



印度尼西亚库泰盆地下中新统混积序列特征研究

鲁银涛, 杨涛涛, 许小勇, 徐 宁, 刘忻蕾, 闫 春, 邵大力, 范国章, 吕福亮, 李 东

Characteristics of Lower Miocene mixed deposits in Kutai Basin, Indonesia

LU Yintao, YANG Taotao, XU Xiaoyong, XU Ning, LIU Xinlei, YAN Chun, SHAO Dali, FAN Guozhang, LV Fuliang, and LI Dong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021051403>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北康盆地基底卷入断层特征及其对南海南部构造演化的启示

Features of the basement-involved faults in the Beikang Basin and their implications for the tectonic evolution of the southern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 116



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

鲁银涛, 杨涛涛, 许小勇, 等. 印度尼西亚库泰盆地中新统混积序列特征研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(2): 158-166.

LU Yintao, YANG Taotao, XU Xiaoyong, et al. Characteristics of Lower Miocene mixed deposits in Kutai Basin, Indonesia[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(2): 158-166.

印度尼西亚库泰盆地中新统混积序列特征研究

鲁银涛¹, 杨涛涛¹, 许小勇¹, 徐宁², 刘忻蕾³, 闫春¹, 邵大力¹, 范国章¹, 吕福亮¹, 李东¹

1. 中国石油杭州地质研究院, 杭州 310023

2. 中国石油海外勘探开发公司, 北京 100031

3. 华北科技学院, 廊坊 065201

摘要:库泰盆地是印尼最大、最深的新生代裂谷盆地,也是印尼油气最富集的盆地之一。长期以来,对库泰盆地的勘探主要针对中-上新统三角洲相沉积体系,对库泰盆地沉积地层的认识也主要集中于中中新统及以上地层,对下中新统及更深层系鲜有勘探认识。通过最新的钻探成果和野外地质考察,认为下中新统以滨海相沉积为主,自下而上形成了海相暗色泥岩-进积砂岩-生屑灰岩的垂向沉积序列,以生屑灰岩为标志层。这套沉积序列具有明显的混积特征,生屑灰岩直接上覆在反韵律的滨海相砂岩之上,被厚层泥岩覆盖。分析认为这种生屑灰岩与砂岩交替发育的交互混积序列是一套完整的代表水体逐渐变浅、随后变深的海相准层序。相对海平面较高时期主要沉积海相泥岩;随着海退事件,垂向上逐渐沉积细砂-中砂-粗砂岩;之后,相对海平面升高,生屑灰岩开始发育;伴随海平面不断上升,生屑灰岩被海水淹没,沉积海相泥岩,覆盖在生屑灰岩之上,一个沉积旋回结束。这种多旋回特征反映了研究区在早中新世高频的海平面变化,指示研究区在挤压应力场的作用下,构造活动频繁,发生快速相对海平面变化。

关键词:海相沉积;混积序列;沉积旋回;早中新世;库泰盆地

中图分类号:P736

文献标识码:A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021051403

Characteristics of Lower Miocene mixed deposits in Kutai Basin, Indonesia

LU Yintao¹, YANG Taotao¹, XU Xiaoyong¹, XU Ning², LIU Xinlei³, YAN Chun¹, SHAO Dali¹, FAN Guozhang¹, LV Fuliang¹, LI Dong¹

1. Petrochina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou 310023, China

2. China National Oil and Gas Development and Exploration Company, Beijing 100031, China

3. North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China

Abstract: As the largest and deepest Cenozoic rift basin in Indonesia, the Kutei Basin is one of the most favorable basins for hydrocarbon exploration. The major exploration targets and intervals in the basin are mainly concentrated so far in the Middle to Upper Miocene deltaic systems, and the deeper intervals below the Middle Miocene have not been fully explored yet. Drilling and field investigation suggest that the Lower Miocene is composed of shallow marine depositional systems. From the bottom to the top, it changes from dark shale, progradational sandstone to bioclastic limestone. which marks the top of the shallow marine sequence. The bioclastic limestone covered the sandstone, and buried by thick shales, showing obvious features of mixed siliciclastic – carbonate deposition. Such a mixed deposit represents a sequence formed in a specific environment with relatively high sea level in the beginning, followed by sea level falling, and sea level rise again. The shale sediments were deposited during the period of highest sea level; while the sandstone was deposited during sea level falling stage. Then the sea level rise made the environment favorable for bioclastic to grow up. Bioclastic would stop develop when the sea level was rising too fast and the water became too deep. Above the bioclastic mudstone deposited. The frequent sea level fluctuation will cause the formation of multiple interbedded siliciclastic - carbonate sequences. This model reveals that under the compressive stress, the tectonic movements was frequent and active in this region. Relative sea level changed rapidly, that caused the deposition of the cyclic mixed deposits.

Key words: shallow marine sediment; mixed deposition sequence; sedimentary cycle; Early Miocene; Kutei Basin

资助项目:国家自然科学基金“孟加拉湾东北部深水沉积体系发育特征与生物气成藏规律研究”(42076219),“孟加拉湾东北部沉积过程与特提斯东段构造变形耦合关系”(92055211),“东印度洋Roo海隆早期俯冲在巽他弧后东爪哇盆地的构造变形记录”(42006067);中国-东盟海洋地震数据平台与研究中心建设(12120100500017001);中国石油集团科技重大专项(2019A-1009, 2019D-4309)

作者简介:鲁银涛(1983—),男,博士,高级工程师,主要从事盆地分析、沉积地质、油气勘探等研究, E-mail: luyt_hz@petrochina.com.cn

收稿日期:2021-05-14; **改回日期:**2021-08-20. 周立君编辑

库泰盆地是印尼最大的新生代盆地, 位于加里曼丹岛东部, 西部整体逐渐抬升, 是库泰盆地新近纪沉积的主要物源区; 东侧向望加锡海峡方向逐渐过渡为深海盆地; 盆地中部的海陆过渡-浅海区的马哈坎褶皱带是油气勘探的重要区域(图 1)。库泰盆地的油气勘探始于 19 世纪末期, 油气发现主要集中在库泰盆地马哈坎三角洲的中—上中新统陆相成藏组合内^[1], 前人研究也大多集中于此。

通过区域地质研究和成藏组合评价, 中国石油于 2009 年首次在中中新统下部—下中新统滨海相砂岩中获得油气发现, 并且首次对该区深层滨海相成藏组合进行了系统研究^[2-4]。但是, 滨海相沉积序列在野外发育特征如何, 垂向上如何演化, 仍需要

