

委内瑞拉马拉开波盆地构造演化对油气的控制

汪伟光, 喻莲, 宋成鹏, 琚亮

(中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 委内瑞拉马拉开波盆地自中生代以来经历了裂谷、被动大陆边缘、前陆盆地和马拉开波向斜4个演化阶段, 对油气的生成运移聚集起到了重要的控制作用。从石油地质条件对构造作用的地质响应出发, 探讨了构造演化对盆地烃源岩、储层、圈闭类型以及油气运聚的控制作用。受构造作用影响, 烃源岩发育南薄北厚, 沉积中心也发生迁移, 形成3个向不同方向增厚的碎屑岩楔体, 构成了马拉开波盆地的主要储层, 并引起烃源岩埋深的变化, 导致生烃条件的多期变化。同时, 构造作用还控制了不同层系主要的圈闭类型, 而早期与裂谷作用相关的断层在后期构造作用下的复活或反转, 为油气提供了主要的运移通道。此外, 盆地区域性的倾斜也为油气的运移提供了大的构造格局。

关键词: 构造演化; 地质响应; 控制作用; 马拉开波盆地; 委内瑞拉

中图分类号: TE121.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-8527(2012)01-0131-08

Controlling of Tectonic Evolution on Hydrocarbon Occurrence of Maracaibo Basin, Venezuela

WANG Wei-guang, YU Lian, SONG Cheng-peng, JU Liang

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: Maracaibo Basin has experienced four tectonic phases including rifting, passive continental margin, foreland basin and Maracaibo syncline since Mesozoic, which played a significant role in the controlling of oil generation, migration and accumulation. Based on the response of hydrocarbon geologic condition to tectonic events, the author discussed the controlling of tectonic evolution on the formation of source rock, reservoir, traps as well as oil migration and accumulation. Impacted by tectonic activities, the thickness of source rock interval varied, with thicker to the north and thinner to the south. Depocentre transferred as well, formed three clastic wedges thickening in different directions, which comprised the major reservoirs of Maracaibo Basin. Besides, the change of buried depth led to the multi-phase oil generation of source rock. Also, tectonic activities controlled the trap types of different layers. The revival and reversal of faults related to early rifting during the later tectonic activities offered the main pathway for oil migration. In addition, regional tilt of the layers set up a basinal structural framework for the oil migration.

Key words: tectonic evolution; geologic response; controlling; Maracaibo Basin; Venezuela

0 引言

马拉开波盆地位于委内瑞拉西北部, 是世界上富含油气的盆地之一, 盆地面积 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 最终石油可采储量为 761 亿桶, 已累计生产石油

487 亿桶, 占南美油气总储量的 16.8%^[1]。截止到 2009 年底, 已发现 17 个大油气田(最终可采储量在 5 亿桶油当量以上)。马拉开波盆地地处梅里达安第斯山脉和塞拉德佩里哈山脉所包围的山间坳陷中, 2~6 km 厚的含油沉积序列分布在马拉开

收稿日期: 2011-07-21; 改回日期: 2011-10-15; 责任编辑: 孙义梅。

基金项目: 国家重大专项项目(2008ZX05028)。

作者简介: 汪伟光, 男, 博士研究生, 1985 年出生, 矿产普查与勘探专业, 主要从事全球油气资源评价及石油地质研究工作。

Email: Annior1985@sina.com。

波地块内的稳定拗陷部位,已探明的油气绝大部分储集在第三纪碎屑岩储层中,其中始新统油藏占总探明石油储量的 50%,其次为中新统油藏,占 40%,其他的主要储集于古新统、白垩系和基岩储层中。始新统油藏主要沿南北走向的断层分布,而中新统油藏集中分布在现今马拉开波湖的东、东北边缘(玻利瓦尔海岸),其油气的形成和分布严格受马拉开波盆地构造演化的控制。

1 大地构造背景

北安第斯地块的北部可以进一步细分出马拉开波地块,它是大陆地壳上的一个三角形楔体,马拉开波盆地地位于其内。马拉开波盆地是一条弓形前陆盆地带中的一段,它们是源自太平洋板块的加勒比海岛弧与南美克拉通在新生代发生碰撞的结果^[2-5]。其东边以博科诺右旋走滑断层为界,西边为左旋的圣玛尔塔-布卡拉曼加断层带,北边则以南加勒比变形带的逆冲断层为界^[6-7](图 1)。新生代时,由于纳斯卡板块、巴拿马岛弧与加勒比板块和南美板块的迅速汇聚,马拉开波地块被缩短和侧向挤出,并在边界走滑断层的作用下被动向北漂移。在马拉开波地块的东边,右旋的博科诺断层带突然向东弯曲并过渡为著名的埃尔皮拉尔右旋走滑断层体系^[8-9]。在马拉开波地块的西边,巴拿马岛弧以每年大约 20 mm 的速度继续沿东西方向与南美板块西北角汇聚^[7,10-11],而在马拉开波盆地的北边,加勒比板块的海底高原和洋壳正在向南美北部俯冲。

