

方小宇, 姚哲, 廖晋, 等. 琼东南盆地深水区第四系乐东组层序地层学特征及其水合物勘探启示[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(1): 51-60.

FANG Xiaoyu, YAO Zhe, LIAO Jin, et al. Sequence stratigraphic architecture of the Quaternary Ledong Formation in the deep-water area of the Qiongdongnan Basin and its significance to gas hydrate exploration[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(1): 51-60.

琼东南盆地深水区第四系乐东组层序地层学特征及其水合物勘探启示

方小宇¹, 姚哲^{1,2}, 廖晋^{1,2}, 葛家旺^{1,3*}, 赵晓明³, 宋鹏^{1,2}, 向柱³, 马畅³

(1 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江), 湛江 524000; 2 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 湛江 524057;

3 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500)

摘要: 琼东南盆地深水区第四系乐东组是南海北部已证实的天然气水合物主要勘探层系。近年来, 其层序地层格架、构成特征以及对天然气水合物稳定域及运聚成藏的控制影响作用等科学问题引发了广泛关注。为了厘清乐东组层序地层格架、构成特征及其展布规律, 基于层序地层学理论, 结合研究区高分辨率地震资料, 建立了乐东组精细层序地层格架及层序样式。依据典型的地震接触关系识别了乐东组复合层序界面 T20、T14 和 T0, 同时划分确定了乐东组下段 6 套三级层序 (LDSQ1-6) 和上段 8 套三级层序 (LDSQ7-14)。在三级层序内部还进一步识别出初始海泛面、最大海泛面以及最大海退面, 在三级层序中进一步划分出低位体系域 (LST)、海侵体系域 (TST)、高位体系域 (HST) 和下降体系域 (FFST)。研究表明, 1.8 Ma 以来, 红河物源体系沉积物供给充足, 乐东组下段陆架边缘体系进积和加积组分厚度大, 层序样式主要为 H 型层序; 0.9~0.8 Ma 至今, 地层以进积叠置样式为主, 且峡谷发育频次增大, 低位体系域组分占比增大, 主要发育 L-H 型层序。笔者结合国内外相似区域的沉积相模式, 明确了层序格架约束下的沉积相发育类型及时空演化特征, 为该区域天然气水合物储层预测提供了地质依据。

关键词: 琼东南盆地; 乐东组; 层序地层格架; 体系域; 层序样式

中图分类号: P744.4; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.121

0 引言

琼东南盆地是南海北部重要的含油气盆地, 油气资源丰富。近年来, 琼东南盆地深水油气及天然气水合物勘探不断推进, 其中, 深水油气主要聚焦于新近系, 而天然气水合物多发现在第四系乐东组浅层的深水平原地区^[1-3]。近年来系列研

究报道, 高饱和度的天然气水合物往往发现于相对粗粒沉积物中, 如何落实稳定域深度范围内优质深水储集体是琼东南盆地水合物规模化勘探面临的重大挑战。琼东南盆地乐东组受控于红河、海南岛及越南 3 套物源体系共同影响, 在深水区沉积充填了大量沉积物, 形成了深水扇、块体搬运沉积物 (MTDs) 及远洋泥岩等多种沉积体系, 叠置样式复杂, 而且地层岩性横向变化大、相变快。目前琼东南盆地第四系乐东组层序地层格架尚未建立, 沉积物组成样式尚不清楚, 严重制约了当前天然气水合物勘探的进程。本文拟充分利用高分辨率三维地震资料, 依据层序地层学基本理论, 开展第四系乐东组高精度层序地层学研究, 明确乐东组层序地层样式及沉积体系组合特征, 进而为该区水合物资源勘探评价及有利勘探区评价预测等提供地质理论依据。

收稿日期: 2021-04-08

资助项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)“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); 国家自然科学基金(41902124, 42072183)

作者简介: 方小宇(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事油气田地质与储层建模方面的研究工作。E-mail: fangxy@zjlab.com

* 通讯作者: 葛家旺(1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事层序地层学与地震沉积学方面的研究工作。E-mail: gjwdn@163.com

1 区域地质概况

琼东南盆地位于我国南海北部西端,围绕海南岛呈 NE-NW 向展布,面积约 $10.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地东以神狐隆起与珠江口盆地相接,西以 1 号断裂与莺歌海盆地为界,南邻永乐隆起,北靠海南岛。盆地从北到南可划分为北部断陷带、北部隆起带、中央坳陷带以及南部隆起带 4 个一级构造单元。其

