

文章编号:0253-9985(XXXX)XX-0001-16

早中新世珠江陆架边缘结构类型、层序样式及其对岩性-地层圈闭形成的控制

戈道瑶^{1,2}, 龚承林^{1,2}, 谢世文^{3,4}, 朱一杰^{1,2}, 陈北辰^{3,4}

[1. 油气资源与工程全国重点实验室 中国石油大学(北京), 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249; 3. 中海石油 深海开发有限公司, 广东 深圳 518054; 4. 中海石油(中国)有限公司 深圳分公司, 广东 深圳 518054]

摘要:大陆边缘层序地层结构与样式是层序地层学研究的重要内容之一,但不同类型陆缘结构及其层序样式对岩性-地层圈闭发育控制方面的研究仍相对薄弱。以珠江口盆地白云凹陷为例,利用 $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 三维深度域地震资料和19口钻井与测井资料,通过陆架坡折迁移轨迹法和层序地层学标准化分析对白云凹陷中新统珠江组进行陆缘结构定量表征、层序及体系域界面识别与划分,明确了陆缘结构特征及其层序样式差异性,同时结合PaleoScan提取的属性切片,探讨了陆缘结构和层序样式对岩性-地层圈闭形成的控制作用。研究发现:①早中新世白云凹陷发育进积富砂型与退积富泥型2类典型陆缘结构。前者以进积式地层叠置样式和低角度上升型陆架坡折迁移轨迹为主,发育完整的四分体系域[高位体系域(HST)-下降体系域(FSST)-低位体系域(LST)-海侵体系域(TST)];而后者以退积式地层叠置样式和回退型陆架坡折迁移轨迹为主,仅发育三分体系域(HST-LST-TST)。②四分体系域的进积富砂型陆缘内发育多种圈闭类型,包括不整合遮挡型和地层超覆型地层圈闭,以及扇体上倾尖灭型、水道周缘侧封型和泥质水道侧封型岩性圈闭;部分砂体在构造活动与古地貌影响下形成朵叶抬升型、砂脊抬升型和底辟遮挡型等岩性-构造复合圈闭。③陆缘结构类型决定岩性-地层圈闭的形成与否,其中进积富砂型陆缘中的砂体能够跨越陆架向深水区搬运,形成规模砂体,为圈闭的形成奠定了储层基础;而退积富泥型陆缘砂体多滞留于陆架,导致深水区整体富泥而不发育圈闭;层序样式控制着不同类型圈闭的形成,其中层序界面控制着地层圈闭的发育,而富砂体系域通过发育不同类型的砂体控制岩性圈闭的多样性。

关键词:陆缘结构;层序样式;岩性-地层圈闭;层序地层;珠江组;白云凹陷;珠江口盆地

中图分类号:TE121.3 文献标识码:A

Architectural types and sequence patterns of the Early Miocene shelf margin and their controlling effects on the formation of lithologic-stratigraphic traps in the Pearl River Mouth Basin

GE Daoyao^{1,2}, GONG Chenglin^{1,2}, XIE Shiwen^{3,4}, ZHU Yijie^{1,2}, CHEN Beichen^{3,4}

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Deepwater Development Ltd., CNOOC, Shenzhen, Guangdong 518054, China; 4. Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Shenzhen, Guangdong 518054, China]

Abstract: The sequence stratigraphic architecture and pattern of shelf margins represent key components of sequence stratigraphy. However, the controlling effects of different shelf margin architecture types and their sequence patterns on the development of lithologic-stratigraphic traps remain poorly understood. In this study, we investigate the Baiyun Sag in the Pearl River Mouth Basin (PRMB) based on $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ of 3D depth-domain seismic data, along with drilling and log data from 19 wells. Using analysis of shelf-slope break migration trajectories and the theory on the standardization of sequence stratigraphy, we quantitatively characterize the shelf margin architectures in the Lower Miocene Zhujiang Formation within the Baiyun Sag and identify their sequences and systems tract boundaries. Accordingly, variations in the characteristics and sequence patterns of different shelf margin architectures are

收稿日期:2025-09-24;修回日期:2025-12-29。

第一作者简介:戈道瑶(1997—),男,博士研究生,层序地层学和沉积学。E-mail: gepakho@163.com。

通信作者简介:龚承林(1983—),男,教授,博士研究生导师,地震解释、深水沉积与层序地层学。E-mail: chenglingong@cup.edu.cn。

基金项目:中海石油(中国)有限公司深圳分公司科技项目(CCL2023SKPS0027)。

determined. In combination with attribute slices extracted using the PaleoScan software, we explore the controlling effects of the shelf margin architectures and their sequence patterns on the formation of lithologic-stratigraphic traps. The results reveal that the Early Miocene Baiyun Sag contains two typical types of shelf margin architectures: progradational sand-rich type and retrogradational mud-rich type. The former type, dominated by a progradational stratal stacking pattern and low-angle ascending shelf-slope break migration trajectories, consists of a complete set of four systems tracts: the highstand systems tract (HST), falling stage systems tract (FSST), lowstand systems tract (LST), and transgressive systems tract (TST). In contrast, the retrogradational mud-rich shelf margin architectures, characterized by a retrogradational stratal stacking pattern and backstepping shelf-slope break migration trajectories, comprise only three systems tracts: HST, LST, and TST. The progradational sand-rich shelf margin architectures, featuring the presence of four systems tracts, exhibit multiple trap types, including stratigraphic traps such as unconformity-bounding traps and stratigraphic onlap traps, as well as lithologic traps like those formed by the updip pinchouts of fans, laterally sealed channel traps, and mud-rich channel-sealed traps. Additionally, lithologic-structural combination traps, including lobe-uplifting traps, sandy ridge-uplifting traps, and diapiric traps, formed under the combined influence of tectonism and paleogeomorphology, are identified within partial sand bodies of the progradational sand-rich shelf margin architectures. The type of shelf margin architectures plays a key role in determining the formation of lithologic-stratigraphic traps. Within the progradational sand-rich shelf margin architectures, sand bodies can bypass the shelf and migrate into deep-water areas. The resulting large-scale sand bodies in these areas form reservoirs, laying the foundation for trap formation. In contrast, within the retrogradational mud-rich shelf margin architectures, sand bodies tend to be retained within the shelf. Consequently, the deep-water areas are generally rich in mud, leading to underdeveloped traps. Meanwhile, trap types are controlled by the sequence stratigraphic patterns. Specifically, sequence boundaries govern the development of stratigraphic traps, while sand-rich systems tracts provide the depositional framework for a variety of lithologic traps.

Key words: shelf margin architecture, sequence stratigraphic pattern, lithologic-stratigraphic trap, sequence stratigraphy, Zhujiang Formation, Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin (PRMB)

引用格式: 戈道瑶, 龚承林, 谢世文, 等. 早中新世珠江陆架边缘结构类型、层序样式及其对岩性-地层圈闭形成的控制[J]. 石油与天然气地质, XXXX, XX(X): 1-16.

GE Daoyao, GONG Chenglin, XIE Shiwen, et al. Architectural types and sequence patterns of the Early Miocene shelf margin and their controlling effects on the formation of lithologic-stratigraphic traps in the Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, XXXX, XX(X): 1-16.

随着油气勘探的持续发展和不断深入, 勘探方向已从早期易于发现的构造圈闭逐渐转向更为隐蔽的岩性圈闭与地层圈闭(全文统称为岩性-地层圈闭), 尤其是在深水和超深水领域^[1]。岩性-地层圈闭的形成依赖于大规模深水重力流砂体。过去40年间, 全球超过15%的油气资源发现于此类砂体, 而此类砂体未来仍将是油气勘探的重要方向^[2-5]。因此, 准确预测砂体怎样从浅水向深水搬运、分散, 进而形成海底扇, 是识别岩性圈闭与地层圈闭的关键。层序地层学自提出以来, 在预测砂体展布方面成效显著^[6]。经过70余年的发展, 形成了众多理论和学派, 包括Exxon公司最早提出的经典三分层序模式, 将地层划分为低位体系域(LST)、海侵体系域(TST)和高位体系域(HST)^[7]; Hunt和Tucker提出的四分层序模式, 将地层划分为低位体

系域(LST)、海侵体系域(TST)、高位体系域(HST)和下降体系域(FSST)^[8]; 此外, 还有以最大海泛面为界的三分成因层序模式以及以最大海退面和最大海泛面为界的T-R(海进-海退)两分层序模式^[9-10]。近年来, 层序地层学标准化理论与陆架坡折迁移轨迹法的提出与兴起, 为基于实际资料客观划分陆架边缘层序提供了新思路^[11-15]。

陆架边缘不仅记录了构造活动、海平面升降、物源供给和气候变迁等地质信号的关键信息, 也是层序地层学研究的重要载体^[15]。针对其结构进行研究不仅是重构可容空间和物源条件的关键, 同时也对解译沉积物向深水区搬运以及预测储层和圈闭具有重要意义^[16-19]。近年来, 被动陆缘的研究取得了显著进展, 主要集中于陆缘结构及其形成机制, 以及陆缘结构与深

水沉积体系和砂体搬运分散的关系^[19-22]。然而针对陆缘结构与层序样式之间的内在关系,以及不同陆缘结构和层序样式对岩性-地层圈闭形成与分布的控制作用的研究仍相对薄弱,制约了被动陆缘深水油气勘探的深入开展。

早中新世珠江口盆地为一伸展构造背景下的被动陆缘盆地,自 23.03 Ma 以来,在珠江强力供源、海平面周期性升降和差异构造沉降的共同作用下,形成多种陆缘结构类型。以最大海泛面(T_3^0)为界,下中新统珠江组上、下段发育了结构迥异的陆缘,其内部层序样式也存在显著差异。珠江口盆地深水区油气发现多来自于珠江组,勘探揭示 90% 可开发的天然气储量集中在珠江组下段内,是南海北部天然气勘探的主力层系;而 T_3^0 之上的上段虽沉积厚度大、持续时间长,却因整体富泥而在勘探上“无人问津”^[23-25]。尽管已有大量关于白云凹陷早中新世(珠江组)层序地层与岩性-地层圈闭的研究^[26-29],但尚未系统探讨陆缘结构类型及层序样式对岩性-地层圈闭形成的控制作用。特别是近年来广受关注的泥质水道侧封型圈闭,其成因不同于传统岩性圈闭,更依赖层序格架与砂体展布规律的精确刻画,凸显了从陆缘结构出发研究圈闭形成的必要性。本文基于研究区最新的三维地震、钻井和测井资料,通过陆架坡折迁移轨迹法对珠江组陆缘结构进行定量表征^[11],然后采用层序地层学标准化理论和方法建立高精度层序地层格架^[14, 30]。本文旨在:① 明确珠江组 2 类典型陆缘结构及其层序样式差异性,并探讨其成因;② 揭示 2 类陆架边缘层序不同体系域下的深水砂体展布特征;③ 总结白云凹陷珠江组岩性-地层圈闭类型与发育模式,探讨陆缘结构类型及其层序样式对岩性-地层圈闭发育的控制作用。

