

转换型被动大陆边缘盆地结构特征与勘探领域

田纳新¹, 郭丰涛¹, 张忠民¹, 刘静静¹, 李会宪², 王兴华¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206; 2. 中国石化河南油田分公司勘探开发研究院, 河南 南阳 473009)

摘要:转换型陆缘盆地已成为全球油气勘探的重要战略接替区,近年来持续取得突破性发现。基于全球典型转换型陆缘盆地的分布特征与结构样式综合分析,提出以“裂陷期—拗陷期—陆缘期”为核心的3阶段盆地演化模式,并建立“裂陷层—拗陷层—陆缘层”3大构造层划分方案,系统阐明盆地结构格局及构造层序对烃源岩发育、储集层展布等关键成藏要素的控制作用。研究认为:拗陷期受边缘脊或高原构造阻隔影响,向陆一侧广泛发育局限海环境,为优质烃源岩的大规模形成与保存提供了关键地质背景;陆缘期沉积体系受物源供给条件与气候差异的共同制约,发育坡底扇、大型进积三角洲和台缘碳酸盐岩3类主要储集层,其沉积厚度对下伏烃源岩的热演化过程具有重要控制作用。在此基础上,进一步建立3种典型成藏模式:坡底扇型储层通过与拗陷层烃源岩的高效耦合形成优质源-储组合,微裂缝网络有效沟通油源;大型进积三角洲型常发育滚动背斜、挤压构造及底辟构造等砂岩圈闭,为油气聚集提供有利圈闭条件;台缘礁体型储层紧邻斜坡烃源灶,油气沿裂缝带实现垂向输导,并在礁相高孔、渗滤层中富集成藏。大西洋赤道段、东非地区及中大西洋两岸转换型陆缘盆地中发育的坡底扇、三角洲和台缘碳酸盐岩具有巨大的油气资源潜力。

关键词:油气潜力;沉积充填;拗陷层烃源岩;构造层;转换型陆缘盆地;被动大陆边缘

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Structural characteristics of transform passive continental margin basins and their exploration domains

TIAN Naxin¹, GUO Fengtao¹, ZHANG Zhongmin¹, LIU Jingjing¹, LI Huixian², WANG Xinghua¹

(1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 2. Exploration & Production Research Institute, Henan Oilfield Branch Company, SINOPEC, Nanyang, Henan 473009, China)

Abstract: Transform continental margin basins have emerged as important frontier areas for global oil and gas exploration, with several significant discoveries reported in recent years. Based on a comprehensive analysis of the distribution patterns and structural styles of typical transform continental margin basins worldwide, this study proposes a three-stage basin evolution model consisting of the “rifting phase, sag phase, and continental margin phase”. Correspondingly, a tripartite tectonostratigraphic framework comprising the rift sequence, sag sequence, continental margin sequence is established to clarify the influence of basin architecture and tectonostratigraphic layering on key elements of the petroleum system, including source rock development and reservoir distribution. As indicated by the research results, during the sag phase, influenced by the barrier effects of marginal ridges or plateau structures, restricted marine environments widely developed on the landward side, providing favorable geological conditions for the large-scale development of high-quality source rocks. During the continental margin phase, depositional systems were jointly controlled by sediment supply and climatic variations, forming three major reservoir types: base-of-slope fan, large progradational delta, and platform-margin carbonate. The depositional thickness of these sedimentary successions exerted first-order control on the thermal evolution of the underlying source rocks. On this basis, three typical hydrocarbon accumulation models are proposed: base-of-slope fan reservoirs, in which efficient coupling with sag-phase source rocks result in the formation of high-quality source-reservoir assemblages, with microfracture networks facilitating

收稿日期:2025-11-06;修回日期:2026-02-11。

第一作者简介:田纳新(1968—),男,博士、高级工程师,含油气盆地构造分析和油气地质。E-mail: tiannx.syky@sinopec.com。

通信作者简介:郭丰涛(1989—),男,博士、副研究员,沉积层序与油气地质。E-mail: guofengtao.syky@sinopec.com。

基金项目:新型油气勘探开发国家科技重大专项(2025ZD1400805-02);中国石化科研项目(P21043-3, P22086, P22214-1)。

hydrocarbon migration; large progradational delta reservoirs characterized by commonly developed sandstone traps such as rollover anticlines, compressional structures, and diapiric structures, providing favorable conditions for hydrocarbon accumulation; platform-margin reef reservoirs, occurring adjacent to slope source kitchens, where hydrocarbons migrate vertically along fracture corridors and accumulate in high-porosity and high-permeability reefal reservoirs. Base-of-slope fans, deltas, and platform-margin carbonates developed in transform continental margin basins along the equatorial Atlantic margin, East Africa, and both margins of the Central Atlantic exhibit enormous hydrocarbon resource potential.

Key words: hydrocarbon potential, sedimentary infill, sag-phase source rock, tectonostratigraphic layer, transform continental margin basin, passive continental margin

引用格式:田纳新,郭丰涛,张忠民,等. 转换型被动大陆边缘盆地结构特征与勘探领域[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(3): 761-776. DOI: 10.11743/ogg20260304.

TIAN Naxin, GUO Fengtao, ZHANG Zhongmin, et al. Structural characteristics of transform passive continental margin basins and their exploration domains[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(3): 761-776. DOI: 10.11743/ogg20260304.

大陆边缘盆地油气资源丰富,是油气勘探的重要领域。全球大陆边缘盆地可划分为离散型、汇聚型和转换型3类^[1-3]。近十多年来,大西洋沿岸被动陆缘盆地的油气勘探及大洋钻探揭示,贫岩浆型被动陆缘岩石圈结构与陆缘裂谷盆地构造格局、沉积充填之间具有很好的耦合关系^[4-5]。依据被动陆缘地壳结构特征,将陆缘区划分出近端带、细颈带、远端带、剥露带或洋-陆转换带等构造单元^[6-8]。转换型陆缘深部地壳结构与伴生盆地组构同样具有密切的成因联系。由于转换断裂活动,转换型陆缘形成了有别于贫岩浆型被动陆缘的深部地壳结构及盆地充填样式^[9-10],其特殊性主要表现在3个方面:①受转换断裂影响,转换型陆缘通常缺乏从陆到洋的完整构造单元,部分转换型陆缘甚至缺失远端带和剥露带,如 Côte d'Ivoire 盆地北缘(西象牙海岸)^[11];②发育与转换断裂平行的边缘脊或外缘高原^[12],如 Demerara 高原、Côte d'Ivoire-Ghana 脊;③发育独特的地形地貌,比如窄的陆架和极为陡峭的陆坡^[13]。Kusznir 等(2018)依据重磁资料揭示了赤道大西洋两岸地壳结构及厚度的变化^[14]。多项研究详细论述了南美与西非赤道段陆缘深部地壳结构及其沉积盆地的发育演化特点^[11, 14-15],并将受转换断层限定并被其强烈控制的被动陆缘盆地统称为转换型陆缘盆地^[16-21]。近年来,众多学者围绕转换型被动陆缘地质结构与构造演化^[9, 13, 22-25]、地层发育特征^[26-32]、深水沉积及油气资源潜力^[33-44]等开展了大量研究,其典型特征表现为具有窄陆架、陡陆坡的陆缘结构,深水区以小物源、短距离、近岸快速堆积为主,形成富砂的纵向叠置横向裙边状小型扇或扇复合体。

早期勘探普遍认为,转换型陆缘盆地断陷规模小、烃源岩分布局限^[34-36, 39]、埋深浅、烃源岩成熟度

低^[34, 36]、构造圈闭不发育^[35-36],制约了勘探发展。2007年,在 Côte d'Ivoire 盆地加纳海域 Jubilee 大型油气田的发现成为转折点。该油田可采储量 9.16×10^8 bbl 油当量(其中石油 7.37×10^8 bbl)^[27],引发石油公司持续探索被动陆缘盆地深水浊积砂岩勘探领域,并在近十年获得了一系列的重大油气发现,包括赤道大西洋 Guyana 盆地的 Liza 和 Haimara 油田,累计探明油气可采储量 154.00×10^8 bbl 油当量;中大西洋 Senegal 盆地的 Fan, Sne, Yakaar 和 Tortue 等油气田,累计探明油气可采储量 107.00×10^8 bbl 油当量。转换型陆缘盆地深水浊积砂岩成为全球油气储量增长的新亮点^[9, 13, 35],也推动学界重新关注转换型被动陆缘盆地的形成和演化^[45]。

本文基于全球典型转换型陆缘盆地的分布与结构分析,提出转换型陆缘盆地3个演化阶段及相应的构造层划分方案,揭示盆地结构及构造层对烃源岩发育、储集层分布等成藏要素的控制作用,并在此基础上提出有利的勘探方向。

1 全球转换型陆缘盆地的分布及结构特征

1.1 全球转换型陆缘盆地分布特征

Mercier de Lépinay 等(2016)基于断裂带、洋-陆边界及板块运动学的综合分析,在全球范围内识别出58个转换型陆缘盆地(图1)^[13]。这些盆地主要分布于大西洋赤道段、Labrador 海、Norwegian-Greenland 海、东南非海岸以及澳大利亚西北陆架等地区。