中,北部断陷带由崖北、松东与松西 3 个凹陷组成;中央坳陷带由崖南、乐东、陵水、宝岛、松南和北礁 6 个凹陷组成。本文研究区位于琼东南盆地中部,跨松南-陵水凹陷,面积近 $10\,000 \text{ km}^2$ (图 1),该区自北向南海水深度逐渐增加,最深超过 $2\,000 \text{ m}$;作为油气及水合物勘探新区,其勘探及研究程度较低,目前全区被二维地震测线覆盖,地震测网密度为 $12.5 \text{ km} \times 12.5 \text{ km}$ 。

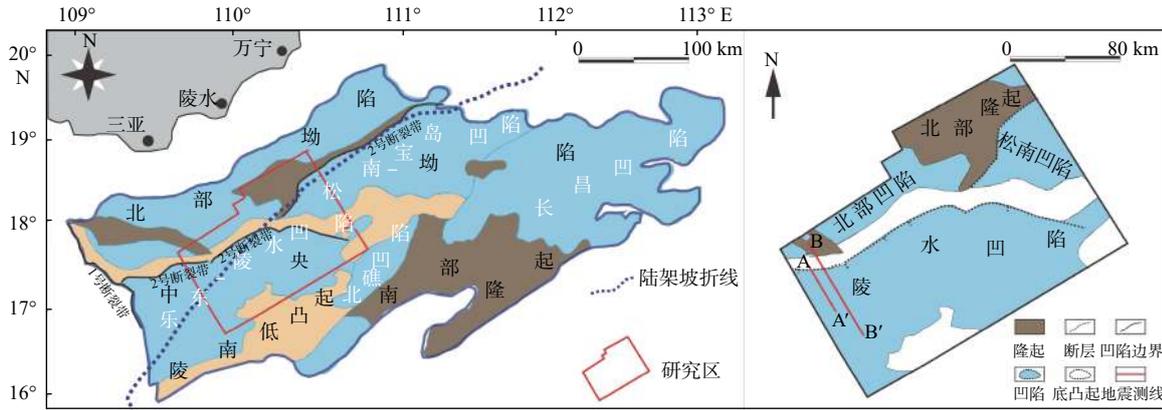


图 1 南海琼东南盆地构造单元划分

Fig.1 Regional tectonic map of the Qiongdongnan Basin, South China Sea

2 乐东组层序地层格架

搭建精细的层序地层格架是沉积体系研究的基础,其关键是识别层序界面。层序界面是以不整合面或与之相对应的整合界面,主要以削截、上超、顶超、下超及地震波组差异等为识别标志^[4]。研究区横跨琼东南盆地陆架、陆架边缘和深水平原区,层序界面处地震终止关系明确。

利用典型的地震接触关系可有效判断层序界面,这些地震接触(终止)关系包括:削截(下切)、上超、顶超及下超等。其中,削截(下切)代表一种侵蚀作用,往往指示构造运动存在或者大规模海平面下降,是划分层序的最可靠标志(图 2)。上超和顶超是层序底界面的可靠标志,在陆架边缘或外陆架区域容易识别。下超往往与前积作用有关,可作为层序边界的辅助标志。

2.1 二级层序界面识别

2.1.1 界面 T20

T20 界面是第四系乐东组底部界面(图 3),在整个琼东南盆地可广泛追踪。T20 界面分割上新统(钙质超微 NN18-NN12 带以及有孔虫 N21-N19 带)与

第四系(钙质超微 NN21-NN19 带以及有孔虫 N23-N22 带)。LS33-1-1 井微体古生物研究将 T20 界面的年龄定为 $1.8/1.9 \text{ Ma}$ ^[6]。

在陆架区,T20 界面为中振幅、高连续性的地震同相轴,界面之上为一组中-强振幅、高连续性和高频的平行地震反射,其下为中振幅、弱连续性和中-低频的地震反射。在陆坡区,T20 界面为弱振幅、低连续性的地震同相轴,界面之上为一套弱振幅、中等连续性条状地震反射,可见明显的上超

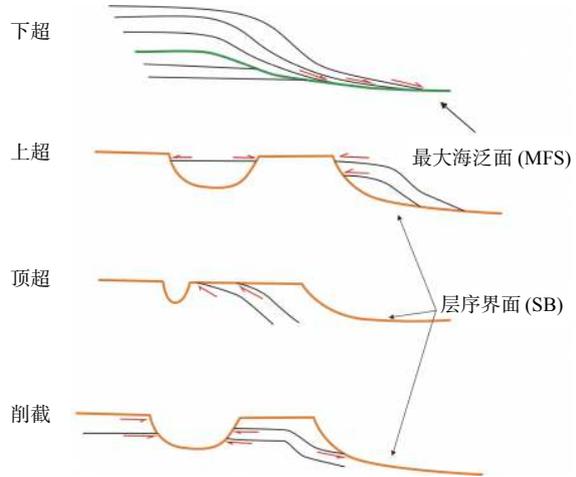


图 2 层序界面和最大海泛面识别标志及示意图^[5]