2 构造演化

根据南美北部大地构造演化及其对马拉开波盆地的影响,可将马拉开波盆地的构造演化划分为 4 个阶段。

2.1 晚侏罗世裂谷阶段

由于侏罗纪潘基亚大陆的裂解,在墨西哥湾和南美北部形成了一系列的基底隆起和北北东向的半地堑。马拉开波盆地的沉积历史始于晚侏罗世,在由北-北东向线性正断层控制的构造洼地或狭长箕状地堑中沉积了与裂谷作用有关的红层(La Quinta 组)^[4,12]。

2.2 白垩纪被动大陆边缘阶段

白垩纪,随着潘基亚大陆的进一步裂解,在加勒比板块到来之前,南美北部发生稳定的热沉降,形成被动大陆边缘环境。在现今的马拉开波盆地地区发育了碎屑-碳酸盐混合型台地。期间发生 3 次不同规模的海侵,其中最大规模的一次海侵发生在赛诺曼-坎佩尼期,于缺氧的陆架-陆坡上沉积了马拉开波盆地最重要的烃源岩——La Luna 组钙质页岩和泥灰岩。

2.3 古近纪前陆盆地阶段

晚古新世到早、中始新世,加勒比板块和南美板块西北缘发生斜向碰撞,标志着马拉开波盆地被动陆缘阶段的结束和前陆盆地阶段的开始。这次碰撞造成沉降中心从西北向东南大约移动了 150 km^[4,13-14],在马拉开波盆地东北部形成前渊并充填了巨厚(约 5 000 m)的河流-三角洲相前陆

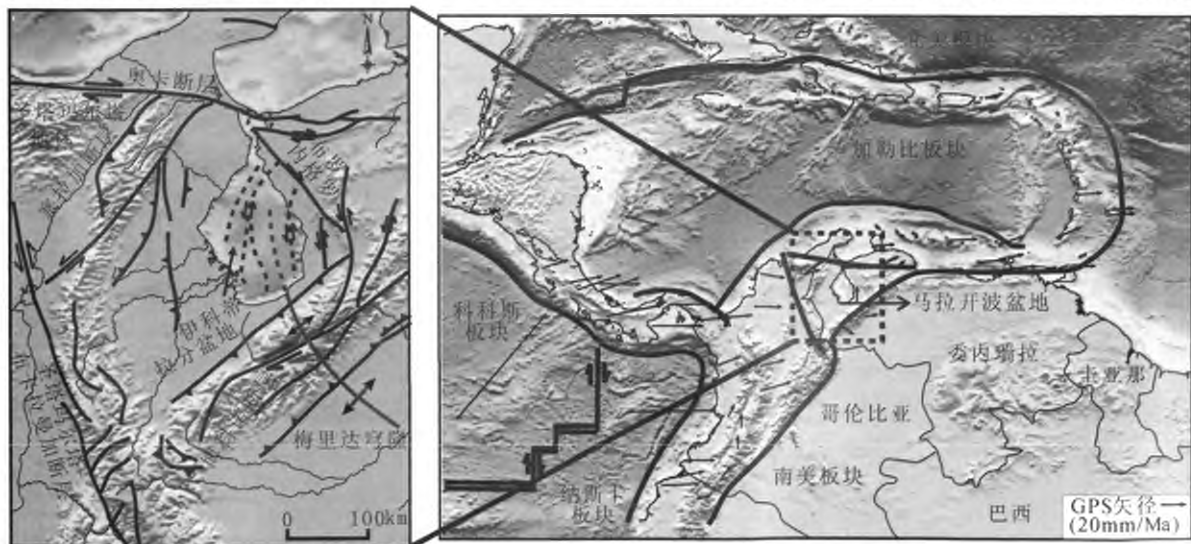


图 1 马拉开波盆地构造位置图

Fig. 1 Tectonic location map of Maracaibo Basin

楔形体。同时, NNE 向与侏罗纪裂谷作用有关的断层(伊科蒂和旧普韦布洛断层)在此活化为左旋走滑断层, 并形成了一个拉分盆地(伊科蒂次盆)^[15]。晚始新世—渐新世, 随着碰撞作用向东发展, 汇聚应力得到释放, 引起均衡回弹。马拉开波盆地大部分地区出露地表并受到剥蚀, 形成了分布广泛的始新世不整合, 标志着马拉开波盆地前陆阶段的结束。

