

马畅, 葛家旺, 赵晓明, 等. 琼东南盆地上新统莺歌海组陆架边缘迁移轨迹及其对深水油气勘探的启示[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(7): 76-86.

琼东南盆地上新统莺歌海组陆架边缘迁移轨迹及其对深水油气勘探的启示

马畅^{1,2}, 葛家旺^{1,2*}, 赵晓明^{1,2}, 姚哲³, 朱继田³, 向柱^{1,2}, 吴鑫涛¹, 樊泽栋¹, 方小宇²

(1 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500; 2 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江), 湛江 524000;

3 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 湛江 524057)

摘要:基于琼东南盆地陆架边缘高精度二维地震资料,利用典型的上超、局部削截、下超及顶超和大型水道下切等地震接触关系,在上新统莺歌海组识别了6套三级层序(自下而上命名为 YGH-SQ1、YGH-SQ2、YGH-SQ3、YGH-SQ4、YGH-SQ5 和 YGH-SQ6)。利用陆架边缘轨迹定量化表征方法,将琼东南盆地上新统莺歌海组邻近陆坡的陆架边缘轨迹划分为负角度下降型、低角度平缓上升型和高角度上升型。上新统莺歌海组6套三级层序发育时期东西两侧的陆架边缘轨迹的演化差异性明显。西部均以下降型或平缓型陆架边缘轨迹为特征;东部以上升型陆架边缘轨迹(YGH-SQ1、YGH-SQ3 和 YGH-SQ5)为主,在 YGH-SQ2 和 YGH-SQ6 时期发育平缓型陆架边缘轨迹, YGH-SQ4 时期对应负角度下降型陆架边缘轨迹。侧向上西部陆架边缘进积距离远远大于东部,形成了“西宽东窄”的陆架坡折地貌。综合研究认为,研究区陆架边缘轨迹的垂向迁移由气候变化所引起的海平面升降以及物源供给增强共同控制;而陆架边缘轨迹侧向迁移则主要由构造活动与物源供给的差异性控制。研究区西部物源供给远大于东部且断裂带活动性小于东部,导致西部发育低角度—负角度平缓型陆架迁移轨迹,东部陆坡对应高角度上升型陆架迁移轨迹;负角度下降型和低角度缓慢上升型陆架边缘轨迹则对应陆坡区及深海平原区广泛发育的深水扇,是深水油气富集的有力勘探区。

关键词:琼东南盆地;莺歌海组;层序格架;陆架边缘迁移轨迹;深水扇

中图分类号:P744.4;P539.1

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2021.120

0 引言

陆架边缘斜接陆架浅水区与陆坡深水区是陆源沉积物输送到海底深水区路径的重要位置(图1)。陆架边缘轨迹是沉积体系地形坡度最先发生明显变化的点,即坡折点随时间变化而形成的轨迹,其形成过程与沉积过程密不可分^[1]。陆架边缘轨迹分析方法是对陆架边缘轨迹的垂向与横向迁移过程进

行客观的描述,采用动态的方法对陆坡的地层与沉积特征进行研究。通过对陆架边缘迁移轨迹的研究并结合物源供给条件,可以建立迁移轨迹变化与深海平原沉积体系之间的对应关系,有助于揭示深水扇及其有利砂体动态演化规律。自从 HELLAND-HANSEN 和 MARTINSEN^[2] 在 1996 年提出了迁移轨迹的概念后,在过去的 20 余年中,国内外学者对其进行了不断探讨与完善,如今陆架边缘迁移轨迹分析已成为国际沉积学与层序地层学的前沿领域。HENRIKSEN 等^[3] 根据陆架边缘轨迹的形态特点,将其划分为上升型、平缓型和下降型。CARVAJALET 等^[4] 提出了定量-半定量表征陆架边缘轨迹的方法。周家伟等^[5] 通过数值模拟验证了陆架边缘轨迹与海底扇沉积之间的响应关系。

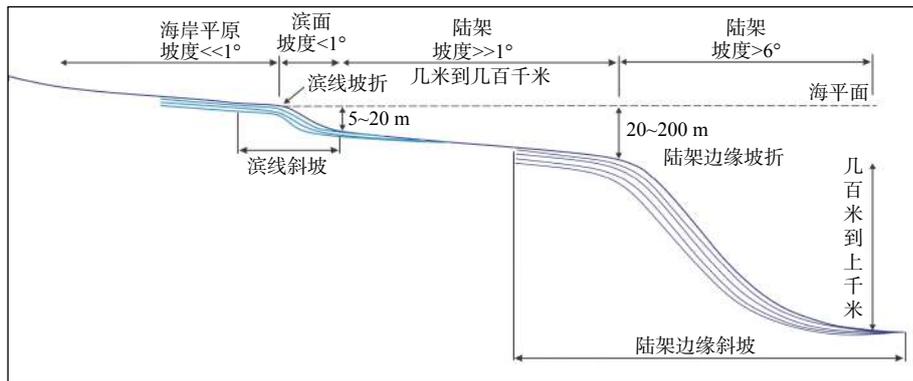
近年来,南海北部琼东南盆地陆架边缘迁移引起了众多学者的关注和报道。何云龙^[6] 从地貌的角度将琼东南盆地陆坡分为进积型、滑塌型、水道

收稿日期: 2021-04-25

资助项目: 国家自然科学基金(41902124, 41872142); 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)项目“南海水合物富集规律及固态流化开采机理研究(一期)”(ZJW-2019-03)

作者简介: 马畅(1997—),男,在读硕士,主要从事沉积学方面的研究工作。E-mail: 957147912@qq.com

* 通讯作者: 葛家旺(1988—),男,博士,讲师,主要从事层序地层学及沉积学方面的科研与教学工作。E-mail: gjwddn@163.com

图 1 陆架边缘斜坡示意图^[2]Fig.1 Schematic diagram of shelf edge slope^[2]

化型和宽缓型 4 类斜坡类型, 认为 4 类不同的斜坡类型可对应多种类型的层序叠加样式。进积型陆坡以强烈进积伴随微弱加积为特征, 滑塌型陆坡以微弱进积与加积为特征, 水道化型陆坡和宽缓型陆坡以加积为特征。任金锋^[7]对琼东南盆地晚中新世至今的陆架边缘迁移轨迹进行了量化研究, 将陆架边缘轨迹划分出平缓或轻微上升型(陆架边缘轨迹角度 $0.2^\circ \sim 0.6^\circ$)、低角度缓慢上升型(陆架边缘轨迹角度 $0.2^\circ \sim 3^\circ$)、高角度上升型(陆架边缘轨迹角度 $3^\circ \sim 5^\circ$)以及超高角度急剧上升型(陆架边缘轨迹角度 $3^\circ \sim 20^\circ$) 4 种类型。张鹏^[8]认为, 琼东南盆地高角度上升型陆架边缘轨迹的形成主要受越南中北部物源控制。虽然前人对琼东南盆地陆架边缘地区进行过一些研究, 但均聚焦在较大尺度上(地层组或者二级层序级别), 而针对琼东南盆地上新统莺歌海组内部层序划分及其陆架边缘响应报道较少, 且陆架边缘轨迹的迁移演化规律及其控制因素尚不明晰, 制约了琼东南盆地莺歌海组陆架边缘—深水区精细的沉积体系刻画及深水油气有利储层预测。本文基于陆架边缘迁移轨迹理论及研究方法, 利用最新采集的二维地震资料, 对琼东南盆地上新统莺歌海组陆架边缘迁移轨迹进行量化表征, 在此基础上, 结合物源供给分析进一步明确研究区上新统晚期东西陆坡侧向差异化控制因素, 并揭示陆架迁移轨迹与深水扇沉积之间的响应机制, 进而为预测深水油气有利勘探区带预测提供指导。

