

张尚锋, 范东旭, 李宏义, 等. 白云南洼珠海组陆架坡折带演化特征与深水沉积耦合关系[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(7): 11-24.

ZHANG Shangfeng, FAN Dongxu, LI Hongyi, et al. Coupling in the evolution between shelf break belt and deep-water sedimentation of the Zhuhai Formation in the Southern Subbasin of the Baiyun Sag[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(7): 11-24.

# 白云南洼珠海组陆架坡折带演化特征与深水沉积耦合关系

张尚锋<sup>1</sup>, 范东旭<sup>1,2\*</sup>, 李宏义<sup>3</sup>, 唐武<sup>3</sup>, 王雅宁<sup>1,2</sup>, 朱锐<sup>1,2</sup>, 李冉<sup>1</sup>

(1 长江大学地球科学学院, 武汉 430100; 2 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 荆州 434023;

3 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

**摘要:**白云南洼珠海组沉积时期, 盆地处于断陷向拗陷转化阶段, 陆架坡折形态以及位置发生巨大变化, 导致深水沉积的类型和特征具有明显差异。针对这种坡折演化对深水沉积类型的影响开展研究, 通过对白云南洼珠海组三维地震剖面进行解译, 识别珠海组各层段陆架坡折带, 定量分析坡折特征及其演化规律, 探讨坡折演化过程与深水沉积的耦合关系。研究结果表明, 通过对珠海组沉积时期陆架坡折带定量分析, 将其迁移演化类型划分为下降型、平直型、低角度上升型、高角度上升型 4 类; 在井震结合的基础上, 根据地震相组合以及沉积体系分布特点, 识别出斜坡扇、块状搬运沉积、深水水道体、盆底扇 4 种主要的深水沉积类型; 并发现陆架坡折演化类型与深水沉积类型存在明显的耦合关系: 平直型、高角度上升型、低角度上升型和下降型陆架边缘迁移轨迹分别对应斜坡扇、块状搬运沉积、深水水道体和盆底扇的优势发育。此外, 珠海组四段至珠海组三段陆架坡折带整体由下降型向低角度上升型转变, 深水沉积体系以斜坡扇及深水水道体发育为主; 珠海组三段至珠海组一段早期整体由低角度上升型向下降型转变, 深水沉积体系以深水水道-盆底扇沉积体系为主; 珠海组一段晚期整体由下降型向高角度上升型演化, 深水沉积体系几乎不发育。本研究揭示了陆架坡折迁移对深水沉积体系类型和分布的控制作用, 对深入理解深水沉积过程和油气勘探具有重要意义。

**关键词:**坡折带; 深水沉积类型; 沉积演化; 珠海组; 白云南洼; 珠江口盆地

中图分类号: P744.4; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.055

## 0 引言

中国南海作为深水油气战略勘探选区, 油气勘探突破面临巨大挑战<sup>[1-3]</sup>。前人对南海北部珠江口盆地白云南洼珠海组深水沉积体系展开了一系列研究, 发现珠海组晚期储层物性较好, 有利储层主

要分布在陆架边缘三角洲前缘和近端深水扇<sup>[4]</sup>。晚渐新世该区构造活动相对平静, 陆架边缘三角洲大规模发育, 深水区形成陆架坡折带, 其前端发育的深水扇体是有利勘探目标<sup>[5-6]</sup>。陆架坡折带作为连接浅水区和深水区的重要桥梁, 其迁移演化规律反映了陆架边缘三角洲与深水沉积体系物质输送过程及响应关系, 对还原盆地沉积物的沉积过程, 预测深水储集体发育规模、储层砂体发育位置及物性等, 以及深水油气勘探具有重要意义。

研究陆架边缘的结构及其时空演化特征, 对重建盆地沉积物供应机制以及预测深水砂体分布具有重要意义。陆架边缘迁移轨迹这一概念广泛应用于陆架坡折带的定量分析中, 认为其控制着沉积物从大陆架向斜坡和深水区的转移<sup>[7]</sup>。相较于传统

收稿日期: 2024-03-11

资助项目: 中海石油(中国)有限公司重大科技项目“南海天然气基础地质与勘探战略方向”(2021-KT-YXKY-05); 国家自然科学基金“南海北部宽缓大陆架海平面变化及双坡折带层序地层模型”(41472098)

第一作者: 张尚锋(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积学与层序地层学方面的研究工作. E-mail: 1291789217@qq.com

\* 通讯作者: 范东旭(1998—), 男, 在读硕士, 主要从事应用沉积学方面的研究工作. E-mail: 1940649032@qq.com

层序地层学方法,陆架边缘迁移轨迹分析能更有效地描绘在连续演化的沉积体系背景下,陆架边缘(海岸线)的前进或后退情况。根据不同的迁移模式,陆架边缘轨迹可分为上升海退、下降海退、海侵和静止4种类型<sup>[8]</sup>。前人通过数值模拟对三角洲演化及陆架坡折带迁移过程的重建,认为不同类型的陆架迁移轨迹是影响陆架边缘三角洲储层发育的重要控制因素之一<sup>[9-10]</sup>。然而,现有研究多集中于浅水区陆架边缘,难以为深水沉积体系演化及油气勘探提供有效指引。为此,本文通过对白云南洼陆架边缘坡折带进行定量化分析,总结坡折带发育特征及其演化与深水沉积的耦合关系,以期预测该区深水有利砂体分布提供理论依据。

## 1 地质背景

珠江口盆地位于南海北部,属典型被动陆缘盆地,该盆地由北部断阶带、北部坳陷带、中央隆起带、南部坳陷带和南部断阶带5个构造单元组成,整体呈现“三隆夹两坳”的构造格局<sup>[11]</sup>。本文重点研究区白云南洼位于珠江口盆地珠二凹陷中部(图1),总面积约2 000 km<sup>2</sup>,现今水深约650~3 000 m。白云南洼构造演化经历了断陷期、断拗转换期及拗陷期3个阶段,其中,始新世—早渐新世为断陷阶段,发育文昌组、恩平组陆相地层;约34 Ma时,南海海盆开始扩张,白云南洼发生区域性抬升,形成大规模破裂不整合界面,随后,白云南洼由断陷阶段转变为拗陷阶段,相对海平面上升,古珠江沉积物供给量持续增加<sup>[12]</sup>,形成早期开阔型陆架边缘-深水斜坡-深水盆地沉积环境,发育珠海组沉积;约23 Ma,白云运动形成古近系与新近系的不整合界面,导致

珠江组陆架坡折带由南向北迁移至白云北坡,珠江组至今发育拗陷期海相地层<sup>[13]</sup>。

本文主要针对断拗转换关键期的珠海组为研究对象来解析陆架坡折演化,前人将其自下而上划分为6段(珠海组六段—一段)<sup>[14-15]</sup>,珠海组整体沉积特征为:珠海组六段—五段物源供给能力较弱,陆架三角洲局限发育,深水沉积不发育;随着相对海平面变化,珠海组四段—一段古珠江物源供给能力增强,发育大型陆架三角洲体系,深水沉积发育规模增大,类型复杂多样(图2)。

## 2 陆架坡折带类型及其特征

### 2.1 坡折带识别与参数定量统计

陆架坡折带是连接浅水陆架与深水盆地的关键构造单元,其地形地貌的显著变化对沉积物搬运过程具有重要影响。RICH<sup>[16]</sup>在1951年首次提出将由陆架坡折带中顶积层、前积层、底积层组成的“S”型斜坡楔状体定义为坡折地形,由坡折地形构成的岩石单元则称为坡折单元。本文基于白云南洼20条均匀分布的SE向平行地震剖面,综合利用地震相反射特征、反射终止关系(上超和削截)、地层厚度和坡度变化等标志,在前人研究的基础上<sup>[17]</sup>,对珠海组各段陆架坡折点位置进行了精细识别。结果表明,由于珠海组六段—五段地形地貌变化较小,坡度平缓,导致坡折带发育不明显,难以识别。因此,本文根据珠海组四段—一段坡折点的空间分布特征约束确定了陆架坡折带的分布范围,并将坡折带进一步划分为多个坡折单元,每个坡折单元具有相对独特的形态与沉积过程(图3)。