大西洋两岸发育的转换型陆缘盆地最多(北大西

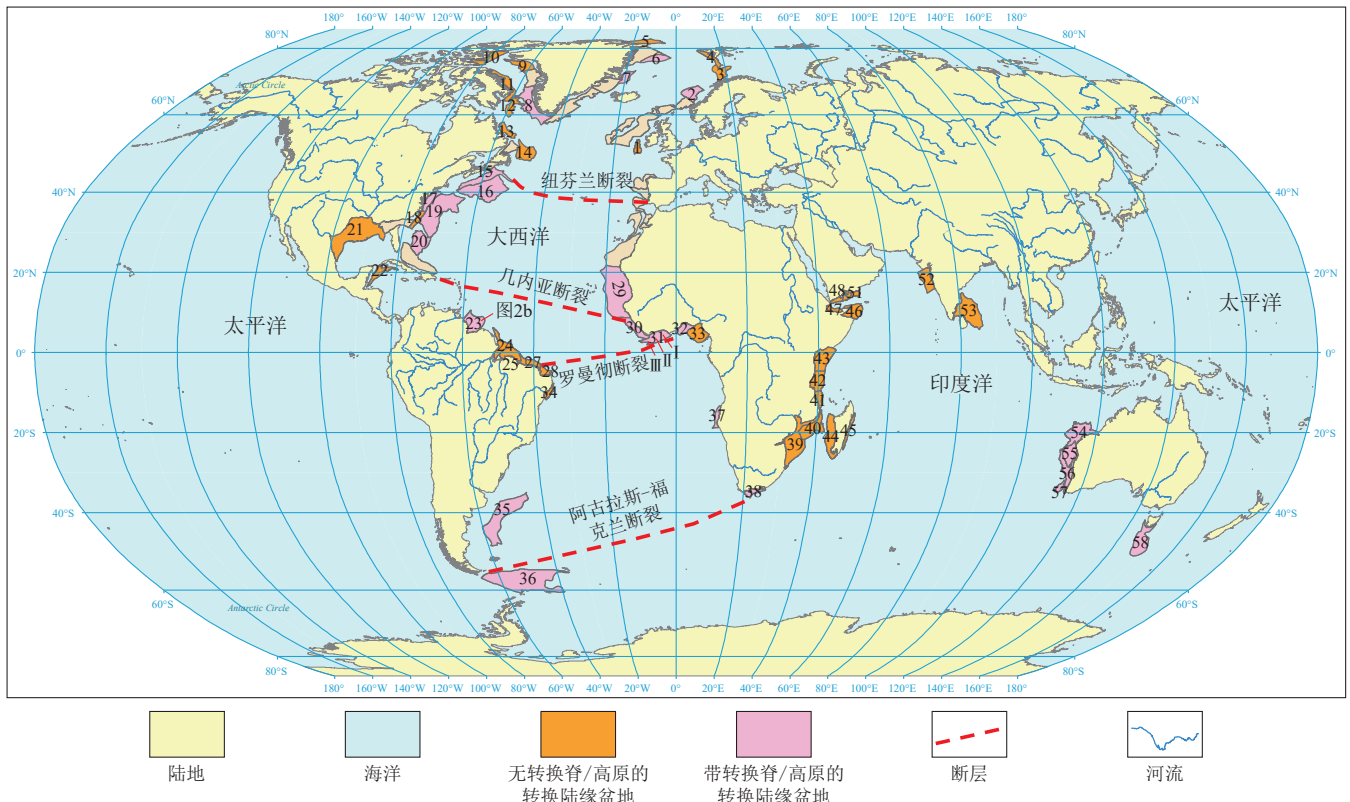


图1 全球转换型陆缘盆地分布

Fig. 1 Distribution of transform continental margin basins across the world

(图中数字为全球分布的转换型陆缘盆地编号,具体盆地名称见表1;罗马数字为图2a中的不同位置剖面。)

洋15个,中大西洋5个,赤道大西洋11个,南大西洋5个),代表性盆地包括Niger Delta盆地、Côte d'Ivoire盆地、Senegal盆地、Guyana盆地、Foz do Amazonas盆地、Potiguar盆地、Scotian盆地和Namibia盆地等(表1)。其中,前4个盆地的油气发现最为丰富。此外,印度洋周缘也发育了Mozambique盆地、Rovuma盆地和North Carnarvon盆地等转换型陆缘盆地。

板块旋转裂解部位或大型转换断层附近,常发育伴生边缘脊/高原的转换型陆缘盆地,如赤道大西洋两侧的Guyana盆地、Senegal盆地、Potiguar盆地、Côte d'Ivoire盆地等。当物源供给充足时,沿大型转换断裂向海延伸方向可形成大型三角洲盆地,如Niger Delta盆地、Rovuma盆地以及Foz do Amazonas盆地等(图1)。

1.2 现今转换型陆缘结构特征

Mercier de Lépinay等(2016)通过对全球78个转换型陆缘的统计分析发现,各个转换型陆缘长度变化很大,介于30~1310 km^[13]。其中,74%的陆缘长度集中在45~400 km,中位数为265 km,平均长度为320 km。

转换型陆缘突出特点之一是普遍发育边缘脊或边

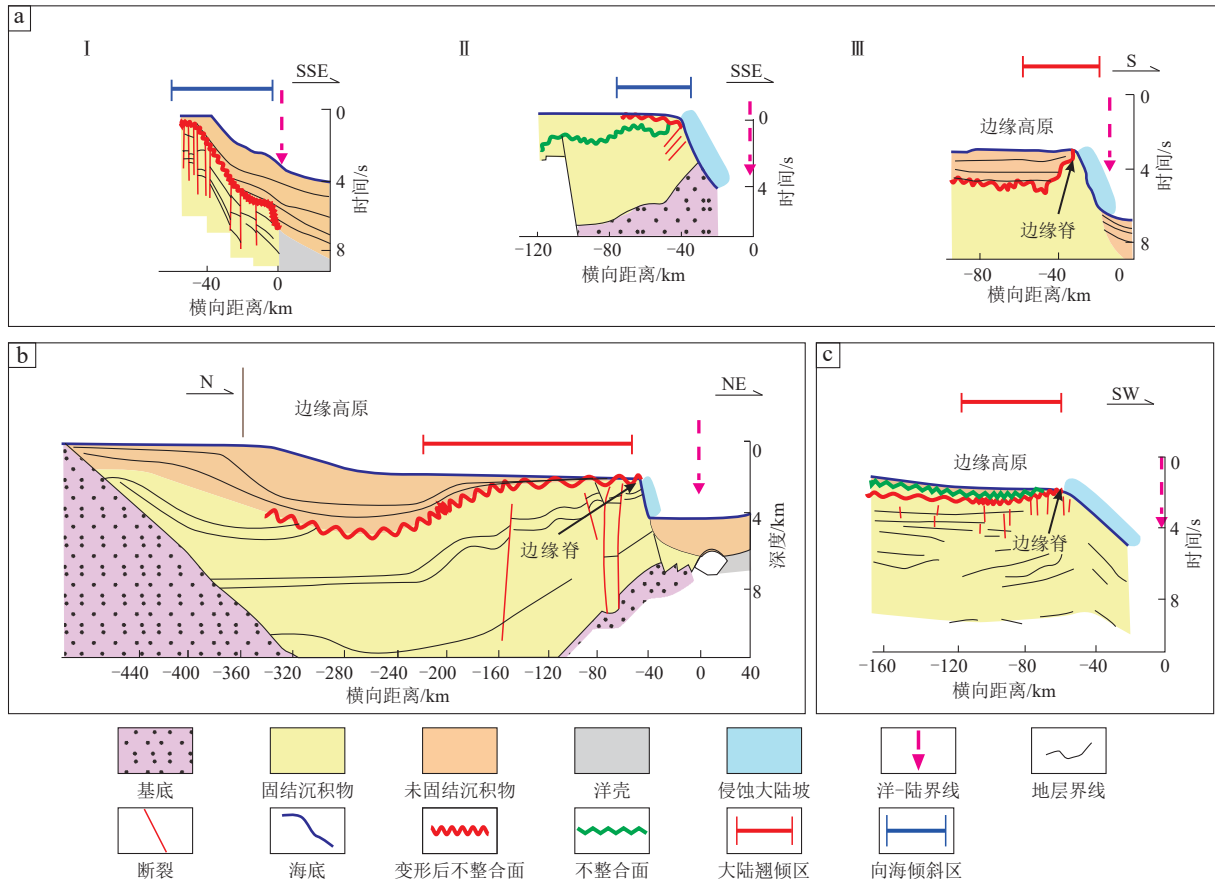
缘高原^[9, 12, 47-48]。边缘高原是指大陆坡上平坦、较深的地区,向海一侧常被转换断层所限定。绝大多数边缘脊位于两个不同时代的洋壳区,如Guinea高原北侧的中大西洋洋壳形成于190 Ma,而南侧的赤道大西洋洋壳形成于128 Ma。全球约1/3的已发现转换型陆缘均发育深水边缘高原,通常被认为是陆壳在转换型陆缘形成前受拉伸作用所致。边缘高原宽度介于9~124 km,水深在100~3400 m,平均水深为1250 m。

边缘脊是指大陆坡上靠海一侧的基底隆起,现今所观测到的边缘脊都位于转换型陆缘的边缘高原的外侧。根据形态特征,可将其划分为3种类型:①窄陡挠曲倾斜型(图2a),如Côte d'Ivoire陆缘和Voring脊,宽度很窄(20 km),向陆倾斜,呈挠曲形态;②宽缓倾斜型(图2b),如Falklands-Malvinas陆缘和Demerara脊,宽度大于150 km;③背斜型(图2c),如Exmouth高原和Diaz脊,宽度在50~100 km。关于边缘脊的发育机制,目前主要存在3种解释:①大陆内转换带两侧地壳厚度的差异^[49];②大陆岩石圈被更热的海洋岩石圈加热而发生隆升^[21];③沿转换断层陆壳岩石圈受侵蚀卸载引发的挠曲响应^[50]。基于地球物理方法,在78个转换型陆缘中识别出11个边缘脊^[13]。

表1 全球主要转换型被动陆缘盆地基本情况^[46]Table 1 Basic characteristics of major transform passive continental margin basins across the world^[46]