深入研究。为此, 对下库泰盆地马哈坎三角洲开展了多次野外地质考察, 在识别研究进积型三角洲的同时, 特别对早中新世滨海相沉积地层开展了识别研究, 厘清了其展布特征, 并建立了该沉积序列的发育模式。通过钻井详细分析和野外地质考察, 认为研究区下中新统不仅是普遍发育的滨海相沉积, 而且是在三角洲和古构造共同作用下发育的碎屑岩与碳酸盐岩混积序列层系, 表现为生屑灰岩上覆在厚层砂岩之上, 而且发育多套相似特征的沉积旋回。关于混合沉积的概念, 前人指出, 混合沉积在同一层形成碎屑岩—碳酸盐岩混积岩系列; 而由碎屑岩与碳酸盐岩、碎屑岩与混积岩、碳酸盐岩与混积岩和不同类型混积岩之间的交互沉积以及与陆

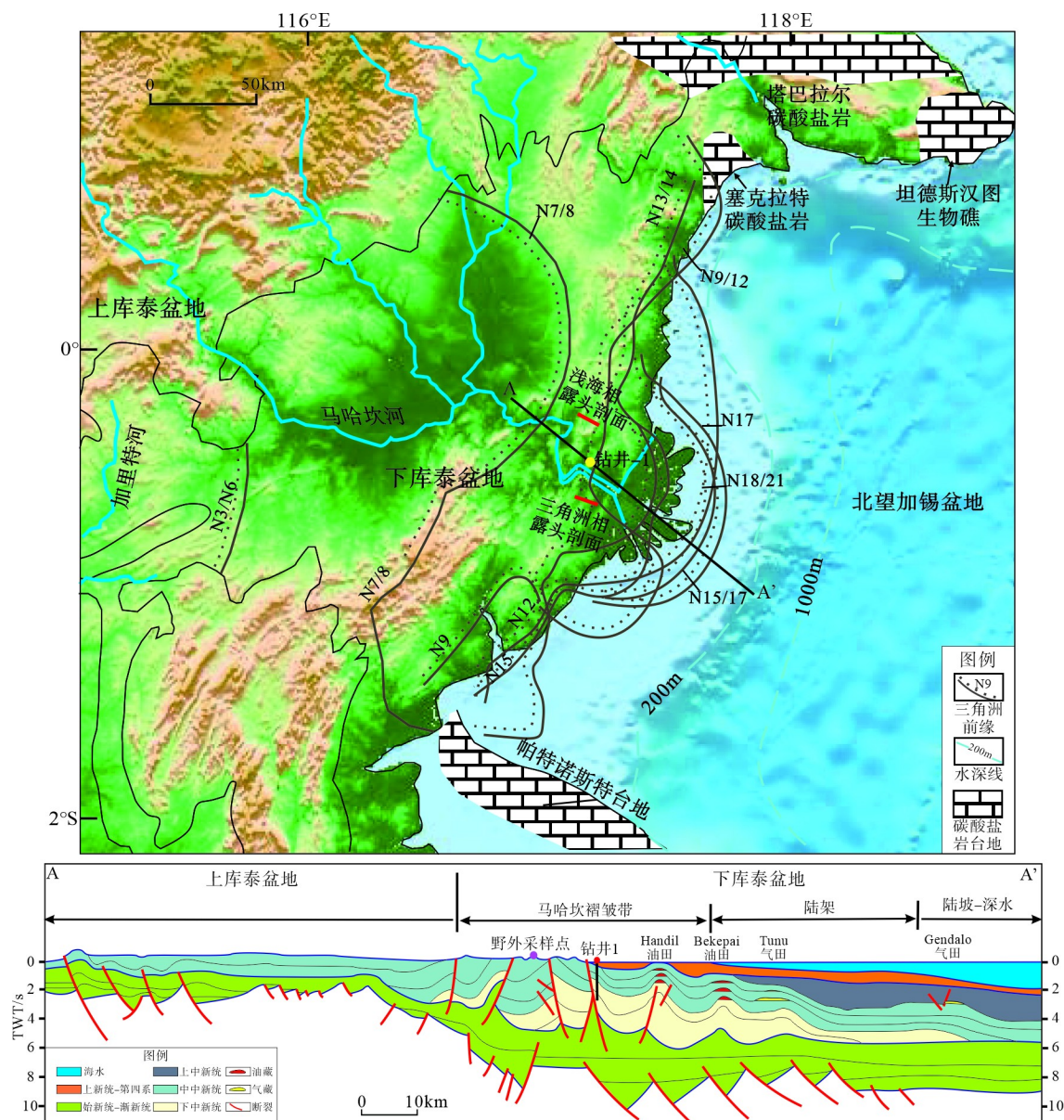


图 1 印度尼西亚库泰盆地位置图及地震-地质综合解释成果剖面图

Fig.1 Location map of Kutai Basin, Indonesia and the cross-section of integrated seismic and geological interpretation results

表海三角洲碎屑沉积交互成层,形成了混积序列。混积序列和混积岩共同构成广义的混合沉积^[5-7]。

通常混合沉积在野外露头上难以保留,而本文研究区为混合沉积研究提供了非常宝贵的地质条件。通过对研究区钻井、露头下中新统滨海相沉积的研究,建立了滨海相沉积的发育模式,并建立了混积序列发育模式,分析了其主控因素,为混积序列这类特殊的沉积现象提供了研究素材,进而为预测岩性变化规律和有利储层发育层段提供了理论依据。

1 地质概况

库泰盆地位于加里曼丹岛的东部,包括陆上和海上部分,面积达 $27\times10^4\text{ km}^2$,其中陆上面积约 $11\times10^4\text{ km}^2$,海上面积约 $16\times10^4\text{ km}^2$ 。其北部边界为芒卡力哈山,与打拉根盆地相隔;南为阿当断层将其与 Paternoster 台地和巴里托盆地分开;西部为中加里曼丹凸起,将其与莫拉维盆地分隔;库泰盆地东部延伸至望加锡海峡深水区,水深大于 500 m 的海域面积约 $6.7\times10^4\text{ km}^2$ 。盆地中部的三马林达复背斜带将库泰盆地分为西部的上库泰盆地和东部的下库泰盆地,油气发现集中在下库泰盆地^[8]。