2.4 新近纪马拉开波向斜形成阶段

这一阶段的盆地发育特点是塞拉德佩里哈和梅里达安第斯山的隆起、南北走向马拉开波向斜的形成^[16]以及盆地中部始新世构造在早中新世的反转。在渐新世的均衡回弹之后^[14,17], 开始了中新世—全新世的快速沉降阶段。加勒比板块的聚敛和巴拿马岛弧的碰撞作用, 导致马拉开波地块发生东西向的缩短, 从而使塞拉德佩里哈山和梅里达安第斯山相继隆起, 马拉开波向斜形成。同时, 盆地中部与裂谷相关的始新世构造也发生反转, 沉积中心也发生了迁移, 从盆地东北部(晚古新世—始新世)到西部(渐新世—中新世), 最后迁移到盆地的东南部(上新世—更新世)。

3 构造演化对油气的控制作用

3.1 构造演化对烃源岩的形成和演化的控制

上白垩统赛诺曼—坎佩尼阶拉卢纳组烃源岩已被证实是马拉开波盆地的主要烃源岩, 含偏生油的Ⅱ型干酪根, 平均 TOC 为 5.6%, 局部地区 TOC 值可高达 16.7%。油源对比表明, 马拉开波盆地 98% 的石油储量都来自于该烃源岩。拉卢纳组烃源岩沉积于缺氧的陆架—陆坡环境, 受当时盆地古构造形态的控制, 厚度变化很大, 在盆地南部为 60 m, 而在北部增加到 150 m。晚白垩世的盆地构造形态可能受到了哥伦比亚中科迪勒拉山隆起的影响^[18], 形成一系列的隆起(梅里达穹隆)和盆地(马奇克斯、乌里班特和巴基西梅托等), 这些古隆起造成了白垩系被动陆缘沉积地层的厚度变化。图 2 为拉卢纳组等厚线图, 在马拉开波湖中南部地区, 拉卢纳组的厚度大约减薄了 10~20 m, 这种隐蔽的厚度变化是梅里达穹隆的影响在马拉开波盆地南部和中部的延续。

拉卢纳组烃源岩的深埋藏和成熟作用受控于两个主要的区域构造事件: (1) 古近纪(60~40 Ma) 沉降事件。加勒比板块和南美板块西北缘发生斜向碰撞, 形成前渊, 使马拉开波盆地北部和东

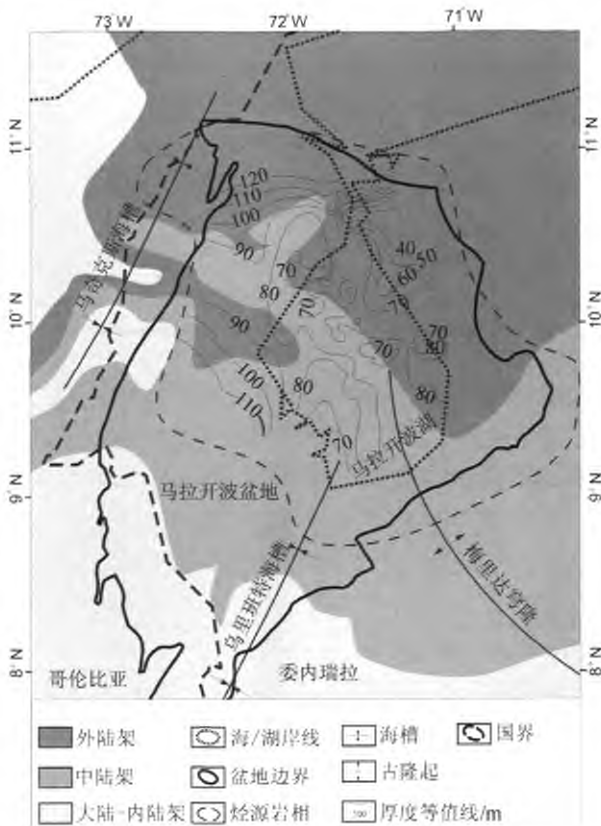


图2 马拉开波盆地拉卢纳组烃源岩沉积环境及厚度等值线图 (赛诺曼期—坎佩尼期)

Fig.2 Source rock deposition environment and thickness contour map of Maracaibo Basin (Cenomanian-Campanian)

北部白垩系岩层的埋藏深度达到了 4~5 km, 进入生油窗, 而中部和西南部地区尚未成熟。(2) 中新世—全新世(20~0 Ma) 沉降事件。随着塞拉德佩里哈山脉和梅里达安第斯山脉的隆起, 其前缘地区的构造沉降使白垩系烃源岩在马拉开波盆地中部和西南部的埋深达到了 2~6 km, 进入生油高峰期, 而此时, 东北部烃源岩已达过成熟。

3.2 对储层形成的控制作用

马拉开波盆地储层可以分为 3 种类型: (1) 始新统以下储层; (2) 始新统储层; (3) 中新统储层。后两者是马拉开波盆地最重要的储层, 聚集了马拉开波盆地 90% 的石油储量。它们主要由 3 个向不同方向增厚的碎屑岩楔体组成, 每一个楔体的形成都和影响马拉开波盆地的区域构造事件密切相关。与碎屑岩楔体形成相关的 3 个地质事件是: (1) 古新世—始新世在盆地北—东北部的陆沉以及马拉开波碎屑岩楔体的形成; (2) 晚始新世—渐新世塞拉德佩里哈山脉发生抬升, 同时使盆地西部出现沉降并形成佩里哈碎屑岩楔体; (3) 中新世—上新世发生梅里达安第斯山脉的抬