1 区域地质概况

琼东南盆地位于中国南海北部大陆架西侧, 地处海南岛以南、西沙群岛以北的海域, 处于 $108^\circ \sim 112^\circ \text{E}$ 、 $16^\circ \sim 19^\circ \text{N}$ ^[9]。区域构造位置属太平洋构造

域, 是欧亚板块、印支板块和太平洋板块三者之间相互碰撞引发的一系列构造活动相互作用的结果^[10]。琼东南盆地整体呈 NE 向展布, 其西与以走滑型断裂体系为主的莺歌海盆地相邻; 东接神狐隆起, 与以大陆边缘伸展断裂体系为主的珠江口盆地相隔; 北邻海南岛隆起; 南接西沙隆起区。盆地海域面积约 $8.0 \times 10^4 \text{ km}^2$, 实际勘探面积约 $4.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[11](图 2), 盆地具有明显的“下断上坳”双层结构和“东西分块、南北分带”的构造展布格局^[12-14]。研究区位于琼东南盆地中部, 面积约 $1.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 水深 200~1 500 m, 南北跨越北部坳陷带与中央坳陷带, 东西涵盖松南-宝岛凹陷及松南低凸起、乐东-陵水凹陷。琼东南盆地形成演化受到南海区域演化的地球动力学背景控制。主要经历了始新世—早渐新世断陷期、晚渐新世早期断坳期、早中新世热沉降坳陷期以及晚中新世—第四纪被动大陆边缘形成时期等主要演化阶段^[15]。古近纪以陆相断陷沉积为主, 新近纪早期为断坳转换阶段形成的浅海相沉积, 新近纪晚期则属于准被动大陆边缘环境下的浅海—深海相沉积, 构成了现今的浅水及深水盆地^[16-20]。盆地新生代以来物源供给主要受红河和海南岛双物源的影响, 且上新世以来物源供给逐渐增强, 并形成了明显的陆架-陆坡体系, 快速堆积了一套较厚的莺歌海组地层, 该时期整体为浅海—半深海沉积环境。莺歌海组岩性主要由灰色厚层块状泥岩组成, 且夹薄层泥质砂岩和粉砂岩(图 3)^[21-24]。

2 量化分析方法

2.1 表征参数

陆架边缘斜坡地形由 3 部分组成, 分别为顶积

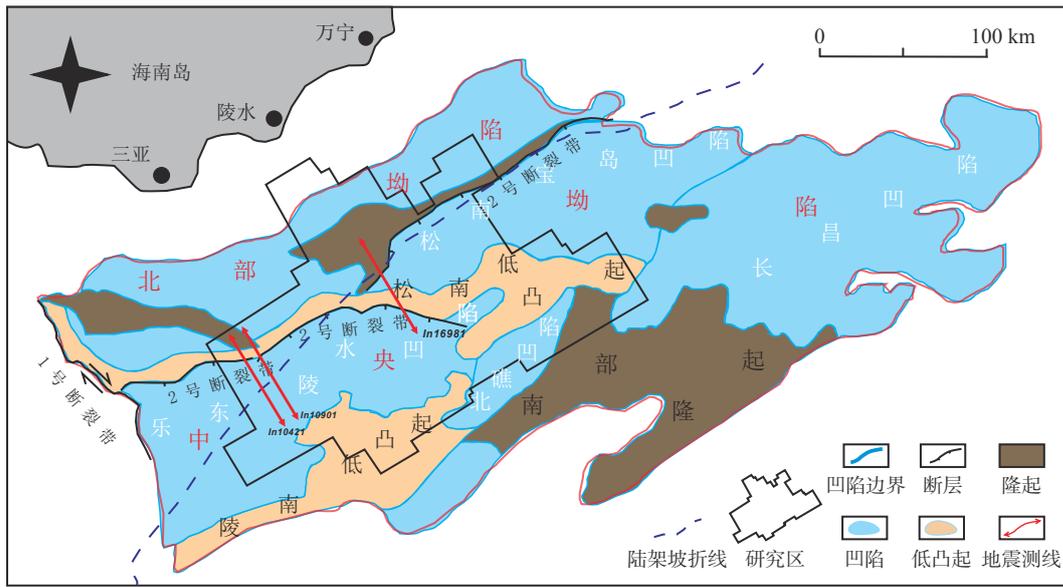


图2 琼东南盆地构造划分及研究区位置图

Fig.2 Tectonic map and the study area of the Qiongdongnan Basin

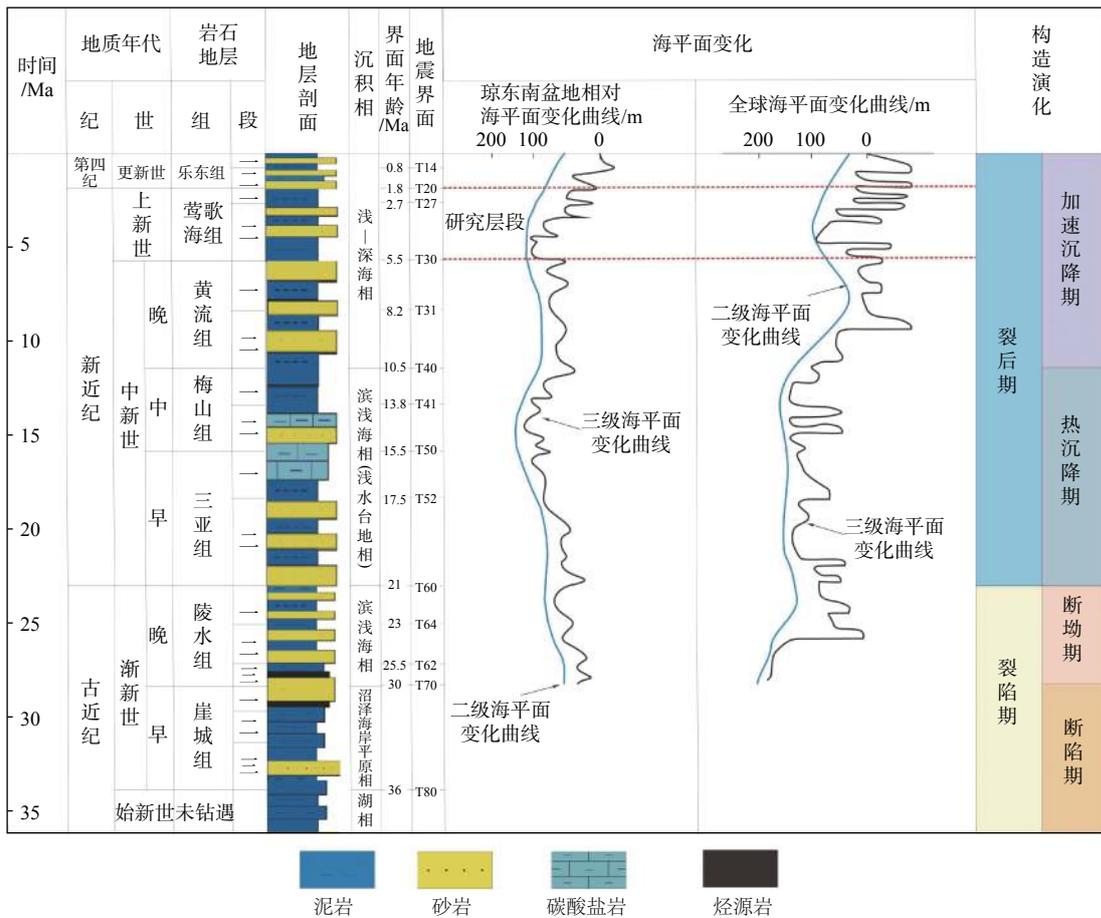


图3 琼东南盆地新生代地层系统综合柱状图^[6-7,24]