Fig.2 A schematic diagram showing sequence boundaries and the maximum flooding surface^[5]

现象, 西部可见典型的 W 型下切水道; 其下为一套弱振幅、低连续性的楔状地震反射, 可识别明显的顶超点。在深水区, T20 界面可见下超现象。

2.1.2 界面 T14

在乐东组内部识别一个重要界面, 命名为 T14。该界面表现为中振幅、中—弱连续性的反射特征, 陆坡区可见广泛的上超及顶超现象, 深水平原区识别多个下超点。以 T14 为分割界面, 将乐东组分为上下两套地层, 命名为乐东组上段和乐东组下段。乐东组上段和下段层序-沉积样式发生重大转变: ①乐东组上段发育大规模斜坡峡谷, 而下段斜坡峡谷规模较小或者基本缺失; ②乐东组上段陆架区分流河道比下段保留程度高, 且发育频率更高; ③相比乐东组下段, 乐东组上段的斜坡体系滑塌程度增大, 深水平原区 MTDs 更为活跃。根据以上典型的地质现象, 认为 T14 界面很可能代表更新世气候-物源转换事件, 据前人资料^[7-8], 推测其年龄约为 0.8~0.9 Ma BP。

2.1.3 界面 T0

乐东组顶界面为现今海底反射界面, 命名为 T0。该界面为强振幅(正极性)、低频高连续性的地震同相轴, T0 界面之下可见明显的大套陆架边缘三角洲前积地震反射及顶超接触关系。

2.2 三级层序界面识别

根据 T20、T14 和 T0 这 3 个重要界面, 将乐东组划分为乐东组下段(T20—T14)和乐东组上段(T14—T0)。由于海平面的周期性波动控制层序多旋回发育, 在乐东组内部可识别多个三级层序界面, 在地震剖面上均表现为局部不整合接触(向陆一侧)和与之对应的整合接触(向海一侧), 但上下均表现出地震同相轴不协调的反射特征, 上下地震相亦有差异, 且界面之下常见顶超和下超等地震反射特征(图 3)。

在乐东组下段内部识别 5 个三级层序界面, 分别命名为 T19、T18、T17、T16 和 T15 界面。

T19 和 T18 界面在陆坡区表现为中—强振幅、中—高连续性地震同相轴, 界面上下为可见广泛的上超及顶超现象。在深水平原地区, T19 和 T18 界面表现为中振幅、低连续性的地震反射轴, 可见典型的下超现象(图 3)。T17 界面在表现为中—强振幅、中等连续性同相轴, 界面之上发育有“V”型下切谷, 宽度约 400~600 m(图 3)。T16 和 T15 界面表现为弱振幅、中连续性同相轴, 界面附近识别广泛的顶超和上超接触关系。

在乐东组上段内部识别 7 个三级层序界面, 命

名为 T13、T12、T11、T10、T09、T08 和 T07 界面。

T13 和 T12 界面表现为中振幅、中—低连续性的地震同相轴, 界面上下可识别局部削截及峡谷等(图 3、4)。T11 和 T10 界面在陆架-上陆坡区域表现为中—弱振幅、中—低连续性的地震同相轴, 界面之上可见广泛上超和顶超现象; 在深水区表现为中—弱振幅、中等连续性的地震同相轴, 可见典型的下超接触关系(图 3、4)。T09 界面之上可见典型的“W”型峡谷, 规模约 1~1.5 km 宽; 界面之下见局部削截现象(图 4)。T08 和 T07 界面在陆架区表现为中—弱振幅、中—高连续性的地震同相轴, 界面之上见局部上超接触关系, 界面附近发育规模不一且多期次切叠的碟型和 U 型陆坡峡谷群, 表现为弱振幅、低连续性地震反射(图 3)。

2.3 层序地层划分方案

以经典层序地层学理论和全区地震资料为基础, 将研究区乐东组自下而上划分为 14 个三级层序: LDSQ1—SQ14(表 1), 其中, 乐东组下段为 6 个三级层序, 乐东组上段为 8 个三级层序。

3 层序构成样式

体系域是指一系列同期沉积体系组合, 是由一个三维的沉积单元组成, 其边界可以为层序界面(SB)、最大海泛面(MFS)、初始海泛面(FFS)或最大海退面(MRS)。通过不同的地层叠置关系及地震反射终止关系识别体系域的类型和特征。