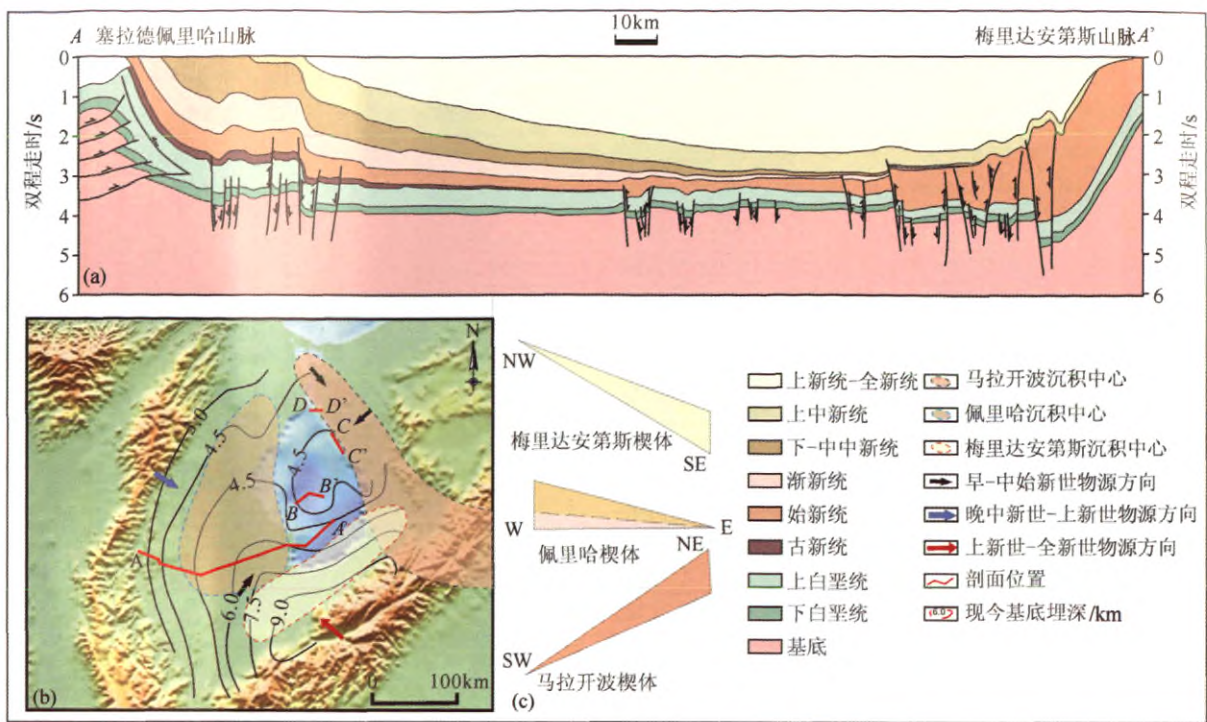


图3 马拉开波盆地剖面图(a)，马拉开波盆地现今基底埋深及不同地质时期沉积中心范围示意图(b)，马拉开波盆地3个碎屑岩楔体厚度变化示意图(c) (修改自文献 [19])

Fig. 3 Cross section diagram of Maracaibo Basin(a), Diagrammatic map of present basement depth and scale of depocenter of different geologic time(b), Diagrammatic map of depth variation of the three clastic wedges, Maracaibo Basin(c)

