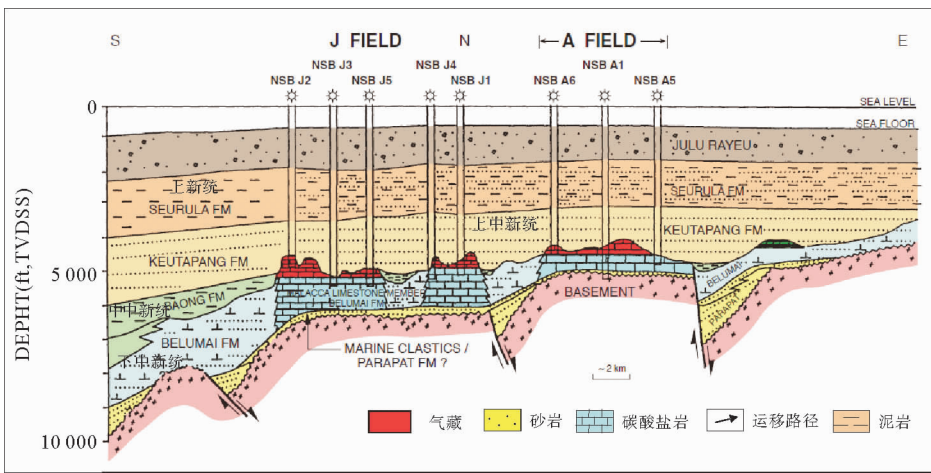


图4 远岛弧带成藏模式

Fig. 4 Hydrocarbon accumulation model of distant island arc belt

4 苏门答腊弧后裂谷盆地带勘探方向

4.1 近岛弧带勘探新领域

剪切应力集中作用的靠近烃源岩的潜山带是

近岛弧带勘探新领域。

近岛弧带油气藏主要依靠临近的中央反转带内的烃源岩供烃,目前该区域基底潜山油气藏已经有少量发现,属于已证实的油气藏类型。基底潜山圈闭成藏主控因素之中,除了烃源岩外,主要受控于储集空间类型。钻井揭示,基底潜山的储集空间以构造裂缝为主,与区域剪切应力区相

关。苏门答腊断裂带附近的区域受断裂带走滑运动影响较强,处于剪切应力集中区,具有潜山油气藏成藏条件,是近岛弧带勘探新领域。

4.2 中央反转带勘探新领域

构造一岩性尖灭组合带和剪切应力集中的潜山带是中央反转带勘探新领域。

中央反转带是苏门答腊弧后裂谷盆地油田勘探生产主要区域,勘探程度相对较高。而从勘探层系与勘探圈闭类型方面,目前尚存两个关注度相对较低的勘探对象,分别为源内构造一岩性圈闭及剪切应力集中的潜山带。

构造一岩性油气藏已发现油气田较少,长期以来不为人们所重视,但在南苏门答腊盆地已有该类型油气藏发现,例如发现于1931年的Limau Niru油田,该油田位于盆地中部偏南古基底高的位置,为典型的构造一岩性圈闭,储层为上渐新统Talang Akar组,孔隙度平均19%,可采储量为71 MMboe。从连井剖面上来看,Talang Akar组内部砂岩夹层向NE方向翘倾,部分砂岩层尖灭,形成岩性圈闭,同时部分砂岩层被断层切割并形成断层侧向封堵的岩性圈闭^[21]。多口钻井在断层尖灭端附近钻遇砂岩夹层,且均获得油气发现。构造一岩性油气藏勘探的难点在于寻找有利储集层的岩性尖灭带。通过对南苏门答腊盆地Talang Akar组岩相古地理特征的仔细研究,发现Talang Akar组上、下段砂岩尖灭的特征具有一定的规律性,Talang Akar组下段砂岩尖灭带主要集中于盆地中西部中巴林旁次盆,而Talang Akar组上段砂岩尖灭带也主要集中在盆地中西部。根据以上砂岩尖灭带的位置,再结合古基底高的构造背景,同时考虑烃源岩对油气藏分布的控制作用,最终在南苏门答腊盆地筛选出3个构造一岩性油气藏有利区带。这些有利区带主要集中在盆地中部,都位于上渐新统煤系烃源岩发育的有利区,且烃源岩已成熟,附近已有油气发现,主要发育上渐新统储盖组合。