编号	所属大洋	构造单元	陆缘	盆地面积/km ²	沉积厚度/m	发现油气田数/个	发现可采储量	
							石油储量/MMbbl	天然气储量/Bcf
1	北大西洋	Porcupine 盆地	Rockall 海槽	44 858. 60	10 000	3	53	423. 0
2		Voring 盆地	Voring	101 014. 60	8 000	70	4 235	20 633. 0
3		West Barents 陆架边缘	Senja	68 776. 70	14 000	8	55	1 436. 0
4		Hornsund 断裂带	Spitzberg_Hornsund	34 575. 20	3 000	—	—	—
5		Wandel Sea 盆地	Northeast Greenland	33 529. 00	—	—	—	—
6		Thetis 盆地	East Greenland 隆起	55 410. 40	5 500	—	—	—
7		Liverpool Land 盆地	Jan Mayen	45 780. 30	10 000	—	—	—
8		West Greenland 盆地	Ungava Greenland	238 478. 00	13 500	—	—	—
9		Melville Bay 盆地	Baffin 2	70 104. 30	13 000	—	—	—
10		Bache 隆起	North Baffin	71 582. 90	—	—	—	—
11		Baffin 陆架	Baffin 1	87 396. 80	—	—	—	—
12		Lady Franklin 盆地	Ungava Canada	81 089. 20	—	—	—	—
13		Hopedale 盆地	Cartwright	66 215. 60	6 000	6	123	4 244. 0
14		Orphan 盆地	Orphan	164 784. 90	>8 000	—	—	—
15		Scotian 盆地	Newfoundland 高原	204 035. 60	—	27	189	7 260. 0
16	中大西洋	Sohm 盆地	East US Coast	492 663. 10	—	—	—	—
17		Baltimore Canyon 海槽	Blake Spur	95 766. 30	—	—	—	—
18		Carolina 海槽	Blake Spur	62 296. 00	—	—	—	—
19		Hatteras 盆地	Blake Spur	636 542. 50	—	—	—	—
20		Blake-Bahama 盆地	Jacksonville, Bahamas	233 792. 20	—	—	—	—
21	墨西哥湾	Gulf Coast 盆地	Mexico 湾	774 810. 00	15 000	1 053	45 498	419 832. 0
22	加勒比海	Yucatan 盆地	Oriente and Walton 转换断层	112 913. 60	—	—	—	—
23	赤道大西洋	Guyana 盆地	Demerara 高原	228 424. 80	>6 000	37	11 303	25 021. 0
24		Foz do Amazonas 盆地	Eastern French Guiana	147 114. 60	100 000	6	151	61. 0
25		Para-Maranhao 盆地	Para-Maranhao (Amazon delta)	145 835. 80	7 000	5	84	132. 0
26		Barreirinhas 盆地	Ceara	37 834. 60	110 000	7	1	0. 4
27		Piaui-Ceara 盆地	Ceara	64 679. 70	7 500	27	294	288. 0
28		Potiguar 盆地	Potiguar	58 185. 00	6 000	185	2 087	3 420. 0
29		Senegal 盆地	Guinea 高原	938 748. 30	13 000 ~ 17 000	33	1 554	55 284. 0
30		Sierra Leone-Liberia 盆地	Sierra Leone 高原	161 531. 50	8 000	7	294	259. 0
31		Cote d'Ivoire 盆地	Western Cote d'Ivoire	185 522. 40	10 000	69	3 098	9 527. 0
32		Benin 海湾	Cote d'Ivoire-Ghana	101 208. 10	6 500	10	396	1 369. 0
33		Niger Delta 盆地	Niger delta	211 984. 50	18 000	851	71 944	274 708. 0
34	南大西洋	Sergipe-Alagoas 盆地	Maceio	47 092. 40	9 000	119	2 364	8 515. 0
35		Argentina 盆地	Falklands-Malvinas	540 498. 80	—	—	—	—
36		West Scotia 盆地	Scotia Sea	750 173. 50	—	—	—	—
37		Namibe 盆地	Walvis, Benguela	60 125. 90	7 000	—	—	—
38		Outeniqua 盆地	Agulhas	64 014. 00	14 000	36	193	3 095. 0
39		Mozambique 盆地	Mozambique	473 455. 60	16 000	10	53	10 958. 0
40		Zambezi Delta 盆地	Mozambique	246 838. 90	12 000	—	—	—
41		Rovuma 盆地	Somali	71 241. 10	12 000	19	238	149 990. 0
42		Tanzania 盆地	Somali	188 074. 40	8 000	21	32	28 090. 0
43		Lamu 盆地	Somali	290 264. 80	11 000	6	12	605. 0
44	印度洋	Morondava 盆地	Southwest Madagascar	269 176. 50	10 000	6	680	221. 0
45		Tamatave 盆地	East Madagascar	61 788. 00	—	—	—	—
46		Sagaleh 盆地	Aden 湾	168 927. 00	5 000	—	—	—
47		Guban 盆地	Aden 湾	46 680. 40	5 000	—	—	—
48		Aden-Abiyar 盆地	Aden 湾	36 893. 70	—	—	—	—
49		Balhaf 地堑盆地	Aden 湾	19 387. 30	4 000	—	—	—
50		Rayan-Jahi-Mukalla 高原盆地	Aden 湾	26 205. 60	—	—	—	—
51		Mukalla-Sayhut 盆地	Aden 湾	35 015. 30	5 000	1	3	0. 3
52		Bombay 盆地	Bombay	176 983. 20	6 000	111	6 271	26 206. 0
53		Cauvery 盆地	Eastern India	439 553. 10	8 000	56	226	3 754. 0
54		North Carnarvon 盆地	Southern Exmouth 高原	307 185. 70	10 000	256	4 243	142 152. 0
55		South Carnarvon 盆地	Southern Exmouth 高原	189 632. 40	7 000	—	—	—
56		Perth 盆地	Perth	174 114. 60	—	—	—	—
57		Mentelle 盆地	Naturaliste 高原	39 130. 80	9 000	—	—	—
58		South Tasman 高原盆地	Western and Southern Tasmany 高原	243 730. 70	—	—	—	—

注：“—”表示未统计。

图2 典型转换型陆缘横剖面特征^[13](剖面位置见图1)Fig. 2 Cross-sectional characteristics of typical transform continental margins^[13] (see Fig. 1 for the section location)

a. Côte d'Ivoire 盆地, I, II 和 III 剖面来自于不同位置; b. Demerara 高原; c. Exmouth 高原

现代转换型陆缘的大陆架坡折水深介于40~240 m,与绝大部分陆缘类型相近;大陆架整体以约0.1°的坡度向海倾斜(表2)。大陆坡平均坡度为4.2°,略大于伸展型陆缘的平均坡度(3°)。通过对18个伸展型陆缘与11个转换型陆缘剖面对比发现,转换型陆缘由陆向海方向地壳快速减薄,细颈带显著变窄^[13]。与伸展型陆缘相比,转换型陆缘通常具有较窄的细颈带(宽度约50 km)和更陡的莫霍面结构^[13]。宽角度地震数据和重力模型的联合反演揭示,Côte d'Ivoire转换型陆缘洋-陆过渡带非常狭窄,莫霍面形态极为陡峭。Guyana地区细颈带宽度约为50 km,莫霍面倾角介于11°~18°^[13]。

1.3 转换型陆缘盆地结构特征

大西洋赤道段发育典型的转换型陆缘盆地,大量地震剖面及重磁资料揭示,赤道大西洋两岸的深部岩石圈结构以及盆地充填样式存在明显差异^[11, 14-15]。已有研究表明,赤道段陆缘深部岩石圈结构与转换断裂密切相关,尤其是洋-陆过渡带与转换断裂之间夹角变化,直接制约了深部构造单元的发育程度。

有学者提出利用倾斜度来划分转换型陆缘类型^[13]。倾斜度是指洋-陆过渡带与转换断裂之间的夹角,倾斜度介于0°~15°为转换型陆缘,介于15°~75°

表2 典型转换型陆缘坡度和宽度等地形参数统计^[16]Table 2 Topographic parameters of typical transform continental margins, including slope gradient and width^[16]

地形	最小坡度/(°)	平均坡度/(°)	中位坡度/(°)	最大坡度/(°)	最大宽度/km	最小宽度/km
大陆架	0	0.1	0.1	0.1	110	3.5
边缘高原	0	0.3	0.2	2.0	124	9.0
大陆坡	1.1	4.2	4.9	14.0	165	16.0
大陆隆和深海平原	0	0	0.1	0.3	—	—

注:“—”表示未统计。

为斜交转换型陆缘,大于 75° 则为受转换断裂活动影响的离散型陆缘,或简称为离散型陆缘。

在转换型陆缘和斜交转换型陆缘中,洋-陆过渡带与转换断裂之间的夹角较小。沿转换断裂及伴生的正断层发育了狭窄的细颈带(宽度约150 km),从而导致从细颈带向洋壳带的急剧快速过渡。

受转换断裂活动影响的离散型陆缘,其细颈带发育陡峭的正断层,可能伴生轻微的走滑分量,依据抬升的莫霍面可以识别出远端带。以Côte d'Ivoire盆地东缘(东象牙海岸段)为例,该段位于圣保罗转换断裂与罗曼彻转换断裂之间,倾斜角大于 75° ,属于离散型陆缘,可明显识别出4个构造单元,细颈带到远端带的宽度达240 km^[51]。

转换型陆缘和斜交转换型陆缘最典型的特征之一,是沿转换断裂发育边缘脊或转换边缘高原^[9]。这类构造是发育于洋-陆过渡带的岩浆脊或基底隆起,是在板块旋转裂开与转换断层共同作用下,沿转换断层带形成的岩浆体。其走向通常与转换断层延伸方向一致,介于大陆斜坡和深海平原之间。部分呈线状展布,如Côte d'Ivoire-Ghana边缘脊和Liberia脊;部分呈不规则隆起高原,如南美Demerara高原、共轭的西非Guinea高原以及Potiguar脊^[52]。以Côte d'Ivoire-Ghana边缘脊为例,其位于东象牙海岸离散型陆缘和Ghana转换型陆缘之间的交界处,宽度不足20 km,大致沿Romanche转换断裂呈弯长条形展布。依据破裂不整合及地层上超关系,该边缘脊的形成至少早于阿尔布(Albian)晚期^[9, 53]。

边缘脊或转换边缘高原对沉积充填具有重要影响。转换型陆缘岩浆活动相对较弱,岩浆活动主要沿大型转换断裂呈带状展布。这些边缘脊形成于同转换期,其沉积环境逐渐从海-陆过渡相演变为浅海相环境。沿转换断裂的岩浆活动形成了海底高原或线状脊,对同期沉积水体起到一定的隔挡作用。因此,边缘脊或转换边缘高原的发育,营造了相对封闭的滨海-半深海相环境,有利于在转换期(拗陷期)形成优质的烃源岩层。

2 典型转换型陆缘盆地成藏特征

从目前油气发现情况来看,带边缘脊/高原的转换型陆缘盆地和大型三角洲盆地油气较为富集。受盆地结构、古构造、古气候和物源供给的综合影响,不同转换型陆缘盆地的沉积体系存在明显差异,主要形成3类沉积充填结构:①三角洲-坡底浊积扇型,如

Guyana盆地和Côte d'Ivoire盆地上白垩统发育陆架三角洲-深水坡底扇浊积体;②大型三角洲型,如Niger Delta盆地、Rovuma盆地和Foz do Amazonas盆地发育了大规模三角洲沉积体系;③碳酸盐台地型,如Senegal和Scotian等盆地中、上侏罗统-下白垩统发育了厚层碳酸盐岩和生物礁。不同沉积结构盆地的成藏特征亦存在较大差异,下面分别以Côte d'Ivoire盆地、Rovuma盆地和Senegal盆地为典型代表加以论述。

2.1 Côte d'Ivoire盆地(三角洲-坡底浊积扇型)

Côte d'Ivoire盆地位于赤道大西洋西非侧(图1;表1),处于大西洋赤道段非洲板块和南美洲板块分离时的转换位置,其形成演化受控于南美洲和非洲大陆旋转分离以及赤道大西洋的开启。