受欧亚板块、太平洋板块和澳大利亚板块的相互作用影响,库泰盆地经历了始新世裂谷期、渐新世至中中新世的区域沉降期和中中新世的挤压反

转期 3 个主要的演化阶段^[9],发育了陆相-海相-三角洲相沉积旋回(图 2)。其中,始于早中新世,剧烈于中中新世的构造抬升及同期的三角洲进积对区内油气成藏至关重要。

始新世裂谷期,盆地初始形态形成,主要沉积湖相、滨岸-陆架沉积,发育湖相-浅海相烃源岩,始新统油气发现指示该时期烃源岩以生油为主;始新世末期至晚渐新世沉降期,沉积了区域性海相泥岩,并在浅水区发育开阔海碳酸盐岩台地,局部发育浊积砂岩,有发育碳酸盐岩、深水浊积砂岩储层的潜力;早中新世末期至今的挤压反转导致东加里曼丹遭受挤压反转,形成一系列北东-南西走向的挤压反转背斜,自东向西挤压反转作用强度逐渐加大,盆地西部陆上部分沉积地层遭受强烈剥蚀,该时期为圈闭形成主要时期。中中新世开始,马哈坎进积型三角洲自西向东不断前积、推进,形成了巨厚马哈坎三角洲沉积体系,沉积中心地层厚度可达 14 km,是盆地内迄今发现最主要的油气储层,同时也为油气系统提供了优质烃源岩,以生气为主^[3],为形成最为富集的油气成藏组合提供了得天独厚的地质条件^[10]。

库泰盆地主力储层即马哈坎三角洲沉积体系内的中中新统三角洲砂岩储层,获得了巨大发现。随着勘探研究工作的深入,不断向西部勘探,在下中新统混积序列中的滨海相砂岩储层中获得了突破。这两类砂岩具有很多相似的特征,因此在研究

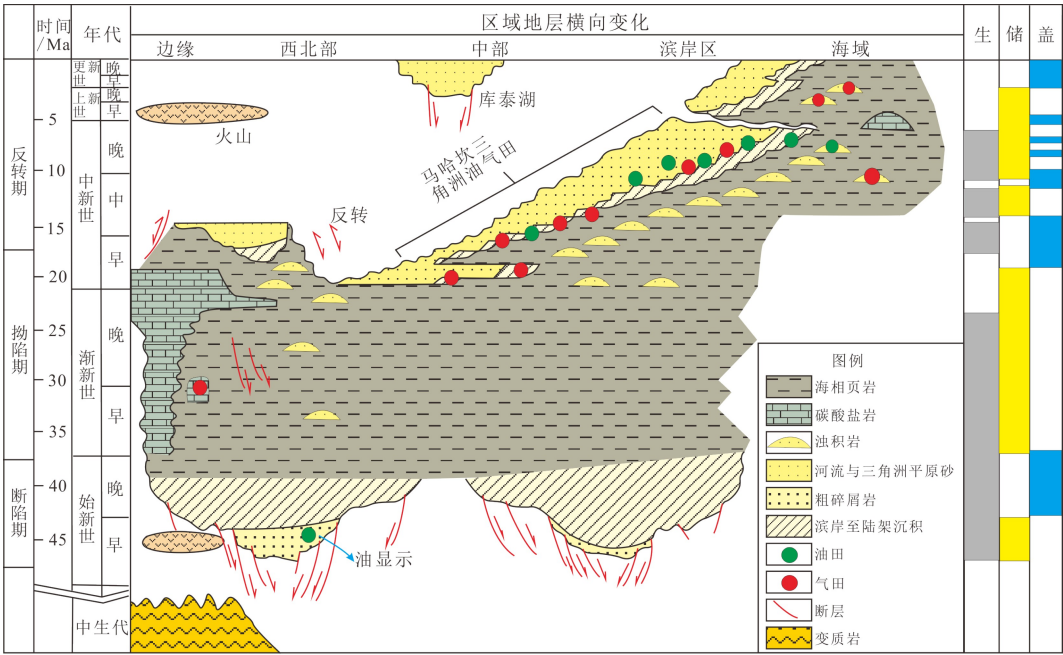


图 2 库泰盆地岩性地质剖面图^[8, 10]

Fig.2 Stratigraphic chart of Kutei Basin

过程中需要通过综合地质研究进行判别, 认准勘探层系, 为进一步的勘探提供理论支撑。

2 中中新统三角洲砂岩沉积特征

2.1 测井响应特征

中中新统三角洲砂岩典型特征为伽马曲线表现为一系列反旋回, 局部层段夹正旋回。这些反旋回解释为粒度自下而上变粗的沉积序列, 为典型河口坝沉积; 而局部夹的正旋回解释为粒度自下而上逐渐变细的正粒序沉积序列, 为典型的水下分流河道沉积。这些水下分流河道砂岩、河口坝砂岩即为库泰盆地主要油气储层。河口坝砂岩与水下分流河道砂岩厚度相当, 主体厚度为 2~5 m(图 3)。整个库泰盆地内, 水下分流河道砂岩的储集物性最好, 储层的孔隙度为 8%~39%, 一般为中至高孔; 渗透率普遍较高, 为 $(30\sim5000)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ^[12-13]。但这两类储层均受三角洲前缘相带迁移控制, 储层非均质性强, 厚度在纵横向上变化较快。钻井揭示局部层段表现为高 GR 值, 为三角洲平原亚相沉积和前三角洲亚相沉积, 以泥质为主, 局部发育煤层, 是油气藏有利的层间盖层(图 3)。

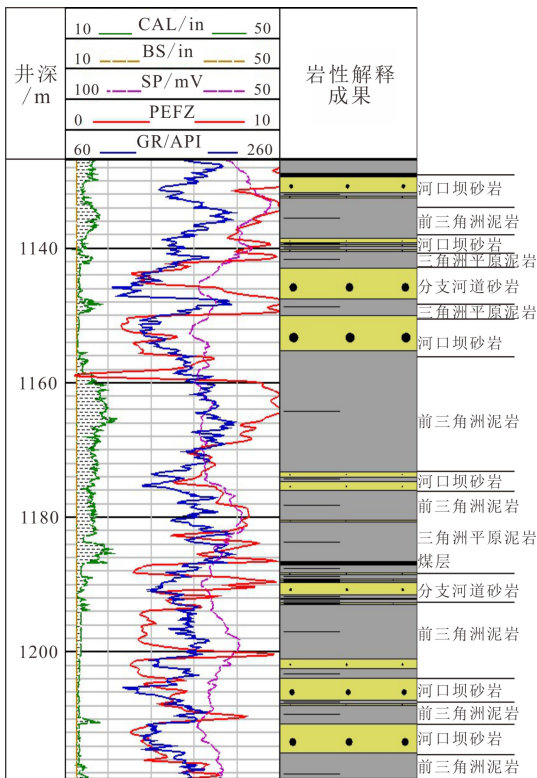


图 3 钻井-1 三角洲相沉积测井曲线柱状图
Fig.3 Lithologic and sediment facies interpretation based on well log response of Well-1