3.1 体系域构成样式

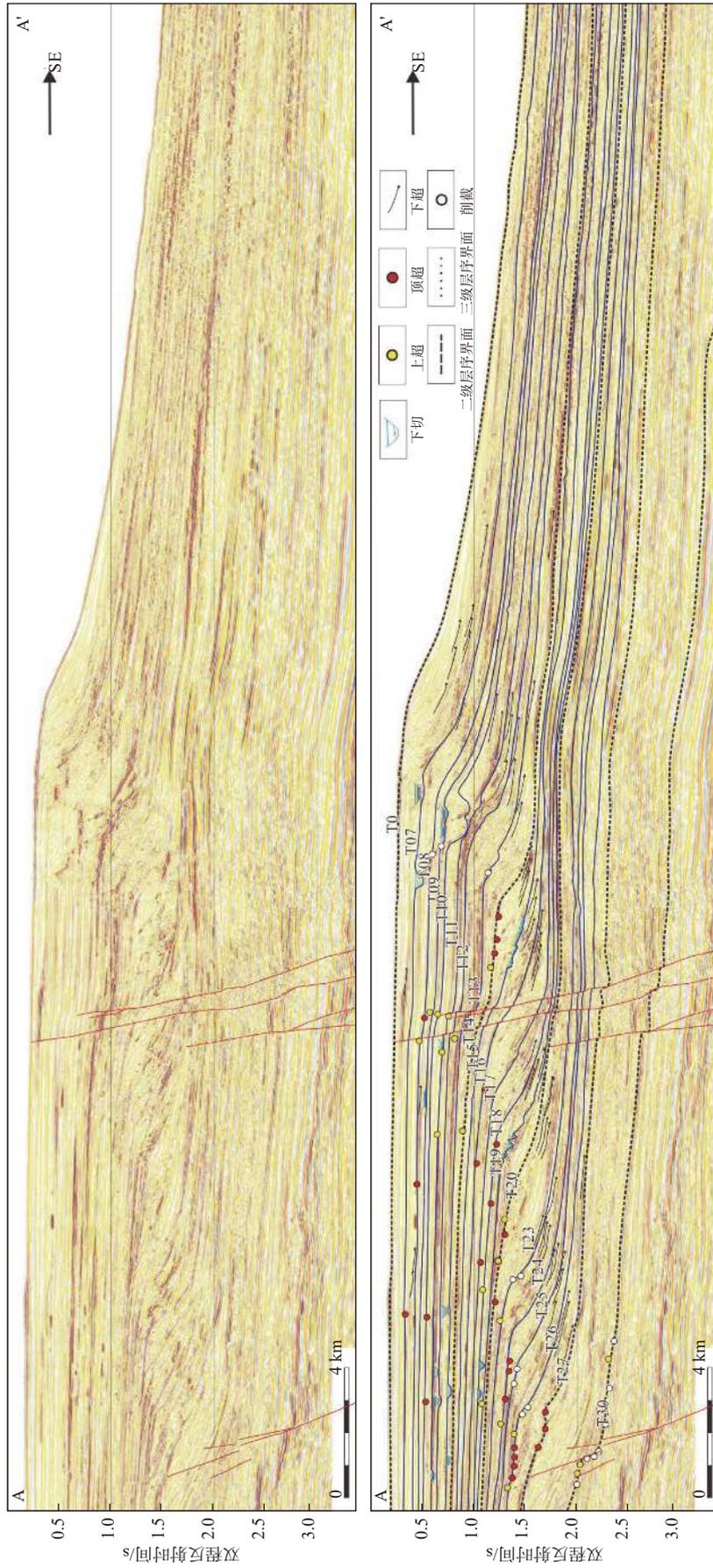
3.1.1 体系域单元

结合研究区实际地震资料, 本文采用四分体系域, 对于能明显识别出最大海退面的沉积旋回, 一个发育完整的三级层序应包括 4 个体系域^[9]: 低水位体系域(LST)、海侵体系域(TST)、高水位体系域(HST)和海退体系域(FSST)。

(1)LST: 当沉积基准面下降到最低点后停止下降, 强制性海退结束, 进入低位体系域发育期。此时主要表现为水道的下切作用, 底界面为层序界面。这一阶段沉积基准面处于相对静止或上升速率小于沉积速率。沉积物堆积驱动水退, 形成正常水退沉积。

(2)TST: 当沉积基准面上升速率开始大于沉积速率时, 此时由海退转换为海侵沉积, 进入发育海侵体系域的发育阶段, 该时期以退积式准层序组为主。

(3)HST: 海侵到最大后向水退沉积转换, 沉积



测线位置见图1

图3 琼东南盆地乐东组 A-A'地震原始剖面 (上) 和层序划分及界面接触关系 (下)
Fig.3 The A-A' original seismic section (upper), sequence division and interface contact relationship (lower) of Ledong Formation in the Qiongdongnan Basin