2.1.1 构造沉积特征

Côte d'Ivoire盆地经历了3期构造沉积演化:①裂陷期(早阿尔布期之前)。该期以横向扭错作用为主,形成垒-堑相间结构,在伸展地堑中发育河流相、三角洲相和湖相沉积。岩性为砂岩、页岩和砾岩,沉积厚度超过2 000 m。②拗陷期[晚阿尔布期-森诺曼期(Cenomanian)]。该期以热沉降为主,在末端发育一系列小型褶皱、反转断层及正花状构造等。沉积环境以浅海相、陆棚相和滨岸相硅质碎屑岩为主。该时期的挤压事件导致Romanche转换断层沉陷带内沉积物变形并抬升,形成了规模巨大的、沿Romanche转换断层分布的“Côte d'Ivoire-Ghana边缘脊”。③陆缘期。土伦期(Turonian)为陆缘早期,陆架区发育三角洲,多级坡折控制了深水浊积砂岩的分布(图3);马斯特里赫特期(Maastrichtian)之后进入陆缘晚期沉积。盆地陆缘层沉积地层厚度为1 000~5 000 m。

2.1.2 陆缘结构

Côte d'Ivoire盆地的边界受两条大型转换断裂带控制:北部以St. Pau断裂带及其陆上延伸部分——Lagunas断层为界;南部为Romanche断裂带所限。伴随Romanche断裂带的演化,形成了北东-南西向展布的Côte d'Ivoire-Ghana边缘脊,该边缘脊将陆壳之上的Côte d'Ivoire盆地和洋壳分割开来。晚白垩世,盆地呈现窄陆架、陡陆坡的结构特征,发育典型的坡底扇型转换陆缘。

2.1.3 生-储-盖条件及油气成藏特征

Côte d'Ivoire盆地发育2套主力烃源岩,分别为裂

陷期阿普特阶(Aptian)-下阿尔布阶湖相烃源岩和拗陷期上阿尔布阶-森诺曼阶海相烃源岩。前者受控于菱形转换断块形成的地堑形状和结构,沉积环境从湖相到海相变化,干酪根类型以Ⅱ型为主;后者受控于边缘脊与陆架所构成的局限环境(如Romanche断裂带围限区域),以海相泥岩沉积为主,干酪根类型为Ⅱ₁-Ⅲ型。

储集层包括裂陷期陆相-过渡相砂岩和陆缘期海相砂岩两大套。前者以上阿尔布阶砂岩最为重要,其储量占盆地总储量的75%,砂岩横向不连续,局部地区变化很大,但储层物性非常好;陆缘层土伦阶浊积砂岩厚度大,储集物性好,如Jubilee油气田孔隙度为17%~23%,渗透率为 $(100 \sim 3\,000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

深水區形成2类主要油气藏。①构造型油气藏。裂陷层-拗陷层烃源岩向阿尔布阶上部圈闭供烃,森诺曼阶不整合面及泥岩为盖层,形成自生自储型油气藏。圈闭主要为背斜和断块、断垒、断阶、穹窿构造,大型断裂控制了油气富集。②陆缘期陡坡三角洲-浊积砂岩油气藏。晚阿尔布期-森诺曼期拗陷层成熟烃源岩供烃,油气通过砂体或铲式正断层向上运移,在上白垩统浊积扇、深水河道、海底峡谷砂岩形成的地层圈闭中聚集成藏(图3)。

2.2 Rovuma盆地(大型三角洲型)

Rovuma盆地位于非洲东部(图1;表1),西邻

Mozambique褶皱带,东为Davie隆起带,南北分别与Zambezi盆地和Tanzania盆地相邻,整体呈南北向延伸。盆地深水區自西向东可划分为陆架-陆坡、Karibas地堑及Davie断裂隆起带3个单元,中部的Karibas地堑为地层沉降最大的区域。

2.2.1 构造沉积特征

Rovuma盆地发育在石炭系结晶基底之上,最大沉积地层厚度超过16 km。盆地的形成演化与冈瓦纳大陆的解体以及Davie断裂带的发育有关,大致可划分为4个演化阶段。①裂前期(二叠纪—三叠纪)。该时期冈瓦纳古陆沿构造活动带发生裂陷,形成陆内裂谷,充填了一套厚度较大、范围较广的以河流-冲积扇为主的陆相红层。②裂陷期(早侏罗世)。该时期冈瓦纳超级大陆开始裂解,东非和马达加斯加裂开形成地堑。古特提斯洋海水率先沿地堑从东北方向侵入裂陷盆地,形成海湾状的局限海环境,发育了侏罗统重要的烃源岩。该套沉积地层厚度约为2 500 m。③拗陷期(中侏罗世—早白垩世)。该时期海底扩张使原冈瓦纳超级大陆彻底分离,Davie断裂带开始发育并形成隆起带,与非洲大陆之间构成了半局限环境,有利于烃源岩发育,沉积地层厚度约为4 055 m;④陆缘期(晚白垩世—现今)。尤其是渐新世开始(陆缘晚期),东非大陆发生抬升,沉积物供应量增加,Rovuma三角洲体系迅速向海推进,进入陆坡深水區,沉积地层厚度为1 340~2 760 m。

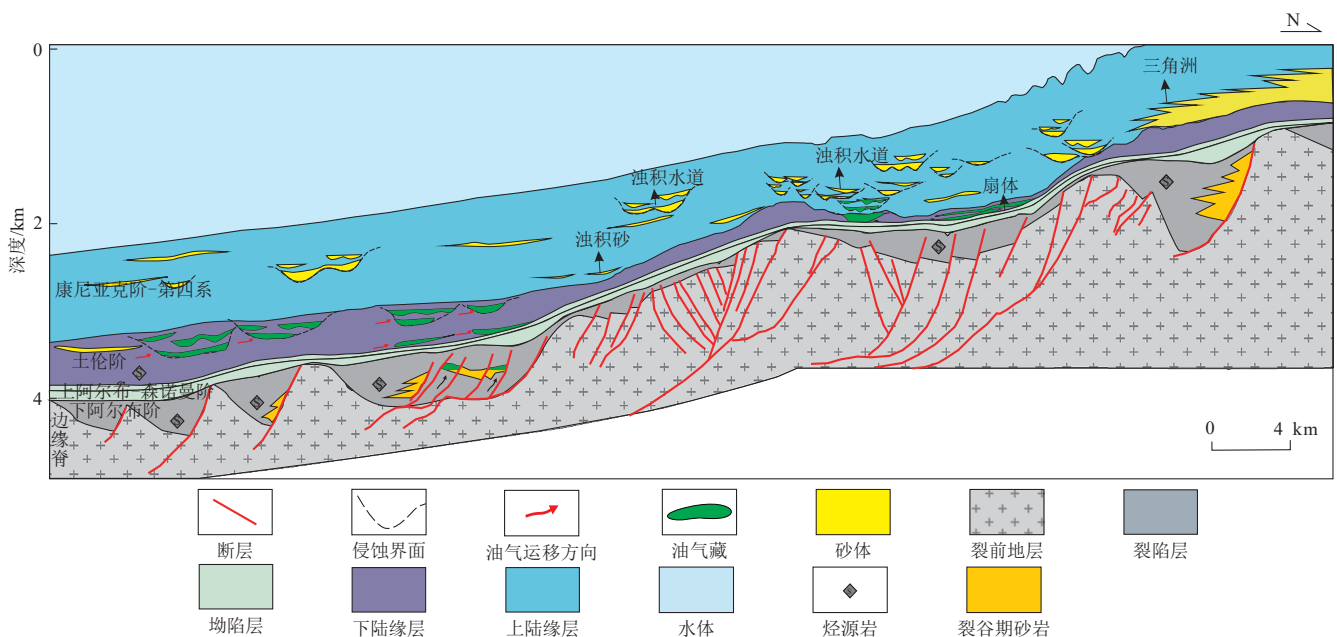


图3 Côte d'Ivoire盆地结构、沉积充填与油气藏分布剖面

Fig. 3 Cross-section of structural framework, sedimentary infill, and reservoir distribution in the Côte d'Ivoire Basin

2.2.2 陆缘结构

Rovuma 盆地陆架较窄、陆坡陡峭,致使三角洲难以在陆架堆积,沉积物可直接越过陆架区,经由上陆坡峡谷水道继续向深水区搬运,最终在趋于平缓的下陆坡形成大规模、广覆式海底浊积扇(图4)。研究表明,Rovuma 三角洲深水区沉积范围虽仅有 $1 \times 10^4 \text{ km}^2$,但沉积厚度却超过 5 000 m,沉积速率高达 $62 \text{ m/Ma}^{[54]}$ 。

2.2.3 生-储-盖条件及油气成藏特征

Rovuma 盆地发育 3 套烃源岩,分别为二叠系-三叠系前裂陷期烃源岩、下侏罗统局限海相烃源岩和中侏罗统-白垩系海相烃源岩。其中,下侏罗统局限海相烃源岩已被陆地和浅水区钻井证实,总有机碳含量(TOC)为 0.7%~9.8%,有机质类型以 I 型和 II₁ 型为主,演化程度较高,推测为 Rovuma 盆地大型油气发现的主要烃源岩,但在深水区尚无钻井揭示。中侏罗世一早白垩世拗陷期,伴随 Davie 断裂带的形成,与非洲大陆之间构成了广泛的半局限环境,沉积厚度大,可能发育优质烃源岩。

储集层主要有白垩系三角洲和新生界浊积砂岩,已发现的天然气藏以古近系构造-地层圈闭为主,深海扇规模大,面积达 $120 \sim 1\,100 \text{ km}^2$ 。

已发现气藏主要分布在大型伸展断裂带的上倾方向,断裂是天然气垂向运移通道,油气在深水大型浊积体与断层共同控制的构造-岩性圈闭中聚集成藏(图4)。

2.3 Senegal 盆地(碳酸盐台地型)

Senegal 盆地位于中大西洋西非侧(图2),是在古生界褶皱基底之上发育的转换型陆缘盆地,其形成演化与中大西洋的开启和持续扩张以及非洲板块与北美板块的分离有关^[11, 55-57]。盆地南部边界为 Guinea 断裂,受其影响,在断裂北侧形成 Guinea 高原(边缘高原),其对盆地的形成演化具有重要控制作用。中侏罗世一早白垩世阿普特期,由于缺乏碎屑物质供给,形成碳酸盐台地型转换陆缘。

2.3.1 构造沉积特征

三叠纪一早侏罗世裂陷期,在古生界褶皱基底上发育一系列北北东向地堑,以碎屑岩沉积为主。

中-晚侏罗世拗陷期,大西洋开始扩张,伴随 Guinea 断裂的活动,在转换断层向洋一侧发生地幔柱上涌,Guinea 高原(边缘脊)开始形成。边缘脊和海底隆起带对海底洋流起到遮挡作用,而近陆侧则由于热冷却作用发生沉降,从而形成一个大面积地势低洼区,与向陆方向偏高原势共同形成一个封闭或半封闭的局限环境^[9, 13, 23]。中-晚侏罗世形成的拗陷层广泛分布于陆坡至远洋高原的局限环境中。这一时期碎屑物质供给匮乏,加之盆地处于低纬度区,盆地东部台地区碳酸盐岩极为发育,而西部则以细粒沉积为主。