Fig.3 Stratigraphic column diagram of Qiongdongnan Basin^[6-7,24]

层、前积层和底积层。顶积层与前积层之间的角度突变点被称为弯折点即为陆架边缘坡折点。陆架边缘迁移轨迹则是由一系列的陆架边缘坡折点组

成的轨迹,其记录着陆架边缘的发育演化过程。

陆架边缘轨迹可通过以下几种参数进行表征:

①陆架边缘的加积与进积距离(A, P);②陆架边缘

轨迹角度(α); ③弯折点与坡脚点间的水平距离(斜坡长度 ETT)和垂直距离(斜坡高度 Rc); ④斜坡地形坡脚角度(β)。

陆架边缘轨迹角度可用来表征陆架边缘斜坡的发育演化过程, 可用如下公式计算:

$$\alpha = \tan^{-1}(A/P) \quad (1)$$

式中: α 为陆架边缘轨迹角度, ($^{\circ}$); A 为加积距离; P 为进积距离; A/P 为陆架边缘加积与进积距离之比,

无量纲, 可用来定量对比陆架边缘斜坡地形在不同时期的地层叠加样式^[7]。

陆架边缘斜坡地形坡脚角度(β)公式表达如下:

$$\beta = \tan^{-1}(Rc/ETT) \quad (2)$$

式中: β 为陆架边缘斜坡坡脚角度, ($^{\circ}$); Rc 为斜坡地形高度; ETT 为斜坡地形的长度。 β 、 Rc 和 ETT 可用来表征斜坡地形的垂向变化, 也可用于提高对陆架边缘角度(α)的变化的理解(图 4)。

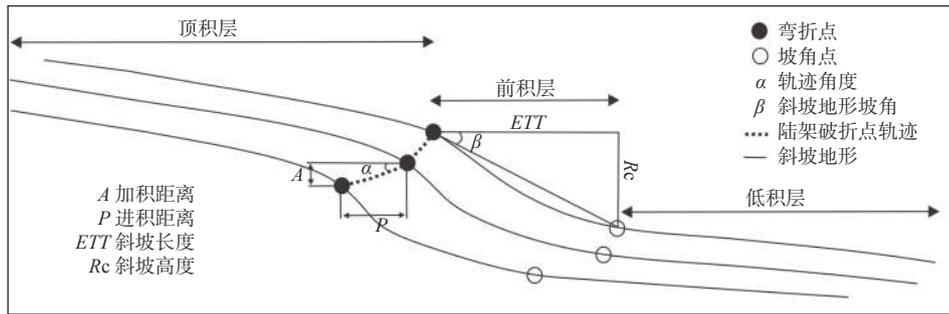


图 4 陆架边缘斜坡的形态特征和几何参数示意图

Fig.4 Schematic diagram showing morphological characteristics and geometric parameters of slope topography

2.2 数据及分析方法

本文采用中海油湛江分公司在琼东南盆地的高精度二维地震资料。资料为 2 ms 的垂向采样率并处理为零相位剖面, 地震剖面主频约 30 Hz, 垂向分辨率为 15~20 m。

陆架边缘轨迹的量化数据采集与表征按下步骤进行^[7]: ①选取研究区典型剖面, 通过地震层序界面识别, 建立起陆架边缘的层序地层格架; ②运用前一节的定量表征参数定义, 将所识别的层序格架作为一个斜坡地形, 识别陆架边缘弯折点和坡脚点, 建立研究区典型剖面的陆架边缘轨迹曲线; ③读取陆架边缘弯折点以及坡脚点的时间值, 利用研究区时深转换关系的公式:

$$S = (V_{水} \times T_{水} + V_{地} \times T_{地}) / 2 \quad (3)$$

式中: $V_{水}$ 为 1 480 m/s, $V_{地}$ 为 1 700 m/s;

$T_{水}$ 、 $T_{地}$ 分别为地震波在海水和地层中的双程旅行时间, s。

据此换算出深度值, 以便计算陆架边缘的加积距离 A 和斜坡长度 ETT 值; 利用所标记的弯折点和坡脚点的平面位置数据(Geoframe 中的 CDP 值), 测量与计算陆架边缘的进积距离 P 和斜坡高度 Rc 值; ④在步骤③所采集的数据的基础上, 利用公式(1)、(2)计算陆架边缘轨迹的角度以及陆架边缘斜坡的坡脚角度; ⑤使用上述参数识别并划分陆架

边缘轨迹的类型, 明确其时空演化过程。

3 层序地层格架搭建

根据 VAIL^[25]、PYLES 等^[26] 建立的经典层序地层学模式并结合琼东南盆地的海平面相对变化, 利用典型地震终止关系包括上超、顶超、下超及局部削截等识别上新统层序地层界面。本文共识别出了 2 个二级层序界面, 分别是中新统与上新统的分界面 T30(5.5 Ma)和上新统与更新统的分界面 T20(1.9 Ma)。上新统内部识别出 5 个三级层序界面, 分别命名为 T27、T26、T25、T24 和 T23(图 5)。

3.1 二级层序界面

(1) T30 界面

T30 界面为中新统的顶界。LS22-1 井的 3 336 m 处发现 *Ceratolithus acutus* 化石^[27], 确定 T30 界面的年龄值约为 5.5 MaBP, 对应于晚中新世晚期的东沙运动^[22,28-29]。陆坡区, T30 界面在地震剖面上表现为中振幅、中连续性的平行—亚平行状的同相轴, 界面之上为中振幅、中连续性和中—高频地震反射。T30 界面之上可见明显的上超现象, 在地震剖面上可见清晰的水道充填下切, 从斜坡到深水区的过渡带可识别 2~3 个水道充填的下切谷, 下切谷呈 V 型和 W 型(宽度约 2~3 km, 深度 200~500 m)。