测线位置见图 1

图 4 琼东南盆地乐东组 B-B'地震原始剖面(上)和测线层序划分及界面接触关系(下)
Fig.4 The B-B' original seismic section (upper), sequence division and interface contact relationship (lower) of Ledong Formation in the Qiongdongnan Basin

表1 琼东南盆地乐东组层序地层格架

Table 1 Sequence stratigraphic framework of Ledong Formation in the Qiongdongnan Basin

地层			层序		地震反射特征	地震界面	界面类型	年龄/Ma	海平面变化	构造阶段	
系	统	组	准二级	二级							
第四系	更新统	乐东组	SQ-LD2	LDSQ14		T0	区域不整合	0.8 Ma		坳陷阶段	
				LDSQ13	上超	顶超 下超	LDSB14				超覆不整合
				LDSQ12	上超	顶超 削截	LDSB13				超覆不整合
				LDSQ11	上超	下超 削截	LDSB12				超覆不整合
				LDSQ10	上超	顶超	LDSB11				超覆不整合
				LDSQ9	上超	下超 下超	LDSB10				超覆不整合
				LDSQ8			LDSB9				超覆不整合
			LDSQ7	上超	下超 削截	LDSB8	超覆不整合				
			LDSQ6		顶超 下超	T14	区域不整合				
			LDSQ5			LDSB6	超覆不整合				
			LDSQ4		顶超	LDSB5	超覆不整合				
			LDSQ3	上超	顶超	LDSB4	超覆不整合				
			LDSQ2	上超	顶超	LDSB3	超覆不整合				
			LDSQ1	上超	顶超 下超	LDSB2	超覆不整合				
				顶超 下超	T20	区域不整合	1.8 Ma				

注：“区域不整合”指整个盆地均有分布的不整合面，分布范围较广；“超覆不整合”指的是界面上下地震接触关系为上超和下超、顶超等，无削截或者分布非常有限。海平面变化数据引自文献[6-7]。

基准面上升速率从大于沉积速率到小于沉积速率，开始正常水退沉积，此时进入高位体系域发育期，并以加积式准层序组为主。

(4)FSST: 在高水位晚期，沉积基准面下降，陆上河流开始下切，河流至滨岸带遭受侵蚀或过路搬运，滨岸带以下形成强制性水退沉积，发育下降体系域，它常常与充足的沉积物供给有关，沉积物不断以进积的形式下超在高位体系域之上，并以强烈的进积式准层序组为特征。

一个完整的三级层序，由4个体系域组成，包含海侵、水退2个过程和低水位、高水位2个状态，海侵-水退旋回控制了沉积体系的时空配置，反映了一个层序地层发育的全过程。

3.1.2 体系域构成样式

体系域构成样式是指三级层序内不同体系域地层单元时空构成配置关系，又称层序构型。根据本工区的实际情况，将其划分为L型、T-H型、H型等3种类型(表2)。

表2 体系域构成样式类型

Table 2 System tract composition types

构成样式	LST	TST	HST	样式特征	层序样式类型
L型	非常发育	厚度较薄或不发育	厚度较薄或不发育	$h_{LST} > h_{TST+HST-FSST}$	
T-H型	相对不发育	较为发育	较为发育	$h_{TST} \approx h_{HST-FSST}$	
H型	相对较薄或不发育	相对较薄或不发育	非常发育	$h_{HST-FSST} > h_{LST+TST}$	

L 型层序是指层序以 LST 体系域厚度(h)为主, TST 和 HST-FSST 的体系域厚度相对比较薄甚至不发育, $h_{LST} > h_{TST+HST-FSST}$; T-H 型层序指 TST 和 HST 体系域厚度相当, LST 不甚发育, $h_{TST} \approx h_{HST}$; H 型层序指层序以 HST-FSST 体系域为主, LST 和 TST 体系域厚度薄甚至不发育, $h_{HST-FSST} > h_{LST+TST}$ 。

对于表征体系域地层单元的空间配置关系而言, 从 L-H 型层序构型则表示出体系域地层单元在叠置关系、空间分布及其迁移性特征。一般情况下, L 型层序分布范围局限, 呈进积或加积叠置样式; T 型层序分布范围增大, 呈退积叠置样式; H 型层序分布范围再次减小, 呈进积叠置样式(图 5)。