1 区域地质概况

南海是在中国东部环滨太平洋构造域岩石圈伸展、变薄的背景下发育演化而来的^[31]。珠江口盆地位于南海北部(图 1),发育于中生代主动陆缘之上,是南海北部规模最大的新生代沉积盆地。该盆地由北部隆起带、北部拗陷带、中央隆起带、南部拗陷带和南部隆起带 5 个构造单元组成,各构造单元又细分为若干个凹陷和低隆起(图 1a)。

研究区主要位于珠江口盆地南部的白云凹陷(图 1a),凹陷面积超过 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$,其西部为云开低凸起,东部为东沙隆起,北侧以番禺低隆起为界,南侧是南部隆起带。白云凹陷整体呈现 NE 向展布,被白云

东低凸起和云中低凸起分割成白云东洼、白云主洼、白云西洼和白云南洼(图 1b),与南部荔湾凹陷共同位于陆坡深水-超深水区。白云凹陷内部充填主要以新生代地层为主,深水区水深为 200 ~ 2 000 m,局部沉积厚度可达 13 km,是珠江口盆地最大和最具油气资源潜力的凹陷^[32]。珠江口盆地新生代以来主要经历了 6 次重要的构造运动,即神狐运动、琼琼运动一幕和二幕、南海运动、白云运动以及东沙运动,其中南海运动和白云运动与盆地深水沉积演化密切相关。前人研究揭示自 33.90 Ma 以来(即珠海组沉积期),在南海运动的影响下,盆地开始由断陷期进入拗陷期,海平面持续上升^[33]。在珠海组四段沉积时期,开始在白云凹陷东南部—长昌凹陷—鹤山凹陷一带形成大范围的陆架坡折带,发育大型陆架边缘三角洲—海底扇(洲—扇)沉积体系^[34],而后在珠江持续物源供给以及较为稳定的构造沉降的共同作用下,陆架坡折带持续向东南方向迁移,此时白云凹陷整体为浅水陆架环境。随后在晚渐新世与早中新世交界之际(23.03 Ma)发生了白云运动,即南海扩张脊的向南跃迁引发的区域快速构造沉降,导致了陆架坡折带发生了近百千米的回撤,使得陆架坡折带北迁至白云北坡—番禺低隆起区,白云凹陷也由先前的浅水陆架环境转变为深水环境。自此以后,白云凹陷在珠江强物源供给、持续裂后异常沉降和周期性海平面变化的共同作用下成为了孕育珠江深水扇的最佳场所。特别是 21.00 Ma 的大规模海平面下降使得三角洲能够推进到陆架边缘,进而成为珠江深水扇的“新物源区”,随后在 19.10 Ma(对应界面为 T_3^0)到达了最大的海侵期。围绕 T_3^0 最大海泛面(MFS2)上、下还发育 2 个最大海泛面(MFS1 和 MFS3),以这 3 个最大海泛面为顶、底界面所限定的 2 个三级层序 SQ1 和 SQ2 具有差异陆缘结构和层序样式。因此,早中新世珠江陆缘是研究不同类型陆缘结构、差异层序样式以及两者对岩性-地层圈闭形成发育控制的“天然实验室”。

2 早中新世珠江陆缘结构类型与层序样式特征

基于陆架坡折迁移轨迹分析,在研究区东、中和西 3 个区域共选取 15 条顺物源方向的地震剖面,对早中新世沉积时期珠江组陆缘结构参数进行定量表征(表 1)。结果表明,珠江组陆缘发育 2 种结构类型,其中珠江组下段 SQ1 发育进积富砂型陆缘,珠江组上段 SQ2 发育退积富泥型陆缘。进一步结合 Catuneanu 等提出的层序地层学标准化理论^[14, 30],对 2 类陆缘层序

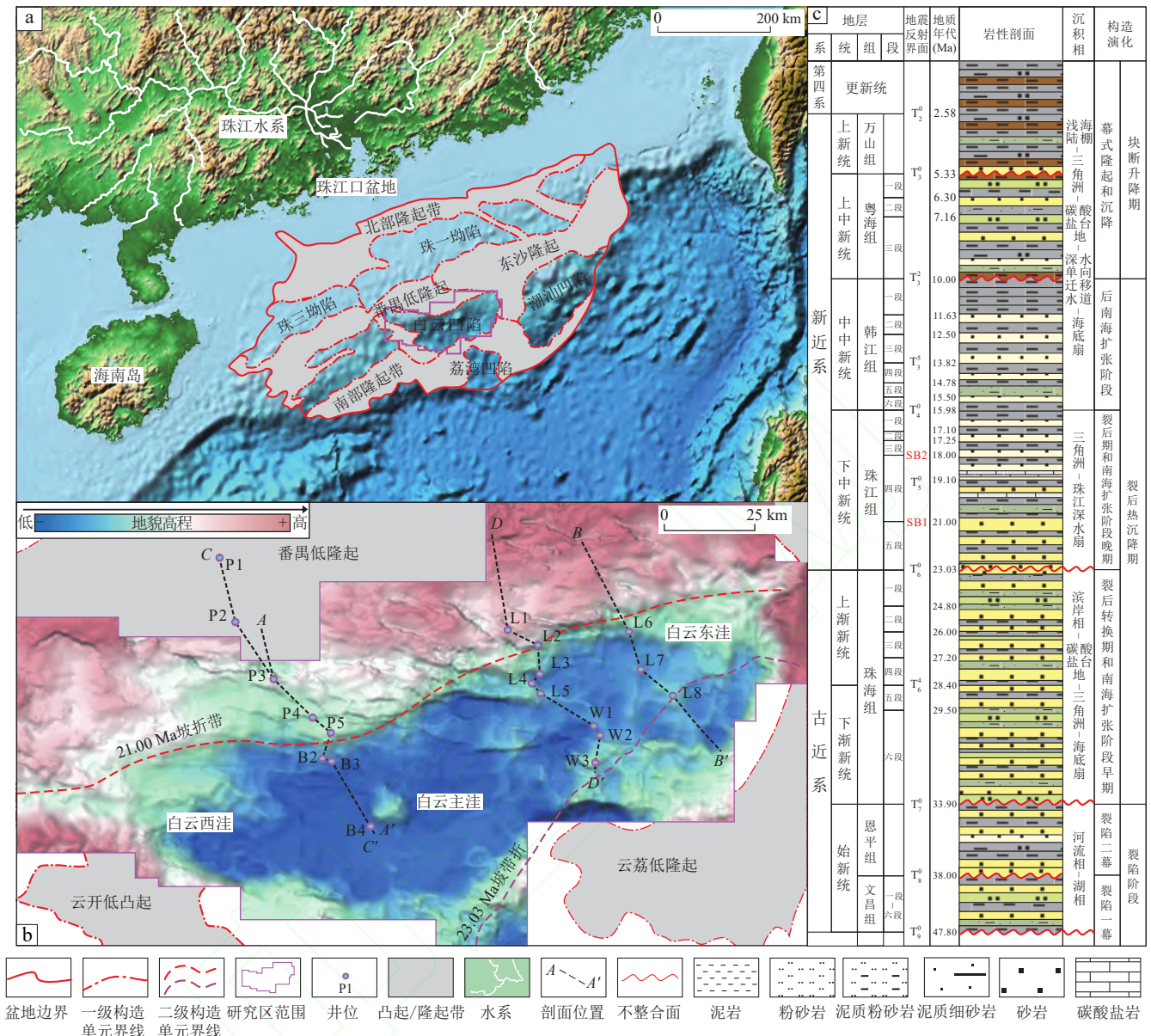


图1 珠江口盆地白云凹陷区域构造位置和综合地层特征

Fig. 1 Regional tectonic setting and composite stratigraphic characteristics of the Baiyun Sag, PRMB

a. 珠江口盆地及其周缘构造区划分; b. 白云凹陷早中新世古地貌; c. 地层综合柱状图

(SB1为珠四段底界面; SB2为珠四段顶界面。)

界面及体系域进行识别与划分,建立高精度层序地层格架,从而揭示其内部层序样式差异。

2.1 进积富砂型陆缘

2.1.1 陆缘结构特征

进积富砂型陆缘发育于珠江组下段,以MFS2和MFS1为顶、底界面,对应三级层序SQ1。地层表现为进积式地层叠置样式,发育低角度上升型陆架坡折迁移轨迹(图2)。其中陆缘进积距离为13.14~18.87 km(平

均值为15.56 km),加积距离为89~295 m(平均值为179 m),迁移轨迹角为0.32°~1.06°(平均值为0.67°;表1),这种低角度上升型陆架坡折迁移轨迹陆缘表现为强烈进积和低幅加积的特征,指示物源供给速率远大于可容空间增长速率[可容空间增长速率/物源供给速率(A/S) < 1],利于沉积物从浅水区向深水区搬运^[13]。连井剖面(图3)显示,进积富砂型陆缘砂体搬运效率(底积层砂体厚度占顶积层与底积层砂体厚度总和的比例)约为44%,进一步表明该类陆缘中砂体易于穿越陆架并进入深水区。

表 1 珠江口盆地白云凹陷珠江组陆缘结构参数定量统计

Table 1 Quantitative statistics of the parameters of shelf margin architectures in the Zhujiang Formation, Baiyun Sag, PRMB

陆缘类型 结构参数	进积富砂型陆缘			退积富泥型陆缘		
	加积距离/m	进积距离/km	轨迹角/(°)	加积距离/m	进积距离/km	轨迹角/(°)
西部	255	13.73	1.06	254	-18.55	179.22
	295	16.03	1.05	249	-19.90	179.28
	288	16.58	0.99	386	-18.53	178.81
	220	14.06	0.90	285	-19.19	179.15
	212	14.80	0.82	310	-19.50	179.09
中部	202	14.55	0.80	451	-21.60	178.80
	212	13.14	0.92	421	-18.44	178.69
	192	13.35	0.82	550	-25.10	178.74
	133	14.51	0.53	419	-20.16	178.81
	134	16.15	0.48	407	-24.81	179.06
东部	93	15.03	0.35	233	-10.62	178.74
	89	15.78	0.32	265	-6.65	177.72
	124	18.76	0.38	203	-7.76	178.50
	107	18.11	0.34	327	-17.71	178.94
	132	18.87	0.40	245	-7.99	178.24
最小值	89	13.14	0.32	203	-25.10	177.72
最大值	295	18.87	1.06	550	-6.65	179.28
平均值	179	15.56	0.67	334	-17.10	178.79