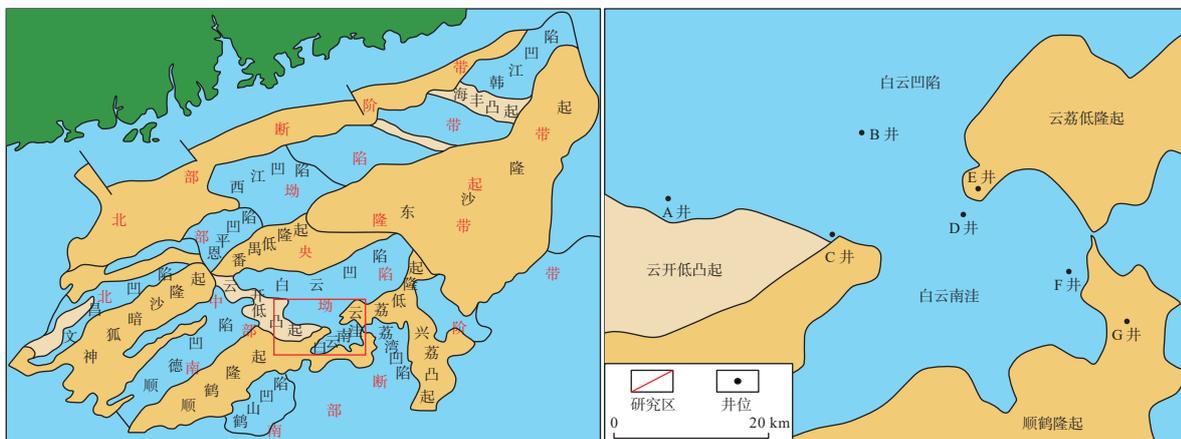


图1 珠江口盆地构造单元及研究区位置

Fig.1 Structural units and location of the study area in Pearl River Mouth Basin

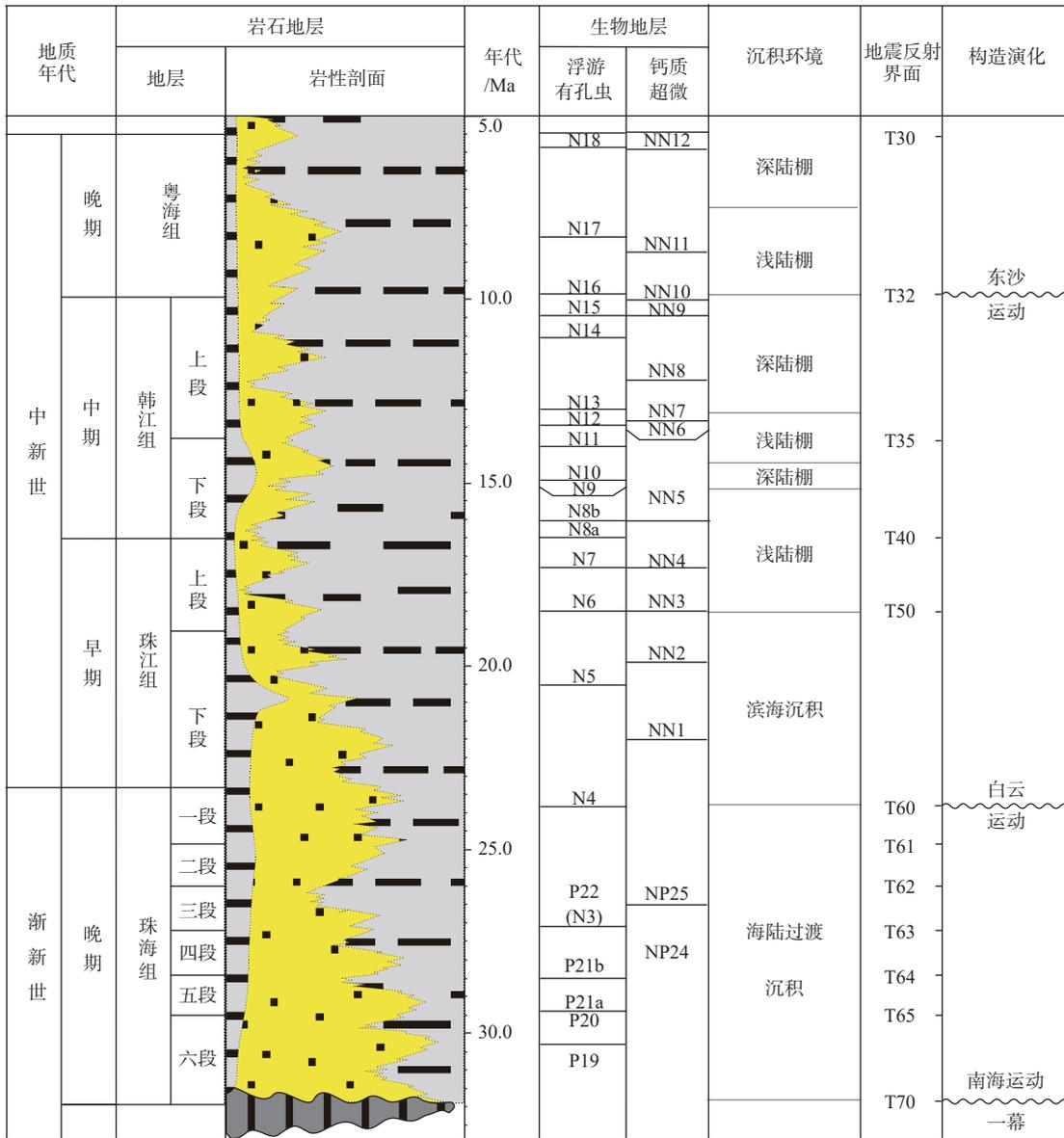


图 2 珠江口盆地地层综合柱状图

Fig.2 Comprehensive stratigraphic column of the Pearl River Mouth Basin

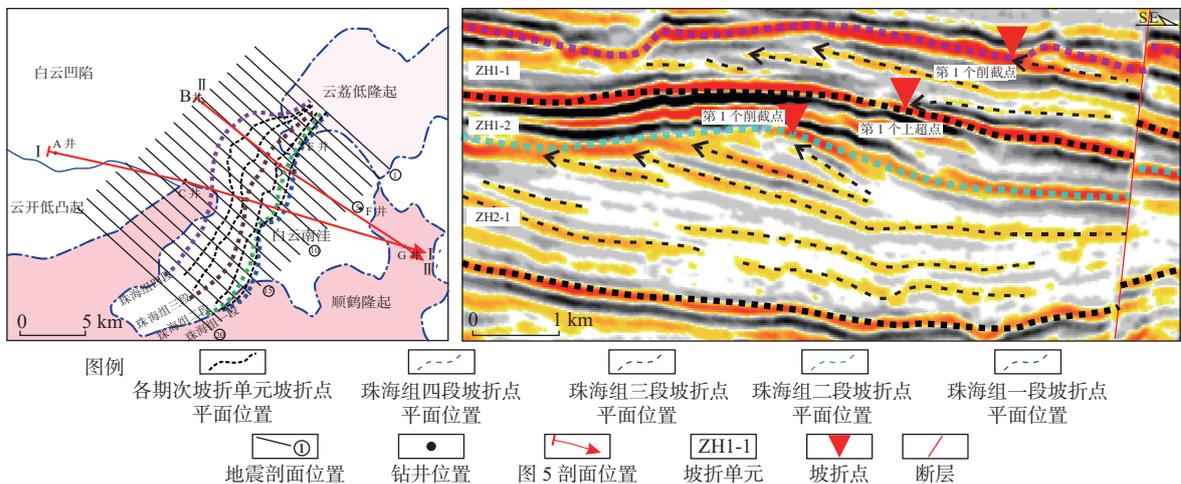


图 3 陆架坡折带时空分布 (左) 与典型识别剖面 (右)

Fig.3 Spatial and temporal distribution of shelf slope break zone (left) and typical section interpreted (right)

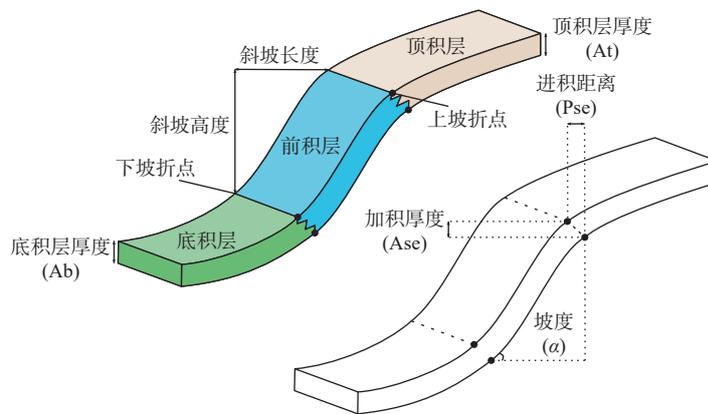
在坡折带识别基础上,定量统计了白云南洼珠海组各坡折单元特征参数(图4)。通过将“S”型斜坡楔状体转折处作为描述参考点(上、下坡折点),有利于地震剖面上坡折带参数的定量统计<sup>[18]</sup>,包括:①坡折点相对高度(斜坡长度 $H$ )和距离(斜坡长度 $L$ ),进而计算斜坡坡度( $\alpha$ );②底面上坡折点和与之对应的顶面上坡折点之间的侧向位移和垂向位移,即陆架边缘进积距离(Pse)和陆架边缘加积厚度(Ase),以计算陆架边缘迁移角度(Tse),表征各坡折单元的时空演化规律;③每个坡折单元的顶积层

(At)和底积层(Ab)厚度。以上所有数据均为时深关系校准后深度域剖面上精细测量的结果,由于未进行去压实矫正,可能会使测量值与实际沉积厚度值存在误差,影响陆架坡折古形态表征,但进行相对比较时其影响可以忽略不计(表1)。