2.2 野外露头发育特征

库泰盆地受挤压变形强度由西向东减弱, 盆地西部的陆上区域隆升幅度较大、遭受强烈剥蚀, 而东部海域部分变形较弱, 并被不断前积的三角洲楔状体覆盖^[11-13]。马哈坎三角洲主要受马哈坎河大量沉积输入的控制, 类型上可归为河控三角洲。中中新世, 三角洲前缘位置到达研究区, 因此露头多表现为三角洲平原、三角洲前缘亚相沉积, 局部可见前三角洲亚相沉积^[14](图 4)。

研究区内中中新统三角洲相沉积露头特征在野外延伸可达数百米甚至上千米。整个露头以褐色、黑灰色为背景, 岩性主要为砂泥岩互层夹煤层。水下分流河道沉积单层厚度一般 5~10 m, 底部具有明显的侵蚀特征, 切割了三角洲平原泥岩和煤层(图 4), 局部可见水下分流河道侵蚀前三角洲暗色泥岩, 形成不规则起伏的表面(图 4)。水下分流河道砂岩表现为正粒序特征, 自下而上粒度变细, 常见大型交错层理和冲刷面。

河口坝砂岩没有明显的侵蚀特征, 呈透镜体“包裹”在厚层泥岩内(图 4), 并表现为反粒序特征, 自下而上粒度变粗。河口坝砂岩单层厚度较水下分流河道小, 一般为 1~2 m, 横向延伸范围也有限, 一般 5~10 m。但马哈坎三角洲浅海区的油气勘探证实, 库泰盆地河口坝砂岩的规模可达上百平方千米^[11-13]。

3 下中新统滨海相砂岩沉积特征

进入下中新统, 虽然地层整体以砂泥岩互层为主, 地层发育特征与中中新统三角洲沉积相似, 但是出现中厚层碳酸盐岩, 指示沉积环境的变化。

3.1 测井响应特征

由于中中新统三角洲砂岩储层在研究区已遭受抬升剥蚀, 研究区的勘探层系由中中新统转为更深层的下中新统, 并获成功^[2-4]。通过钻井分析, 主力含气储层为下中新统砂岩, 该下中新统砂岩储层为滨海相砂岩, 表现为一系列反旋回特征, 主体为进积型的中—细粒砂岩, 顶部为中厚层碳酸盐岩(图 5)。

通过钻井对比, 认为这套滨海相准层序发育 5 个沉积旋回, 均以中—厚层碳酸盐岩出现为标志, 每期旋回的 GR 测线整体表现为逐渐变小的特征, 呈反韵律特征(图 5)。钻井 1 钻遇 3 期旋回, 总厚

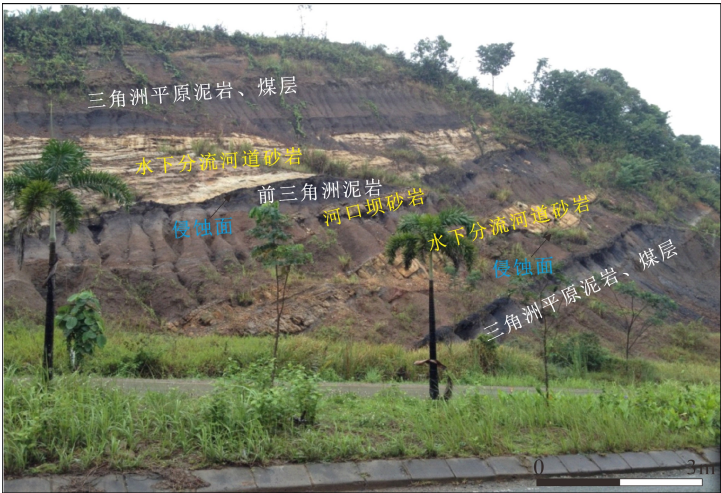


图 4 研究区中新统三角洲相沉积露头
位置见图 1。

Fig.4 Outcrop of Middle Miocene deltaic sediment in study area

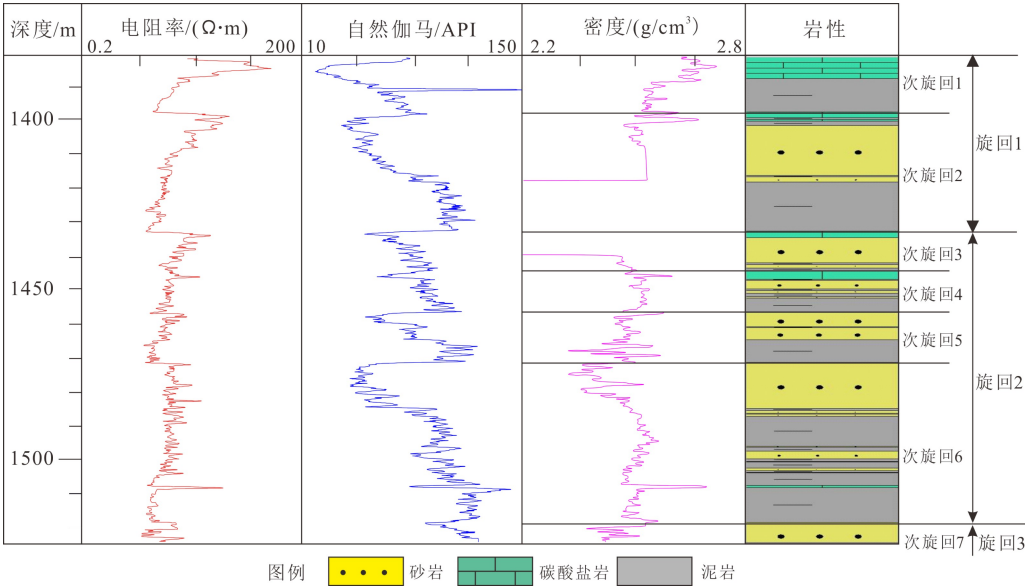


图 5 钻井 1 下中新统滨海相沉积测井响应及岩性解释成果图
井位见图 1。

Fig.5 Lithologic and sediment facies interpretation based on well log response of Well-1