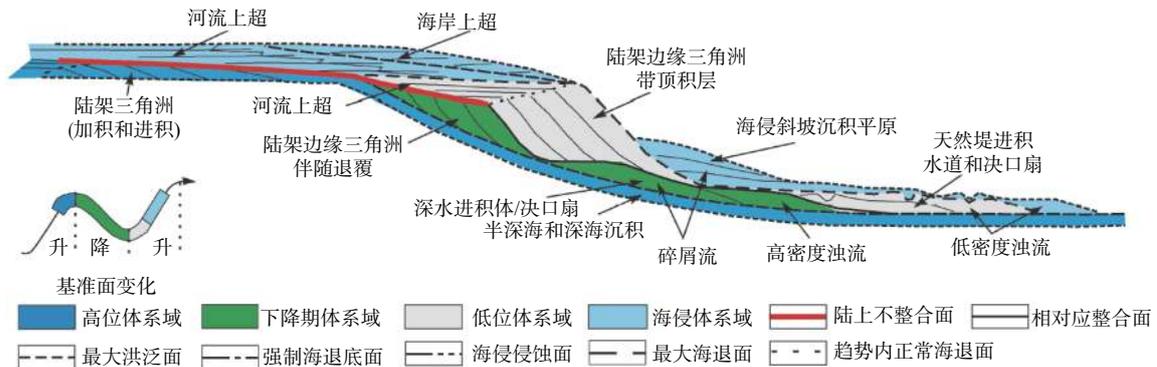


图 5 基于四分体系域模型的层序地层学模式^[10]

Fig.5 Sequence stratigraphic model based on the quadrangular system tract^[10]

3.2 层序样式及演化规律

3.2.1 乐东组下段

乐东组下段以发育大套陆架边缘-上斜坡前积地震反射为特征, 向前推进 10~30 km。陆坡区亦可见部分深海峡谷, 深度平均 30 m, 宽度平均 1~2 km(图 3)。

LDSQ1~2: 层序以进积结构为特征, HST-FSST 体系域厚度大, LST 和 TST 体系域则较薄, 层序构型为 H 型(图 6)。西部陆坡发育典型的 W 型和 U 型的深海峡谷, 宽度约 500~800 m。

LDSQ3~5: 层序依然以进积结构为特征, HST-FSST 体系域厚度大, 层序构型均为 H 型(图 6)。该时期广泛发育陆架边缘三角洲沉积体系, 可见小规模斜坡区峡谷, 深水区可见 SN 向延展较远的斜坡扇和海底扇, 范围约 4~5 km(图 3)。

LDSQ6: 层序旋回中 TST 和 HST 厚度相当, 其层序构型为 T-H 型(图 6)。LST 时期可见双向上超的强振幅-平行地震相, 指示盆地扇或斜坡扇沉积。HST 及 FSST 时期发育至少 2 期陆架边缘三角洲沉积, 体系域边界具有广泛的下超结构(图 3)。

3.2.2 乐东组上段

乐东组上段厚度整体大, 且地层以加积为主; 该时期地层西部陆架边缘-斜坡区广泛发育“W 型”和“U 型”大型峡谷体系, 深度平均 60 m, 宽度平均 1.5~2.5 km, 无论从宽度还是下切深度上, 都远远

大于之前时期; 西部峡谷多侧向的切叠迁移, 东部则垂向的切叠演化。深水区以多期 MTDs 和深水扇相互叠置堆积形成, 且 MTDs 分发育频次高、展布面积广(图 3)。

LDSQ7~9: 层序内 HST 与 LST 厚度相似, 层序构型均为 L-H 型(图 6)。该时期气候发生转变, 由热带气候转换为亚热带气候, 海平面波动幅度变大。地层叠置以加积为特征, 深水区总体以中-低连续性的杂乱地震相, 代表 MTDs 沉积体系(滑移、滑塌及碎屑流)(图 3)。

相比 LDSQ7~9, LDSQ10~14 的层序以强烈加积为特征, 层序旋回内 LST 和 HST 厚度大, 层序构型均为 L-H 型(图 7)。高水位时期, 陆架边缘体系在上斜坡容易发生滑塌, 深水区可见大规模 MTDs 体系, 沉积物的快速堆积(图 4), FSST 时期陆架边缘识别出多套退覆型陆架边缘三角洲体系, 往深海平原区输送浊积体、碎屑流舌状体及 MTDs 沉积物(图 4)。

4 对天然气水合物勘探的意义

琼东南盆地天然气水合物稳定域存在的临界水深约 600 m, 其中陆坡-海盆转换带(水深约 1 800~2 400 m)稳定域厚度大(达 400 m), 水合物勘探潜力大^[11-13]。琼东南盆地地震资料分析表明, 天然气水合物地震指示包括负极性、强振幅的似海