斜坡坡度(AC)、陆架边缘迁移角度(Tse)计算公式:

$$AC = \frac{H}{L} \quad (1)$$

$$Tse = Pse/Ase \quad (2)$$



据文献 [19] 修改

图4 坡折参数统计示意图

Fig.4 Schematic of geometric parameters of slope topography

珠江口盆地白云南洼珠海组四段坡折带北部显示出较大的进积距离(4 243~9 093 m)和加积厚度(41~157 m),而坡折带南部则呈现相对较小的进积距离(2 987~6 324 m)和加积厚度(23~51 m)。同时,陆架边缘迁移角度虽整体偏低(平均约为 $0.5^\circ$ ),但北部( $0.61^\circ\sim 1.38^\circ$ )相对南部( $0.29^\circ\sim 0.76^\circ$ )更高。这些特征表明,珠海组四段陆架坡折的迁移演化过程呈现出南部水平推进和中北部低角度上升推进的空间分异特征,反映了沉积物供给能力的南北差异变化。

珠海组三段早—中期坡折带的进积距离(2 753~11 257 m)大于晚期(2 425~8 425 m),而晚期坡折带加积厚度(-314~298 m)相较于早期(14~211 m)显著提升,反映沉积物供给能力明显增强。陆架边缘迁移角度整体偏低( $-3.26^\circ\sim 3.17^\circ$ ,平均约为 $0.70^\circ$ ),但在空间上表现出明显分异特征:北部晚期陆架坡折迁移角度为负值( $-3.26^\circ\sim -0.32^\circ$ ),呈现下降推进趋势;中部晚期陆架坡折迁移角度较高( $1.96^\circ\sim 3.17^\circ$ ),呈现高角度的上升推进趋势。总体而言,珠海组三段陆架坡折经

历了复杂的迁移演化过程,早—中期继承珠海组四段坡折迁移规律,晚期南部坡折持续水平推进,而中部坡折则呈现高角度缓慢上升推进,北部坡折则快速下降推进。反映白云南洼陆架坡折带沉积物供给和地形地貌变化显著。

珠海组二段坡折带表现出较强的沉积物输送能力,其进积距离(4 591~12 017 m)明显强于珠海组三段,而珠海组二段坡折带中部加积厚度为负值(-500~-25 m),反映沉积物向坡折带以下深水区供给增强,上坡折带几乎不停留沉积。此外,珠海组二段陆架边缘迁移角度整体较小( $-2.42^\circ\sim 1.66^\circ$ ,平均为 $-0.37^\circ$ ),表明相对于早期珠海组四段及三段,珠海组二段沉积时期白云南洼沉积物推进能力最强,陆架上沉积厚度相对较薄,斜坡及深水区沉积厚度较厚。总而言之,白云南洼陆架坡折带珠海组二段沉积时期物源供给能力大幅度增强,沉积物向深水区大规模搬运。

珠海组一段坡折带的定量统计数据呈现明显的阶段性差异,早期坡折单元的进积距离较大(848~9 052 m),与珠海组二段沉积时期相似,坡折

表 1 白云南洼珠海组坡折带参数定量统计

Table 1 Quantitative statistics of slope break zone parameters of the Zhuhai Formation in the Southern Subbasin of the Baiyun Sag

剖面位置	层位	坡折单元	At/m	Ab/m	At/Ab	Pse/m	Ase/m	Pse/Ase	Tse/(°)	$\alpha$ /(°)	
剖面①	珠海组一段	ZH1-1	184.76	124.79	1.48	377.00	176.00	2.14	15.03	1.80	
		ZH1-2	168.16	181.47	0.93	848.00	9.00	94.22	0.61	1.44	
	珠海组二段	ZH2-1	184.04	219.24	0.84	2 433.00	25.00	97.32	0.59	1.55	
		ZH2-2	190.51	225.25	0.85	1 895.00	55.00	34.45	1.66	1.91	
	珠海组三段	ZH3-1	141.35	145.24	0.97	2 425.00	-138.00	-17.57	-3.26	1.83	
		ZH3-2	283.99	218.20	1.30	2 902.00	41.00	70.78	0.81	2.15	
		ZH3-3	323.13	195.78	1.65	3 257.00	155.00	21.01	2.72	1.96	
	珠海组四段	ZH4-4	152.27	224.29	0.68	6 289.00	110.00	57.17	1.00	1.63	
	剖面⑤	珠海组一段	ZH1-1	157.04	122.61	1.28	2 378.00	157.04	15.14	3.78	2.39
			ZH1-2	176.08	138.03	1.28	1 189.00	53.00	22.43	2.55	2.54
		珠海组二段	ZH2-1	218.68	252.84	0.86	3 995.00	66.00	60.53	0.95	1.57
			ZH2-2	210.04	188.66	1.11	2 168.00	54.00	40.15	1.43	1.38
珠海组三段		ZH3-1	219.32	270.80	0.81	6 144.00	-60.00	-102.40	-0.56	3.35	
		ZH3-2	182.61	203.21	0.90	4 033.00	123.00	32.79	1.75	1.69	
		ZH3-3	282.80	166.88	1.69	6 105.00	211.00	28.93	1.98	1.23	
珠海组四段		ZH4-4	175.03	305.92	0.57	4 895.00	118.00	41.48	1.38	0.89	
剖面⑨		珠海组一段	ZH1-1	148.08	207.67	0.71	2 036.00	75.00	27.15	2.11	5.10
			ZH1-2	0.00	137.81	0.00	9 052.00	-81.00	-111.75	-0.51	4.03
		珠海组二段	ZH2-1	0.00	129.14	0.00	7 290.00	-64.00	-113.91	-0.50	3.57
			ZH2-2	114.90	129.46	0.89	6 296.00	-55.00	-114.47	-0.50	3.45
	珠海组三段	ZH3-1	129.48	162.81	0.80	6 853.00	298.00	23.00	2.49	3.88	
		ZH3-2	152.20	205.72	0.74	7 070.00	95.00	74.42	0.77	1.61	
		ZH3-3	158.30	133.75	1.18	6 258.00	97.00	64.52	0.89	2.26	
	珠海组四段	ZH4-4	173.76	194.35	0.89	8 333.00	88.00	94.69	0.61	2.83	
	剖面⑬	珠海组一段	ZH1-1	145.44	131.24	1.11	6 537.00	95.00	68.81	0.83	2.68
			ZH1-2	89.07	112.93	0.79	5 716.00	89.00	64.22	0.89	2.83
		珠海组二段	ZH2-1	65.72	282.17	0.23	8 675.00	-88.00	-98.58	-0.58	3.35
			ZH2-2	312.41	149.27	2.09	9 543.00	107.00	89.19	0.64	3.21
珠海组三段		ZH3-1	52.60	181.76	0.29	4 765.00	191.00	24.95	2.30	5.41	
		ZH3-2	249.83	115.42	2.16	5 529.00	46.00	120.20	0.48	2.20	
		ZH3-3	208.00	164.05	1.27	4 325.00	102.00	42.40	1.35	1.97	
珠海组四段		ZH4-4	101.61	162.86	0.62	5 971.00	38.00	157.13	0.36	3.07	
剖面⑰		珠海组一段	ZH1-1	76.50	114.28	0.67	4 491.00	58.00	77.43	0.74	0.64
			ZH1-2	107.21	164.04	0.65	5 761.00	34.71	165.98	0.35	0.57
		珠海组二段	ZH2-1	19.21	64.62	0.30	9 442.00	17.00	555.41	0.10	0.68
			ZH2-2	51.97	51.66	1.01	8 685.00	43.00	201.98	0.28	0.65
	珠海组三段	ZH3-1	0.00	132.70	0.00	5 981.00	33.00	181.24	0.32	1.95	
		ZH3-2	0.00	130.17	0.00	9 245.00	38.00	243.29	0.24	2.24	
		ZH3-3	238.59	89.69	2.66	6 554.00	127.00	51.61	1.11	1.80	
	珠海组四段	ZH4-4	104.17	29.11	3.58	4 785.00	36.00	132.92	0.43	1.70	

注: 剖面位置见图3。

带中部加积厚度呈现负值(-52~-180 m), 反映沉积物向深水区的强烈供给, 导致上坡折带几乎不存在沉积作用。这一特征表明, 在珠海组一段沉积早期, 物源供给仍然较强, 沉积物向深水区大规模搬

运。然而, 晚期坡折单元的加积厚度发生明显增加(24~200 m), 指示了较强的加积作用, 大量沉积物在上坡折带堆积, 向深水区供给能力减弱。此外, 陆架边缘迁移角度由早期(-1.2°~1.39°)转变为晚

期( $0.44^{\circ}\sim 15.03^{\circ}$ ),反映陆架坡折由早期下降推进向晚期高角度上升推进的变化。综上所述,白云南洼陆架坡折带珠海组一段沉积期物源供给能力依然强劲,沉积早期,大量沉积物向深水区搬运;沉积晚期,沉积物主要堆累在陆架上,呈现明显的加积趋势。珠海组一段整体展现了与珠海组二段相似的物源供给能力,且具有独特的双阶段沉积模式。

## 2.2 陆架坡折迁移演化类型及其特征

基于对上述 20 条地震剖面中坡折带的定量统计与计算,根据陆架坡折迁移角度(Tse)、顶积层厚度( $A_t$ )、底积层厚度( $A_b$ )以及可容空间与沉积物供给量之比( $A/S$ )的差异,将珠江口盆地白云南洼坡折单元的迁移演化轨迹进一步划分为以下 4 类(图 5、6):