早白垩世贝里阿斯期(Berriasian)一阿普特期为陆缘早期,陆架-陆坡格局开始形成,碎屑物质供给仍较少,陆架区沉积了巨厚的碳酸盐岩。钻井和地震资料证实,其最大厚度超过 3 000 m(图5),向盆地方向逐

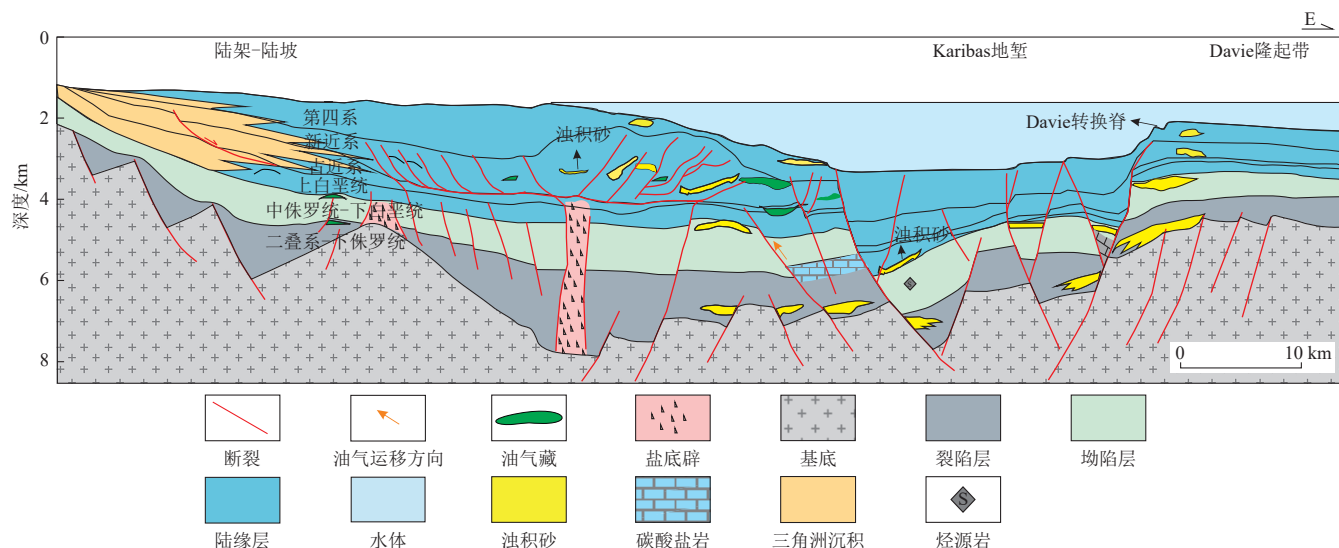


图4 Rovuma 盆地结构、沉积充填与油气藏分布剖面

Fig. 4 Structural characteristics, sedimentary features, and hydrocarbon reservoir distribution of the Rovuma Basin

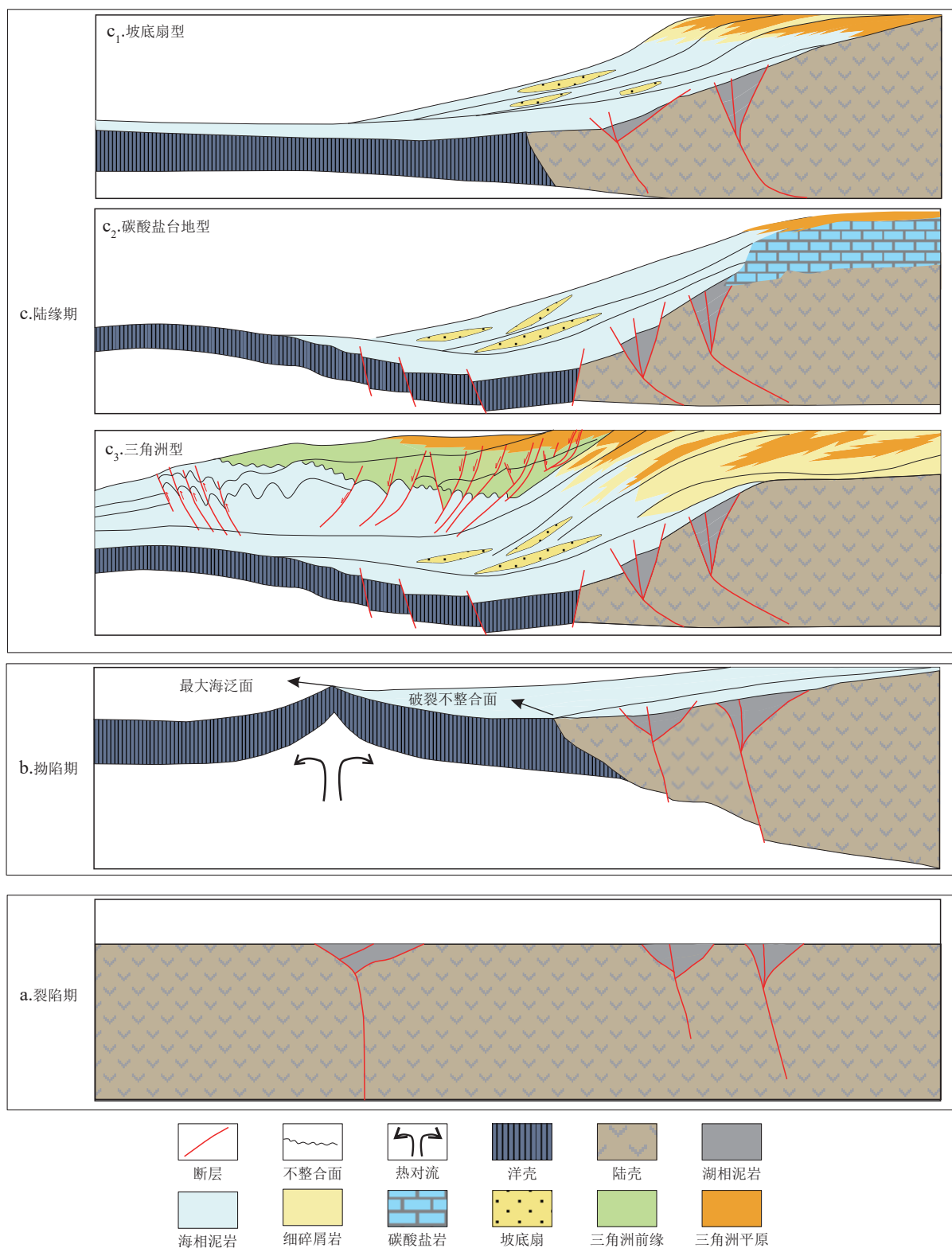


图6 转换型陆缘盆地形成演化过程与模式示意图(修改自文献[59])

Fig. 6 Schematic diagram of the formation and evolutionary models of transform continental margin basins (modified after reference [59])

含裂解不整合面(真正洋壳出现的首界面)之下小型拗陷和陆缘早期以浅水为主的区域性拗陷沉积,此时洋壳还处于隆升状态,陆坡-洋盆结构还没有形成,沉积方式主要为加积和进积,沉积环境从海-陆过渡相转

变为浅海相。在边缘脊和扭动构造海底隆起的遮挡下,洋-陆壳过渡带上多为浅水-半深水局限海,有利于大面积烃源岩形成。陆缘层与下伏拗陷层分界面为裂解不整合面之上的首个区域性最大海泛面,标志着

沉积环境由浅水向深水的重大转变,从补偿沉积逐渐变为饥饿沉积,陆坡结构开始明显发育,代表了深水环境的正式出现。陆缘层以三角洲(或碳酸盐台地)、陆坡下切谷和深水浊积扇形成的进积楔状体为主要特征。

3.2 裂陷层和坳陷层控制烃源岩发育规模和品质

裂陷期,受转换断层作用,多形成菱形断陷,烃源岩发育程度受控于断陷规模。钻井证实,裂陷层烃源岩品质普遍较好。例如,Côte d'Ivoire 盆地裂陷期中—下阿尔布阶发育的陆源缺氧环境泥页岩,TOC 为 0.4%~4.5%,氢指数(HI)可达 450 mg/g;Rovuma 盆地早侏罗世裂陷期局限海环境形成的泥页岩,有机质丰度高。但受盆地结构及裂陷规模控制,转换型陆缘盆地裂陷层烃源岩分布范围相对局限,加之埋藏较深,钻遇的探井较少。

拗陷期,转换型陆缘盆地边缘脊/边缘高原开始发育,在边缘脊/边缘高原和陆块之间可形成广泛的局限环境,有利于发育大面积优质烃源岩。近年来,Côte d'Ivoire 和 Guyana 等转换型陆缘盆地一系列重大油气发现,其主要油气来源均来自坳陷层烃源岩^[60]。以 Côte d'Ivoire 盆地为例,森诺曼期受边缘脊与先前裂陷盆地凹陷所构成局限环境的影响(如 Romanche 断裂带围限区域),发育浅海相页岩,干酪根类型以 II 型倾油型为主,TOC 平均为 5.5%,最高可达 15.3%,HI 可达 574 mg/g;Guyana 盆地坳陷层白垩系 Canje 组受 Demerara 高原影响,发育局限环境沉积的 1 套黑色页岩,5 口大洋钻探井钻遇厚度超过 100 m 的富有机质地层,干酪根类型以 II 型为主,TOC 在 3.0%~15.0%,最高可达 30.0%,HI 最高可达 600 mg/g^[61-62]。

陆缘期,形成的开阔海环境不利于规模优质烃源岩的发育。仅在大型河流入海时,所携带的大量陆源有机质在前三角洲沉积,为泥质烃源岩发育创造条件,如 Niger Delta 盆地。