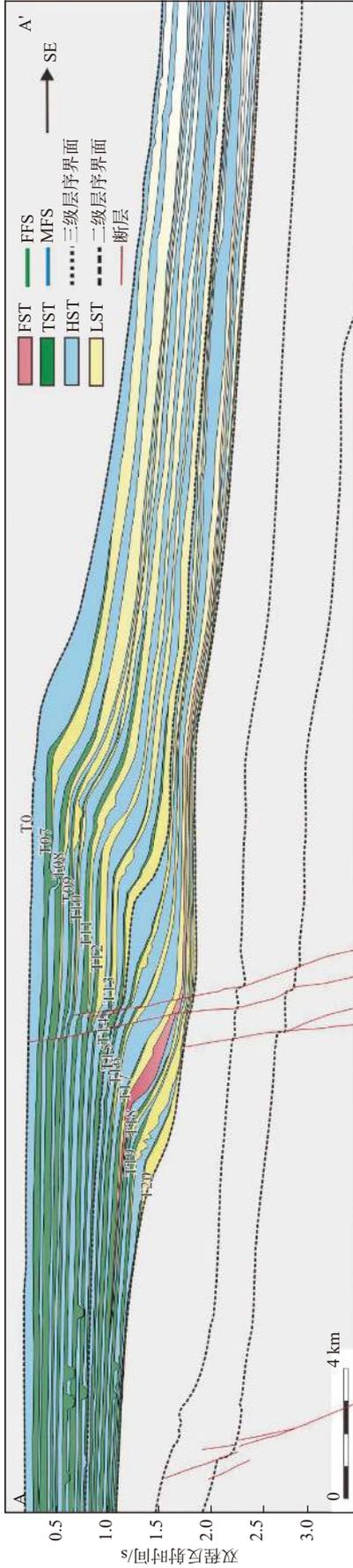


图 6 琼东南盆地乐东组顺物源方向地震剖面 A-A'体系域划分模式
 Fig.6 The system tracts along the source-direction seismic section A-A'of the Ledong Formation in the Qiongdongnan Basin

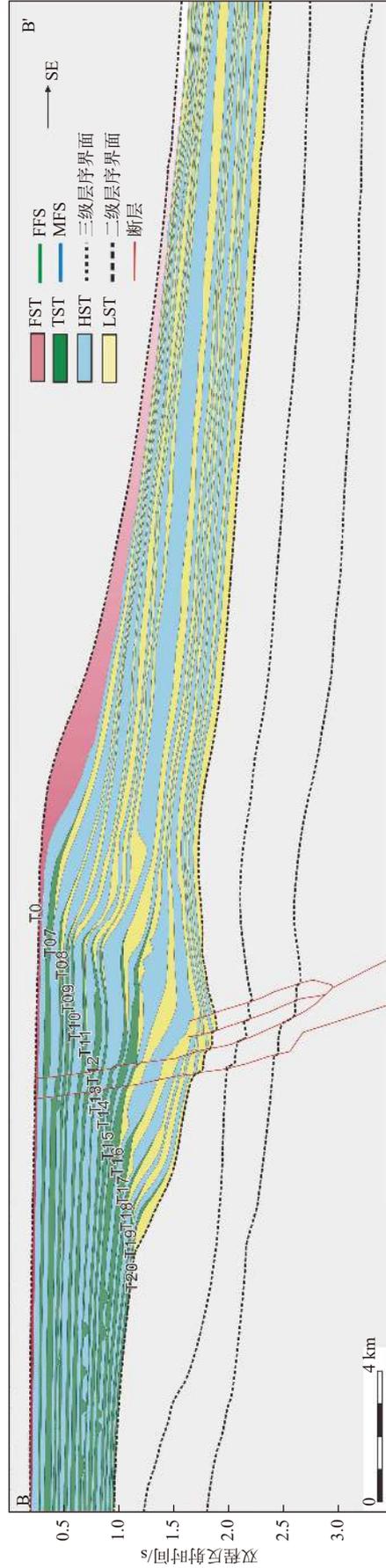


图 7 琼东南盆地乐东组顺物源方向地震剖面 B-B'体系域划分模式
 Fig.7 The system tracts along the source-direction seismic section B-B'of the Ledong Formation in the Qiongdongnan Basin