### (1) 下降型陆架边缘迁移轨迹 ( $A/S \ll 1$ )

白云南洼陆架坡折带珠海组二段与珠海组一段早期可识别到这种类型的迁移模式。其具有显著的前积主导性(进积距离远大于加积厚度),且加积厚度表现为负值( $-500\sim -25\text{ m}$ ),这一特征反映陆架边缘迁移轨迹具有显著下降趋势( $Tse < 0^{\circ}$ )。同时,顶积层厚度远小于底积层厚度( $A_t/A_b \approx 0$ ),表明绝大多数沉积物沉积在深水区,而非陆架上,陆架上沉积物供给能力远大于陆架可容纳空间,从而导致深水区沉积体系发育。

### (2) 平直型陆架边缘迁移轨迹 ( $A/S < 1$ )

白云南洼陆架坡折带珠海组四段——一段南部均展现出平直型陆架边缘迁移模式。定量统计结果表明,该类型的坡折单元进积距离介于  $2\ 457\sim 14\ 795\text{ m}$ ,而加积厚度仅为  $14\sim 97\text{ m}$ ,进积距离与加积厚度之比( $Pse/Ase$ ) $> 100$ ,表明具有极强的前积性,陆架边缘迁移轨迹近乎平直( $0^{\circ} < Tse < 0.5^{\circ}$ )。同时,顶积层厚度较小,介于  $19\sim 240\text{ m}$ ,而底积层厚度相对较大,介于  $64\sim 489\text{ m}$ ,顶积层厚度与底积层厚度之比( $A_t/A_b$ )介于  $0\sim 0.5$ ,但坡度较小,仅为  $0.11^{\circ}\sim 2.25^{\circ}$ ,表明大量的沉积物被输送到陆架坡折带深水区斜坡处,少部分沉积物沉积在陆架上。

### (3) 低角度上升型陆架边缘迁移轨迹 ( $A/S < 1$ )

白云南洼陆架坡折带珠海组三段——二段呈现出此类型的迁移模式。定量分析显示,该类型的坡折单元进积距离( $848\sim 14\ 653\text{ m}$ )与加积厚度( $9\sim 282\text{ m}$ )均表现为相对较高值,但进积距离与加积厚度之比( $Pse/Ase$ )介于  $30\sim 100$ ,表明了较强的前积性和较弱的加积性。相较于平直型陆架边缘

迁移轨迹,该类型的陆架边缘迁移轨迹呈现轻微上升趋势,迁移角度较大( $0.5^{\circ} < Tse < 2^{\circ}$ )。同时,顶积层厚度( $46\sim 324\text{ m}$ )与底积层厚度( $42\sim 484\text{ m}$ )之比( $A_t/A_b$ )介于  $0.5\sim 1.5$ ,这种特征表明随着陆架边缘迁移轨迹的小幅度抬升,上坡折带和深水区均接受大量沉积物质供给,陆架上沉积物供给能力相对较大。

### (4) 高角度上升型陆架边缘迁移轨迹 ( $A/S \approx 1$ )

高角度上升型陆架边缘迁移轨迹仅在白云南洼陆架坡折带珠海组三段及一段晚期发育。定量统计数据揭示,该类型的坡折单元进积距离较小,仅为  $377\sim 4\ 765\text{ m}$ ,而加积距离相对较大,平均可达  $200\text{ m}$ ,进积距离与加积厚度之比( $Pse/Ase$ )介于  $0\sim 30$ ,表明具有较弱的前积性和较强的加积性,相对于低角度上升型陆架边缘迁移轨迹,该类型陆架边缘轨迹为显著上升( $Tse > 2^{\circ}$ )。进一步分析显示,顶积层厚度( $144\sim 398\text{ m}$ )远大于底积层厚度( $52\sim 256\text{ m}$ ),其厚度比( $A_t/A_b$ )介于  $1.5\sim 3$ ,表明随着上坡折带不断接受沉积,陆架边缘迁移轨迹逐渐上升,而向深水区沉积物供给能力变弱,陆架上沉积物供给能力和可容纳空间变化速率相对平衡。