度 158.5 m, 单层砂岩厚度可达 13.5 m^[4]。可以通过反韵律特征, 将钻井 1 揭示的 3 期旋回细分为 7 期次旋回, 每个次旋回的厚度为 20~40 m。虽然有些旋回内岩性有缺失, 旋回 1 内的次旋回 1, 未揭示厚层砂岩, 表现为碳酸盐岩直接上覆在厚层泥岩之上; 旋回 2 内的次旋回 5 和 6, 顶部未揭示厚层碳酸盐岩, 表现为厚层砂岩作为旋回顶面(图 5)。整体而言, 自下而上均为泥岩-砂岩-碳酸盐岩组合特征。表现最为典型的为旋回 2 内的次旋回 3 和 4, 均表现为典型的反韵律特征, 泥岩在下部, 上覆厚层砂岩, 顶部为厚层碳酸盐岩(图 5)。

3.2 野外露头特征

下中新统滨海相沉积在野外露头上一中新统三角洲沉积中具有相似性, 均以厚层砂岩为典型特征, 但是泥岩含量有所增加, 特别是这套滨海相沉积在野外露头上以厚层碳酸盐岩为标志层, 通过岩性判别, 这些厚层碳酸盐岩为生屑灰岩。该生屑灰岩在野外露头上表现为浅灰色, 厚度约 2~3 m, 由于暴露风化, 多具有破碎特征(图 6)。该灰岩内生生物碎屑发育, 主要有鹿角珊瑚、海胆、贝壳类等生屑化石(图 7)。通过野外岩石样品取样制片观察, 这

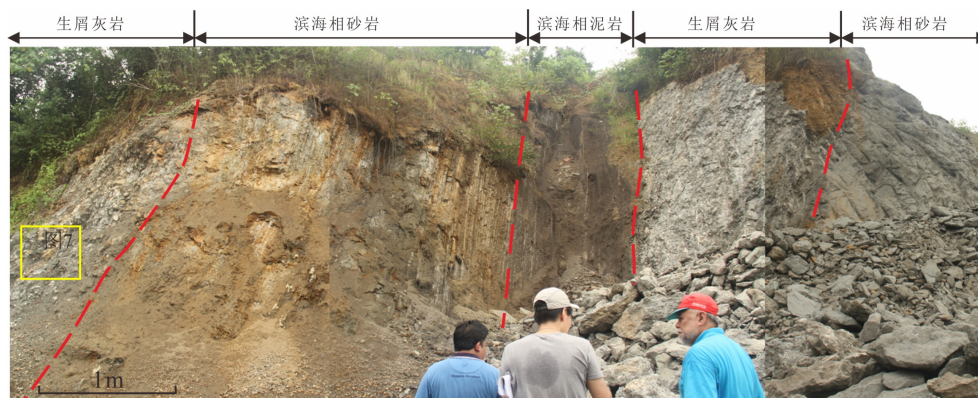


图 6 滨海相沉积野外露头剖面图

位置见图 1。

Fig.6 Outcrop of littoral facies sediment

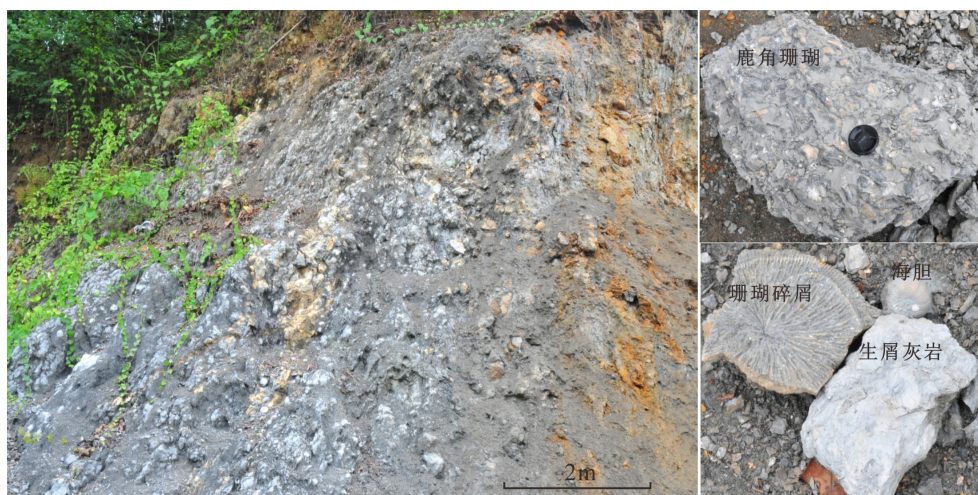


图 7 生屑灰岩野外露头

露头位置见图 6 黄色方框。

Fig.7 Outcrop of bioclastic limestone

The location of the outcrop is shown in the yellow box in Fig. 6.

些生屑灰岩内富含珊瑚、海绵等造礁生物化石(图 8)。

该厚层生屑灰岩上覆在厚层砂岩之上,二者之间没有明显的泥岩层发育。厚层砂岩表现为黄色-浅黄色,厚度约 4~5 m,钻井揭示最大厚度可达 20 m。砂岩内多发育水平层理、丘状-槽状交错层理,顶部有大量炭屑和虫孔,反映了滨浅海相沉积环境。岩性由下向上:底部为粉砂岩-细粒砂岩、并向上逐渐变粗、变厚,呈现反韵律特征,厚层砂岩之下为暗色—浅棕色厚层泥岩,下伏厚层生屑灰岩,指示着另一沉积旋回。

4 下中新统滨海相混积序列沉积模式

4.1 混积序列沉积模式

库泰盆地马哈坎褶皱带在早中新世临近陆架

坡折,在海平面较高时期,主要沉积海相泥岩,对应着钻井和露头观察到的厚层暗色—浅棕色泥岩。由于马哈坎三角洲向东进积发育,携带大量物源至研究区,在相对海平面较低时期,大量的粗粒碎屑被搬运至河口进入海岸,在波浪的搬运下,沉积至临滨,且细粒、偏泥质沉积物被携带相对较远(图 9)。随着相对海平面持续下降,粗粒物质能被携带的距离越来越远,在垂向上形成反韵律特征(图 9)。