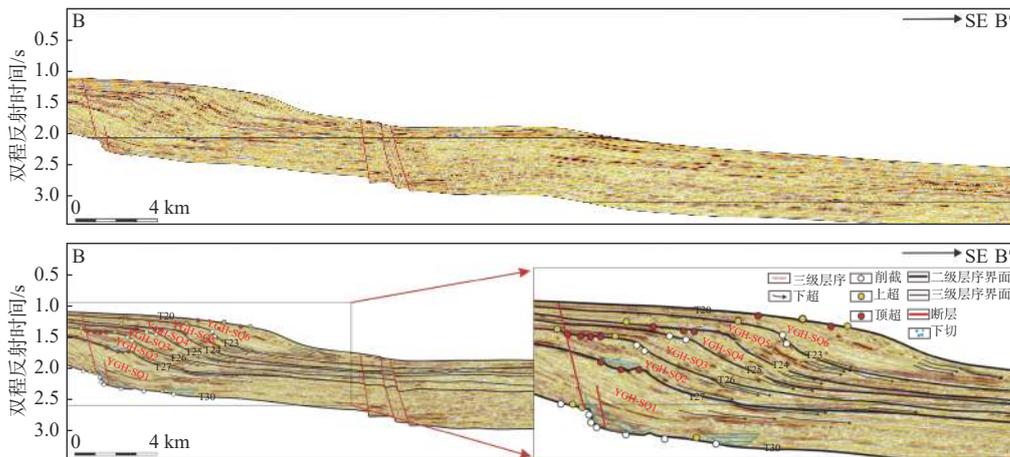


图5 琼东南盆地上新统莺歌海组层序格架划分

Fig.5 Sequence framework and classification in the study area

深水平原区 T30 界面之下以中—强振幅、中—高连续性、高频的同相轴为主。该时期琼东南盆地陆坡已经显出雏形。

(2) T20 界面

陆架区, T20 界面为中振幅、高连续性的席状反射, 其上为一组中—强振幅、高连续性、高频的平行反射, 界面之下为中振幅、弱连续性、中—低频的反射, 可见典型的上超和顶超现象。在陆坡区, T20 界面为弱振幅、低连续性地震同相轴, 界面之上为一套弱振幅、中等连续性条状反射, 可见明显的上超现象, 发育典型的斜坡扇体, 西部可见典型的 W 型下切水道; 界面之下为一套弱振幅、低连续性楔状反射, 推测为三角洲沉积体系, 同时可见明显的顶超现象。在深水区, T20 界面为中—强振幅、高连续性反射, 界面之上为大规模中振幅、高连续性席状反射, 发育有约 20 km 宽的海底扇, 可见典型的下超现象, 其下分布中—弱振幅、中等连续性席状反射。

3.2 三级层序界面

(1) T27 界面

陆架区, T27 界面以中等振幅、中连续性反射特征为主, 界面之上为中振幅、中连续性反射, 可见广泛的上超现象; 界面之下为中振幅高连续性席状反射, 可见大量的顶超现象。陆坡区, T27 界面为中—弱振幅、低连续性和中—低频反射, 界面之上发育多期 S 型前积反射的陆架边缘三角洲体系, 同时可见 W 型的水道充填现象; 界面之下识别局部削截现象。深水区, T27 界面对应一条中强振幅、中等连续性地震反射轴, 界面之上以中—强振幅、中高连续性和中频反射为主, 发育广泛的下超。

(2) T26 界面

T26 是一个强振幅高连续性反射轴, 在陆坡—深海区的地震剖面上可广泛识别。在陆架区, 界面之下为弱振幅、中—高连续性地震同相轴, 可见明显的削截现象; 界面之上为强振幅、高连续性席状反射, 发育局部下超现象。在陆坡区, T26 界面之下为强振幅、中—高连续性反射轴; 该时期沉积物供给充分, 界面之上可见 1~2 km 宽的下切谷。深水区, T26 界面为弱振幅、差连续性地震同相轴。

(3) T25 界面

T25 界面整体以中—强振幅、高连续性反射为主, 在陆架—陆坡—深水区都有较好展布, 可在全区追踪。在陆架区, T25 界面为一个强振幅中等连续性反射轴。在陆坡区, T25 为一个中—强振幅、中等连续性反射轴, 界面之下可见局部削截现象。在深水区, T25 为弱振幅、差连续性反射轴, 界面之上可见广泛的下超特征。

(4) T24 界面

T24 界面整体呈强振幅、高连续性反射, 并且在陆架—陆坡—深水区均有较好的连续性。在陆架—陆坡区, T24 界面之上可见典型的 W 型下切谷构造; 界面之下可见广泛的上超现象。在深海区, T24 界面为一条中—弱振幅、中—高连续性地震同相轴, 在全区均能较好识别。

(5) T23 界面

T23 界面整体为一条中—强振幅、中等连续性的地震同相轴。在陆架区, 界面之下广泛存在典型的顶超现象。在陆坡区, 界面之下可见局部削截。在深海区, T23 界面之上可见明显的下超。

3.3 层序划分方案

利用典型的上超、下切、下超及顶超等地震接

触关系, 在上新统莺歌海组共识别出二级层序界面 2 个, 分别为 T30(5.5 Ma)和 T20(1.9 Ma)。三级层序界面 5 个, 分别为 T27、T26、T25、T24 和 T23。上新统莺歌海组上段共识别 6 套三级层序, 自下而上命名为 YGH-SQ1、YGH-SQ2、YGH-SQ3、YGH-SQ4、YGH-SQ5 和 YGH-SQ6(图 5)。

4 莺歌海组陆架边缘轨迹定量表征

4.1 陆架边缘轨迹类型

选择具有代表性的 2 个地震剖面对研究区陆架边缘迁移轨迹进行定量化表征。

(1) 地震剖面 AA'

该剖面位于研究区西部, 记录了从 T30—T20 格架内的陆架边缘轨迹演化过程。YGH-SQ1 时期陆架边缘加积距离 426.7 m, 进积距离 2 975.5 m, 加积/进积比为 0.14, 陆架边缘轨迹角度 8.16°; YGH-SQ2 时期, 加积距离 65 m, 进积距离 600 m, 加积/进积 0.11, 陆架边缘轨迹角度 6.2°; YGH-SQ3 时期陆架边缘加积距离 13.6 m, 进积距离 1 187.5 m, 加积/进积 0.01, 陆架边缘轨迹角度 0.65°; YGH-SQ4 时期

陆架边缘加积距离 2.96 m, 进积距离 1 262.5 m, 加积/进积 0.002, 陆架边缘轨迹角度 0.13°; YGH-SQ5 时期陆架边缘加积距离 71.84 m, 进积距离 1 187.5 m, 加积/进积 0.06, 陆架边缘轨迹角度 3.46°; YGH-SQ6 时期陆架边缘加积距离 21.22 m, 进积距离 2 000 m, 加积/进积 0.01, 陆架边缘轨迹角度 0.6°(图 6)。

(2) 地震剖面 CC'

该剖面位于研究区东部, 记录了从 T30—T20 格架内的陆架边缘轨迹演化过程。YGH-SQ1 时期陆架边缘加积距离为 401.64 m, 进积距离为 375 m, 加积/进积为 1.07, 陆架边缘轨迹角度为 46.96°; YGH-SQ2 时期, 加积距离为-16.12 m, 进积距离为 1 975 m, 加积/进积为-0.008, 陆架边缘轨迹角度为-0.47°; YGH-SQ3 时期陆架边缘加积距离为 33.56 m, 进积距离为 562.5 m, 加积/进积为 0.06, 陆架边缘轨迹角度为 3.41°; YGH-SQ4 时期陆架边缘加积距离为-9.76 m, 进积距离为 700 m, 加积/进积为-0.014, 陆架边缘轨迹角度为-0.80°; YGH-SQ5 时期陆架边缘加积距离为 58.68 m, 进积距离为 562.5 m, 加积/进积为 0.10, 陆架边缘轨迹角度为 5.95°; YGH-SQ6 时期陆架边缘加积距离为 13.16 m, 进积距离为 1 012.5 m, 加积/进积为 0.01, 陆架边缘轨迹角度为 0.74°(图 7)。