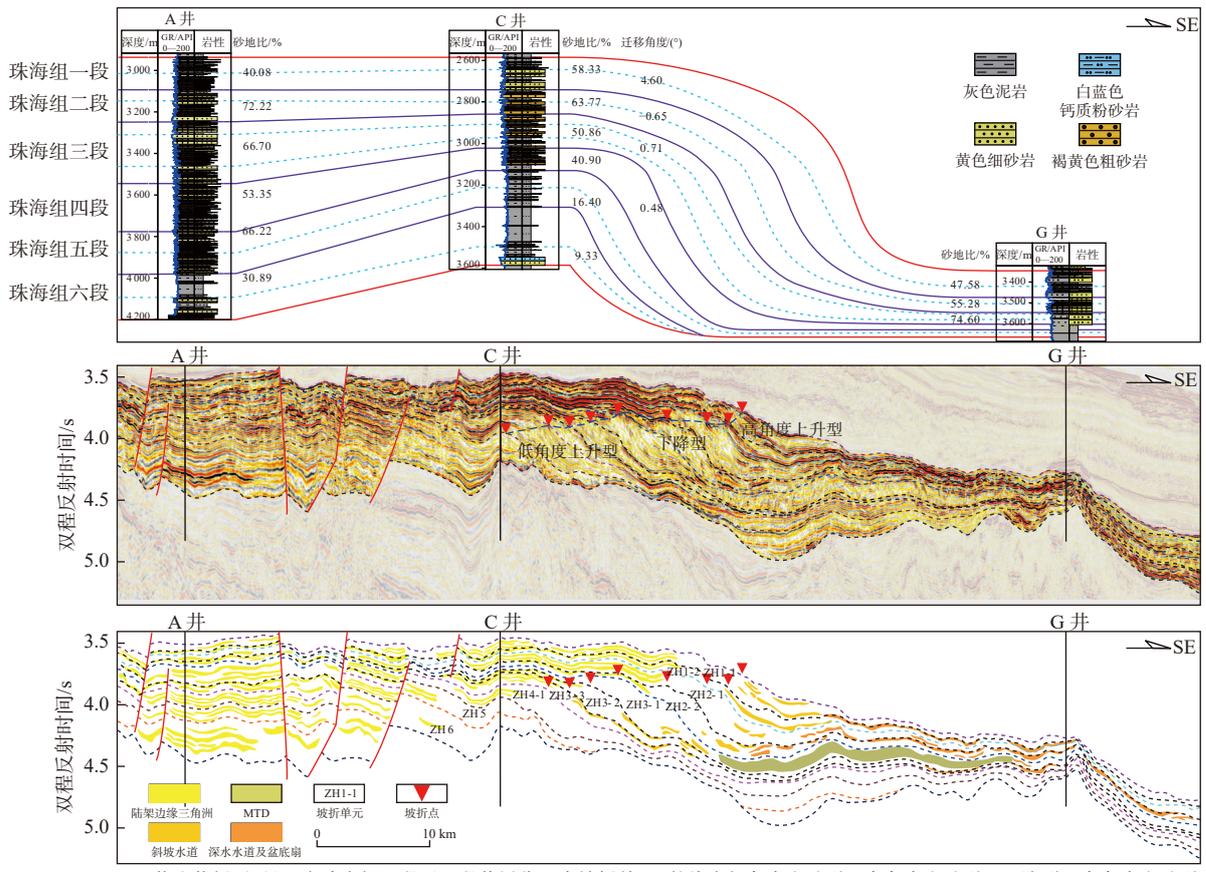
## 3 陆架坡折演化与深水沉积体系的耦合关系

### 3.1 深水沉积体系类型及其特征

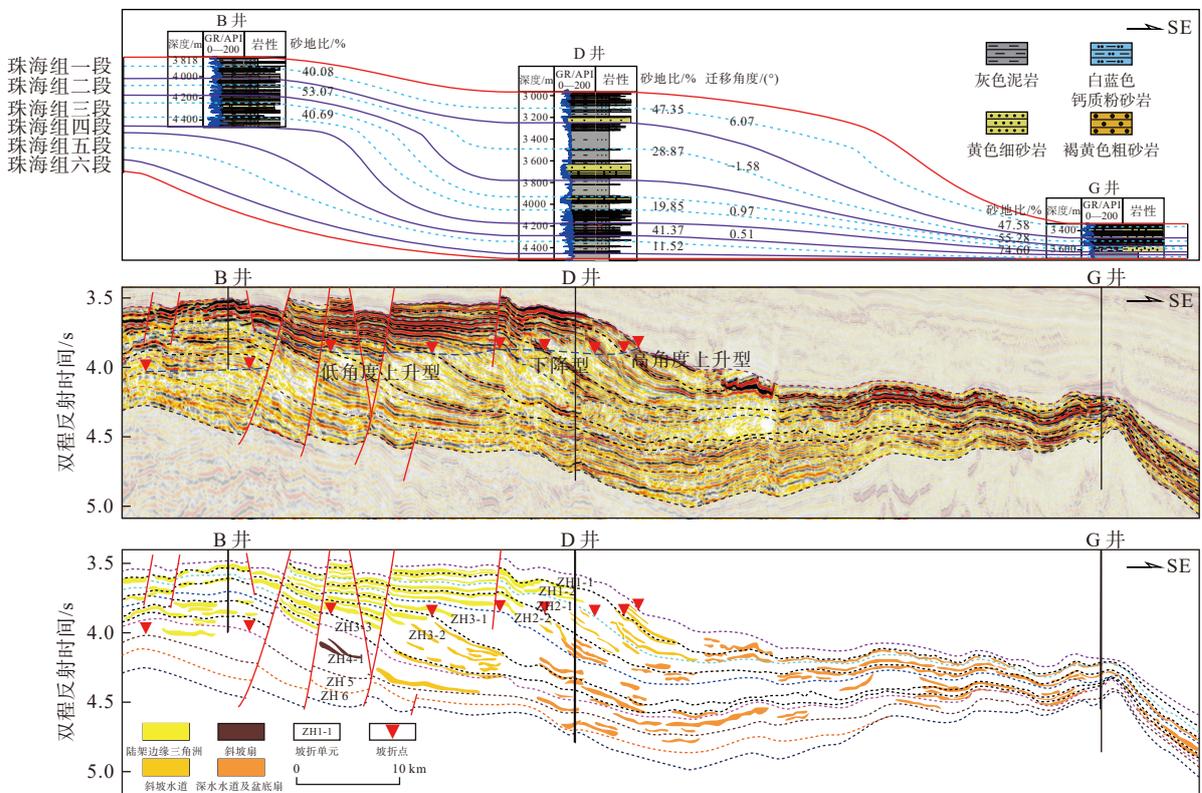
珠江口被动陆缘盆地背景下,珠海组沉积中晚期古珠江物源体系强烈供给导致大量陆源碎屑物质持续注入,陆架边缘三角洲侵蚀、搬运能力增强,从而在白云南洼陆架坡折带之下形成了一系列广泛发育的深水沉积体系,本文综合利用地震属性(RMS)、地震相特征、沉积体形态及钻井揭示等相关资料(图 5),在前人研究基础上<sup>[20]</sup>,结合沉积区沉积背景,将深水沉积划分为斜坡扇、深水水道体、盆底扇、块状搬运沉积(MTDs)4 种主要类型(表 2)。

#### (1) 斜坡扇

斜坡扇沉积体系一般发育于坡度较低的陆架坡折带斜坡靠盆地方向,往往形成带状及不规则朵状的斜坡扇复合体。在地震剖面上表现为长条带状中强振幅、低连续反射地震相以及小型丘状强振幅、杂乱反射地震相等,该地震相组合通常与陆架边缘三角洲前缘相似。同时,斜坡扇内部常见块状构造,指示沉积物快速堆积特点。在地震 RMS 均



(a) A—C—G 井连井剖面, 显示由珠海组四段至一段共划分 8 个坡折单元, 整体由低角度上升型—高角度上升型—下降型—高角度上升型



(b) B—D—G 井连井剖面, 显示珠海组四段—一段共划分 8 个坡折单元, 整体由低角度上升型—下降型—高角度上升型

剖面位置见图 3

图 5 坡折单元划分及坡折点迁移轨迹典型剖面

Fig.5 Typical profile of the division of slope break units and the migration trajectory of slope break points

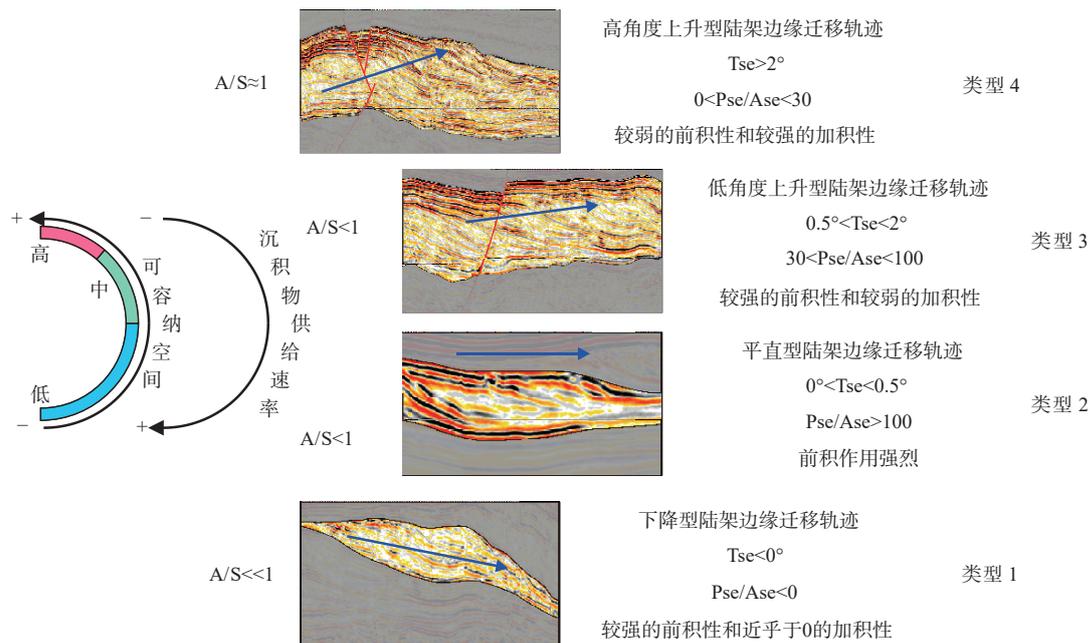


图6 陆架边缘迁移轨迹类型

Fig.6 Types of migration track in shelf margin

方根振幅属性图上,斜坡扇呈沿坡折带分布的条带状、块状特征。斜坡扇厚度相对较小,约为 30 ms,单个扇体规模可达  $10 \sim 20 \text{ km}^2$ 。这类斜坡扇被认为是三角洲前缘沿坡折带滑塌形成<sup>[21]</sup>,岩性以砂质为主,在白云南洼珠海组陆架坡折带南部广泛发育。

### (2) 深水水道体

本文讨论的深水水道为陆坡下方坡脚及盆底深水区水道沉积,主要是由陆架边缘三角洲沉积经陆架斜坡向深水区盆底扇供源而形成不断延伸的水道,作为浅水陆架区向深水区输送陆缘物质的通道,同时也是沉积物质沉积的场所。该类型沉积主要出现于富砂、坡度较低的坡折底部。在地震 RMS 均方根振幅属性图上,深水水道呈长条状及带状等展布特征,在平行物源地震剖面上深水水道体厚度通常约为  $10 \sim 30 \text{ ms}$ ,长度约为  $10 \sim 30 \text{ km}$ ,呈现平行状强振幅、好连续地震相特征,在垂直物源地震剖面上深水水道体宽度约为  $300 \sim 5000 \text{ m}$ ,呈水道化中强振幅、好连续地震反射特征,常见“U”型。井震综合分析结果表明,深水水道的地震振幅强度介于盆底扇和 MTDs,且振幅强度由陆架边缘向深水扇体方向逐渐增强,可能反映深水水道作为沉积物输送通道,将粗粒沉积物由上坡折带向深水区搬运过程中,沉积物过路不沉积或少量沉积,导致这种类型的沉积物通常以细砂为主。而部分深水水道在坡脚处沉积,延伸距离相对较短,存在粒度较粗的砂砾岩沉积充填。深水水道体沉积体系在白

云南洼珠海组沉积时期持续发育,其中珠海组四段—三段中期发育规模相对较大。

### (3) 盆底扇

盆底扇沉积体系通常发育于深水水道末端,其形成机制受控于深水水道搬运能力的变化,当水道搬运至末端,流速降低导致沉积物大规模堆积。在地震 RMS 均方根振幅属性图上呈现以朵叶状、席状形态分布为主的特点。该类型沉积主要出现于富砂、坡度相对较低的坡折底部,在平行物源地震剖面上深水盆底扇厚度通常约为  $25 \sim 50 \text{ ms}$ ,长度约为  $10 \sim 35 \text{ km}$ ,呈席状强振幅、连续地震反射特征,由中心向边缘不断减薄直至尖灭。在垂直物源地震剖面上宽度约为  $10 \sim 15 \text{ km}$ ,呈丘状、水道状中强—强振幅中高频连续反射特征,内部可识别多 U 型水道。钻井 F、G 井揭示珠海组二段盆底扇大规模发育,且扇中沉积砂岩粒度以粗—中砂为主,而扇缘以中—细砂为主,夹有部分薄层粉砂岩,整体物性较好,有利于形成高质量储层。

### (4) 块状搬运沉积 (MTDs)

MTDs 的发育受多种因素控制,研究区内 MTDs 的形成主要是由于陆架三角洲在上坡折带迅速堆积,引发不稳定重力滑坡,并导致 MTDs 沿下倾方向不断延伸。在珠海组三段晚期可有效识别出此类型的深水沉积体系,这些 MTDs 表现为席状、中振幅、差连续、杂乱反射特征,块状平行或波状中—弱振幅、差连续反射等地震相与侵蚀、下切等

表 2 白云南洼珠海组深水沉积类型

Table 2 Deep-water depositional types of the Zhuhai Formation in the Southern Subsasg of the Baiyun Sag