在一段时间的相对海平面下降后,发生海侵事件,海平面快速升高,三角洲退积,陆源碎屑影响不到研究区。由于研究区处于热带,有利于生屑灰岩发育,在研究区沉积厚层生屑灰岩(图 9)。但随着海平面不断上升,一段时间后,生屑灰岩被海水淹没,停止发育,此时研究区沉积海相泥岩,表现为厚层泥岩覆盖在生屑灰岩之上,此时对应最大海泛

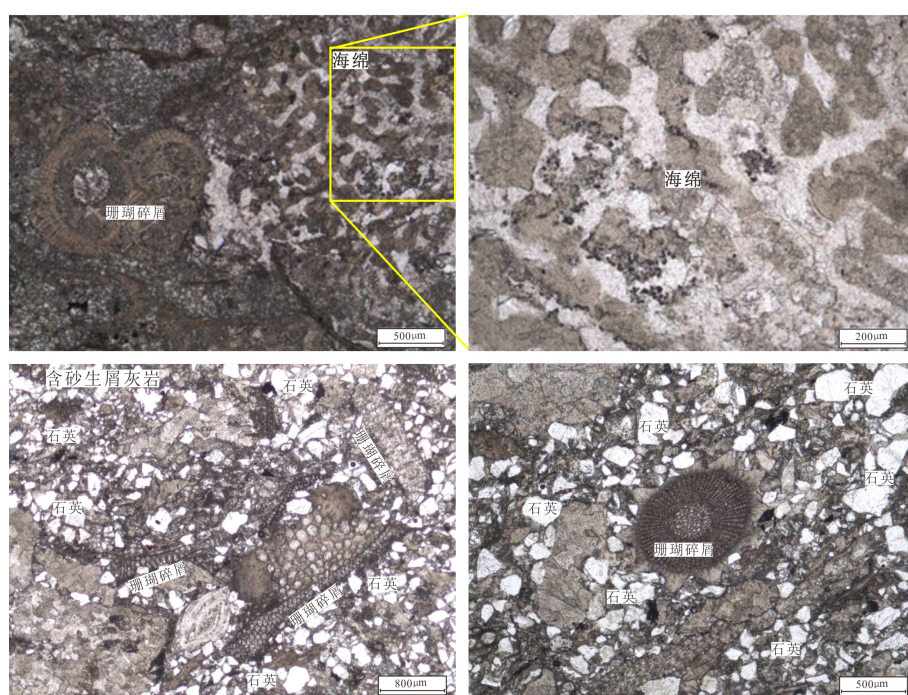


图 8 生屑灰岩镜下特征照片

Fig.8 Microscopic pictures of bioclastic limestone

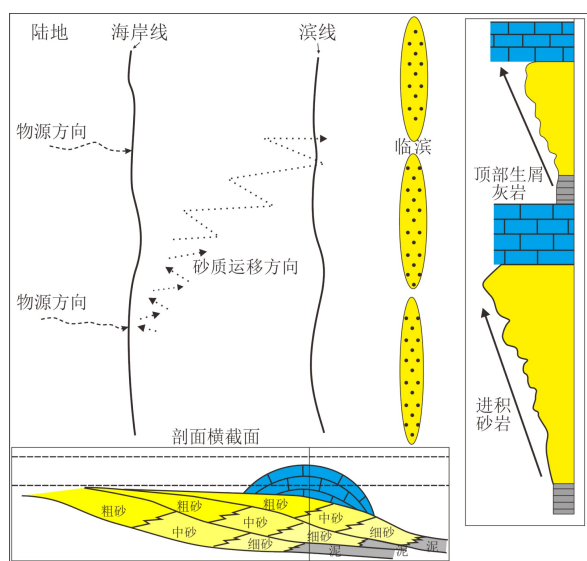


图 9 滨海相地层发育模式图

Fig.9 Sketched model for the development of shallow marine sediments

面,也标志着海侵事件的结束。

随后,另一期海退事件发生,相对海平面快速下降,马哈坎三角洲进积,碎屑岩沉积占主导地位,沉积进积型砂岩,开始一个新的旋回。马哈坎褶皱带早中新世多次海侵、海退频繁发生导致了多套滨海相泥岩-砂岩-生屑灰岩沉积旋回的发育。

4.2 混积序列发育控制因素

研究区下中新统滨海相沉积独特之处在于厚

层砂岩上覆厚层生屑灰岩,具有明显的交互混合沉积特征^[15-17],这种混积序列主要控制因素包括构造升降、海平面变化、气候、物源供应、突发性事件等^[17]。下中新统滨海相沉积发育多套特征相似的混合沉积旋回,在相对纯净的砂岩之上发育厚层生屑灰岩,似乎与经典的碳酸盐岩生长模式相悖^[18-27]。但是研究区所处的构造背景和地理位置可以解释该交互混积序列发育的可能。

相对海平面的频繁变化可能为该混积序列发育的主控因素。伴随南海扩张、东苏拉威西海消亡及晚期苏禄海扩张,库泰盆地进入拗陷期,海平面整体处于上升阶段。但是,由于库泰盆地马哈坎褶皱带处于近东西向挤压应力场,早中新世开始,构造变形即比较强烈,研究区挤压背斜开始形成。始于早中新世的挤压反转构造运动造就了一系列近北北东-南南西向背斜,这些背斜的轴部走向基本与海岸线、陆架坡折带平行^[10-13]。挤压反转隆升速率和海平面的变化主要控制了相对海平面的变化,进而导致了三角洲进积的速率,影响了滨海相沉积旋回的发育。由于马哈坎褶皱带挤压应力活跃,幕式挤压反转作用导致研究区相对海平面频繁快速变化,导致碎屑岩和生屑灰岩交互发育。

在海平面相对低时期,三角洲占据主导地位,虽然早中新世马哈坎三角洲还未发育至中中新世规模,但也能输入大量的陆源碎屑至河口,进而被波浪作用携带至临滨,沉积厚层砂岩;在构造相对