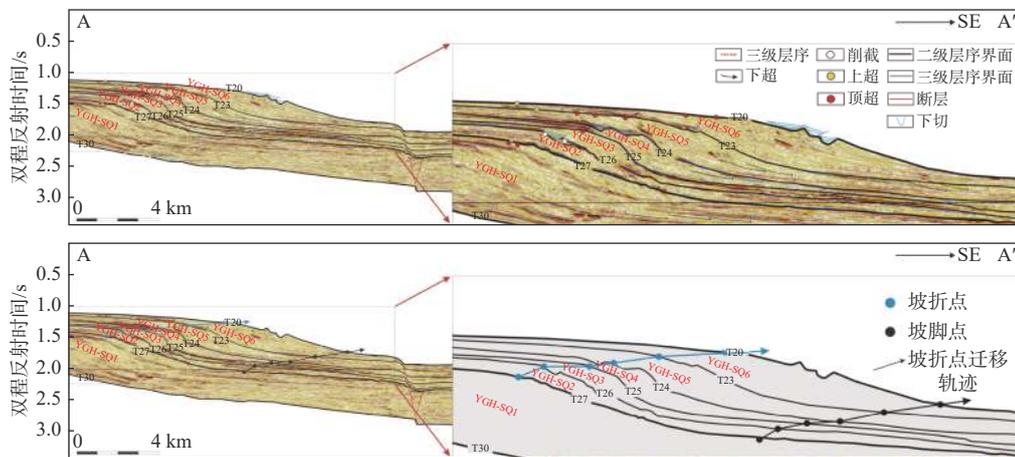


图 6 典型剖面 AA'陆架边缘轨迹特征

Fig.6 Typical profile AA' showing the characteristics of shelf edge trajectories

在上述典型剖面的分析基础上, 以层序界面 T30、T27、T25、T24、T23、T20 作为特征界面, 根据加积距离与进积距离之比、陆架边缘轨迹角度等的分布规律, 将上新统陆架边缘轨迹分为 3 种类型(图 8):

类型 I: 负角度下降型陆架边缘轨迹

此类陆架边缘轨迹加积距离-100~0 m 之间, 进积距离 500~3 000 m, 加积距离与进积距离之比-0.4~0; 陆架边缘轨迹角度-20°~0°, 陆架边缘斜

坡高度 200~600 m, 变化较大, 长度 3 000~6 000 m, 为 3 种陆架边缘轨迹类型中最长, 斜坡坡脚角度 2°~8°。综上, 将研究区 YGH-SQ1 时期西部、YGH-SQ4 时期东部以及 YGH-SQ6 时期西部陆架边缘轨迹类型定义为负角度下降型陆架边缘轨迹。

类型 II: 低角度平缓上升型陆架边缘轨迹

此类陆架边缘轨迹加积距离 0~100 m 之间, 进积距离 300~2 000 m, 加积距离与进积距离之比

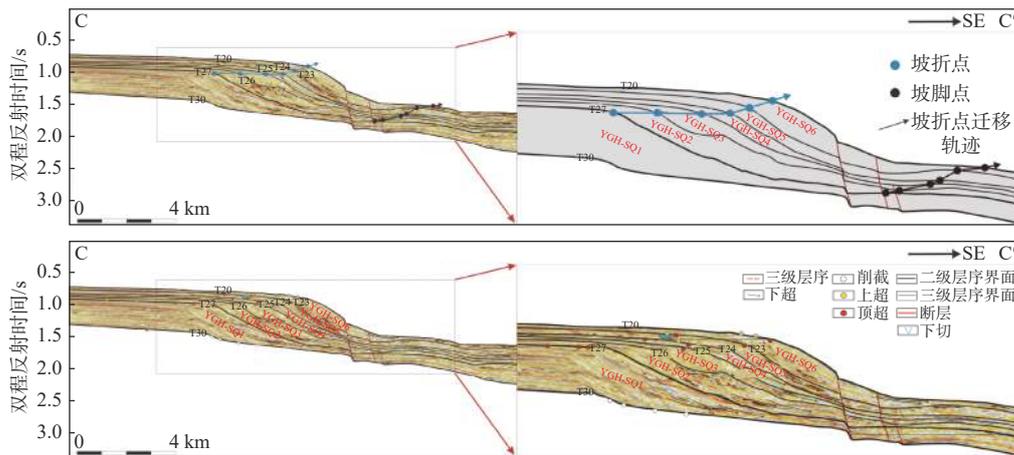


图7 典型剖面 CC'陆架边缘轨迹特征

Fig.7 Typical profile CC' showing characteristics of shelf edge trajectories

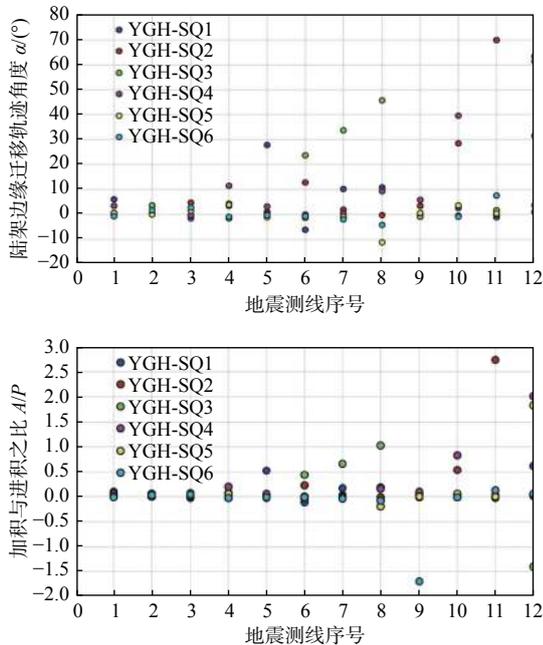


图8 12个典型剖面加积与进积距离之比以及陆架边缘轨迹角度统计图

Fig.8 The ratio of accretion to progressive distance for 12 typical profiles and the trajectory angle of shelf edge

0~0.15, 陆架边缘轨迹角度 0°~10°, 陆架边缘斜坡高度 400~600 m, 长度 2 000~6 000 m, 变化较大, 斜坡坡脚角度 2°~5°。综上, 将研究区 YGH-SQ2 时期西部、YGH-SQ3 时期全部、YGH-SQ5 时期全部以及 YGH-SQ6 时期东部陆架边缘轨迹类型定义为低角度缓慢上升型陆架边缘轨迹。

类型 III: 高角度上升型陆架边缘轨迹

此类陆架边缘轨迹加积距离 20~200 m 之间, 为 3 种陆架边缘轨迹类型中最大, 进积距离 20~400 m, 为 3 种类型中最小, 加积距离与进积距离之比 >0.15, 陆架边缘轨迹角度 >10°, 陆架边缘斜坡高度 300~700 m, 长度 2 000~5 000 m, 变化较小,

斜坡坡脚角度 4°~10°, 为 3 种类型中最大。综上, 将研究区 YGH-SQ1 时期东部、T22-T26 时期东部以及 YGH-SQ4 时期东部陆架边缘轨迹类型定义为高角度上升型。

4.2 陆架边缘轨迹时空演化规律

根据上述分类方法, 将上新统陆架边缘轨迹的垂向演化分为 6 个阶段: YGH-SQ1 时期西部以负角度下降型陆架边缘轨迹为主, 东部以高角度上升型为主; YGH-SQ2 时期西部以低角度平缓上升型为主, 东部以高角度上升型为主; YGH-SQ3 时期以低角度平缓上升型为主; YGH-SQ4 时期西部以高角度上升型为主, 东部以负角度下降型为主; YGH-SQ5 时期以低角度平缓上升型为主; YGH-SQ6 时期西部以负角度下降型为主, 东部则以低角度平缓上升型为主。