类型	地震相特征	典型测井图版	典型地震剖面	典型平面属性
斜坡扇	整体呈细长条带状、楔状等, 内部主要为中强振幅、低连续、反射地震相, 主要分布在大型 S 型、斜交反射层下斜坡带, 单体规模较小, 多为复合叠置扇体			
深水水道体	整体呈水道化结构, 内部主要为强振幅、好连续、中高频反射地震相, 常见 U 型、W 型由于陆架边缘三角洲向下坡折带深水区供源而形成不断延伸弯曲的水道			
盆底扇	整体呈丘状结构, 内部主要为强振幅、连续、中高频反射地震相, 可见多水道型、席状朵叶型沉积, 主要出现在研究区内坡折以下深水区较远端			
块状搬运沉积体系	整体呈席状结构, 内部主要为中振幅、差连续、杂乱反射地震相, 主要分布在下坡折带深水区, 研究区内珠海三段晚期大规模发育			

地震相具有明显差异, 同时, 杂乱反射特征中存在部分短轴强振幅低频反射, 认为其内部充填物质分选差, 结合钻井岩屑分析, MTDs 对应于分选较差的泥质粉砂岩、泥岩夹少量砂岩。另外, 地震剖面显示其下部存在明显杂乱地震反射带, 将 MTDs 与下部未变形地层分离, 该层即为 MTDs 的滑坡面。白云南洼珠海组发育的这套 MTDs 宽约 10~16 km, 沿下倾方向延伸约 30 km, 厚度约 20~100 ms, 与特立尼达拉岛及珠江口盆地第四系等地层中 MTDs 沉积特征相似<sup>[22-23]</sup>。综合而言, 珠海组发育的 MTDs 以泥质为主, 内部杂乱充填细砂和粉砂。MTDs 的形成受陆架边缘三角洲快速堆积以及斜坡较高坡度等因素控制, 同时, 由于 MTDs 内部物质分选较差, 岩性以泥质为主, 其本身并不构成有利的储层, 但其上下界面可能成为有利的油气运移通道。

### 3.2 坡折带迁移与深水沉积类型的对应关系

沉积物供给是控制陆架边缘生长和深水砂体

输送的重要驱动力, 深入理解陆架坡折带迁移轨迹与深水沉积体系之间的内在联系, 对于揭示陆架和深水区之间沉积物的分配规律具有重要意义。本文通过对白云南洼珠海组陆架坡折带进行定量分析, 并与上述不同类型深水沉积体系进行对比, 探讨两者之间的对应关系(图 7)。

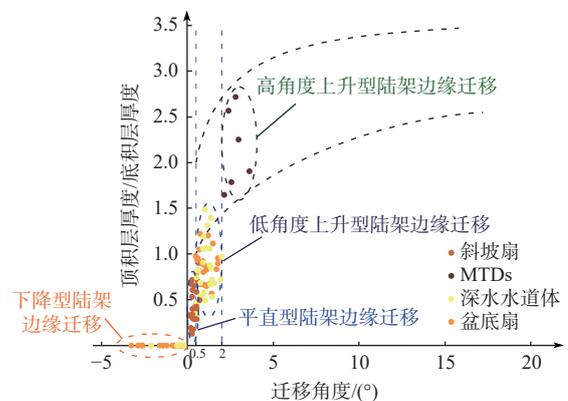


图 7 坡折迁移演化规律与深水沉积类型关系

Fig.7 Relationship between slope break migration-evolution and deep-water sedimentary types

研究表明,白云南洼珠海组陆架坡折带迁移演化伴随着大量沉积物被分配到深水环境中,不同的陆架坡折带迁移轨迹类型对应着不同的深水沉积体系类型。

(1)平直型陆架边缘迁移轨迹下深水沉积体系以斜坡扇为主。该类型陆架坡折带的坡度通常相对平缓,其 Tse 值、顶积层与底积层厚度之比均为

正值,但数值相对较小,说明其前积性较强,沉积物通常发育于斜坡及底积层,但其顶积层与底积层的厚度较小,因此,顶积层与底积层沉积体系发育相对较弱,而斜坡扇沉积体系发育。白云南洼珠海组三段—一段早期陆架坡折带南部可有效识别此类对应关系,同时,深水区共发育 11 个规模较大的斜坡扇沉积体系,为该区域油气勘探提供了有利目标(图 8)。

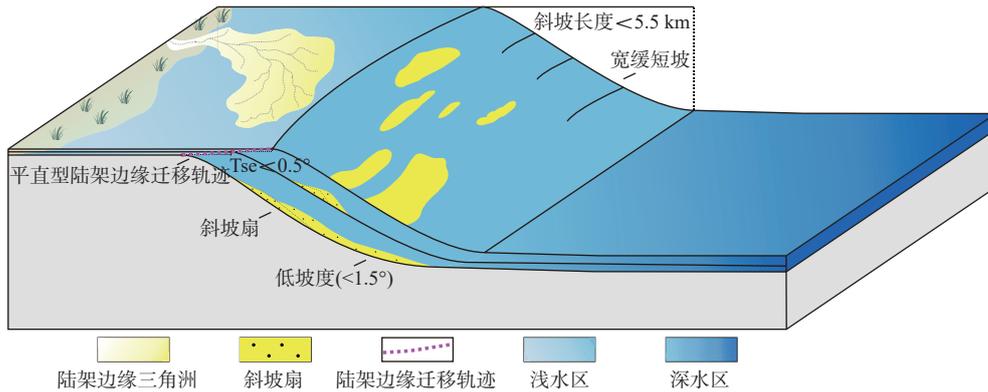


图 8 斜坡扇与平直型陆架边缘体系结构之间的关系

Fig.8 The relationship between slope fans and the architecture of flat continental shelf margins

(2)高角度上升型陆架边缘迁移轨迹下深水沉积体系以 MTDs 为主。高角度上升型陆架坡折带坡度较高, Tse 值、顶积层与底积层厚度之比较大,加积性较强,沉积物通常发育于顶积层。随着顶积层厚度不断增加,沉积物易失稳,诱发滑动、滑塌,而

由于失稳而获得的重力加速度在不断运移中转化为搬运动力,同时与斜坡上黏土混杂,向下坡折带及深水区不断扩散形成大块的泥质碎屑沉积。此类对应关系仅在白云南洼珠海组三段晚期陆架坡折带中部可有效识别(图 9)。

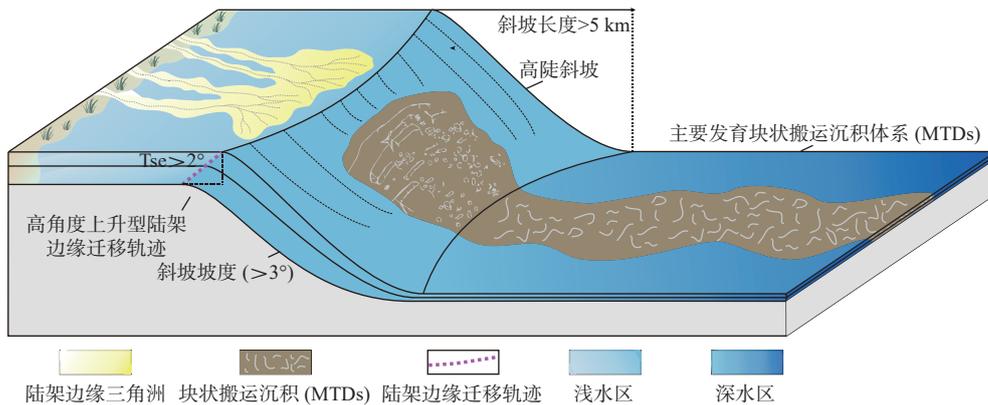


图 9 块状搬运沉积 (MTDs) 与高角度上升型陆架边缘体系结构之间的关系

Fig.9 The relationship between mass-transport depositional systems and the architecture of high-angle rising continental shelf margins

(3)低角度上升型陆架边缘迁移轨迹下深水沉积体系以深水水道复合体为主,由于该类型陆架坡折具有较缓的坡度,其顶积层与底积层厚度之比和 Tse 值相对较小,表明其前积性较强,但也具有一定加积性,因此,沉积物供给能力和向深水区的搬运能力较强,有利于深水水道复合体发育。白云南洼

珠海组四段及珠海组三段早—中期陆架坡折带北部可明显识别出此类型耦合关系,同时,深水区共发育 7 条单一深水水道体以及 5 条水道复合体。钻井揭示这些深水水道体沉积砂体的厚度相对较小,粒度较细,以细砂质沉积为主(图 10)。

(4)下降型陆架边缘迁移轨迹下深水沉积体系

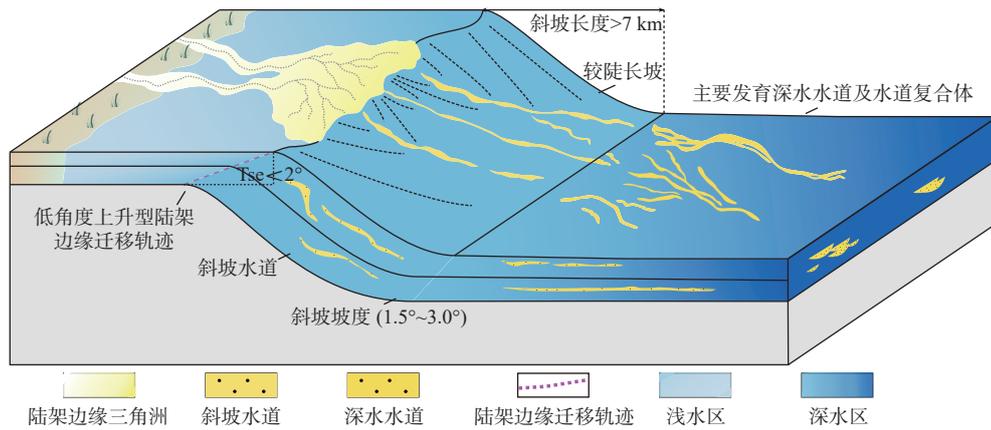


图 10 深水水道体与低角度上升型陆架边缘体系结构之间的关系

Fig.10 The relationship between deep-water channel systems and the architecture of low-angle rising continental shelf margins