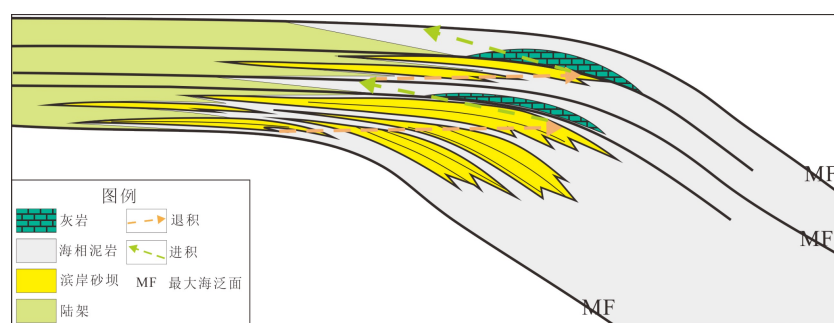


图 10 研究区混积序列沉积模式图

Fig.10 Sketched model for the mixed sediment system in shallow marine system

平静期,整体南海扩张和苏禄海扩张的背景下,海平面上升,马哈坎褶皱带发育的一系列背斜构造为生屑灰岩的发育提供了有利的场所,这些生屑灰岩往往在这些局部高点上生长^[20-22],沿着或平行于陆架坡折带,呈北北东-南南西向展布(图 10),而且研究区位于热带,所处的地理位置有利于生屑灰岩的发育^[23]。

随着海平面持续上升,生屑灰岩停止发育,之上覆盖厚层海相泥岩,这套泥岩也代表一次最大海泛面。但在此之后,挤压构造又占据主导,相对海平面下降,三角洲进积,在厚层海相泥岩之上沉积厚层滨海相砂岩,一个新的沉积旋回开始。因此,在研究区这种特殊的挤压构造活动频繁的热带地区^[22-23],发育了生屑灰岩直接上覆于砂岩之上的沉积现象,泥岩上覆于生屑灰岩之上。

4.3 下中新统混积序列油气勘探意义

库泰盆地中新统交互混积序列的发现,揭示了下中新统受碳酸盐岩碎屑干扰的规模砂岩储层,扩展了库泰盆地油气勘探新层系,这套混积序列临近烃源岩层系,厚度大、分布广、物性好,是规模有利储层,在库泰盆地马哈坎褶皱带及其以西地区,寻找该混积序列是油气勘探的关键。同时,该套混积序列明确了研究区滨海相砂岩储层的重要标志层——上覆的碳酸盐岩沉积。在钻井过程中,厚层海相碳酸盐岩的出现,即预示下伏规模滨海相砂岩储层的出现,可能发现规模气层,为油气勘探作业提供了技术保障。

5 结论

(1)库泰盆地马哈坎大型三角洲的发育,为马哈坎褶皱带中新统三角洲砂岩储层提供了充足的物源,使马哈坎褶皱带成为库泰盆地主要油气产区。同时,马哈坎三角洲的发育与相对海平面的变

化,控制了下中新统海相地层的沉积旋回的发育,导致研究区内沉积多期次旋回的混合沉积。

(2)早中新世,在相对海平面低时期,三角洲占主导,马哈坎三角洲输入的陆源碎屑被波浪作用搬运至临滨,形成滨海相砂岩;在相对海平面高时期,马哈坎三角洲退积,在滨海-陆架坡折位置发育生屑灰岩;随着海平面持续上升,生屑灰岩淹没,被厚层泥岩覆盖;随着海平面的下降,开始下一个沉积旋回,以厚层滨海相砂岩为标志。挤压应力场为主的环境控制了频繁的相对海平面变化,导致了研究区内滨海相混合沉积的发育。

参考文献 (References)

- [1] Hall R, Cloke I R, Nur'aini S, et al. The North Makassar straits: what lies beneath? [J]. *Petroleum Geoscience*, 2009, 15 (2): 147-158.
- [2] 史卜庆, 徐宁, 鲁银涛, 等. 印尼库泰盆地新成藏组合的发现及其石油地质意义[C]//童晓光. 跨国油气勘探开发研究论文集. 北京: 石油工业出版社, 2015: 118-127. [SHI Buqing, XU Ning, LU Yintao, et al. Discovery of new accumulation assemblages in Kutai Basin, Indonesia and its petroleum geological significance[C]//TONG Xiaoguang. Proceedings of Transnational Oil and Gas Exploration and Development Research. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015: 118-127.]]
- [3] 鲁银涛, 栾锡武, 史卜庆, 等. 加里曼丹岛库泰盆地Naga Utara-1井下中新统油、气样品特征分析[J]. *地质学报*, 2017, 91 (4): 928-941. [LU Yintao, LUAN Xiwu, SHI Boqing, et al. Feature analysis of oil and gas samples from well Naga Utara-1 in the Kutei Basin, Kalimantan island [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91 (4): 928-941.]
- [4] 鲁银涛, 栾锡武, 史卜庆, 等. 加里曼丹岛库泰盆地海相成藏组合特征及油气富集区分带性分析[J]. *海洋科学*, 2019, 43 (1): 38-49. [LU Yintao, LUAN Xiwu, SHI Boqing, et al. Characteristics of Lower Miocene marine petroleum play and prospective petroleum accumulation region in the Kutei Basin, the Kalimantan Island [J]. *Marine Sciences*, 2019, 43 (1): 38-49.]
- [5] 郭福生, 严兆彬, 杜杨松. 混合沉积、混积岩和混积层系的讨论[J]. *地学前缘*, 2003, 10 (3): 68. [GUO Fusheng, YAN Zhaobin, DU Yangsong. Discussion of mixed deposits, mixed rocks and mixed bedding systems [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10 (3): 68.]