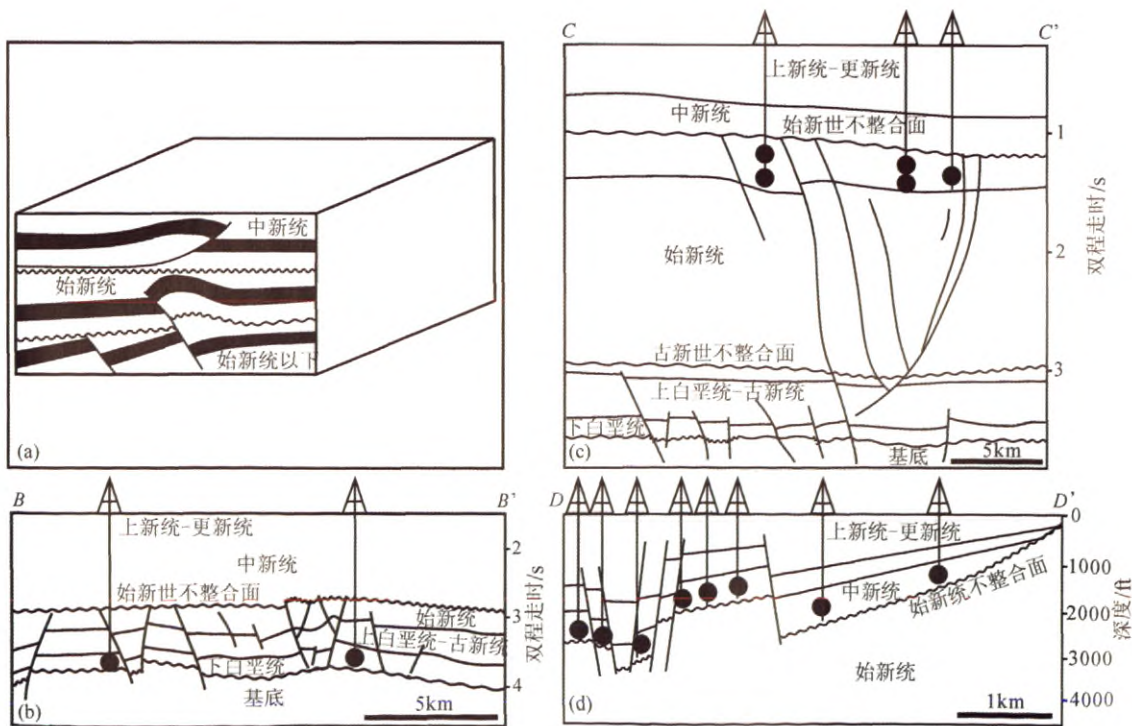


图4 不同层位构造样式及主要圈闭类型示意图(剖面图位置见图3(b))

Fig. 4 Diagrammatic map of structure styles and main trap types of different layers

(a)不同层位构造样式; (b)始新统以下圈闭类型示意图; (c)始新统圈闭类型示意图; (d)中新统圈闭类型示意图

升，导致盆地东南部的沉降和梅里达安第斯碎屑岩楔体的形成(图 3)。此外，物源和 3 个岩楔体中储层的沉积相也受到了上述 3 个地质事件的影响。始新世初，随着东北部前渊的形成，原型马拉开波河由西南向东北陆架方向输入了大量的碎屑沉积物，形成了以河控和潮控三角洲相为主的马拉开波碎屑岩楔体；新近纪，隆起的塞拉德佩里哈山脉和梅里达安第斯山脉为佩里哈碎屑岩楔体和梅里达安第斯碎屑岩楔体的形成提供了物源，同时，原型马拉开波河也发生分流，形成了以伴随有深切冲积谷的河流相为主的碎屑岩沉积。

3.3 对盖层的控制作用

马拉开波盆地以第三系层内/间盖层为主，如始新统 Misoa 组、中新统 La Rosa 组和 Lagunillas 组层内泥岩段，它们形成于前陆阶段，以河流-三角洲相泥岩为主，在 3 个碎屑岩楔体之中与储集层呈“三明治”状交互分布，形成高效的储盖组合，它们封盖了盆地 90% 以上的储量。上白垩统

科隆组泥岩为全区唯一的区域盖层，形成于被动陆缘阶段末期，分布稳定，厚度大于 300 m，一般具超压特征，为白垩系储层提供封盖条件。第三纪以来多期的构造运动使断层幕式开启，大量油气沿断层运移至第三系储层聚集成藏，这是马拉开波盆地第三系油气富集并主要沿断层带分布的最根本原因。

3.4 对圈闭形成的控制作用

马拉开波盆地圈闭类型主要有构造圈闭、地层圈闭以及构造、地层和不整合等组成的复合圈闭。在不同层系，油气圈闭的主要类型存在差异，这种差异主要受盆地构造演化的控制(图 4)。白垩系主要为构造圈闭，受早期裂谷作用和后期复活、反转作用的影响，发育一系列的背斜、穹隆、断背斜、断块，切割背斜的断层大多为正断层或反转断层。始新统主要为构造-不整合复合圈闭，渐新世的均衡回弹作用形成了始新世重要不整合面，与复活的早期断裂相配合，对始新统圈闭的