以盆底扇为主, 这种类型的陆架坡折坡度相对较低, Tse 值为负值, 顶积层厚度为 0, 底积层厚度较大, 说明其前积性极强, 向深水区搬运能力极强, 盆底扇沉积体系大规模发育。在白云南洼珠海组二段

及一段早期陆架坡折带中部可明显识别此种类型的对应关系, 深水区发育了 4 套大型叠置盆底扇沉积。钻井揭示, 盆底扇沉积体系砂体厚度相对较大, 整体粒度较粗, 物性较好(图 11)。

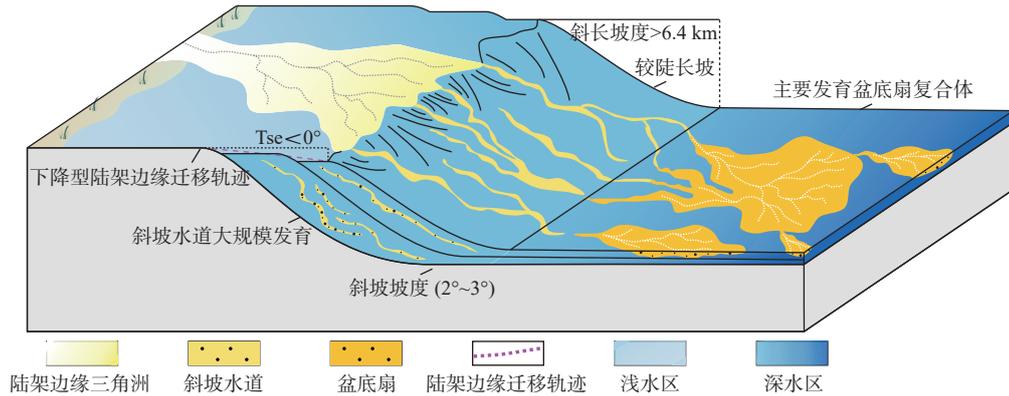


图 11 盆底扇与下降型陆架边缘体系结构之间的关系

Fig.11 The relationship between basin-floor fans and the architecture of descending-type continental shelf margins

### 3.3 坡折迁移演化与深水沉积演化

总结坡折带迁移演化规律(图 12)、地震均方根属性图变化(图 13), 绘制坡折迁移演化与深水沉积演化相图。

珠江口盆地白云南洼珠海组沉积期垂向上经历了 3 个演化阶段: ①古珠江物源供给能力开始增强, 陆架坡折由平直迁移至低角度上升迁移, 深水沉积由斜坡扇为主至以深水水道体沉积体系为主(图 13a、b), 沉积物向深水搬运能力增强, 深水沉积体系规模逐渐增大。②古珠江物源供给能力持续增强, 陆架坡折由低角度上升迁移向下降迁移演化, 对应深水沉积体系由深水水道体为主至以盆底扇沉积为主, 深水沉积体系规模进一步增大(图 13c、d), 沉积物搬运能力增强, 粒度大小由以细砂为主到以

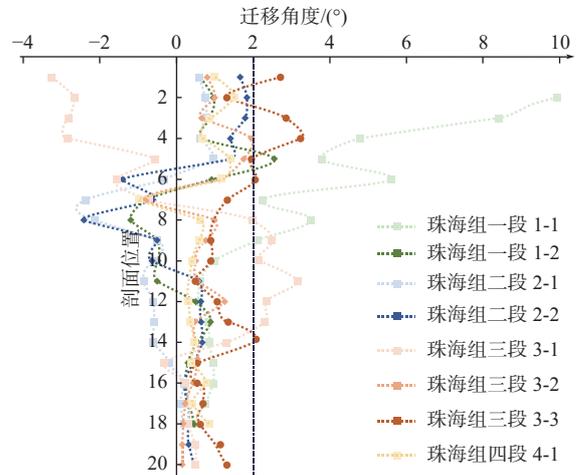


图 12 坡折迁移演化规律

Fig.12 Evolution of slope break migration

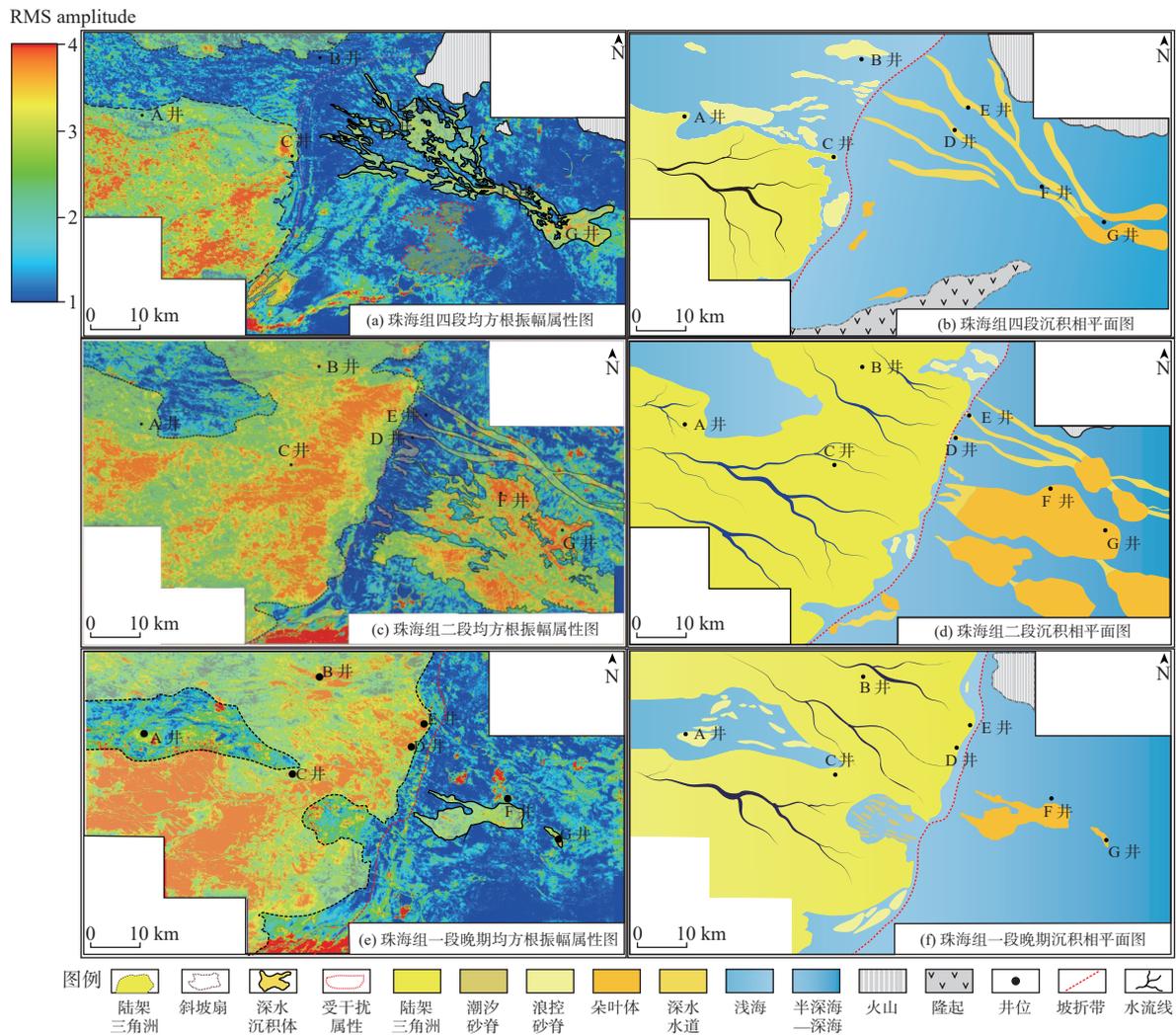


图 13 坡折迁移演化与深水沉积演化规律

Fig.13 Sedimentary facies of slope break migration and deep water sedimentary evolution

中、粗砂为主。③古珠江物源供给能力减弱,陆架坡折由下降迁移至高角度上升迁移,深水沉积体系发生巨变(图 13e、f),由发育大规模盆底扇沉积体系至深水沉积几乎不发育。

## 4 结论

(1) 定量统计珠江口盆地白云南洼珠海组陆架坡折带参数,结合前人研究,根据陆架坡折迁移角度( $Tse$ )及顶积层与底积层厚度之比( $At/Ab$ )将白云南洼珠海组陆架边缘迁移轨迹分为平直型、低角度上升型、高角度上升型及下降型 4 类。

(2) 综合利用白云南洼地区珠海组的钻井资料、地震相及地震属性等数据,识别出该区域存在 4 种主要类型的深水沉积体系:珠海组四段至珠海组一段持续发育于陆架坡折带南部的斜坡扇沉积、