此外, SQ1 陆缘结构呈现出显著的东、西差异, 迁移轨迹角度和加积距离自东向西逐渐增大(其中东部平均值分别为 0.36° 和 109 m, 中部为 0.71° 和 175 m, 西部为 0.97° 和 254 m; 表 1), 反映 A/S 向西增大, 沉积物更易滞留于陆架区, 向深水供砂能力减弱。SQ1 在均方根振幅(RMS)属性和地震剖面上均呈现出强振幅响应, 且自然伽马(GR)测井曲线呈向左偏转的齿化箱状和漏斗状特征(图 2, 图 4), 表明砂体广泛发育, 形成典型的“有洲-有扇”富砂陆缘。

2.1.2 层序样式与沉积特征

完整的四分体系域(HST-FSST-LST-TST)的构成是进积富砂型陆缘的典型层序样式特征。

高位体系域(HST)的顶、底界面分别为强制海退起始面(BSFR)和最大海泛面(MFS1)。整体呈加积-进积式叠置样式, 岩性自下向上由砂-泥互层逐渐变为漏斗状和箱状砂岩, 呈明显反旋回特征(P1, P2 和 P3 井; 图 3)。不同于经典层序模式中“高位三角洲仅局限于内陆架”的说法^[35], 该阶段三角洲推进至陆架边缘形成了陆架边缘三角洲(为后续下降体系域提供了充足的物源基础), 并在陆坡与盆底发育的齿化箱状砂岩构成高位洲-扇体系(P1, P2, P3, P5 和 B4 井; 图 3)。地震上表现为连续中-强振幅前积反射(图 5)。

下降体系域(FSST)发育于 BSFR 和 SB1 之间(图 3, 图 5), 是进积富砂型陆缘中最关键的成因单元(图 3, 图 5)。BSFR 是该陆缘标志性的界面, 钻井资料显示, 界面之上岩性由底部泥岩夹砂岩向上陡然变粗, 变为箱状和漏斗状砂岩(P4 井和 P5 井; 图 3)。地震剖面上, BSFR 起始于陆架边缘, 向深水方向延伸, 表现为陆架边缘三角洲的下超包络面(图 5)。顶界面 SB1 在浅水区表现为陆架及陆架边缘三角洲的顶界面(P1, P2, P3, P4 和 P5 井; 图 3), 对应到地震上表现为一顶超包络面; 而在陆坡区则表现为上超面(图 5)。FSST 整体为进积-降积式地层叠置样式, 地震剖面上表现为大规模强制海退进积楔, 前方深水区发育席状、强振幅反射(图 5)。浅水区漏斗状砂岩和深水区齿化箱状砂体的组合特征, 共同指示相对海平面的显著下降使砂体持续向深水搬运, 形成陆架边缘洲-扇体系(图 3)。

低位体系域(LST)发育于 SB1 与 MRS1(最大海退面)之间(图 3, 图 5), 对应海平面到最低点后的初期上升阶段。LST 在地震剖面上表现为向陆侧变薄、向盆地方向加厚的楔状单元(图 5)。钻井资料显示, 该体系域主要发育在坡折以下的陆坡区, 可见多期齿化箱状海底扇砂岩(图 3), 与 FSST 呈明显继承关系, 二者共同构成了进积富砂型陆缘中深水砂体最为发育的部位。

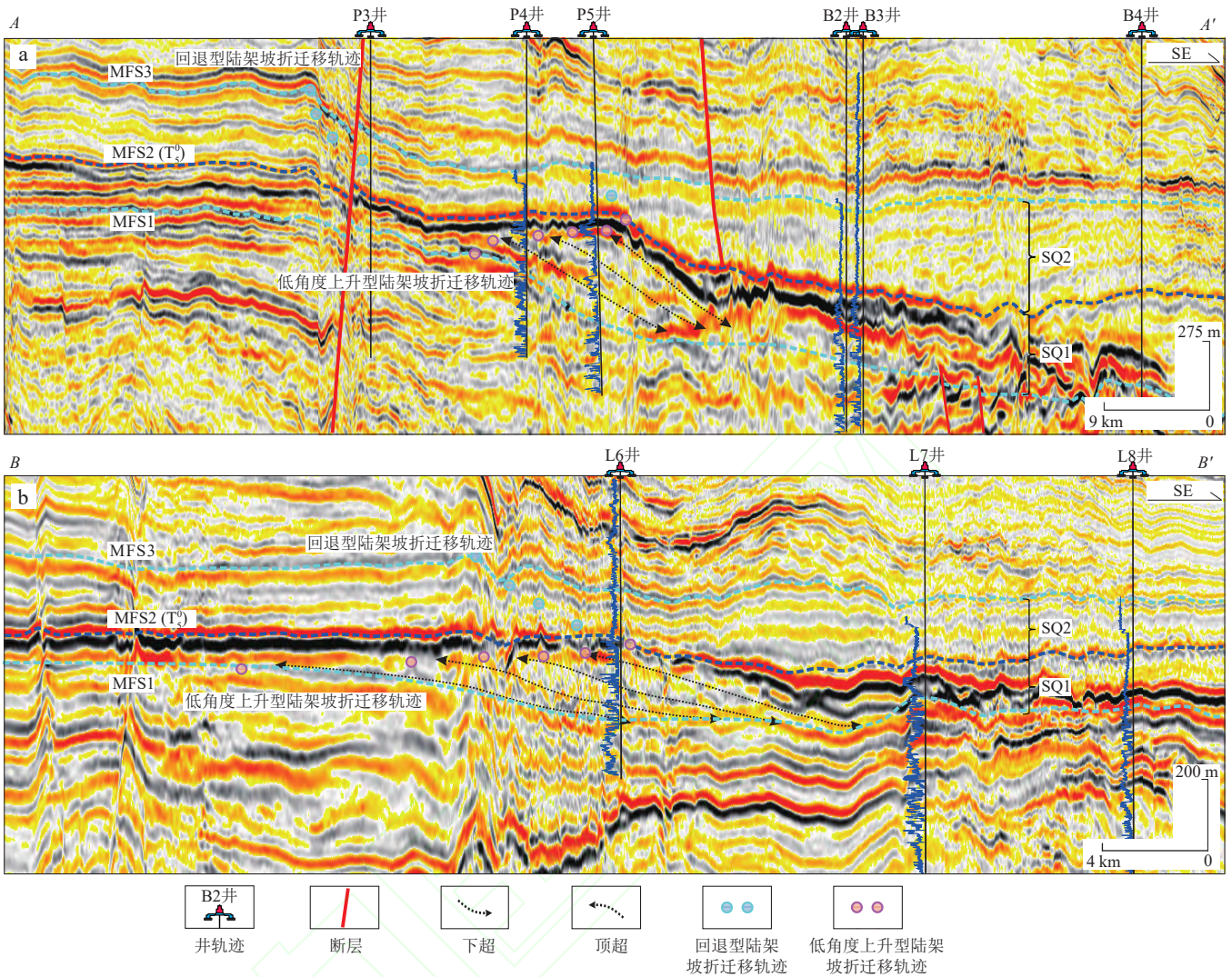


图2 珠江口盆地白云凹陷中部(a)和东部(b)珠江组典型地震剖面及进积富砂型陆缘和退积富泥型陆缘结构特征(剖面位置见图1b)
 Fig. 2 Representative seismic sections showing the characteristics of progradational sand-rich and retrogradational mud-rich shelf margin architectures in the central (a) and eastern (b) parts of the Zhujiang Formation, Baiyun Sag, PRMB (see Fig. 1b for the section locations)
 MFS1—MFS3. 最大海泛面;SQ1—SQ2. 三级层序
 (井旁蓝线为GR曲线。)

海侵体系域(TST)位于MRS1和MFS2之间(图3,图5),对应相对海平面快速上升阶段。该体系域在震上表现为近似等厚的一套地层,在浅水区发育箱状与指状陆架砂,含砂率向陆一侧升高,而在陆架边缘最低,仅陆坡区发育少量深水扇(图3)。

2.2 退积富泥型陆缘

2.2.1 陆缘结构特征

退积富泥型陆缘发育于珠江组上段,以MFS3和MFS2(T50)为顶、底界面,对应三级层序SQ2。与SQ1截然不同,SQ2表现为退积式地层叠置样式,发育回退型陆架坡折迁移轨迹(图2)。其中陆架进积距离为

-25.10 ~ -6.65 km(平均值为-17.10 km),加积距离为203 ~ 550 m(平均值为334 m),迁移轨迹角为177.72° ~ 179.28°(平均值为178.79°;表1),该类型陆缘以地层大幅度退积为特征,反映可容空间增长速率远大于物源供给速率($A/S \gg 1$)^[13]。砂体搬运效率约为14%,显著低于进积富砂型陆缘(44%),表明粗粒沉积物主要滞留于陆架,难以搬运至深水。

其陆缘结构亦呈明显的区域差异。西部与中部平均加积距离(分别为297和450 m)高于东部(255 m),表明物源供给以西部和中部为主,易形成更厚的顶积层(图2)。SQ2地震剖面上呈现出弱振幅响应特征,GR曲线整体靠近泥岩基线(图2,图3),共同指示陆缘整体富泥。SQ2陆架坡折带相较于SQ1向陆一侧发生