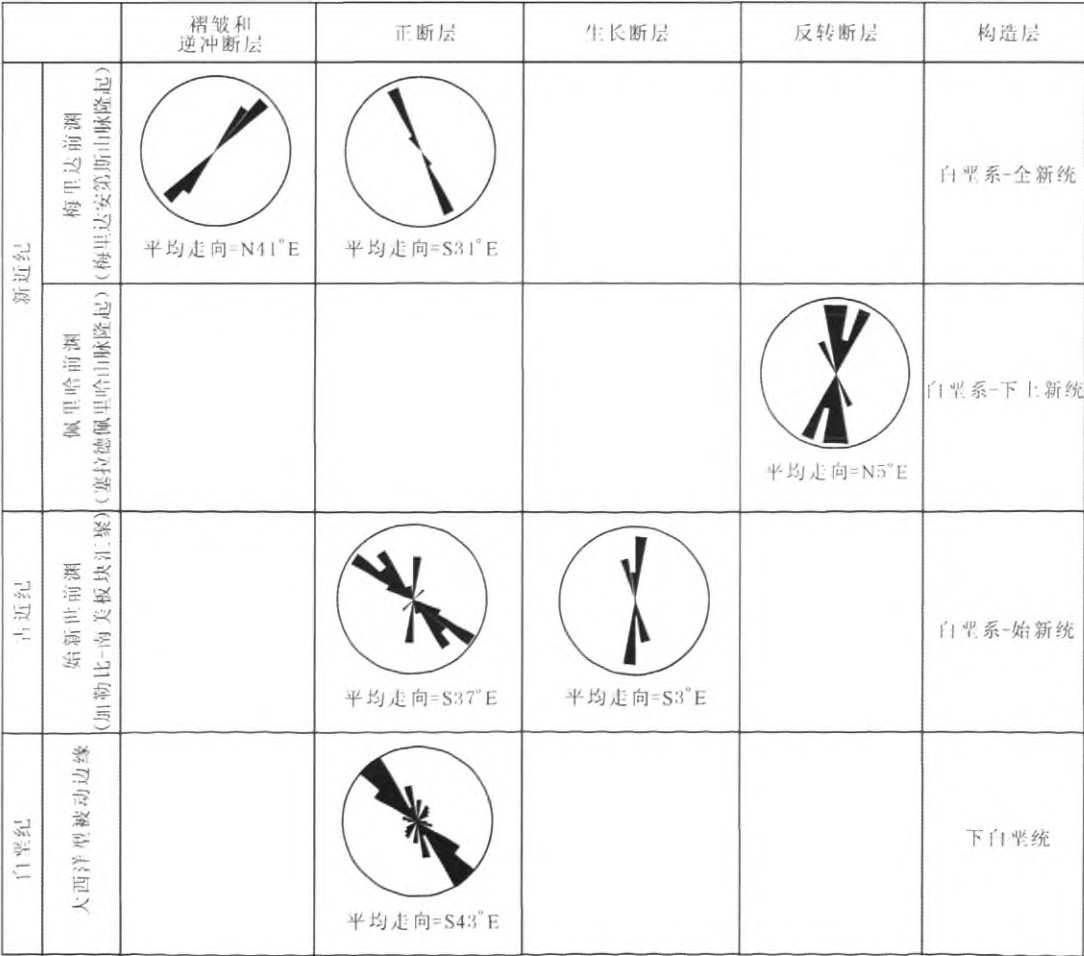


图 5 马拉开波盆地断层走向玫瑰花图 (据文献 [16])
Fig. 5 Rose diagrams of fault trend in Maracaibo Basin