大规模发育于珠海组四段至三段的深水水道体沉积、在珠海组二段至一段大规模发育的盆底扇沉积、以及仅在珠海组三段晚期出现的块状搬运沉积(MTDs)。

(3) 通过对陆架坡折带多种因素(陆架边缘迁移轨迹类型、坡折带参数等)作用的陆架边缘的沉积过程分析,表明在陆架边缘三角洲供源能力充足情况下:平直型陆架边缘迁移轨迹( $0^\circ < Tse < 0.5^\circ$ ,  $Pse/Ase > 100$ , 低  $A/S$ ,  $0 < At/Ab < 0.5$ )下坡折斜坡带通常发育斜坡扇沉积;下降型陆架边缘迁移轨迹( $Tse < 0^\circ$ ,  $Pse/Ase < 0$ ,  $A/S \ll 1$ ,  $At/Ab \approx 0$ )下坡折底积层多水道供源发育盆底扇沉积体系(沉积物以粗砂—中为主,粒径相对较大)。而在陆架边缘三角洲供源能力较差情况下,低角度上升型陆架边缘迁移轨迹( $0.5^\circ < Tse < 2^\circ$ ,  $30 < Pse/Ase < 100$ ,  $A/S < 1$ ,  $0.5 < At/Ab < 1.5$ )下前积作用较弱,深水区发育深

水水道体沉积体系(沉积物以细砂为主, 粒径相对较小); 高角度上升型陆架边缘迁移轨迹( $Tse > 2^\circ$ ,  $0 < Pse/Ase < 30$ ,  $A/S \approx 1$ ,  $1.5 < At/Ab < 3$ ) 下受滑塌作用深水区可能发育 MTDs。因此, 本文通过对陆架坡折带不同沉积过程进行定量分析, 在理论上丰富了对深水沉积体系形成机制的认识, 并在实践上为深水沉积体系类型及分布的预测提供了依据。

#### 参考文献:

- [1] 舒梁锋, 张向涛, 张忠涛, 等. 珠江口盆地白云南洼珠海组陆架边缘三角洲沉积体系演化 [J]. 沉积学报, 2022, 40(3): 825-837.
- [2] 张向涛, 彭光荣, 谢世文, 等. 珠江口盆地白云凹陷西南部珠海组储层成岩特征及其对储层物性的影响 [J]. 天然气地球科学, 2024, 35(3): 379-392.
- [3] 田兵, 郑有伟, 赵俊梅. 南海白云凹陷渐新统珠海组沉积相及其演化 [J]. 断块油气田, 2022, 29(6): 800-806, 836.
- [4] 舒梁锋, 张丽丽, 雷胜兰, 等. 珠江口盆地白云南洼珠海组陆架边缘三角洲储层发育特征与主控因素及有利储层预测 [J]. 石油科学通报, 2022, 7(3): 309-320.
- [5] 曾清波, 陈国俊, 张功成, 等. 珠江口盆地深水区珠海组陆架边缘三角洲特征及其意义 [J]. 沉积学报, 2015, 33(3): 595-606.
- [6] 吴景富, 徐强, 祝彦贺. 南海白云凹陷深水区渐新一中新世陆架边缘三角洲形成及演化 [J]. 地球科学, 2010, 35(4): 681-690.
- [7] HELLAND-HANSEN W, SØMME T O, MARTINSEN O J, et al. Deciphering earth's natural hourglasses: perspectives on source-to-sink analysis[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2016, 86(9): 1008-1033.
- [8] HENRIKSEN S, HAMPSON G J, HELLAND-HANSEN W, et al. Shelf edge and shoreline trajectories, a dynamic approach to stratigraphic analysis[J]. *Basin Research*, 2009, 21(5): 445-453.
- [9] 周家伟, 王英民, 何敏, 等. 基于轨迹分析和数值模拟的陆架边缘沉积研究: 以珠江口盆地 13.8 Ma 陆架边缘三角洲为例 [J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(3): 603-614.
- [10] CHEN S, STEEL R, OLARIU C, et al. Growth of the paleo-Orinocosshelf-margin prism: process regimes, delta evolution, and sediment budget beyond the shelf edge [J]. *GSA Bulletin*, 2018, 130(1/2): 35-63.
- [11] 马兵山. 南海北部珠江口盆地新生代构造特征及其演化 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.
- [12] 黄维, 汪品先. 渐新世以来的南海沉积量及其分布 [J]. 中国科学(D 辑): 地球科学, 2006, 36(9): 822-829.
- [13] 邵磊, 李献华, 汪品先, 等. 南海渐新世以来构造演化的沉积记录: ODP1148 站深海沉积物中的证据 [J]. *地球科学进展*, 2004, 19(4): 539-544.
- [14] 林畅松, 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.
- [15] 张曼莉, 林畅松, 何敏, 等. 珠江口盆地晚渐新世陆架边缘三角洲沉积层序结构及演化 [J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4): 875-885.
- [16] RICH J L. Three critical environments of deposition, and criteria for recognition of rocks deposited in each of them[J]. *Zhurnal Mikrobiologii Epidemiologii I Immunobiologii*, 1951, 62(1): 52-62.
- [17] 舒梁锋, 张丽丽, 雷胜兰, 等. 南海北部白云南洼陆架坡折带演化特征及其控制因素 [J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(3): 686-696.
- [18] 岳翀, 赵晓明, 葛家旺, 等. 琼东南盆地莺歌海组陆架边缘轨迹演化及主控因素 [J]. 沉积学报, 2023, 41(1): 110-125.
- [19] 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.
- [20] 邢作昌, 张忠涛, 林畅松, 等. 珠江口盆地荔湾凹陷晚渐新世—早中新世重力流沉积类型及其特征 [J]. *古地理学报*, 2020, 22(6): 1143-1156.
- [21] 谢宗奎, 王优杰, 蒋晓澜, 等. 埕岛低凸起深水斜坡扇与滑塌扇砂体成因类型、沉积模式及分布规律 [J]. 现代地质, 2020, 34(4): 757-768.
- [22] LORENA M, LESLI W, PAUL M, et al. Mass-transport complexes and associated processes in the offshore area of Trinidad and Venezuela[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(7): 1059-1088.
- [23] SUN Q L, CARTWRIGHT J, XIE X N, et al. Reconstruction of repeated Quaternary slope failures in the northern South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2018, 401(4): 17-35.

## Coupling in the evolution between shelf break belt and deep-water sedimentation of the Zhuhai Formation in the Southern Subsag of the Baiyun Sag

ZHANG Shangfeng<sup>1</sup>, FAN Dongxu<sup>1,2\*</sup>, LI Hongyi<sup>3</sup>, TANG Wu<sup>3</sup>, WANG Yaning<sup>1,2</sup>, ZHU Rui<sup>1,2</sup>, LI Ran<sup>1</sup>

(1 School of Earth Sciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2 Key Laboratory of Oil and Gas Resources and Exploration Technology of Ministry of Education, Yangtze University, Jingzhou 434023, China; 3 CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China)

**Abstract:** In the deposition of the Zhuhai Formation in the Southern Subsag of the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, South China Sea, the basin was in the transitional stage from a graben to a sag, and the morphology and location of the shelf slope break underwent significant changes, resulting in distinct differences in the types and characteristics of deep-water sedimentation. We investigated the influence of slope break morphology on deep-water sedimentation types. By interpreting the 3D seismic profiles of the Zhuhai Formation, the shelf slope break zones of various intervals were identified. The characteristics and evolutionary patterns of the slope break were quantitatively analyzed, and the coupling between the slope break evolution and deep-water sedimentation was discussed. Results shows that the shelf slope break migration and evolution types were classified into four categories: descending, straight, low-angle ascending, and high-angle ascending. Based on the integration of well and seismic data, and according to the seismic facies assemblages and distribution characteristics of sedimentary systems, four major deep-water sedimentation types were identified: slope fans, mass transport deposits, deep-water channel complexes, and basin floor fans. A distinct coupling relationship was recognized between the slope break evolution type and deep-water sedimentation type: the straight, high-angle ascending, low-angle ascending, and descending migration trajectories of the shelf margin correspond to the preferential development of slope fans, mass transport deposits, deep-water channel complexes, and basin floor fans, respectively. From the fourth member to the third member of the Zhuhai Formation, the overall shelf slope break zone transitioned from a descending type to a low-angle ascending type, and the deep-water sedimentation system was dominated by the development of slope fans and deep-water channel complexes. From the third member to the early stage of the first member of the Zhuhai Formation, the overall trend transitioned from a low-angle ascending type to a descending type, and the deep-water sedimentation system was dominated by the deep-water channel-basin floor fan depositional system. During the late stage of the first member of the Zhuhai Formation, the overall trend evolved from a descending type to a high-angle ascending type, and the deep-water sedimentation system was almost undeveloped. This study revealed the control effect of shelf slope break migration on the types and distribution of deep-water sedimentation systems, which is of great significance for a deeper understanding of deep-water sedimentation processes and hydrocarbon exploration.

**Key words:** shelf break; deep-water sedimentary type; sedimentary evolution; Zhuhai Formation; Southern Subsag of the Baiyun Sag; Pearl River Mouth Basin