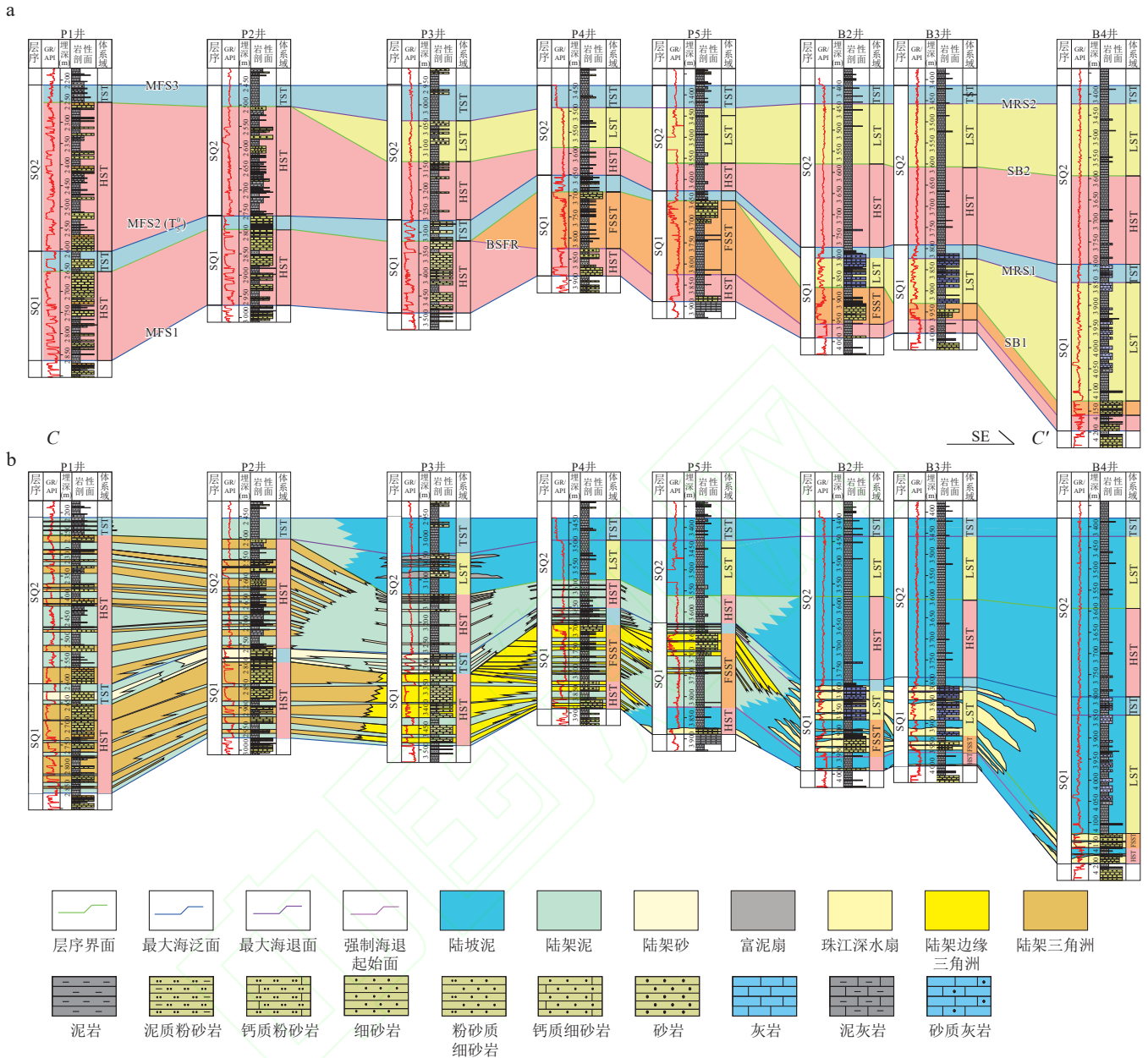


图3 珠江口盆地白云凹陷珠江组陆架边缘层序划分(a)及沉积演化连井对比剖面(b)(剖面位置见图1b)

Fig. 3 Well-correlation section showing the sequences of shelf margin architectures (a) and corresponding sedimentary evolution (b) in the Zhujiang Formation, Baiyun Sag, PRMB (see Fig. 1b for the section location)

MFS1—MFS3. 最大海泛面;MRS1—MRS2. 最大海退面;SQ1—SQ2. 三级层序;BSFR. 强制海退起始面;LST. 低位体系域;TST. 海侵体系域;HST. 高位体系域;FSST. 下降体系域

明显的回撤,沉积物集中于陆架区,呈现出“无洲-无扇”的沉积格局,整体相对富泥(图3)。

2.2.2 层序样式与沉积特征

与中-下段进积富砂型陆缘发育完整的四分体系域不同,上段退积富泥型SQ2明显缺失FSST,仅发育HST,LST和TST,呈三分体系域特征(图3,图5)。FSST的缺失表明该时期未经历显著的强制海退过程,而高

位正常海退持续时间更长,三角洲长期滞留于陆架区而无法形成陆架边缘三角洲;地震剖面上亦缺乏典型的强制海退起始面及强制海退楔的识别标志(图5)。

层序界面同样在2类陆缘中展现出较大差异,其中SQ1的SB1在陆架边缘处发育清晰的顶超反射,界面之下发育大规模砂体(图2、图3和图5);而SQ2的SB2仅在白云西洼局部表现为陆架三角洲顶部包络面,界面下的顶超反射规模有限^[28]。而在研究区中部

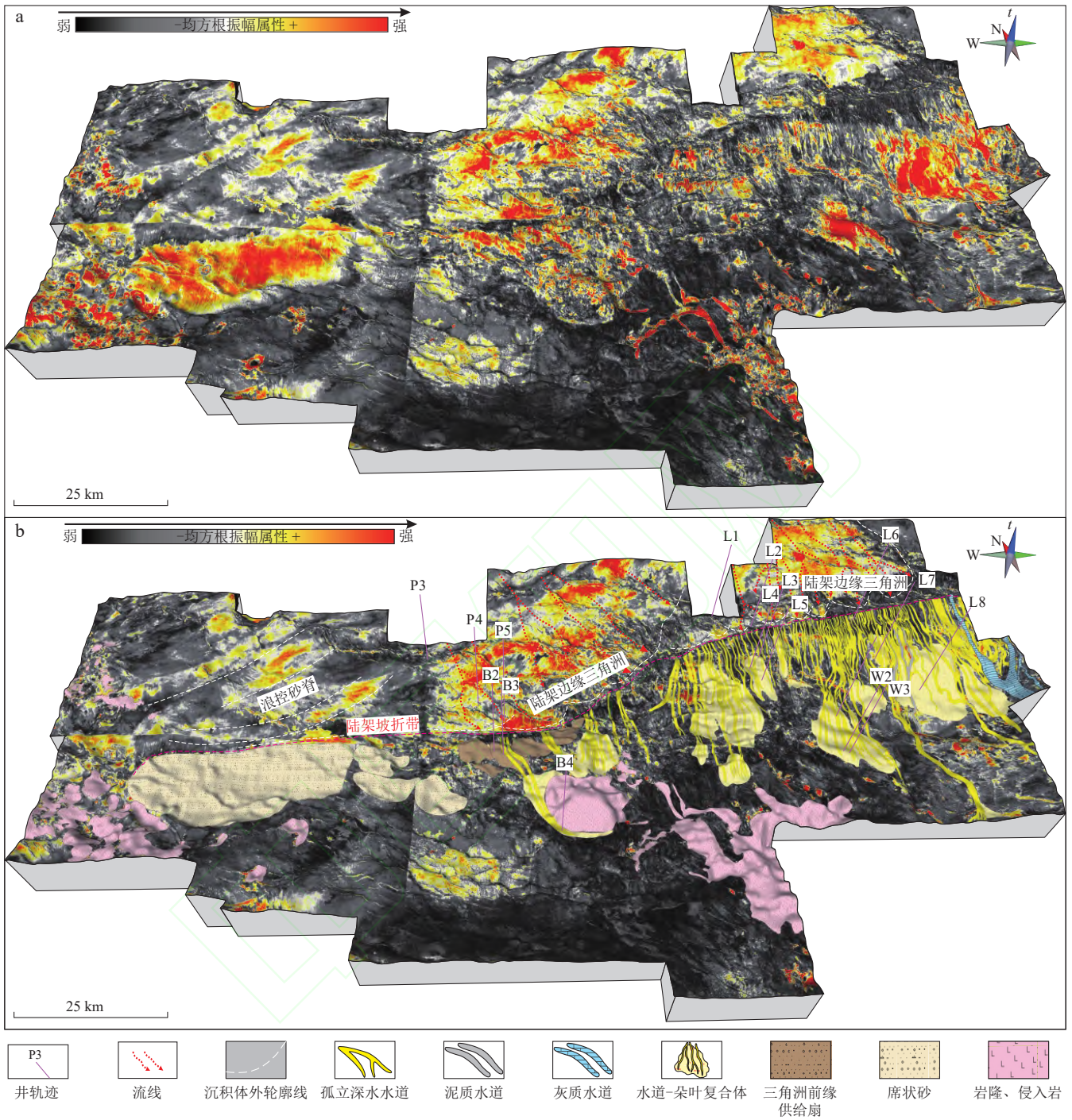


图4 珠江口盆地白云凹陷珠江组进积型陆缘下降体系域RMS属性(a)及其沉积解释叠合古地貌立体图(b)

Fig. 4 3D paleogeomorphic map overlaying the root-mean-square (RMS) amplitude attributes (a) and sedimentary interpretation (b) of the falling stage systems tract (FSST) of progradational shelf-margin architectures in the Zhujiang Formation, Baiyun Sag, PRMB
RMS. 均方根振幅; W. 西; N. 北; z. 古地貌高程

和东部,SB2对应富泥的加积-退积式叠置样式地层和视削截反射终止关系的顶部包络面(图2,图5),特征上更接近于“最大海泛面”。钻井资料显示,界面SB2之下以薄层砂-泥岩互层为主,旋回特征不明显;界面之上为泥岩夹粉砂岩,整体富泥(P1井和P2井;图3)

在体系域内部,SQ1与SQ2的差异更为突出。SQ1

的HST中三角洲能够推进至陆架边缘,形成陆架边缘三角洲和高位扇;而SQ2的HST主要以退积-加积式叠置为主,发育陆架三角洲。此外,由于缺乏FSST,三角洲无法推进至外陆架-陆架边缘,深水区砂质供给不足,LST难以形成规模海底扇,仅在上陆坡零星发育富泥扇(图3,图5)。TST阶段在2类陆缘中均表现为砂

体减少、泥质增加的特征,但SQ2的富泥特征更为显著(图3)。

2.3 差异陆缘结构成因

早中新世白云运动导致陆架坡折带由白云凹陷南部回撤至白云北坡一番禹低隆起一带。随后,在冰室气候下的高频海平面升降、珠江物源变化及差异构造沉降的共同作用下,形成进积富砂型与退积富泥型2种陆缘结构,其差异本质上反映了可容空间增长速率与物源供给速率之比(A/S)的响应特征。

高位域三角洲的快速进积及随后的相对海平面显著下降是形成进积富砂型陆缘和规模陆架边缘三角洲-深水扇体系的主要原因。高位陆架边缘三角洲的

发育一方面可作为下降体系域的有利物源,另一方面也指示河口在这一时期已经推进到了陆架边缘。其后显著的海平面下降进一步加强了河口向海迁移与砂体向深水区域搬运,促进了FSST陆架边缘洲-扇体系的形成。FSST及其强制海退楔的发育表明该时期经历过大幅度的相对海平面下降,这与约21.0 Ma时珠江口盆地的区域性海平面下降事件相吻合^[33]。