- [6] 郭福生. 浙江江山藕塘底组陆源碎屑与碳酸盐混合沉积特征及其构造意义[J]. *沉积学报*, 2004, 22(1): 136-141. [GUO Fusheng. Characteristics and tectonic significance of mixing sediments of siliciclastics and carbonate of outangdi formation in Jiangshan, Zhejiang province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(1): 136-141.]
- [7] 郭书元, 张广权, 陈舒薇. 陆表海碎屑岩—碳酸盐岩混积层系沉积相研究——以鄂尔多斯东北部大牛地气田为例[J]. *古地理学报*, 2009, 11(6): 611-627. [GUO Shuyuan, ZHANG Guangquan, CHEN Shuwei. Study on sedimentary facies of mixed clastic-carbonate sediments strata system in epicontinental sea——A case of Daniudi Gasfield in northeastern Ordos [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11(6): 611-627.]
- [8] 张强, 吕福亮, 毛超林, 等. 印度尼西亚库泰盆地油气地质特征及勘探方向[J]. *海相油气地质*, 2012, 17(4): 8-15. [ZHANG Qiang, LYU Fuliang, MAO Chaolin, et al. Petroleum geology and exploration prospect in Kutai Basin, Indonesia [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2012, 17(4): 8-15.]
- [9] Moss S J, Chambers J L C. Tertiary facies architecture in the Kutai Basin, Kalimantan, Indonesia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 1999, 17(1-2): 157-181.
- [10] McClay K, Dooley T, Ferguson A, et al. Tectonic evolution of the sanga Sanga block, Mahakam delta, Kalimantan, Indonesia [J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(6): 765-786.
- [11] Cibaj I. Miocene stratigraphy and paleogeography of lower Kutei Basin, East Kalimantan—a synthesis[C]//Proceedings, Indonesian Petroleum Association, Thirty-seventh Annual Convention & Exhibition. IPA, 2013.
- [12] Peters K E, Snedden J W, Sulaeman A, et al. A new geochemical-sequence stratigraphic model for the Mahakam Delta and Makassar Slope, Kalimantan, Indonesia [J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(1): 12-44.
- [13] Duval B C, Cassaigneau C, De Janvry C, et al. Technology and exploration efficiency in the Mahakam Delta province, Indonesia[C]//Proceeding of the 15th World Petroleum Congress. Beijing: World Petroleum Congress, 1998: 187-200.
- [14] 薛良青, Galloway W E. 扇三角洲、辫状河三角洲与三角洲体系的分类[J]. *地质学报*, 1991, 65(2): 141-153. [XUE Liangqing, Galloway W E. Fan-delta, braid delta and the classification of delta systems [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1991, 65(2): 141-153.]
- [15] 瞿建华, 杨荣荣, 唐勇. 准噶尔盆地玛湖凹陷三叠系源上砂砾岩扇-断-压三控大面积成藏模式[J]. *地质学报*, 2019, 93(4): 915-927. [QU Jianhua, YANG Rongrong, TANG Yong. Large area petroleum accumulation model of the Triassic glutenite reservoirs in the Mahu Sag, Junggar Basin: triple controls of fan, fault and overpressure [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(4): 915-927.]
- [16] 邹妞妞, 张大权, 史基安, 等. 准噶尔西北缘玛北地区扇三角洲砂砾岩岩相分类及储集意义[J]. *地质学报*, 2017, 91(2): 440-452. [ZOU Niuniu, ZHANG Daquan, SHI Ji'an, et al. Lithofacies classification of Glutenite in the fan delta of the Mabei area in the northwestern Junggar Basin and its reservoir significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(2): 440-452.]
- [17] 林春明, 张霞, 徐振宇, 等. 长江三角洲晚第四纪地层沉积特征与生物气成藏条件分析[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(5): 589-601. [LIN Chunming, ZHANG Xia, XU Zhenyu, et al. Sedimentary characteristics and accumulation conditions of shallow-biogenic gas for the late quaternary sediments in the Changjiang river delta area [J]. *Advances in Earth Sciences*, 2015, 30(5): 589-601.]
- [18] 马玉波, 吴时国, 邢树文, 等. 南海北部陆坡混合沉积地层模式及地震响应特征[J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 2012, 40(S1): 88-95. [MA Yubo, WU Shiguo, XING Shuwen, et al. Stratigraphic model and seismic characteristics of the mixed sedimentation in the slope area of north South China Sea [J]. *Journal of Jilin University:Earth Science Edition*, 2012, 40(S1): 88-95.]
- [19] 董桂玉, 陈洪德, 何幼斌, 等. 陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究中的几点思考[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(9): 931-939. [DONG Guiyu, CHEN Hongde, HE Youbin, et al. Some problems on the study of the mixed siliciclastic-carbonate sediments [J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(9): 931-939.]
- [20] 江茂生, 沙庆安. 碳酸盐与陆源碎屑混合沉积体系研究进展[J]. *地球科学进展*, 1995, 10(6): 551-554. [JIANG Maosheng, SHA Qing'an. Research advances in the mixed siliciclastic-carbonate sedimentary systems [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1995, 10(6): 551-554.]
- [21] 王萍, 谭先锋, 陈浩, 等. 早志留世埃隆期上扬子海洋生物礁发育过程及制约机制——以渝南-黔北地区石牛栏组为例[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(6): 623-640. [WANG Ping, TAN Xianfeng, CHEN Hao, et al. The development process and restriction mechanism of Reefs (Aeronian, Early Silurian) in the Paleo-Ocean of Upper Yangtze Region—the Shiniulan formation of southern Chongqing and Northern Guizhou province as an example [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(6): 623-640.]
- [22] 余克服, 张光学, 汪稔. 南海珊瑚礁: 从全球变化到油气勘探——第三届地球系统科学大会专题评述[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(11): 1287-1293. [YU Kefu, ZHANG Guangxue, WANG Ren. Studies on the coral reefs of the South China Sea: From global change to oil-gas exploration [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(11): 1287-1293.]
- [23] Ran W M, Luan X W, Lu Y T, et al. Formation and evolution of the tertiary carbonate reefs in the Madura Strait Basin of Indonesia [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2019, 37(1): 47-61.
- [24] 马玉波, 吴时国, 谷明峰, 等. 西沙海区碳酸盐台地地震反射特征及沉积模式[J]. *海洋学报*, 2010, 32(4): 118-128. [MA Yubo, WU Shiguo, GU Mingfeng, et al. Seismic reflection characteristics and depositional model of carbonate platforms in Xisha sea area [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(4): 118-128.]
- [25] 杨振, 吴时国, 吕福亮, 等. 西沙海区晚新生代碳酸盐台地的发育模式及控制因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(5): 47-55. [YANG Zhen, WU Shiguo, LYU Fuliang, et al. Evolutionary model and control factors of late Cenozoic carbonate platform in Xisha area [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(5): 47-55.]
- [26] 马玉波, 吴时国, 杜晓慧, 等. 西沙碳酸盐岩建隆发育模式及其主控因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(4): 59-67. [MA Yubo, WU Shiguo, DU Xiaohui, et al. Evolutionary model and control factors of Xisha carbonate buildup [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(4): 59-67.]
- [27] Lu Y T, Li W, Wu S G, et al. Morphology, architecture, and evolutionary processes of the Zhongjian Canyon between two carbonate platforms, South China Sea [J]. *Interpretation*, 2018, 6(4): SO1-SO15.