3.3 陆缘层控制储集层类型和下伏烃源岩热演化程度

陆缘层主要发育 3 类储集层:坡底扇、大型三角洲和台地碳酸盐岩。陆缘层厚度控制了下伏裂陷层和坳陷层烃源岩的热演化。

3.3.1 坡底扇

坡底扇主要发育于具有成熟水系和较大源区的斜坡坡脚及深盆区,其沉积物源主要来自陆架三角洲和

上斜坡沉积物的失稳或滑塌剥离,斜坡边缘以侵蚀型沟谷和拉伸旋转型滑塌体为典型特征。

此类储层广泛发育于南大西洋赤道段诸盆地。陆缘晚期,盆地呈现窄陆架、陡陆坡的陆缘结构,加之大规模地层掀斜作用,陆缘物质供给显著增强,物源规模较大。陆架之上发育三角洲建造,由于陆架边缘可容纳空间有限,三角洲砂体逐渐向陆架边缘推进,沿陆坡滑塌沉积于坡脚和深盆区,形成浊积扇。陆架三角洲与浊积扇之间具有明显的“源—汇”耦合关系。南大西洋赤道段的 Guyana 盆地和 Côte d'Ivoire 盆地等均发育此类沉积模式(图 3)。其中,Côte d'Ivoire 盆地钻井揭示的坡底扇厚度可达 183 m。

Guyana 盆地也具有类似的盆地结构和沉积充填特征:陆缘期陆架边缘发育三角洲,深水区则发育坡底扇和盆底扇(图 7)。近年来,在深水扇中相继发现了一系列大型油气藏^[63]。

3.3.2 大型三角洲型陆缘(超大物源)

当陆缘期有大型河流注入时(即超大物源供给),可形成大型三角洲型转换陆缘,如 Niger Delta 盆地、Foz do Amazona 盆地和 Rovuma 三角洲盆地等。

以 Niger Delta 盆地为例,其演化经历了 3 个陆缘期阶段:早白垩世—晚白垩世桑托期(Santonian)、晚白垩世坎佩尼期(Campanian)—古新世末以及始新世至今。由于 Niger-Benue 河系持续提供巨量的物源,盆地内沉积了总厚度超 7 000 m 的地层。陆缘层主要包括始新世—第四纪的沉积,自下而上依次为 Akata 组、Agbada 组和 Benin 组^[64-65]。最底部的 Akata 组由巨厚的、岩性单一的海相及前三角洲相页岩组成,推测厚度为 600~6 000 m,在整个三角洲范围内均有分布。中部 Agbada 组主要发育进积的近岸—三角洲前缘沉积砂岩或粉砂岩,沉积时代从始新世至今,厚度在 600~3 600 m。上部 Benin 组发育陆相河流及岸后沼泽沉积,主要岩性为砂砾岩夹黏土,厚度在 0~2 100 m,平均约 1 800 m。

整个尼日尔新生代三角洲沉积体以底部的海相泥岩(Akata 组)为主滑脱层,巨厚三角洲沉积体在重力作用下由非洲大陆向南大西洋方向滑动,形成了一个大型重力滑动构造体系,断裂构造和泥底劈构造都非常发育^[22, 32, 66-68]。从陆向海方向,可划分出后缘伸展和前缘挤压冲断 2 个大的构造变形区^[31-32, 68-72]。在 2 个构造区的过渡带,泥底辟构造和滑脱构造尤为发育,目前已发现的油气藏几乎都与这些断裂和构造有关。

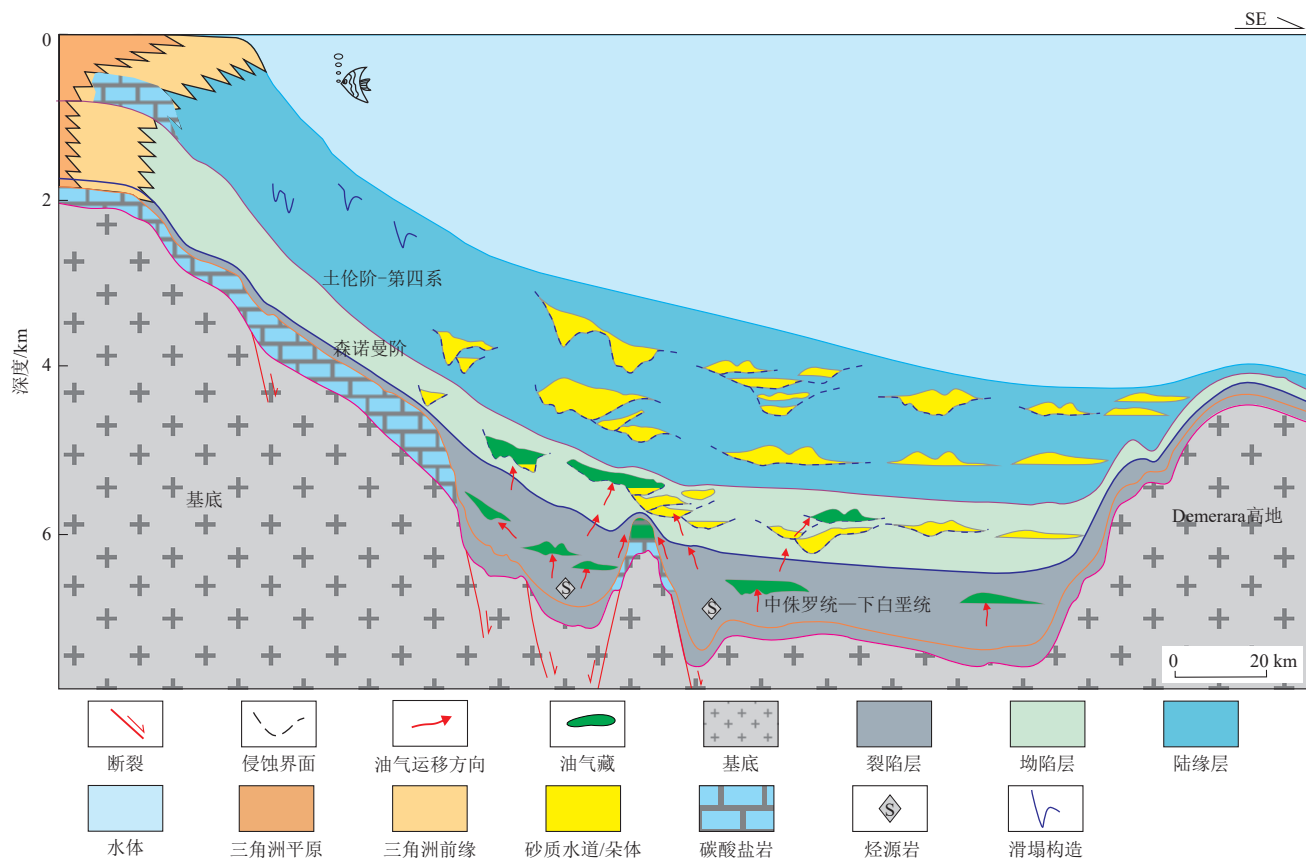


图7 Guyana盆地白垩系沉积充填模式与油气分布示意图

Fig. 7 Sedimentary infill model and hydrocarbon distribution of the Cretaceous in the Guyana Basin

3.3.3 台地碳酸盐岩

台地碳酸盐岩主要形成于拗陷期—陆缘早期,盆地水体整体较浅,当碎屑物质供给较少时,在被动大陆边缘易形成碳酸盐台地。较为典型的碳酸盐台地型陆缘包括中大西洋两岸的Senegal盆地和Scotian盆地。

Scotian盆地中侏罗统一白垩统Abenaki组以灰岩为主,沿陆架边缘呈北东—南西向条带状展布,宽度为1~3 km,储层厚度为70~140 m,向海方向地层变陡,已发现Panuke等多个气田^[73]。

Senegal盆地上侏罗统—下白垩统阿普特阶发育了2 000~3 000 m厚的碳酸盐岩,剖面上呈现出明显的生物礁发育特征(图5)。由于生物礁礁体生长速度快于围岩,其外形普遍具有丘形突起,周围地层在礁体翼部通常出现反射中断与上超现象,礁体顶部则往往出现披覆构造。生物礁主要沿着台地边缘叠置发育,晚侏罗世为礁体发育的鼎盛时期,礁体厚度大、宽度广,向上礁体个体逐渐变小。此外,受古气候和海平面变化影响,自晚侏罗世—早白垩世,台缘礁体逐渐向陆方向迁移。至阿普特期后,受陆源碎屑及海平面

变化影响,礁体逐渐消亡殆尽。靠近台地边缘一侧,礁体形态常不完整,可能与冲刷或构造运动等导致的破坏有关。

与此同时,陆缘层系沉积地层厚度是影响下伏烃源岩演化的关键控制因素之一。若陆缘层沉积厚度大,则下伏烃源岩通常埋藏比较深,易达到较高热演化成熟度而生烃。例如,Guyana盆地坳陷层系广泛发育Canje组优质烃源岩,但由于Demerara高原上覆陆缘层较薄,其下伏烃源岩普遍未达到成熟阶段;与之形成鲜明对比的是,Demerara高原西北侧的洼陷作为陆缘层系的沉积中心,沉积厚度大,促使下伏烃源岩已达到热演化成熟阶段。通常情况下,大物源多发育较厚陆缘层(厚度3 000~5 000 m),使得下伏烃源岩普遍成熟,裂陷层和坳陷层烃源岩常已进入生气阶段,如Niger Delta盆地和Amazon盆地。而在缺少物源供给的陆缘区,若陆缘期发育厚层碳酸盐岩,其下裂陷期和拗陷期烃源岩也可能成熟,如Senegal盆地。

3.4 转换型陆缘盆地有利勘探领域预测

通过对大西洋两岸盆地共性、差异和类比分析,分

别预测了坡底扇、大型三角洲和碳酸盐台地型3种转换型陆缘盆地的有利勘探领域。

3.4.1 坡底扇型有利区

坡底扇型转换陆缘是近年来赤道大西洋重大油气发现的主要类型,如 Côte d'Ivoire 盆地、Guyana 盆地和 Senegal 盆地上白垩统的一系列大型油气发现。大西洋转换型陆缘盆地多具有类似的盆地结构,如赤道段的 Sierra Leone 盆地、Potiguar 盆地、Ceará 盆地,以及中大西洋西岸的 Scotian 盆地等,应具有巨大的勘探潜力。

3.4.2 大型三角洲型有利区

目前已在 Gulf of Mexico 盆地、Niger Delta 盆地和 Rovuma 等大型三角洲盆地获得一系列大型-巨型油气田。此类盆地通常发育大型水系,提供大量物源^[69, 71],形成巨厚的陆缘期构造层,发育优质的三角洲砂岩储集体和坡底扇。重力滑脱构造形成的滚动背斜、断块、挤压背斜和底劈构造,构成了有利的圈闭。通过对比分析认为,晚白垩世森诺曼期—土伦期的大西洋赤道段 Foz do Amazonas 盆地和东非海岸 Zambezi Delta 盆地,分别与 Niger Delta 盆地和 Rovuma 盆地具有相似的沉积背景和地质条件,勘探前景广阔。