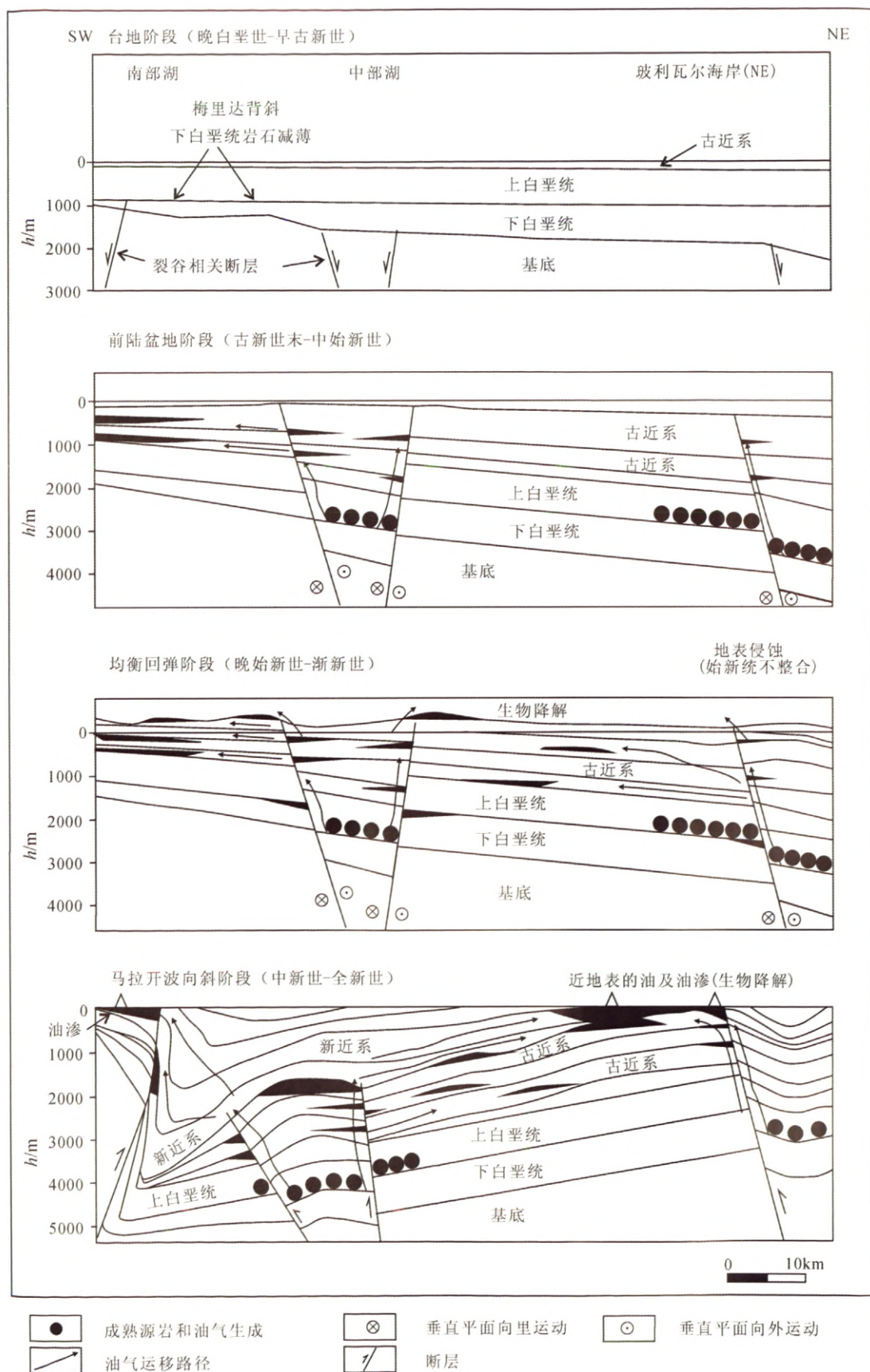


图6 马拉开波盆地油气运聚示意图 (据文献 [20])

Fig. 6 Diagrammatic map of hydrocarbon migration in Maracaibo Basin

形成起到了重要的控制作用。油气圈闭在被不整合面削截的背斜和单斜褶皱中,并被断层分割成不同的块体。中新统主要为构造-地层圈闭,构造主要为断背斜和单斜褶皱,源于早期构造的复活和马拉开波向斜形成阶段的東西向构造挤压,而地层要素主要为相变、沉积尖灭和碎屑沉积透镜体。

3.5 对油气运聚的控制作用

由于马拉开波盆地沉积和构造过程的差异性,其油气运移过程也相当复杂。拉卢纳组烃源岩自晚始新世进入生油窗,主要的油气运移发生在晚中新世—现今,断层和砂体是其主要垂向和侧向运移通道。断层的形成及反转与构造演化密切相关(图5)。晚侏罗世,在马拉开波盆地中部及以北地区发育了一系列与裂谷作用相关的北、北北东向地堑和正断层,在白垩纪,这些断层活动性较弱。而在盆地南部发育了北西向为主的正断层,但这些正断层只影响下白垩统地层。晚古新世—始新世,与侏罗纪裂谷作用相关的断层复活并继承了早期的构造特征,控制了中下始新统的同沉积作用。同时,作为对东北部挠曲沉降的响应,在马拉开波湖南部地区,发育了一系列北西向高角度正断层。晚渐新世—新近纪,塞拉德佩里哈山脉的隆起,导致了马拉开波盆地南北向褶皱、逆冲断层的形成和南北向走滑断层的复活和反转,而梅里达安第斯山脉的隆起,形成了与其平行的北东向单行褶皱和叠加的共轭正断层。

马拉开波盆地油气的运移和聚集主要受控于两个主要的构造阶段(图6)。晚古新世—始新世,马拉开波盆地东北部烃源岩进入生油窗,与侏罗系裂谷作用有关的一系列北、北北东向断层也在此时复活并转化为走滑断层,生成的油气沿这些断层向上运移至始新统储层,并聚集于盆地东北部和中部。伊科蒂拉分盆地主要边界断层的垂向位移造成了白垩系烃源岩和始新统储层的并置,为深埋的白垩系之上的油气运移提供了另外一种环境。盆地性的北—北东区域倾向为石油向马拉开波盆地中部的上倾运移创造了条件,在那里发育有高质量的河流和三角洲相储层。

晚始新世—渐新世的均衡回弹,使马拉开波盆地在部分地区遭受剥蚀,尤其是在盆地中部,剥蚀持续了大约20 Ma,大量油气溢出地表,同时,始新统浅层油藏遭受生物降解。中新世—全新世马拉开波向斜形成阶段,由于沉降中心的迁

移,导致马拉开波盆地中部和南部白垩系拉卢纳组烃源岩二次成熟,在区域挤压应力作用下,早期高角度伸展断层复活并发生反转,为油气通过断层穿越始新世不整合面进入上覆储层创造了条件,同时,区域性的南倾为油气向北、东北方向运移提供了大的构造格局。这些不同的运移路径可以使油气从盆地的深部经过东—北东向的上倾运移进入中新统储层,并聚集于盆地的北、东北部边缘(波利瓦尔海岸)。而在马拉开波向斜的东、西和南部缺少圈闭的地区,则已溢出地表形成了油苗。