退积富泥型陆缘的形成主要受控于先期强烈海侵与持续快速构造沉降的共同作用。SQ2的形成演化(19.1~18.0 Ma)始于SQ1海侵体系域之后。约19.1 Ma(MFS2形成),珠江口盆地发生了全区规模最大的海侵事件^[36],河口显著向陆回退,可容空间急剧增大,为后续退积型陆缘的形成奠定了基础。此后,陆

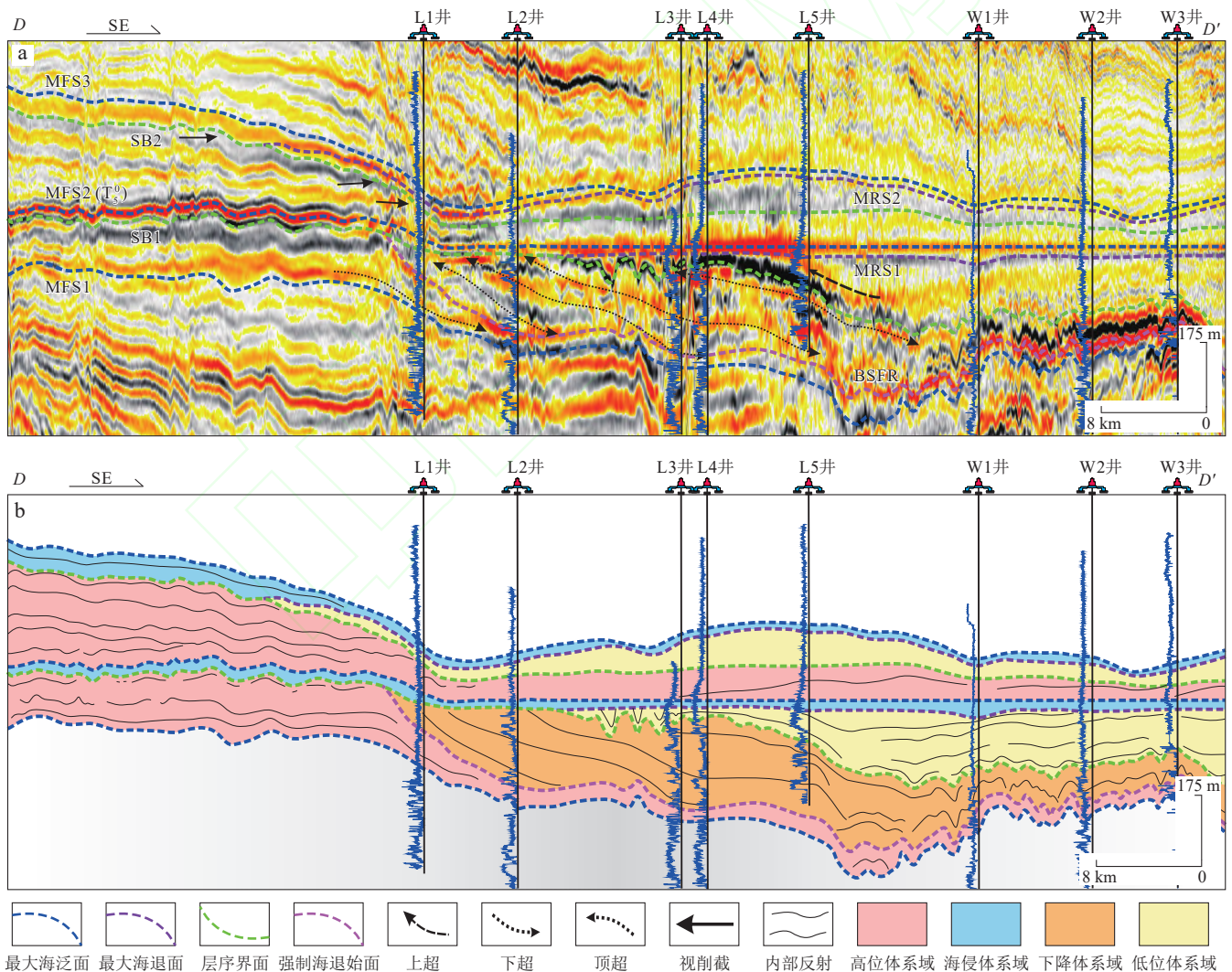


图5 珠江口盆地白云凹陷珠江组典型地震剖面(a)及层序地层解释剖面(b)(剖面位置见图1b)

Fig. 5 Representative seismic section (a) and corresponding sequenceW stratigraphic interpretation (b) of the Zhujiang Formation, Baiyun Sag, PRMB (see Fig. 1b for section location)

MFS1—MFS3. 最大海泛面;MRS1—MRS2. 最大海退面;SQ1—SQ2. 三级层序;BSFR. 强制海退起始面
(井旁蓝线为GR测井曲线。)

架区构造沉降显著增强, SQ2 内部 HST 陆缘加积速率高达 290 m/Myr (> 200 m/Myr, 符合高可容空间条件)^[12, 37], 结合其巨厚的顶积层与退积地层叠置样式, 指示陆架区存在快速构造沉降作用^[13, 21]。在快速构造沉降的影响下, 尽管全球海平面在 19.1 ~ 18.0 Ma 期间有所下降^[38], 但区域性沉降在一定程度上抵消了全球海平面下降引起的海退, 导致相对海平面下降阶段持续时间相对较短甚至缺失。河口长期滞留于陆架区, 粗粒物质难以向深水输送, 大量沉积物被高可容空间捕获并堆积于陆架区形成巨厚的顶积层, 而深水区仅发育零星泥质薄层砂体。

3 不同陆架边缘层序下深水砂体展布特征

不同陆缘结构与层序样式控制了深水砂体的类型、规模与展布格局。本节重点对比进积富砂型与退积富泥型 2 类陆缘的 FSST 和 LST 内深水砂体发育差异。

SQ1 下降体系域中三角洲全面推进至陆架边缘, 在中部和东部形成大规模陆架边缘三角洲, 而西部陆架砂体由于受到波浪改造, 从而发育沿陆架坡折走向展布的浪控砂脊(图 3b)。而深水区砂体类型和展布同样差异显著(图 3b), 其中, 东部以长距离搬运的孤立深水水道和水道-朵叶复合体为主, 单个朵体可达 33 km 长、14 km 宽, 还可见早期形成的大规模朵叶被晚期泥质水道所侵蚀下切(图 3b); 中部以中等距离搬运的水道-朵叶复合体为主, 还发育三角洲前缘供给扇和少量孤立深水水道(图 3b); 西部则以短距离搬运的席状砂为主(延伸距离约 22 km, 宽度 40 km), 沿着陆架坡折带展布(图 3b)。整体表现为东、中部“有洲-有扇”, 西部“无洲-有扇”的洲-扇耦合格局。

SQ1 的 LST 重力流沉积仍十分发育, 但搬运距离有所减小。其东部东侧由先前朵叶化特征明显的水道-朵叶复合体演变为孤立深水水道, 仅少量水道末端发育小规模朵叶(图 6b); 东部西侧由先前长距离搬运的水道-朵叶复合体演变为集中在中-上陆坡连片发育的非水道化扇。分析认为, 早期水道溯源侵蚀与拓宽增强了砂体捕获能力, 促进深水扇的形成(图 6b)。中部砂体规模整体变大, 其西侧演变为紧靠坡折带呈裙带状分布的三角洲前缘供给扇(图 6b); 东侧由先前的少量孤立水道和水道-朵叶复合体演变为规模更大的水道-朵叶复合体, 整个中部表现为深水砂体连片发育于中-上陆坡。西部依旧发育大规模的

席状砂(图 6)。

与之对比, SQ2 砂体发育特征截然相反。连井剖面显示, 其 LST 以泥岩为主, 砂体厚度薄、分布零散(图 3)。这一时期陆架坡折带相较于 SQ1 而言整体向北发生了回撤, 沉积物主要滞留于陆架区, 深水区砂体发育极为有限, 仅局部见少量粉砂质富泥扇。整体上表现为“无洲-无扇”的沉积格局。

总体而言, 发育“四分体系域”的进积富砂型陆缘砂体规模大、类型多样, 是深水砂体发育的主体; 而“三分体系域”的退积型陆缘整体富泥, 深水砂体相对不发育。

4 陆缘结构与层序样式对岩性-地层圈闭形成的控制

陆缘结构与层序样式决定了砂体的展布格局, 从而控制了岩性-地层圈闭的形成与分布。进积富砂型陆缘砂体发育充分, 具备圈闭形成条件; 而退积富泥型陆缘整体富泥, 圈闭发育有限。因此, 本节重点讨论进积富砂型陆缘中岩性-地层圈闭类型与发育模式。

4.1 岩性-地层圈闭类型与发育模式

层序界面和富砂体系域是控制砂体展布的关键要素, 直接影响地层圈闭和岩性圈闭的形成。研究区共识别出 5 类非构造类圈闭, 包括不整合遮挡型和地层超覆型 2 类地层圈闭以及扇体上倾尖灭型、水道周缘侧封型和泥质水道侧封型 3 类岩性圈闭(图 7, 图 8)。

层序界面上、下是砂体富集与地层圈闭形成的有利部位。①不整合遮挡型地层圈闭: 发育于层序界面之下的 FSST, 强制海退使多期三角洲以进积-降积式叠置于前期三角洲前缘之上, 易形成明显的砂-泥界面和侧向封闭。后期砂体被不整合面及其上覆海侵泥岩封盖, 从而形成不整合遮挡型圈闭。属性特征上表现为紧邻坡折带的扇状强振幅响应, 剖面上表现为楔状、强振幅、高频和连续反射等特征(图 7)。②地层超覆型地层圈闭: 形成于层序界面之上的 LST, 相对海平面处于低位期, 河口位于陆架边缘, 砂体得以直接搬运至陆坡区并形成三角洲前缘供给扇、水道-朵叶复合体和非水道化扇(图 6b)。砂体上覆的区域性海侵泥岩提供了良好的顶封条件, 构成地层超覆型圈闭。其属性特征表现为朵叶状强振幅响应, 剖面上表现为楔状、强振幅、高频和连续反射等特征, 扇体整体上超于层序界面之上(图 8)。