3.4.3 台缘碳酸盐岩型有利区

迄今为止,该类型仅在中大西洋加拿大东海岸的 Scotian 盆地上侏罗统—下白垩统发现商业油气藏。根据中大西洋裂解过程和板块位置推测,北美东海岸和西非海岸北段盆地早侏罗世—早白垩世位于赤道附近,更有利于台缘碳酸盐岩的发育。Senegal 盆地地震资料显示,上侏罗统—下白垩统阿普特阶发育厚度超过 3 000 m 的台缘碳酸盐岩。由此预测,中大西洋两岸盆地早侏罗世—早白垩世拗陷期—陆缘早期形成的台缘碳酸盐岩,具有巨大的油气勘探潜力。

4 结论

1) 转换型陆缘盆地演化可分为裂陷期、拗陷期和陆缘期3大阶段,对应形成裂陷层、拗陷层与陆缘层3大构造层。裂陷层为大陆裂解阶段的裂谷沉积充填;拗陷层包括裂解不整合面(首现洋壳的界面)下伏的小型拗陷及早期浅水陆缘沉积;陆缘层以裂解不整合面上首个区域性最大海泛面为界,伴随陆坡发育和深水环境形成,标志着被动陆缘体系的建立。

2) 转换型陆缘盆地构造格局及构造层序对油气成藏要素具有显著的空间约束与耦合控制作用。裂陷—拗陷层主导烃源岩的形成与分布,其中拗陷期边缘脊向陆侧发育的大面积局限海环境,为优质烃源岩的富集与保存提供了有利的封闭条件;陆缘构造层则控制储集层展布及下伏烃源岩的热演化过程,其沉积充填受物源供给与气候差异共同制约,形成坡底扇、大型进积三角洲砂岩和台地—台缘碳酸盐岩3类主要储集体。上述3类储集体成藏模式差异明显:坡底扇型以拗陷期烃源岩为物质基础,构成优良源—储配置,微裂隙有效沟通油源,覆盖层厚度对烃源岩成熟度具有关键控制作用;三角洲型以进积砂体为主要储集空间,滚动背斜、挤压背斜、断块及底劈等构造样式显著促进油气聚集;台缘礁滩型则依托斜坡裂缝带实现烃源侧向输导,在礁滩相高孔、渗储层中有效成藏。

3) 转换型陆缘盆地油气资源丰富,勘探前景广阔。大西洋赤道段的 Sierra Leone 盆地、Potiguar 盆地、Ceará 盆地,东非的 Mozambique 盆地和中大西洋西岸的 Scotian 盆地以坡底扇为重点勘探领域;大西洋赤道段 Foz do Amazonas 盆地和东非海岸 Zambezi Delta 盆地以向海进积的三角洲砂岩为勘探目标;中大西洋两岸盆地下侏罗统—下白垩统的台缘碳酸盐岩具有巨大的勘探潜力。

致谢:论文撰写得到了冯志强教授的悉心指导,他在转换型陆缘形成机制和盆地结构等方面的深刻认识对转换型陆缘盆地成藏条件和勘探领域预测具有重要指导意义,在此深表感谢!

参 考 文 献

- [1] ALLEN P A, ALLEN J R. Basin analysis: Principles and application to petroleum play assessment [M]. 3rd ed. Chichester: Wiley-Blackwell, 2013.
- [2] GALLAGHER K, BROWN R. The onshore record of passive margin evolution[J]. Journal of the Geological Society, 1997, 154 (3): 451-457.
- [3] JOBE Z R, LOWE D R, UCHYTL S J. Two fundamentally different types of submarine canyons along the continental margin of Equatorial Guinea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(3): 843-860.
- [4] HAUPERT I, MANATSCHAL G, DECARLIS A, et al. Upper-plate magma-poor rifted margins: Stratigraphic architecture and structural evolution[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 69: 241-261.
- [5] MASINI E, MANATSCHAL G, MOHN G. The Alpine Tethys rifted margins: reconciling old and new ideas to understand the stratigraphic architecture of magma-poor rifted margins [J]. Sedimentology, 2013, 60(1): 174-196.

- [6] PÉRON-PINVIDIC G, MANATSCHAL G. The final rifting evolution at deep magma-poor passive margins from Iberia-Newfoundland: A new point of view[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(7): 1581–1597.
- [7] 任建业, 罗盼, 高圆圆, 等. 南海西南次海盆地壳岩石圈伸展破裂过程的构造、沉积和岩浆作用记录[J]. *地球科学*, 2022, 47(7): 2287–2302.
- REN Jianye, LUO Pan, GAO Yuanyuan, et al. Structural, sedimentary and magmatic records during continental breakup at southwest sub-basin of South China Sea[J]. *Earth Science*, 2022, 47(7): 2287–2302.
- [8] 张翠梅, 孙珍, 赵明辉, 等. 南海北部陆缘结构及构造-岩浆演化[J]. *地球科学*, 2022, 47(7): 2337–2353.
- ZHANG Cuimei, SUN Zhen, ZHAO Minghui, et al. Crustal structure and tectono-magmatic evolution of northern South China Sea[J]. *Earth Science*, 2022, 47(7): 2337–2353.
- [9] BASILE C. Transform continental margins—part 1: Concepts and models[J]. *Tectonophysics*, 2015, 661: 1–10.
- [10] CHIMA K I, GRANJEON D, DO COUTO D, et al. Tectono-stratigraphic evolution of the offshore western Niger Delta from the Cretaceous to present: Implications of delta dynamics and paleotopography on gravity-driven deformation [J]. *Basin Research*, 2022, 34(1): 25–49.
- [11] YE Jing, ROUBY D, CHARDON D, et al. Post-rift stratigraphic architectures along the African margin of the Equatorial Atlantic: Part I the influence of extension obliquity [J]. *Tectonophysics*, 2019, 753: 49–62.
- [12] LONCKE L, ROEST W R, KLINGELHOEFER F, et al. Transform marginal plateaus [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 203: 102940.
- [13] MERCIER DE LÉPINAY M, LONCKE L, BASILE C, et al. Transform continental margins—Part 2: A worldwide review [J]. *Tectonophysics*, 2016, 693(Part A): 96–115.
- [14] KUSZNIR N J, ROBERTS A M, ALVEY A D. Crustal structure of the conjugate Equatorial Atlantic Margins, derived by gravity anomaly inversion [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2020, 476(1): 83–107.
- [15] LOPAREV A, ROUBY D, CHARDON D, et al. Superimposed rifting at the junction of the central and equatorial Atlantic: Formation of the passive margin of the Guiana shield [J]. *Tectonics*, 2021, 40(7): e2020TC006159.
- [16] FAIL J P, MONTADERT L, DELTEIL J R, et al. Prolongation des zones de fractures de l’océan atlantique dans le golfe de guinée [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1970, 7(5): 413–419.
- [17] LE PICHON X, FOX P J. Marginal offsets, fracture zones, and the early opening of the North Atlantic [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76(26): 6294–6308.
- [18] MASCLE J. Atlantic-type continental margins: distinction of two basic structural types [J]. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 1976, 48(Supplement): 149–155.
- [19] MASCLE J, LOHMANN P, CLIFT P, et al. Development of a passive transform margin: Côte d’Ivoire-Ghana transform margin-ODP Leg 159 preliminary results [J]. *Geo-Marine Letters*, 1997, 17(1): 4–11.
- [20] RABINOWITZ P D, LABRECQUE J. The Mesozoic South Atlantic Ocean and evolution of its continental margins [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1979, 84(B11): 5973–6002.
- [21] SCRUTTON R A. On sheared passive continental margins [J]. *Tectonophysics*, 1979, 59(1/4): 293–305.
- [22] JOLLY B A, ANYIAM O A, OMERU T. Structural controls on channel-related seismic facies distribution in the toe-thrust of deepwater Niger Delta [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2017, 125: 151–165.
- [23] PERON-PINVIDIC G, MANATSCHAL G, the “IMAGinING RIFTING” Workshop Participants. Rifted margins: State of the art and future challenges [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2019, 7: 218.
- [24] SAPIN F, RINGENBACH J C, CLERC C. Rifted margins classification and forcing parameters [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 8199.
- [25] 张光亚, 余朝华, 陈忠民, 等. 非洲地区盆地演化与油气分布 [J]. *地学前缘*, 2018, 25(2): 1–14.
- ZHANG Guangya, YU Chaohua, CHEN Zhongmin, et al. Tectonic evolution and hydrocarbon distribution in African basins [J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(2): 1–14.
- [26] CLIFT P D, LORENZO J, CARTER A, et al. Transform tectonics and thermal rejuvenation on the Côte d’Ivoire-Ghana margin, west Africa [J]. *Journal of the Geological Society*, 1997, 154(3): 483–489.
- [27] DAILLY P, HENDERSON T, HUDGENS E, et al. Exploration for Cretaceous stratigraphic traps in the Gulf of Guinea, West Africa and the discovery of the Jubilee Field: a play opening discovery in the Tano Basin, Offshore Ghana [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2013, 369(1): 235–248.
- [28] DIREEN N G, STAGG H M J, SYMONDS P A, et al. Architecture of volcanic rifted margins: new insights from the Exmouth-Gascoyne margin, Western Australia [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2008, 55(3): 341–363.
- [29] GODET A. Drowning unconformities: Palaeoenvironmental significance and involvement of global processes [J]. *Sedimentary Geology*, 2013, 293: 45–66.
- [30] ZECCHIN M, CATUNEANU O. High-resolution sequence stratigraphy of clastic shelves I: Units and bounding surfaces [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 39(1): 1–25.
- [31] ZHANG Jiajia, WU Shenghe, HU Guangyi, et al. Role of shale deformation in the structural development of a deepwater gravitational system in the Niger Delta [J]. *Tectonics*, 2021, 40(5): e2020TC006491.
- [32] 苏玉山, 王桐, 李程, 等. 尼日尔三角洲的沉积-构造特征 [J]. *岩石学报*, 2019, 35(4): 1238–1256.
- SU Yushan, WANG Tong, LI Cheng, et al. The sedimentary and tectonic features of the Niger Delta [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(4): 1238–1256.