4 结 论

(1)马拉开波盆地的构造演化划分为4个阶段:晚侏罗世裂谷阶段、白垩纪被动大陆边缘阶段、古近纪前陆盆地阶段和新近纪马拉开波向斜形成阶段。

(2)马拉开波盆地构造演化对烃源岩的分布和演化、储、盖层及圈闭的发育和油气的运移和聚集有着重要的控制作用。古构造形态控制了烃源岩的分布,沉降中心的迁移导致了其多期生烃。前陆阶段两侧山脉的隆升形成的3个碎屑岩楔体,为盆地提供了良好的储、盖层及高效的储盖组合。多期的构造运动还使不同层系的主要圈闭类型差异明显。断层是马拉开波盆地油气运移的主要通道,控制其油气运移和聚集的两个主要构造阶段,均对应于早期断层的复活或反转,同时盆地性的区域倾斜,也为油气的运聚提供了大的构造格局。

参考文献:

- [1] 白国平,秦养珍. 南美洲含油气盆地和油气分布综述[J]. 现代地质, 2010, 24(6): 1102-1111.
- [2] Erlich R, Barrett S. Cenozoic plate tectonic history of the northern Venezuela-Trinidad area[J]. Tectonics, 1990, 9: 161-184.
- [3] Pindell J, Barrett S. Geological evolution of the Caribbean region: A plate tectonic perspective[M]//Dengo G, Case J. The Caribbean Region. Boulder, Colorado: Geological Society of America, 1990: 405-432.
- [4] Lugo J, Mann P. Jurassic-Eocene tectonic evolution of Maracaibo Basin, Venezuela[J]. AAPG Memoir, 1995, 62: 699-725.
- [5] Escalona A, Mann P. Tectonic controls of the right lateral Burro Negro tear fault on Paleogene structure and stratigraphy, north-eastern Maracaibo Basin[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90: 479-504.
- [6] Mann P, Burke K. Neotectonics of the Caribbean[J]. Reviews

- of Geophysics and Space Physics, 1984, 22: 309–362.
- [7] Taboada A, Rivera L, Fuenzalida A, et al. Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia) [J]. *Tectonics*, 2000, 19: 787–813.
- [8] Schubert C. Neotectonics of Boconó fault, western Venezuela [J]. *Tectonophysics*, 1982, 85: 205–220.
- [9] Audemard F E, Audemard F A. Structure of the Merida Andes, Venezuela: Relations with the South America-Caribbean geodynamic interaction [J]. *Tectonophysics*, 2002, 345: 299–327.
- [10] Trenkamp R, Kellogg J, Freymueller J, et al. Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2002, 15: 157–171.
- [11] Colmenares L, Zoback M. Stress field and seismotectonics of northern South America [J]. *Geology*, 2003, 31: 721–724.
- [12] Maze W. Jurassic La Quinta Formation in the La Sierra de Perija, northwestern Venezuela; geology and tectonic environment of red beds volcanic rocks [M] // Bonini W, Hargraves R, Shagam R. *The Caribbean-South American Plate Boundary and Regional Tectonics*. Boulder, Colorado: Geological Society of America, 1984: 263–282.
- [13] Stephan J. Andes et Chaîne Caraïbe sur La Transversal de Barquisimeto (Venezuela), Evolution Géodynamique [M]. Paris: Editions Technip, 1985: 505–529.
- [14] Escalona A, Mann P. Sequence-stratigraphic analysis of Eocene elastic foreland basin deposits in central Lake Maracaibo using high-resolution well correlation and 3-D seismic data [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90: 581–623.
- [15] Escalona A, Mann P. Three-dimensional structural architecture and evolution of the Eocene pull-apart basin, central Maracaibo Basin, Venezuela [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20: 141–161.
- [16] Castillo M V, Mann P. Cretaceous to Holocene structural and stratigraphic development in south Lake Maracaibo, Venezuela, inferred from well and three-dimensional seismic data [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90: 529–565.
- [17] Escalona A. Regional tectonics, sequence stratigraphy and reservoir properties of Eocene elastic sedimentation, Maracaibo Basin, Venezuela [D]. Austin: University of Texas at Austin, 2003.
- [18] Macsotay O, Erlich R, Peraza T. Sedimentary structures of the La Luna, Navay and Querecual formations, Upper Cretaceous of Venezuela [J]. *Palaos*, 2003, 18: 334–348.
- [19] Mann P, Escalona A, Castillo M V. Regional geologic and tectonic setting of the Maracaibo supergiant basin, western Venezuela [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90: 445–477.
- [20] Escalona A, Mann P. An overview of the petroleum system of Maracaibo Basin [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90: 657–678.