从研究区 12 个典型剖面的加积距离和进积距离的统计可以看出, 研究区陆架边缘轨迹迁移存在侧向分布差异性。

在研究区整个陆架边缘轨迹的演化过程中, YGH-SQ1 时期西部的加积距离与进积距离均大于东部; YGH-SQ2 时期, 西部加积距离与东部相差不大, 但西部进积距离远远大于东部; YGH-SQ3 时期, 加积距离与进积距离自西向东逐渐减小; YGH-SQ4 时期, 加积距离变化较小, 大多在 -10~50 m 波动, 东西部进积距离差异不大; YGH-SQ5 时期, 东西部加积距离差异不大, 进积距离自西向东明显减小; YGH-SQ6 时期, 加积距离自西向东先减小后增大, 进积距离自西向东逐渐减小。总而言之, 研究区加积距离自西向东变化较小, 进积距离则自西向东有明显的减小趋势(表 1)。

表 1 琼东南盆地上新统莺歌海组陆架边缘加积及进积距离统计

Table 1 Statistics of accretion and distance to the shelf edge of the Pliocene Yinggehai Formation in the Qiongdongnan Basin

时期	加积距离 A/m			进积距离 P/m		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
YGH-SQ1	657.08	208.12	406.2	6 171.5	612.5	1 698.2
YGH-SQ2	72.66	-39.92	21.7	2 962.5	62.5	765.5
YGH-SQ3	107.92	-5.48	41.1	1 712.5	25	756.3
YGH-SQ4	141.68	-82.36	7	2 937.5	37.5	896.9
YGH-SQ5	101.56	-12.84	41.2	2 950	37.5	914.6
YGH-SQ6	45.84	-53.08	5.5	2 987.5	25	1 239.6

通过对陆架边缘轨迹角度以及加积与进积之比这 2 个参数的统计分析, 亦有助于描述研究区侧向上的差异演化。

YGH-SQ1 时期, 加积与进积距离之比呈“东大西小”的特征, 东部最大为 10.09, 西部最小为-0.4, 自西向东逐渐增大, 与之对应, 陆架边缘轨迹角度也呈逐渐增大的趋势, 最大值 84.34°, 最小值-21°。该阶段西部以负角度下降型陆架边缘轨迹为主, 东部以高角度上升型陆架边缘轨迹为主。

YGH-SQ2 时期, 加积与进积距离之比与 YGH-SQ1 时期相比, 略有增大。加积与进积距离之比最大为 0.62, 最小为-0.11, 仍呈“东大西小”的特点, 对应的陆架边缘轨迹角度最大为 31.7°位于东部, 最小的为-6.08°, 位于西部; 该阶段西部以低角度缓慢上升型为主, 东部以高角度上升型陆架边缘轨迹为主。

YGH-SQ3 时期, 最大值为 2.74, 最小值为 0.02; 对应的陆架边缘轨迹角度最大为 69.93°, 最小为-0.18°, 该阶段以低角度平缓上升型陆架边缘轨迹为主, 但也可见高角度上升型陆架边缘轨迹出现。

YGH-SQ4 时期加积与进积距离之比最大值为 0.67, 最小值为-1.39; 对应的陆架边缘轨迹角度最大为 45.86°, 最小为-54.32°, 该阶段西部以高角度上升型陆架边缘轨迹为主, 东部以负角度下降型为主。

YGH-SQ5 时期加积与进积距离之比, 最大值为 2, 最小值为-0.004; 对应的陆架边缘轨迹角度最大为 63.52°, 最小为-0.25°, 该阶段以低角度平缓上升型陆架边缘轨迹为主, 但也可见高角度上升型陆架边缘轨迹出现。

YGH-SQ6 时期加积与进积距离之比最大值为 1.83, 最小值为-0.19; 对应的陆架边缘轨迹角度最大为 61.39°, 最小为-11.12°, 该阶段西部以负角度下降型陆架边缘轨迹为主, 东部以低角度平缓型陆架边缘轨迹为主。

5 陆架边缘迁移控制因素

上新世以来, 琼东南盆地处于加速沉降期, 盆地沉降速率达到最高峰^[30]。而由于盆地东西分块的构造格局特点, 也导致了不同区域的构造沉降速率有较大差异^[31]。沉降速率自西向东逐渐变小, 研究区西部陵水凹陷沉降速率可达 179 m/Ma, 而东部松南凹陷沉降速率仅约为 35 m/Ma^[32-36]。沉降速率的不同也直接影响沉积物的堆积速率, 进而造成了研究区东西部陆坡极强的差异性。琼东南盆地的陆架边缘轨迹的垂向演化与海平面升降过程有着很好的响应关系, 在海平面较低时, 对应时期的陆架边缘轨迹的加积速率较小, 进积速率较大, 陆架边缘轨迹角度也较小; 海平面较高时, 对应时期的陆架边缘轨迹的加积速率较大, 进积速率较小, 陆架边缘轨迹角度也较大。综上, 海平面的变化对陆架边缘轨迹的垂向演化有着重要的控制作用。

上新世 5.5~1.8 Ma, 研究区内一直处于西部的进积速率较大(0.35~23 km/Ma), 东部进积速率较小(0.012~16 km/Ma); 研究区西部的沉积物通量大(最大 0.8 km/Ma), 东部的沉积物通量小(最大 0.5 km/Ma)的情况下。通过进积速率以及沉积物通量的变化可知, 研究区西部所接收沉积物量远大于东部, 致使研究区西部陆坡向前推进更远。2.7~1.8 Ma, 研究区西部陆架边缘轨迹向前进积距离陡然增加, 而东部几乎没有进积, 反映了该时期研究区西部物源供给大大增强, 研究区主要受到来自莺歌海方向物源的影响要远远大于海南岛方向物源。

晚上新世以来, 气候逐渐从湿热转换为干凉, 从热带气候转为亚热带气候。琼东南盆地气候为典型热带气候; 转型后, 琼东南盆地受到东亚季风增强的影响, 温度下降, 气候也转变为亚热带气候^[24]。通过气候变化与研究区陆架边缘轨迹迁移的对比可以发现, 随着气温下降, 东亚冬季风增强

时,陆架边缘轨迹的进积速率也会随之增大。综上所述可知,气候变化对研究区陆架边缘轨迹的迁移有着重要的控制作用。

6 深水扇发育规律

海底扇是重力流通过深水水道或者峡谷搬运,由于地形变化以及势能减弱在其末端沉积形成的一种沉积体。平面上一般呈朵叶状,剖面上呈双向下超的扁丘状,扇体内部呈平行、亚平行结构,具较高连续性、强振幅反射特征。

通过对大量测线的追踪解释,在研究区目的层深水沉积区发现了大量的海底扇沉积。总体来看,研究区西部深水扇发育较多,多发育在斜坡坡脚或深海平原地区;研究区东部深水扇的发育少于西部,多发育于陆架边缘斜坡上。YGH-SQ1层海底扇发育较少且多位于西部,东部几乎不发育;YGH-SQ2、YGH-SQ3与YGH-SQ6层为研究区深水扇最为发育的层段,几乎各个剖面均可观察到深水扇沉积;YGH-SQ4与YGH-SQ5层虽也有深水扇发育,但规模均较小(图9)。