除了发育与层序界面直接相关的地层圈闭外,

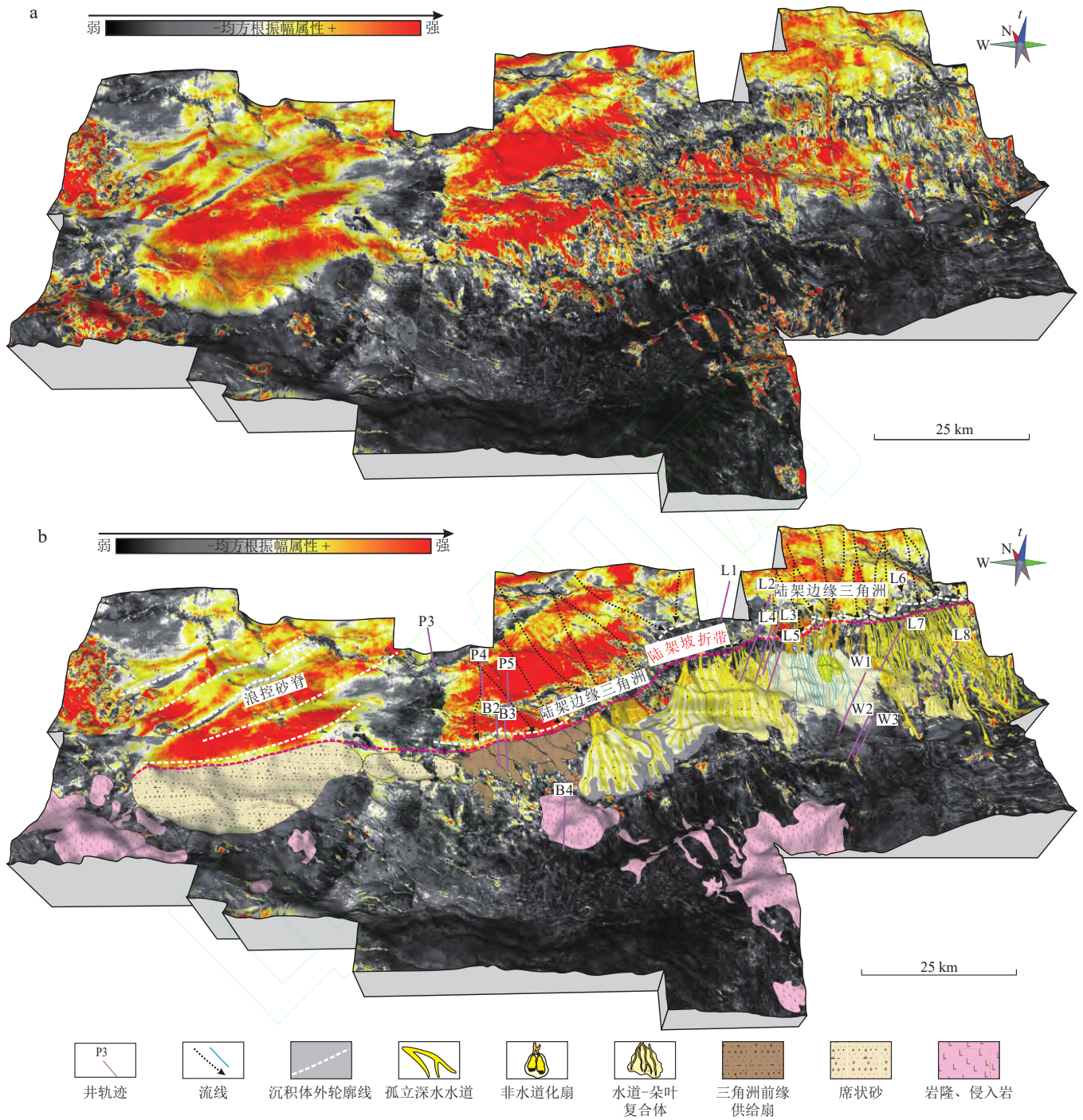


图6 珠江口盆地白云凹陷珠江组进积型陆缘低位体系域RMS属性(a)及其沉积解释叠合古地貌立体图(b)

Fig. 6 3D paleogeomorphic map overlaying the RMS amplitude attributes (a) and sedimentary interpretation (b) of the lowstand systems tract (LST) of the progradational shelf margin architectures in the Zhujiang Formation, Baiyun Sag, PRMB
RMS. 均方根振幅;W. 西;N. 北;Z. 古地貌高程

FSST和LST还因砂体类型丰富、展布广泛而被认为是岩性圈闭最为发育的部位。①扇体上倾尖灭型圈闭：上陆坡地区的三角洲前缘供给扇和水道-朵叶复合砂体向上倾方向尖灭于泥岩中，并被海侵泥岩封盖形成岩性圈闭(图7)。属性特征上表现为扇状强振幅响应，剖面上表现为席状、强振幅、高频和连续反射等特

征，砂体向上倾方向振幅逐渐减弱(图7)。②水道周缘侧封型圈闭：该类圈闭主要发育于东部区域，深水水道砂体被周缘泥岩包裹，形成良好的侧封闭条件。属性特征上表现为条带状强振幅响应向侧翼突变为弱振幅响应，剖面上呈透镜状强振幅反射、振幅向两翼减弱，指示水道砂体受泥岩分割而形成有效侧封(图7)。

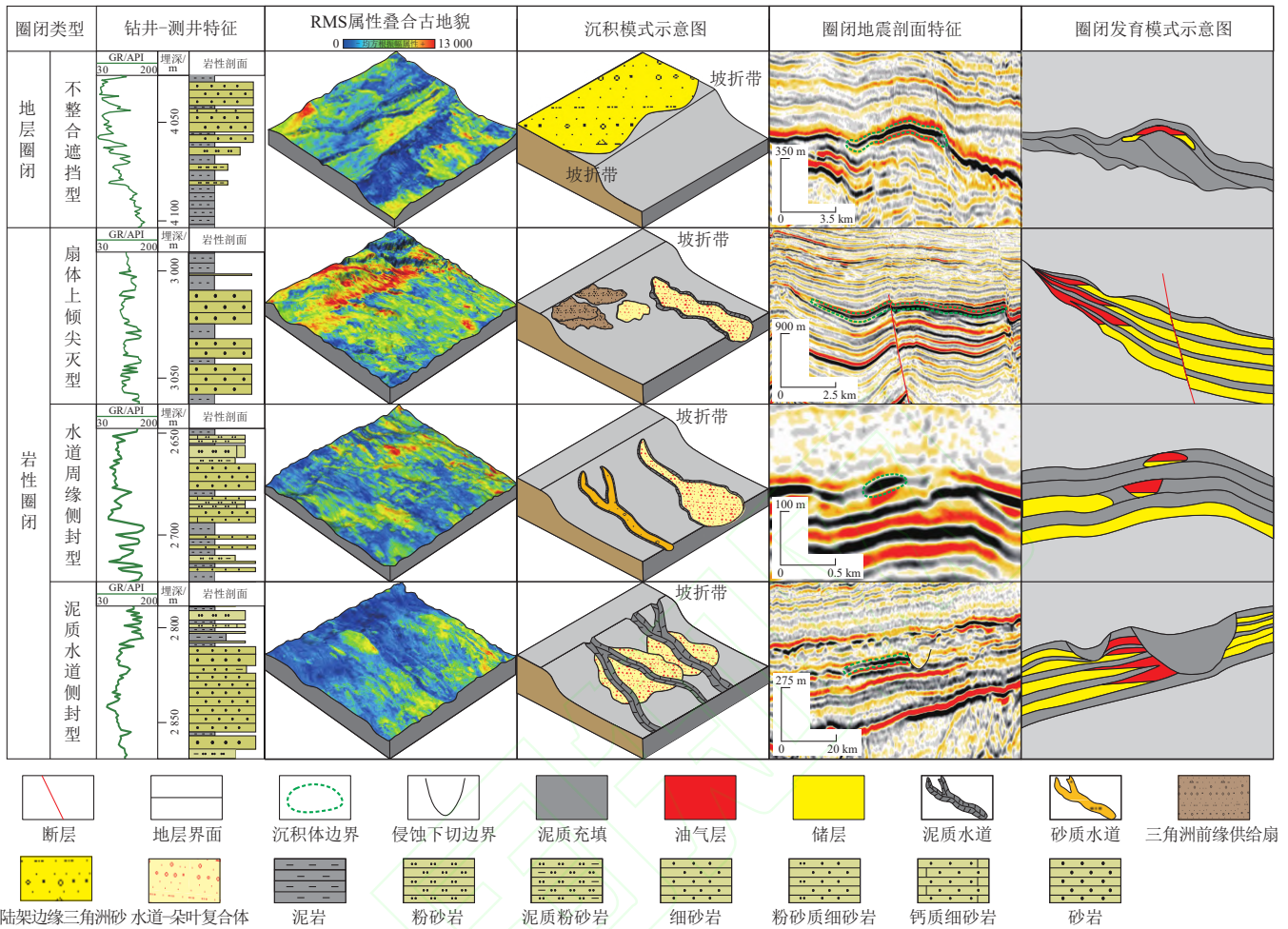


图7 珠江口盆地白云凹陷珠江组岩性-地层圈闭发育模式

Fig. 7 Schematic diagrams showing the developmental model of lithologic-stratigraphic traps in the Zhujiang Formation, Baiyun Sag, PRMB
RMS. 均方根振幅

③泥质水道侧封型圈闭:泥质水道下切侵蚀早期朵叶砂体并形成侧向封闭,是东部地区代表性的圈闭类型。属性特征上表现为朵叶状强振幅被条带状弱振幅所切割,剖面上呈席状,强振幅反射被侧翼U型弱振幅下切而中断(图7)。该类圈闭不仅是近年来白云凹陷东部油气勘探的主要突破口,还是琼东南盆地乐东-陵水凹陷规模优质天然气发现的主要圈闭类型之一^[39]。

除了上述5种非构造类圈闭外,研究区还发育3类岩性-构造复合圈闭:朵叶抬升型、砂脊抬升型和底辟遮挡型,对应于体系域内部分砂体受构造作用的影响而形成的圈闭。①朵叶抬升型圈闭:该圈闭形成于重力流远端卸载区域,末端朵叶砂体向四周泥岩尖灭,后期受地垒抬升影响并被两侧断层泥岩共同遮挡,构成复合圈闭。属性特征上表现为舌状强振幅响应,剖面上表现为发育在地垒高部位的席状、强振幅、高频、连续反射,砂体受断层与泥岩共同侧封(图8)。②砂脊抬升型圈闭:陆架边缘三角洲前缘砂体经波浪改造形

成条带状的砂脊,受后期构造隆升影响而被抬升至高部位,砂体向周缘泥岩尖灭,形成砂脊抬升型圈闭。属性特征上表现为相互平行、长带状和强振幅响应;剖面上呈席状、强振幅、中-高频、连续反射特征等特征,局部因泥质含量增加而出现振幅由强变弱的趋势,主要分布于西部浅水区(图8)。③底辟遮挡型圈闭:重力流在搬运过程中遇底辟隆起带改道或卸载,砂体沉积于底辟周缘或上超尖灭于其侧翼,底辟的侧向封闭与海侵泥岩顶封共同作用,形成底辟遮挡型圈闭。属性特征上表现为条带状强振幅反射环绕底辟展布,局部发育长条状或朵叶状强振幅体;剖面上呈席状、强振幅、高频、连续反射等特征,上超尖灭于丘状、杂乱反射的底辟体之上,主要分布于研究区中部中央底辟带(图8)。