- [33] AGBASI O E, SEN S, INYANG N J, et al. Assessment of pore pressure, wellbore failure and reservoir stability in the Gabo field, Niger Delta, Nigeria-implications for drilling and reservoir management [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2021, 173: 104038.
- [34] BÉDIR M, ZARGOUNI F, TLIG S, et al. Subsurface geodynamics and petroleum geology of transform margin basins in the Sahel of Mahdia and El Jem (Eastern Tunisia) [J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76(9): 1417-1442.
- [35] MACGREGOR D S, ROBINSON J, SPEAR G. Play fairways of the Gulf of Guinea transform margin [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2003, 207(1): 131-150.
- [36] 刘剑平, 潘校华, 马君, 等. 赤道西非科特迪瓦-加纳转换边缘油气勘探方向[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(1): 43-50.
LIU Jianping, PAN Xiaohua, MA Jun, et al. Exploration targets in the Côte d'Ivoire-Ghana transform margin in equatorial West Africa [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(1): 43-50.
- [37] 孙涛, 王建新, 孙玉梅. 西非塞内加尔盆地深水油气地球化学特征与油气成藏[J]. *沉积学报*, 2017, 35(6): 1284-1292.
SUN Tao, WANG Jianxin, SUN Yumei. Petroleum geochemical characteristics and accumulation in offshore of Senegal Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(6): 1284-1292.
- [38] 田纳新, 吴高奎, 刘静静, 等. 中大西洋被动陆缘盆地结构特征与勘探领域[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(3): 486-496.
TIAN Naxin, WU Gaokui, LIU Jingjing, et al. Structural characteristics and exploration fields in passive continental margin basins of Central Atlantic [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(3): 486-496.
- [39] 田纳新, 王大鹏, 郑求根, 等. 西非北部被动陆缘盆地油气地质特征与勘探方向[J]. *中国地质调查*, 2024, 11(2): 17-27.
TIAN Naxin, WANG Dapeng, ZHENG Qiugen, et al. Geological characteristics and exploration direction of oil and gas in the passive continental margin basins in the northern part of West Africa [J]. *Geological Survey of China*, 2024, 11(2): 17-27.
- [40] 田纳新, 龚承林, 吴高奎, 等. 转换陆缘海底扇的沉积特征与沉积模式——以赤道大西洋漂移晚期陆缘为例[J]. *沉积学报*, 2023, 41(6): 1798-1809.
TIAN Naxin, GONG Chenglin, WU Gaokui, et al. Depositional characteristics and models of submarine fans on transform margins: A case study from the late drift stage of the equatorial Atlantic margin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(6): 1798-1809.
- [41] 彭承文, 卜春明, 王玉洁, 等. 三角洲前缘薄互层型油藏基于单砂层的单砂体精细刻画及其成果应用[J]. *大庆石油地质与开发*, 2025, 44(5): 142-150.
PENG Chengwen, BU Chunming, WANG Yujie, et al. Fine characterization and application of single sandbodies based on single sand layers in delta front thin interbedded reservoirs [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2025, 44(5): 142-150.
- [42] 杜仲元, 李相文, 李青霖, 等. 不同序级走滑断裂对碳酸盐岩储集层发育的控制差异[J]. *新疆石油地质*, 2024, 45(4): 425-431.
DU Zhongyuan, LI Xiangwen, LI Qinglin, et al. Differential controls of strike-slip faults of different orders on carbonate reservoirs [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2024, 45(4): 425-431.
- [43] 李海滨, 黄健良, 任艳. 南加蓬盆地阿普特期不整合特征及对油气藏的控制作用[J]. *特种油气藏*, 2025, 32(6): 33-39.
LI Haibin, HUANG Jianliang, REN Yan. Aptian unconformity characteristics and their controlling role on petroleum reservoirs in the South Gabon Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2025, 32(6): 33-39.
- [44] 许凤鸣. 受油源断裂控制的不同层位油气运聚空间分布部位预测方法及其应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2024, 54(2): 461-469.
XU Fengming. Prediction method of hydrocarbon migration and accumulation space distribution positions in different layers controlled by oil source faults and its application [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2024, 54(2): 461-469.
- [45] 朱筱敏, 王晓琳, 胡鑫, 等. 国际沉积学研究前沿和发展讨论——第37次国际沉积学家年会述评[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(3): 685-704.
ZHU Xiaomin, WANG Xiaolin, HU Xin, et al. Frontiers and future prospects of international sedimentological research: Review on the 37th International Meeting of Sedimentology [J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(3): 685-704.
- [46] IHS Markit. IHS Database [Z]. S&P Global. Accessed July 31, 2025.
- [47] BASILE C, MASCLE J, GUIRAUD R. Phanerozoic geological evolution of the Equatorial Atlantic domain [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2005, 43(1/3): 275-282.
- [48] BASILE D P, ROVAK J M, MARTIN D R, et al. Increased transforming growth factor-beta 1 expression in regenerating rat renal tubules following ischemic injury [J]. *American Journal of Physiology-Renal Physiology*, 1996, 270(3): F500-F509.
- [49] HUGUEN C, MASCLE J, CHAUMILLON E, et al. Deformational styles of the eastern Mediterranean Ridge and surroundings from combined swath mapping and seismic reflection profiling [J]. *Tectonophysics*, 2001, 343(1/2): 21-47.
- [50] BASILE C, ALLEMAND P. Erosion and flexural uplift along transform faults [J]. *Geophysical Journal International*, 2002, 151(2): 646-653.
- [51] GILLARD M, AUTIN J, MANATSCHAL G. Fault systems at hyper-extended rifted margins and embryonic oceanic crust: Structural style, evolution and relation to magma [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 76: 51-67.
- [52] PADRON C, KLINGELHOEFER F, ROEST W R, et al. Volcanic influence during the formation of a transform marginal plateau: Insights from wide-angle seismic data along the northwestern Demerara Plateau [J]. *Tectonophysics*, 2022, 842: 229592.

- [53] ANTOSBREH A A, FALEIDE J I, TSIKALAS F, et al. Rift-shear architecture and tectonic development of the Ghana margin deduced from multichannel seismic reflection and potential field data [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26 (3): 345–368.
- [54] 刘子玉, 吕明, 卢景美, 等. 东非鲁伍马盆地窄陆架背景下的深水沉积体系[J]. *海相油气地质*, 2017, 22(4): 27–34.
LIU Ziyu, LYU Ming, LU Jingmei, et al. Deepwater depositional system in the background of narrow shelf in the Ruvuma Basin, eastern Africa [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2017, 22 (4): 27–34.
- [55] GUIRAUD R, BOSWORTH W, THIERRY J, et al. Phanerozoic geological evolution of Northern and Central Africa: An overview [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2005, 43(1/3): 83–143.
- [56] MASCLE J, MOUGENOT D, BLAREZ E, et al. African transform continental margins: Examples from Guinea, the Ivory Coast and Mozambique [J]. *Geological Journal*, 1987, 22(S2): 537–561.
- [57] WITHJACK M O, SCHLISCHE R W, OLSEN P E. Diachronous rifting, drifting, and inversion on the passive margin of central eastern North America; an analog for other passive margins [J]. *AAPG Bulletin*, 1998, 82(5): 817–835.
- [58] RUBAN D A, ZERFASS H, PUGATCHEV V I. Triassic synthems of southern South America (southwestern Gondwana) and the Western Caucasus (the northern Neotethys), and global tracing of their boundaries [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2009, 28(2): 155–167.
- [59] 冯志强, 郭丰涛, 张忠民, 等. 转换型陆缘——尼日尔三角洲盆地成因类型再认识[J]. *岩石学报*, 2022, 38(9): 2565–2580.
FENG Zhiqiang, GUO Fengtao, ZHANG Zhongmin, et al. A transform margin: Review of genetic types of the Niger Delta Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(9): 2565–2580.
- [60] WAGNER T, PLETSCH T. Tectono-sedimentary controls on Cretaceous black shale deposition along the opening Equatorial Atlantic Gateway (ODP Leg 159) [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1999, 153(1): 241–265.
- [61] ERBACHER J, FRIEDRICH O, WILSON P A, et al. Stable organic carbon isotope stratigraphy across Oceanic Anoxic Event 2 of Demerara Rise, western tropical Atlantic [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2005, 6(6): Q06010.
- [62] MEYERS P A, BERNASCONI S M, FORSTER A. Origins and accumulation of organic matter in expanded Albion to Santonian black shale sequences on the Demerara Rise, South American margin [J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(12): 1816–1830.
- [63] 刘亚明, 王红军, 田作基, 等. 南美圭亚那盆地不同区带油气成藏差异性分析[J]. *中国石油勘探*, 2024, 29(6): 130–143.
LIU Yaming, WANG Hongjun, TIAN Zuoji, et al. Analysis of differences in hydrocarbon accumulation in various zones of Guyana Basin, South America [J]. *China Petroleum Exploration*, 2024, 29(6): 130–143.
- [64] AVBOVBO A A. Tertiary lithostratigraphy of Niger Delta [J]. *AAPG Bulletin*, 1978, 62(2): 295–300.
- [65] SHORT K C, STAUBLE A J. Outline of geology of Niger Delta [J]. *AAPG Bulletin*, 1967, 51(5): 761–779.
- [66] DOUST H. Petroleum geology of the Niger Delta [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1990, 50(1): 365.
- [67] ROUBY D, NALPAS T, JERMANNAUD P, et al. Gravity driven deformation controlled by the migration of the delta front: The Plio-Pleistocene of the Eastern Niger Delta [J]. *Tectonophysics*, 2011, 513(1/4): 54–67.
- [68] 苏玉山, 陈占坤, 李曰俊, 等. 南大西洋东岸尼日尔三角洲大型重力滑动构造东南缘的断裂和泥构造[J]. *地质科学*, 2020, 55(2): 615–625.
SU Yushan, CHEN Zhankun, LI Yuejun, et al. The faults and shale tectonics in the southeastern flank of the Niger Delta large scale gravity gliding tectonics [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2020, 55(2): 615–625.
- [69] BALESTRIERI M L, MORATTI G, BIGAZZI G, et al. Neogene exhumation of the Marrakech High Atlas (Morocco) recorded by apatite fission-track analysis [J]. *Terra Nova*, 2009, 21 (2): 75–82.
- [70] CORREDOR F, SHAW J H, BILOTTI F. Structural styles in the deep-water fold and thrust belts of the Niger Delta [J]. *AAPG Bulletin*, 2005, 89(6): 753–780.
- [71] JACKSON M P A, HUDEC M R. Stratigraphic record of translation down ramps in a passive-margin salt detachment [J]. *Journal of Structural Geology*, 2005, 27(5): 889–911.
- [72] WU J E, MCCLAY K, FRANKOWICZ E. Niger Delta gravity-driven deformation above the relict Chain and Charcot oceanic fracture zones, Gulf of Guinea: Insights from analogue models [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 65: 43–62.
- [73] ZHANG Yuanyuan, PE-PIPER G, PIPER D J W. How sandstone porosity and permeability vary with diagenetic minerals in the Scotian Basin, offshore eastern Canada: Implications for reservoir quality [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 63: 28–45.

(编辑 张玉银)