中央反转带基底油气藏勘探已在南苏门答腊盆地初见成效。通过对南苏门答腊盆地源下基底潜山油气藏研究发现,该类型成藏模式具有以下普遍规律:基底潜山油气成藏受烃源岩控制,分布于烃源岩有效供给范围之内,下渐新统Lahat组

和上渐新统一下中新统Talang Akar组两套主力烃源岩生成的油气沿不整合面或断层向上运移,达到基底构造高部位并进入基底裂缝或古风化壳溶蚀孔洞等各种形式的储集空间,最终形成油气藏。中央反转带内有着类似的基底组成、构造演化特征和断裂系统,因此在整个构造带具有较大的勘探潜力。

4.3 远岛弧带勘探新领域

临近深洼陷的超覆带是远岛弧带勘探新领域。

远岛弧带油气勘探起步相对较晚,目前发现的油气藏类型主要是背斜构造油气藏、生物礁油气藏以及地层超覆油气藏,其中背斜构造油气藏和生物礁油气藏为该构造带主要的勘探研究对象,勘探程度较高,剩余勘探潜力较小,而地层超覆圈闭研究程度较低,油气发现相对较少。对于地层超覆圈闭勘探主要是围绕着近中央反转带烃源岩的地层超覆带进行钻探,例如发现于1951年的ABAB油田,该油田位于南苏门答腊盆地中部近源地层超覆带位置,圈闭类型为微幅地层超覆^[22],储层为上渐新统Talang Akar组,孔隙度平均25%,可采储量为80 MMboe。在远岛弧带发育的深洼陷/深残洼可作为该构造带的烃源灶进行供烃,而临近这些深洼陷的地层超覆带关注度很低^[23]。

临近深残洼的超覆带具有较好的烃源岩条件以及地层超覆圈闭背景,勘探程度低,是远岛弧带勘探新领域。

5 结论

(1)根据区域构造演化及构造样式,将苏门答腊弧后裂谷盆地划分为近岛弧带、中央反转带、远岛弧带3个构造带。

(2)结合构造带构造样式对油气成藏的控制作用,总结出3个构造带的油气成藏模式。近岛弧带为旁生侧储型成藏模式,油气生成于中央反转带凹陷之中,以长距离垂向运移为主;中央反转带为下生上储型成藏模式,油气生成于中央反转带凹陷之中,以垂向运移及短距离侧向运移为主;远岛弧带为旁生侧储型成藏模式,油气生成于远

岛弧带斜坡带深洼发育区,以中—远距离侧向运移为主。

(3)通过苏门答腊裂谷盆地不同构造带油气成藏主控因素的类比分析,创新性提出了3个勘探新领域。即“剪切应力集中的靠近烃源岩的潜山带是近岛弧带勘探新领域;构造—岩性尖灭组合带和剪切应力集中的潜山带是中央反转带勘探新领域;临近深洼陷的超覆带是远岛弧带勘探新领域”。

参考文献:

- [1] Sosrowidjojo I B, Saghafi A. Development of the first coal seam gas exploration program in Indonesia: Reservoir properties of the Muaraenim Formation, south Sumatra[J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 79(4): 145-156.
- [2] Barber A J, Crow M J. An evaluation of plate tectonic models for the development of Sumatra[J]. Gondwana Research, 2003, 6(1): 1-28.
- [3] 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.
- [4] Awang H S. Petroleum Geology of Indonesia: Sumatra [M]. Indonesia: Hmpunan Ahli Geofisika, 2012: 231-244.
- [5] Harold H W, Roger T E. Hydrocarbon habitat in the rift graben of the Central Sumatra Basin, Indonesia[J]. The Leading Edge, 1995, 80(1): 331-371.
- [6] Sigit S. Application of multi-attribute analysis in mapping lithology and porosity in the Pematang-Sihapas groups of Central Sumatra Basin, Indonesia[J]. The Leading Edge, 2007, 18(8): 126-131.
- [7] Barber A J. The origin of the Woyla Terranes in Sumatra and the late mesozoic evolution of the Sundaland margin [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2000, 18(6): 713-738.
- [8] Zonneveld J P, Zaim Y, Rizal Y, et al. Ichnological constraints on the depositional environment of the Sawahlunto Formation, Kandi, northwest Ombilin Basin, west Sumatra, Indonesia[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 45(45): 106-113.
- [9] Macpherson K A, Hidayat D, Siang H G. Receiver function structure beneath four seismic stations in the Sumatra region [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 46(46): 161-176.
- [10] 许凡, 康永尚, 李水静, 等. 中苏门答腊盆地油气成藏分析与勘探潜力预测[J]. 特种油气藏, 2010, 17(1): 41-48.
- [11] 董国栋, 张琴, 朱筱敏, 等. 中苏门答腊盆地新生代沉积演化及其油气意义[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2013, 15(3): 5-8.
- [12] Steve J M, Andy C. Thermal histories of Tertiary sediments in western Central Sumatra, Indonesia[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 14(5): 351-371.
- [13] 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.
- [14] Agusetiawan G, Nugraha R, Hernadi D, et al. Beruk field reservoir in Central Sumatra Basin, Indonesia [J]. Saint Petersburg, 2014, 68(51): 113-141.
- [15] 毛治国, 樊天亮, 王宏语, 等. 层序地层格架下岩性—地层油气藏成藏与分布——以南苏门答腊盆地北部为例[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(1): 120-127.
- [16] 丁一. 断裂在中苏门答腊盆地油气成藏中的作用[J]. 石油化工应用, 2013, 32(5): 67-71.
- [17] 赵毅, 唐艳萍. 井—震结合进行高分辨率层序地层划分——以南苏门答腊盆地 N 油田 U 组为例[J]. 海洋石油, 2011, 31(4): 24-28.
- [18] 薛良清, 杨福忠. 南苏门答腊盆地中国石油合同区块成藏组合分析[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(3): 130-134.
- [19] 毛治国, 樊天亮, 刘亚明, 等. 南苏门答腊盆地北部新生代层序地层格架及有利储层分布[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(6): 1226-1231.
- [20] 田鑫, 王绪本, 吕锡敏, 等. 南苏门答腊盆地 Ripah 油田弧后裂谷盆地同沉积断裂对沉积的控制作用[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2012, 39(4): 396-402.
- [21] 田鑫, 王绪本, 张铭, 等. 地震属性方法在油田开发阶段薄砂体识别中的应用——以印尼苏门答腊盆地 Gemah 油田 M 油层为例[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3): 533-538.
- [22] 张琴, 朱筱敏, 董国栋, 等. 南苏门答腊盆地构造演化对沉积演化及成藏条件的控制[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(1): 16-19.
- [23] Amijaya H, Schwarzbauer J, Littke R. Organic geochemistry of the Lower Suban coal seam, South Sumatra Basin, Indonesia: Palaeoecological and thermal metamorphism implications[J]. Organic Geochemistry, 2006, 37(3): 261-279.

STRUCTURAL ZONATION AND HYDROCARBON ACCUMULATION MODEL OF THE SUMATRA BACK ARC RIFT BASIN

HUANG Zhong, HU Xiaolin, GUO Gang, MIAO Shunde, GUO Zhifeng, ZHANG Lu
(CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China)

Abstract: The Sumatra back-arc rift basin is the largest oil and gas producing province in Indonesia and Southeast Asia. Since the exploration degree of the region is quite high already, new exploration results are pretty rare in the past ten years, and thus the hydrocarbon discovery in the basin has entered a bottleneck. In order to find out the target areas for future exploration in the basin, we studied the tectonic pattern of the basin and its control over the distribution of source rocks and reservoirs. Upon the basis, the future exploration direction of the back arc rift basin is discussed. According to tectonic features, the Sumatra back-arc rift basin can be subdivided into three structural belts namely the near island arc belt, the central inversion belt and the distant island arc belt. The near island arc belt, in fact, is an inherited uplift. Oil and gas migrate vertically mainly through faults and accumulate in high-stand traps such as reefs and anticlines. The buried-hill trap is the major exploration target for future in the belt. The central inversion belt is dominated by semi-grabens and shovel-like normal faults. Oil and gas come from deep depressions and accumulated in the multi-layer reservoir in the upper part. Both fault and sand body act as the pathway for oil and gas migration. Buried-hill and structural-lithological are the main traps for hydrocarbon accumulation. The distant island arc belt is dominated by monoclinic strata locally with visible depressions which have hydrocarbon generation potential. Lithological hydrocarbon reservoirs occur in the belt and there is a great potential for future hydrocarbon exploration.

Key words: Sumatra; back-arc rift basin zone; tectonic features; accumulation model; favorable prospecting direction

关于作者著作权及稿酬的声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意上述声明。

《海洋地质前沿》编辑部