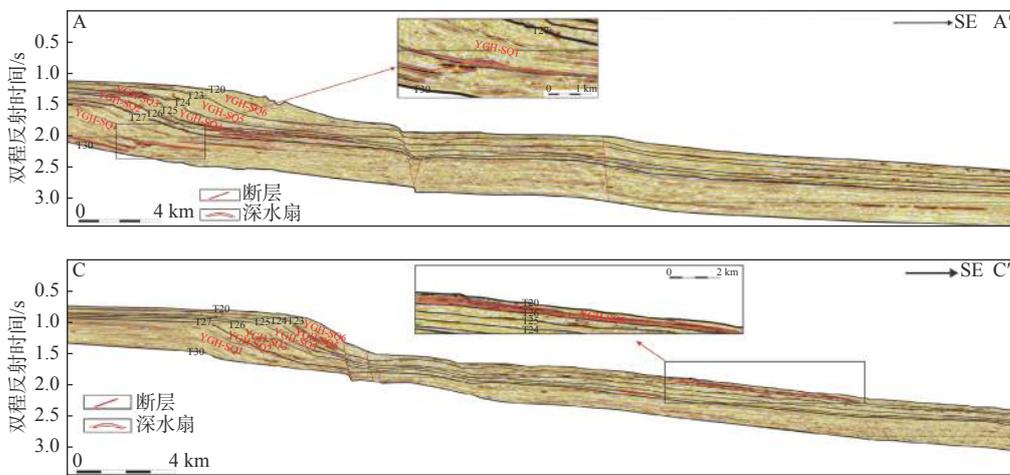


图9 典型剖面 AA'与 CC'深水扇发育特征

Fig.9 Typical profile AA' and CC' showing the development characteristics of deep water fan

通过对研究区各层的深水扇的出现概率统计(图10),结合各层陆架边缘轨迹类型分析可知,YGH-SQ1层以III型陆架边缘轨迹为主,该层的深水扇沉积较少;YGH-SQ2层西部以II型陆架边缘轨迹为主,东部以III型陆架边缘轨迹为主,深水扇发育较多且集中于西部;YGH-SQ3以II型陆架边缘轨迹为主,深水扇发育较多;YGH-SQ4层以III型

陆架边缘轨迹为主,深水扇发育较少且面积普遍偏小;YGH-SQ5层以II型陆架边缘轨迹为主,该层的深水扇发育虽然也较多,但规模普遍偏小;YGH-SQ6层以I型陆架边缘轨迹为主,该层的深水扇发育较多。综上所述,通过陆架边缘迁移轨迹研究可以预测深水扇分布特征,进而为琼东南盆地莺歌海组深水油气勘探评价中的储层评价预测以及成藏

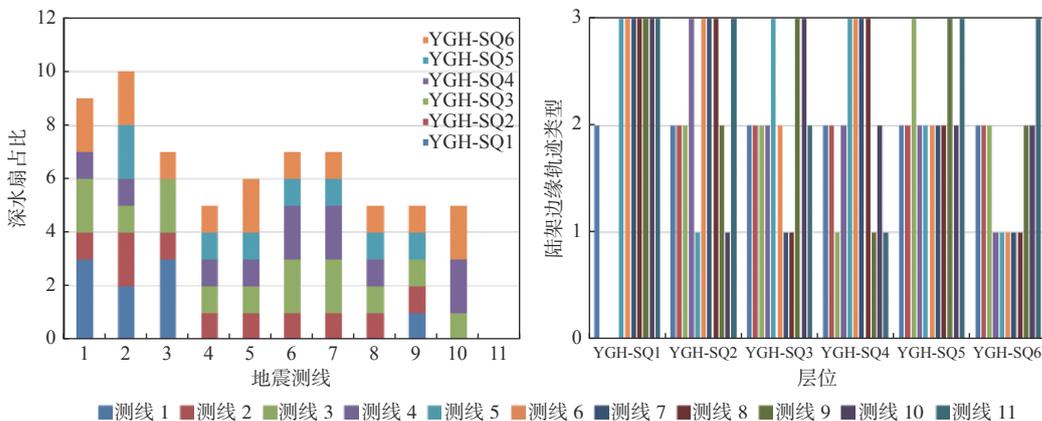


图10 各个剖面深水扇占比以及陆架边缘轨迹类型统计

Fig.10 Statistical diagram of the proportion of deep-water fans in each section and the trajectory types of shelf edge

地质条件分析等提供基础地质依据。

7 结论

(1) 上新统莺歌海组共识别出二级层序界面 3 个, 分别为 T30(5.5 Ma)、T27(2.4 Ma) 和 T20(1.9 Ma); 三级层序界面 4 个, 分别为 T26、T25、T24 和 T23。基于陆架边缘轨迹量化方法, 通过统计陆架边缘有关的加积距离、进积距离、加积与进积之比和陆架边缘轨迹角度等参数, 将上新统以来琼东南盆地陆架边缘轨迹可划分为 3 类, 分别为负角度下降型、低角度平缓上升型和高角度上升型。

(2) 上新统陆架边缘轨迹垂向上经历 6 个演化阶段, 西部以下降型和平缓型陆架边缘轨迹为主, 东部以平缓型和上升型陆架边缘轨迹为主, 侧向上由于全时期西部进积距离均远远大于东部, 因此形成了“西宽东窄”的陆架坡折形态。琼东南盆地上新统以来气温不断下降, 以及东亚冬季风的显著增强, 导致研究区的物源供给增强, 加之海平面的下降, 进而导致了陆架边缘向前快速进积。研究区东部的断裂活动频繁, 以及物源体系的供给在研究区东西部存在较大的差异, 导致了研究区西部陆坡推进距离远远大于研究区东部。

(3) 上新统莺歌海组深水扇沉积主要集中于 YGH-SQ2、YGH-SQ3 与 YGH-SQ6 层, 负角度下降型和低角度缓慢上升型陆架边缘轨迹与深水扇发育有良好的响应关系, 是陆坡区及深海平原区深水油气储层预测的有效指标。

参考文献:

- [1] HELLAND-HANSEN W, HAMPSON G J. Trajectory analysis: concepts and applications[J]. *Basin Research*, 2010, 21(5): 454-483.
- [2] HELLAND-HANSEN W, MARTINSEN O J. Shoreline trajectories and sequences; description of variable depositional-dip scenarios[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(4): 670-688.
- [3] HENRIKSEN S, HELLAND-HANSEN W, BULLIMORE S. Relationships between shelf-edge trajectories and sediment dispersal along depositional dip and strike: a different approach to sequence stratigraphy[J]. *Basin Research*, 2011, 23(1): 3-21.
- [4] CARVAJAL C, STEEL R, PETTER A. Sediment supply: the main driver of shelf-margin growth[J]. *Earth Science Reviews*, 2009, 96(4): 221-248.
- [5] 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 13.8Ma 陆架边缘三角洲为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(3): 603-614.
- [6] 何云龙. 琼东南盆地陆坡区重力流沉积特征及其成因机制[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- [7] 任金锋. 琼东南盆地陆架边缘斜坡地形的定量演化过程[D]. 武汉: 中国地质大学, 2016.
- [8] 张鹏. 南海北部新近系陆架-陆坡演化及沉积体系研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2020.
- [9] 蔡佳. 琼东南盆地古近系古地貌恢复及其对层序样式和沉积特征的控制[D]. 武汉: 中国地质大学, 2009.
- [10] CHUNFENG L, JIABIAO L, WEIWEI D, et al. Seismic stratigraphy of the central South China Sea basin and implications for neotectonics[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(3): 1377-1399.
- [11] 姚哲, 王振峰, 左倩娟, 等. 琼东南盆地中央峡谷深水大气田形成关键要素与勘探前景[J]. *石油学报*, 2015, 36(11): 1358-1366.
- [12] XIE X N, MÜLLER D R, REN J Y, et al. Stratigraphic architecture and evolution of the continental slope system in offshore Hainan, northern South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2007, 247(3): 129-144.
- [13] 何云龙, 解习农, 李俊良, 等. 琼东南盆地陆坡体系发育特征及其控制因素[J]. *地质科技情报*, 2010, 29(2): 118-122.
- [14] LI S T, LIN C S, ZHANG Q M, et al. Episodic rifting of continental marginal basins and tectonic events since 10 Ma in the South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(1): 10-23.
- [15] 龚再升. 中国近海含油气盆地新构造运动与油气成藏[J]. *地球科学*, 2004, 29(5): 513-517.
- [16] XIE X N, MÜLLER D R, LI S T, et al. Origin of anomalous subsidence along the Northern South China Sea margin and its relationship to dynamic topography[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23(7): 745-765.
- [17] PESTANA J M, BISCONTIN G, NADIM F, et al. Modeling cyclic behavior of lightly overconsolidated clays in simple shear[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2000, 19(7): 501-519.
- [18] 何家雄, 苏丕波, 卢振权, 等. 南海北部琼东南盆地天然气水合物气源及运聚成藏模式预测[J]. *天然气工业*, 2015, 35(8): 19-29.
- [19] 张伟, 何家雄, 卢振权, 等. 琼东南盆地疑似泥底辟与天然气水合物成矿成藏关系初探[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(11): 2185-2197.
- [20] 万志峰, 夏斌, 何家雄, 等. 南海北部莺歌海盆地与琼东南盆地油气成藏条件比较研究[J]. *天然气地球科学*, 2007(5): 648-652.
- [21] 陈慧, 解习农, 毛凯楠, 等. 南海北部陆缘深水峡谷体系沉积特征及形成机制[J]. *地球科学*, 2020, 45(9): 3419-3419.
- [22] 陈宏言, 孙志鹏, 翟世奎, 等. 琼东南盆地地震地层对比分析及区域地层格架的建立[J]. *海洋学报*, 2015, 37(5): 1-14.
- [23] 赵蒙维. 琼东南盆地新生代古海洋环境演变[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [24] 雷振宇, 苏明, 张莉, 等. 南海北部陆坡琼东南盆地晚中新世以来沉积物来源及输送样式[J]. *海洋学研究*, 2016, 34(2): 35-42.

- [25] VAIL P R. The stratigraphic signatures of tectonics, eustacy and sedimentology an overview[J]. *Cycles & Events in Stratigraphy*, 1991, 123(1): 38-41.
- [26] PYLES D R, SYVITSKI J P M, SLATT R M. Defining the concept of stratigraphic grade and applying it to stratal (reservoir) architecture and evolution of the slope-to-basin profile: an outcrop perspective[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 28(3): 675-697.
- [27] 刘新宇, 张道军, 左倩媚, 等. 南海北部西区琼东南盆地深水区生物地层研究进展: 以LS33-1-1井为例[J]. *地层学杂志*, 2013, 37(4): 571-572.
- [28] 邹振宇, 刘豪, 周小龙, 等. 琼东南盆地新近纪以来的层序地层划分及地震相分析[J]. *内蒙古石油化工*, 2016, 42(Z2): 49-53.
- [29] 张风廉. 琼东南盆地长昌凹陷三亚组岩性体地震解释及成藏条件分析[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- [30] 魏魁生, 崔早云, 叶淑芬, 等. 琼东南盆地高精度层序地层学研究[J]. *地球科学*, 2001, 26(1): 59-66.
- [31] 万玲, 姚伯初, 吴能友, 等. 南海西部海域新生代地质构造[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(2): 45-52.
- [32] 秦志亮. 南海北部陆坡块体搬运沉积体系的沉积过程、分布及成因研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2012.
- [33] 李亚敏, 施小斌, 徐辉龙, 等. 琼东南盆地构造沉降的时空分布及裂后期异常沉降机制[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(1): 47-57.
- [34] 袁玉松, 杨树春, 胡圣标, 等. 琼东南盆地构造沉降史及其主控因素[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(2): 376-383.
- [35] 田姗姗. 琼东南盆地裂后期构造沉降分析及古地貌恢复[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.
- [36] 张云帆, 孙珍, 郭兴伟, 等. 琼东南盆地新生代沉降特征[J]. *热带海洋学报*, 2008, 27(5): 30-36.

PLIOCENE SHELF MARGIN MIGRATION TRAJECTORIES IN THE QIONGDONGNAN BASIN AND ITS IMPLICATIONS FOR DEEP WATER HYDROCARBON EXPLORATION

MA Chang^{1,2}, GE Jiawang^{1,2*}, ZHAO Xiaoming^{1,2}, YAO Zhe³, ZHU Jitian³,
XIANG Zhu^{1,2}, WU Xintao¹, FAN Zedong¹, FANG Xiaoyu²

(1 School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2 Guangdong Laboratory of Southern Marine Science and Engineering - Zhanjiang, Zhangjiang 524000, China; 3 Zhanjiang Branch of CNOOC Limited, Zhanjiang 524057, China)

Abstract: Based on the high-precision 2D seismic data from the shelf margin of the Qiongdongnan Basin, six sequences, namely YGH-SQ1, YGH-SQ2, YGH-SQ3, YGH-SQ4, YGH-SQ5, and YGH-SQ6 from the bottom up are identified for the Pliocene Yinggehai Formation according to the typical seismic contact relationships such as local truncation, onlap, toplap, downlap and incised valley. The quantitative characterization method is adopted to follow up the trajectories of shelf edge. The Pliocene trajectories of the shelf edge of the Yinggehai Period in the Qiongdongnan Basin can be classified into three types: negative-angle descending, low-angle gently ascending and high-angle ascending, and the vertical evolution of the Pliocene shelf edge track can be divided into six stages, with the descending and gently ascending shelf edge trajectories dominated the west and the gently ascending and ascending shelf edge trajectories dominated the east. In lateral direction the progradation is much larger in the west than that in the east, and thus the shelf slope folds formed in a pattern of “wide in the west and narrow in the east”. Based on the quantitative statistical analysis and previous work, it is clear that the vertical migration of the shelf edge tracks in the study area is mainly controlled by sea level fluctuation caused by climate change and the increase in sediment supply; while the lateral migration of the shelf edge trajectories is mainly controlled by the difference in tectonic activity and sediment supply. The sediment supply in the western part of the study area is much larger than that in the eastern part as the activity of the fracture zone is weaker than that in the eastern part, which leads to the development of the western land slope in the study area. The western part of the study area is much more abundant in sediment supply than that of the eastern part and the fault zone is less active than the eastern part, resulting in the development of the western land slope and the eastern land slope. The land slope areas and deep water fans in the deep-sea plain area are favorable exploration areas for oil and gas, which correspond to the trajectories of the negative-angle descending and low-angle slowly rising shelf edges.

Key words: Qiongdongnan Basin; Yinggehai Formation; stratigraphic shelf; shelf-edge migration trajectory; deep water fan