4.2 陆缘结构与层序样式对岩性-地层圈闭形成的控制

陆缘结构是决定圈闭能否发育的首要因素。进积

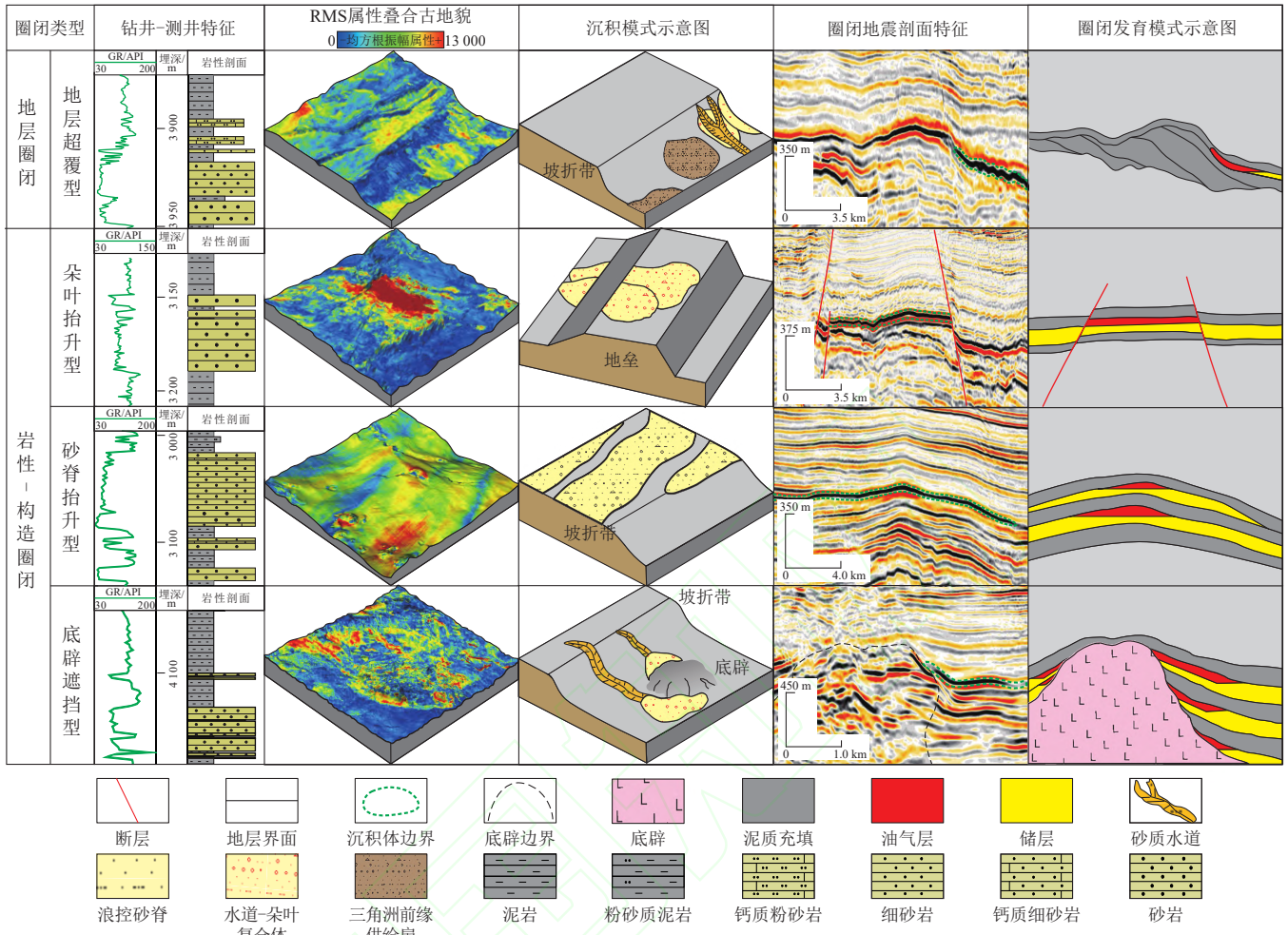


图8 珠江口盆地白云凹陷珠江组地层圈闭和岩性-构造圈闭发育模式

Fig. 8 Schematic diagrams showing the developmental model of stratigraphic traps and lithologic-structural traps in the Zhujiang Formation, Baiyun Sag, PRMB
RMS. 均方根振幅

富砂型陆缘中,物源供给速率远高于可容空间增长速率($A/S < 1$),砂体能够穿越陆架并进入深水区,形成陆架边缘三角洲-深水扇沉积体系,为圈闭发育提供了物质基础;而退积富泥型陆缘在高可容空间条件下,粗碎屑物质滞留于陆架区,深水区普遍富泥,缺乏有效储层条件,圈闭发育受限。

层序样式进一步控制圈闭类型与分布。进积型陆缘形成的“四分体系域”中,层序界面在圈闭形成中起关键作用,控制着界面之下不整合遮挡型和之上地层超覆型地层圈闭的形成。此外,FSST与LST砂体类型多样、展布广泛,控制着岩性圈闭的多样性,主要形成扇体上倾尖灭型、水道周缘侧封型和泥质水道侧封型等岩性圈闭。

从时间上看,FSST除发育扇体上倾尖灭型和水道周缘侧封型岩性圈闭外,还可形成不整合遮挡型地层

圈闭、泥质水道侧封型岩性圈闭及受构造活动影响的朵叶抬升型、砂脊抬升型和底辟遮挡型等岩性-构造圈闭;LST主要位于坡折以下,除同样发育扇体上倾尖灭型和水道周缘侧封型岩性圈闭外,还发育地层超覆型地层圈闭。从空间上看,圈闭展布呈明显东、西分异:东部以水道周缘侧封型与泥质水道侧封型岩性圈闭为主,中部以扇体上倾尖灭型岩性圈闭和底辟遮挡型岩性-构造圈闭为主,西部则以砂脊抬升型岩性-构造圈闭为主。总体上,圈闭集中分布于SQ1的FSST与LST,受陆缘结构差异和砂体展布格局的共同控制。

类似特征在其他被动陆缘中也有所体现。前人在尼日尔三角洲和巴西桑托斯盆地的研究中,揭示低角度进积型陆缘形成于相对海平面下降或低幅上升阶段,通常发育进积主导的陆架边缘三角洲与深水扇体系,深水区富砂沉积体系更容易发育;而回退型陆缘以

海平面上升为主,陆坡区普遍富泥、砂体发育受限^[40-41]。综合来看,白云凹陷进积富砂型陆缘的沉积体系和圈闭发育特征与全球其他被动陆缘具有一定相似性,显示陆缘结构与层序样式在控制砂体展布与圈闭类型方面具有较强的参考意义。然而,不同盆地的构造背景、物源供给和可容空间条件各异,该模式的适用性仍需结合具体地质条件进一步验证与拓展。

5 结论

1) 珠江组发育2类典型陆缘:进积富砂型陆缘和退积富泥型陆缘。前者表现为低角度上升型陆架坡折迁移轨迹,地层叠置样式以进积为主;后者为回退型陆架坡折迁移轨迹,叠置样式以退积为主。进积型陆缘发育完整的“四分体系域”(HST-FSST-LST-TST),下降体系域的形成是砂体向深水输送的关键;退积型陆缘则缺失下降体系域,仅具“三分体系域”(HST-LST-TST),三角洲滞留于陆架区,深水区整体富泥。

2) 进积富砂型陆缘的下降体系域和低位体系域中砂体发育广泛,形成“有洲-有扇”的洲-扇耦合格局,深水区发育水道-朵叶复合体、非水道化扇和孤立水道等多类型砂体。退积富泥型陆缘深水区仅零星发育富泥扇,整体表现为“无洲-无扇”的洲-扇耦合格局。

3) 陆缘结构决定圈闭能否形成,而层序样式进一步控制圈闭类型与分布。进积型陆缘中,下降体系域与低位体系域为圈闭发育最集中的部位,主要形成不整合遮挡型、地层超覆型、扇体上倾尖灭型、水道周缘侧封型及泥质水道侧封型等岩性-地层圈闭;退积型陆缘因储层条件不足,圈闭发育受限。该研究揭示了陆缘结构-层序样式-圈闭形成之间的内在耦合关系,为被动陆缘深水区岩性-地层圈闭预测提供了一定理论依据。

参 考 文 献

- [1] AMY L A. A review of producing fields inferred to have upslope stratigraphically trapped turbidite reservoirs: Trapping styles (pure and combined), pinch-out formation, and depositional setting[J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(12): 2861-2889.
- [2] 付超, 谢玉洪, 赵雨初, 等. 深水峡谷上游复合浊积砂岩储层类型及其展布规律——以琼东南盆地中央峡谷陵水气田为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 516-529.
FU Chao, XIE Yuhong, ZHAO Yuchu, et al. Types and distribution patterns of complex turbidite sandstone reservoirs in the upper reaches of deep-water canyons—A case study of the Lingshui Gas Field in the Central Canyon of Qiongdongnan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 516-529.
- [3] 田纳新, 龚承林, 吴高奎, 等. 重力流与海底地貌动态相互作用下深水沉积体系发育演化——以大西洋赤道段菩提瓜尔盆地为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 15-30.
TIAN Naxin, GONG Chenglin, WU Gaokui, et al. Development of submarine depositional systems under dynamic interplays between sediment gravity flows and seafloor topography: A case study of the Potiguar Basin on the equatorial Atlantic Ocean [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 15-30.
- [4] GONG Chenglin, STEEL R J, WANG Yingmin, et al. Grain size and transport regime at shelf edge as fundamental controls on delivery of shelf-edge sands to Deepwater [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 157: 32-60.
- [5] 张功成, 屈红军, 赵冲, 等. 全球深水油气勘探40年大发现及未来勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(10): 1447-1477.
ZHANG Gongcheng, QU Hongjun, ZHAO Chong, et al. Giant discoveries of oil and gas exploration in global deepwaters in 40 years and the prospect of exploration [J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(10): 1447-1477.
- [6] 龚承林, STEEL R J, 彭畅, 等. 深海碎屑岩层序地层学50年(1970—2020)重要进展[J]. 沉积学报, 2022, 40(2): 292-318.
GONG Chenglin, STEEL R J, PENG Yang, et al. Major advances in deep-marine siliciclastic sequence stratigraphy, 1970 to 2020 [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(2): 292-318.
- [7] POSAMENTIER H W, JERVEY M T, VAIL P R. Eustatic controls on clastic deposition I—Conceptual framework [M]// WILGUS C K, HASTINGS B S, POSAMENTIER H, et al. Sea-Level Changes: An Integrated Approach. Denver: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1988: 109-124.
- [8] HUNT D, TUCKER M E. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: Deposition during base-level' fall [J]. Sedimentary Geology, 1992, 81(1/2): 1-9.
- [9] GALLOWAY W E. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis I: Architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(2): 125-142.
- [10] EMBRY A F, JOHANNESSEN E P. T-R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost Triassic-Lower Jurassic succession, western Sverdrup Basin, Arctic Canada [J]. Norwegian Petroleum Society Special Publications, 1993, 2: 121-146.
- [11] HELLAND-HANSEN W, HAMPSON G J. Trajectory analysis: Concepts and applications [J]. Basin Research, 2009, 21(5): 454-483.

- [12] GONG Chenglin, STEEL R J, WANG Yingmin, et al. Shelf-margin architecture variability and its role in sediment-budget partitioning into deep-water areas [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 154: 72-101.
- [13] PAUMARD V, BOURGET J, PAYENBERG T, et al. Controls on shelf-margin architecture and sediment partitioning during a syn-rift to post-rift transition: Insights from the Barrow Group (Northern Carnarvon Basin, North West Shelf, Australia) [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 177: 643-677.
- [14] CATUNEANU O. Model-independent sequence stratigraphy [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 188: 312-388.
- [15] 陈维涛, 徐少华, 孙珍, 等. 层序地层学标准化理论在陆架坡折-陆坡区的应用——以珠江口盆地中中新世沉积层序为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(6): 1414-1422.
CHEN Weitao, XU Shaohua, SUN Zhen, et al. Application of standardized sequence stratigraphy theory in the shelf break-to-slope area: A case study of the Middle Miocene sedimentary sequence in the PRMB [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6): 1414-1422.
- [16] CARVAJAL C, STEEL R, PETTER A. Sediment supply: The main driver of shelf-margin growth [J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 96(4): 221-248.
- [17] PATRUNO S, HELLAND-HANSEN W. Clinoforms and clinoform systems: Review and dynamic classification scheme for shorelines, subaqueous deltas, shelf edges and continental margins [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 185: 202-233.
- [18] PAUMARD V, BOURGET J, PAYENBERG T, et al. Controls on deep-water sand delivery beyond the shelf edge: Accommodation, sediment supply, and deltaic process regime [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2020, 90(1): 104-130.
- [19] 葛家旺, 唐小龙, 赵晓明, 等. 南海琼东南盆地西区晚更新世陆架边缘层序结构及差异机制 [J]. *地球科学进展*, 2024, 39(7): 737-751.
GE Jiawang, TANG Xiaolong, ZHAO Xiaoming, et al. Variability in the shelf-edge sequence architecture and its controlling factors in the western part of the Late-Pleistocene Qiongdongnan Basin, South China Sea [J]. *Advances in Earth Science*, 2024, 39(7): 737-751.
- [20] STEVENTON M J, JACKSON C A L, HODGSON D M, et al. Lateral variability of shelf-edge and basin-floor deposits, Santos Basin, offshore Brazil [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2020, 90(9): 1198-1221.
- [21] SHEPHERD J W, LANG S C, PAUMARD V, et al. Controls on shelf-margin architecture and sediment partitioning on the Hammerhead shelf margin (Bight Basin, southern Australia): Implications for Gondwanan break-up dynamics between Australia and Antarctica [J]. *Earth-Science Reviews*, 2023, 244: 104538.
- [22] SHEPHERD J W, PAUMARD V, LANG S, et al. Investigating relationships between shoreline process regime, shelf-margin architecture, and deep-water sand delivery: Insights from the early post-rift Hammerhead shelf margin (Bight Basin, southern Australia) [J]. *Gondwana Research*, 2024, 135: 208-233.
- [23] 陈亮, 庞雄, 韩晋阳, 等. 珠江口盆地白云深水区构造-岩性油气藏特征及成藏模式 [J]. *特种油气藏*, 2019, 26(1): 30-36.
CHEN Liang, PANG Xiong, HAN Jinyang, et al. Structural-lithologic hydrocarbon reservoir characterization and accumulation patterns in the Baiyun deep-water area of the Pearl River Mouth Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(1): 30-36.
- [24] 张功成, 冯杨伟, 屈红军. 全球 5 个深水盆地带油气地质特征 [J]. *中国石油勘探*, 2022, 27(2): 11-26.
ZHANG Gongcheng, FENG Yangwei, QU Hongjun. Characteristics of petroleum geology of global five deep-water basin belts [J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(2): 11-26.
- [25] 远光辉, 彭光荣, 张丽丽, 等. 珠江口盆地白云凹陷古近系深层高变温背景下储层成岩作用与低渗致密化机制 [J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(1): 44-64.
YUAN Guanghui, PENG Guangrong, ZHANG Lili, et al. Diagenesis and low-permeability tightening mechanisms of the deep Paleogene reservoirs under high temperature and highly variable geothermal gradients in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(1): 44-64.
- [26] 陈维涛, 施和生, 杜家元, 等. 珠江口盆地陆架坡折区地层岩性圈闭形成条件及发育模式——以珠江组地层为例 [J]. *石油实验地质*, 2016, 38(5): 619-627.
CHEN Weitao, SHI Hesheng, DU Jiayuan, et al. Formation conditions and development model of stratigraphic-lithologic traps in shelf break zone, Pearl River Mouth Basin: Zhujiang Formation as an example [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2016, 38(5): 619-627.
- [27] 林杨松, 施和生, 李浩, 等. 南海北部珠江口盆地陆架边缘斜坡带层序结构和沉积演化及控制作用 [J]. *地球科学*, 2018, 43(10): 3407-3422.
LIN Changsong, SHI Hesheng, LI Hao, et al. Sequence architecture, depositional evolution and controlling processes of continental slope in Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea [J]. *Earth Science*, 2018, 43(10): 3407-3422.
- [28] 张昕, 林杨松, 张忠涛, 等. 珠江口盆地北部早一中中新世滨线迁移轨迹与沉积体系演化 [J]. *东北石油大学学报*, 2020, 44(1): 99-111.
ZHANG Xin, LIN Changsong, ZHANG Zhongtao, et al. Shoreline trajectory and depositional evolution of Early-Mid Miocene succession in Northern Pearl River Mouth Basin [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2020, 44(1): 99-111.

- [29] 刘军, 柳保军, 谢世文, 等. 珠江口盆地白云凹陷中央底辟带珠江组岩性圈闭发育条件与天然气勘探前景[J]. 天然气工业, 2025, 45(6): 78–87.
LIU Jun, LIU Baojun, XIE Shiwen, et al. Development conditions and natural gas exploration prospects of Zhujiang lithologic traps in the central diapir zone of the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(6): 78–87.
- [30] CATUNEANU O, ABREU V, BHATTACHARYA J P, et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy [J]. Earth-Science Reviews, 2009, 92(1/2): 1–33.
- [31] 庞雄, 陈长民, 彭大钧, 等. 南海北部白云深水区之基础地质[J]. 中国海上油气, 2008, 20(4): 215–222.
PANG Xiong, CHEN Changmin, PENG Dajun, et al. Basic geology of Baiyun deep-water area in the northern South China Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2008, 20(4): 215–222.
- [32] 柳保军, 庞雄, 王家豪, 等. 珠江口盆地深水区伸展陆缘地壳减薄背景下的沉积体系响应过程及油气勘探意义[J]. 石油学报, 2019, 40(增刊1): 124–138.
LIU Baojun, PANG Xiong, WANG Jiahao, et al. Sedimentary system response process and hydrocarbon exploration significance of crust thinning zone at extensional continental margin of deep-water area in Pear River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(S1): 124–138.
- [33] 秦国权. 珠江口盆地新生代晚期层序地层划分和海平面变化[J]. 中国海上油气, 2002, 16(1): 1–10, 18.
QIN Guoquan. Late Cenozoic sequence stratigraphy and sea-level changes in Pearl River Mouth Basin, South China sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2002, 16(1): 1–10, 18.
- [34] 唐武, 谢晓军, 熊连桥, 等. 陆架边缘三角洲-深水扇源汇耦合关系及成因机制——以珠江口盆地白云南洼古近系珠海组为例[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(3): 513–525.
TANG Wu, XIE Xiaojun, XIONG Lianqiao, et al. Coupling relationship and genetic mechanisms of shelf-edge delta and deep-water fan source-to-sink: A case study in Paleogene Zhuhai Formation in South subsag of Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(3): 513–525.
- [35] POREBSKI S J, STEEL R J. Deltas and sea-level change [J]. Journal of Sedimentary Research, 2006, 76(3): 390–403.
- [36] 吴太霏, 王华, 刘恩涛, 等. 珠三坳陷珠江组一段沉积体系演化过程及其控制因素[J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 111–122.
WU Taifei, WANG Hua, LIU Entao, et al. Evolutionary and controlling factors of sedimentary system in the First Member of the Zhujiang Formation in the Zhu III Depression [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 111–122.
- [37] SONG Gihun, LEE H S, LEE S. Architecture and evolution of shelf-margin clinoforms developed in a back-arc tectonic setting: Insights from quantitative analysis on the south-west shelf margin of the Ulleung Basin [J]. Basin Research, 2024, 36(2): e12859.
- [38] WESTERHOLD T, MARWAN N, DRURY A J, et al. An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years [J]. Science, 2020, 369(6509): 1383–1387.
- [39] 尤丽, 江汝锋, 龚宇, 等. 琼东南盆地深水海底扇岩性圈闭成藏主控因素与勘探突破[J]. 地球科学, 2024, 49(2): 749–758.
YOU Li, JIANG Rufeng, GONG Yu, et al. Main controlling factors of accumulation and exploration breakthrough of deep-water submarine fan lithologic trap in the Qiongdongnan Basin [J]. Earth Science, 2024, 49(2): 749–758.
- [40] ANYIAM O A, HOGGMASCALL N, AMOGU D K. Basin margin sediment wedge build out of the Eastern Niger Delta: Application of shelf-edge trajectory pattern studies [J]. Journal of Petroleum Exploration and Production, 2021, 11(3): 1093–1100.
- [41] BERTON F, VESELY F F. Stratigraphic evolution of Eocene clinoforms from northern Santos Basin, offshore Brazil: Evaluating controlling factors on shelf-margin growth and deep-water sedimentation [J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 78: 356–372.

(编辑 许诺)