底反射标志(BSR)。这些地震响应分布在第四系乐东组中,主要对应于浊流沉积/半深海泥岩和块体流搬运沉积物(图 3、4)。前人认为琼东南盆地的天然气水合物藏主要分布在松南低凸起、陵南低凸起及乐东-陵水凹陷和松南-宝岛凹陷等地区^[14-15]。本次研究进一步指出,0.8~0.9 Ma 以来主要发育 L-H 型层序,以进积叠置样式为特征,且峡谷体系发育规模及频次增大,LST 组分占比增大。乐东组浅部层序(LD-SQ13 及 LD-SQ14)LST 易形成的水道化厚层海底扇体,应是未来水合物的勘探有利区。目前在中央峡谷气田区、松南低凸起及周缘深水海底浅层多口井已钻遇水合物及疑似水合物分解产物,证实了这些区域均有水合物赋存^[14-15]。MTDs 的存在及分布演化亦与水合物的形成关系密切,MTDs 在地震剖面上表现为乱岗状和不连续层状,MTDs 末端的碎屑流为低渗透层可作为水合物封闭层,这在松南低凸起之上的深水海底浅层的水合物勘探中已得到了充分证实^[13-14]。同时,琼东南盆地水合物勘探区具有较高的沉积速率及超压环境^[16],第四系不同层序旋回中低位体系域中潜在的砂质海底扇储层及 HST-FSST 时期发育的 MTDs 盖层为天然气水合物成藏富集提供优越的条件,是未来琼东南盆地天然气水合物勘探重要目的层段。

5 结论

(1)在经典层序地层学理论指导下,构建了琼东南盆地深水区第四系乐东组精细的层序地层格架。T14 界面将乐东组划分为乐东组下段和乐东组上段。其中乐东组下段可进一步分为 LDSQ1~6 等 6 个三级层序,乐东组上段可分为 LDSQ7~14 等 8 个三级层序。

(2)乐东组下段时期,红河物源体系沉积物供给充足,广泛发育陆架边缘三角洲加积-进积体系,向前推进 10~30 km,层序样式主要为 H 型层序。斜坡峡谷发育频率低且下切幅度较浅。

(3)乐东组上段时期,峡谷体系规模扩大且频率增大,西部峡谷以侧向切叠为主,东部则以垂向切叠为特征。地层以加积为主,层序样式主要为 L-H 型层序。

(4)琼东南盆地第四系不同层序旋回中 LST 中潜在的砂质海底扇储层及 HST-FSST 时期发育的 MTDs 低渗透层为天然气水合物成藏富集提供优越的条件;乐东组浅部 LD-SQ13 及 LD-SQ14 层序位于水合物稳定域范围内,是未来琼东南盆地天然气水合物勘探重要目的层段。

参考文献:

- [1] 程世秀,李三忠,索艳慧,等.南海北部新生代盆地群构造特征及其成因[J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(6):79-93.
- [2] 杨俊,赵彦彦,吴佳庆,等.南海中部全新世以来海山深潜区有孔虫的地球化学记录及反映的气候变化[J].海洋地质与第四纪地质,2020,40(2):100-110.
- [3] 刘莹,刘海燕,杨海长,等.琼东南盆地古近纪成煤沉积体系类型及特征[J].石油与天然气地质,2019,40(1):142-151.
- [4] MITCHUM R M. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part II: glossary of terms used in seismic stratigraphy[J]. AAPG Memoir, 1977, 26(1): 205-212.
- [5] CATUNEANU O, GALLOWAY W E, KENDALL C G, et al. Sequence stratigraphy: methodology and nomenclature[J]. *Newsletters on Stratigraphy*, 2011, 44(3): 173-245.
- [6] 杜同军.琼东南盆地层序地层和深水区沉积充填特征[D].青岛:中国海洋大学,2013.
- [7] 谢金有,祝幼华,李绪深,等.南海北部大陆架琼盆地新生代海平面变化[J].海相油气地质,2012,17(1):49-58.
- [8] 孙辉.南海西北部深水重力流沉积体系特征及其控制因素分析[D].武汉:中国地质大学(武汉),2015.
- [9] 刘招君,董清水,郭巍,等.陆相层序地层学导论与应用[M].北京:石油工业出版社,2002.
- [10] CATUNEANU O. Principles of sequence stratigraphy[M]. Amsterdam: Elsevier, 2006: 50-72.
- [11] 张伟,梁金强,陆敬安,等.琼东南盆地典型渗漏型天然气水合物成藏系统的特征与控制机制[J].天然气工业,2020,40(8):90-99.
- [12] 江定川,刘睿,赵晓明,等.琼东南盆地深水上新世以来天然气水合物稳定域时空迁移及其分布特征[J].海洋地质前沿,2021,37(7):43-51.
- [13] 姚哲,张金锋,朱继田,等.琼东南盆地深水天然气水合物运聚成藏模式[J].海洋地质前沿,2021,37(7):22-32.
- [14] YE J L, WEI J G, LIANG J Q, et al. Complex gas hydrate system in a gas chimney, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 104: 29-39.
- [15] 朱继田,邓勇,郭明刚,等.琼东南盆地盆底平原区天然气水合物成矿条件及成藏模式[J].中国海上油气,2020,32(3):1-10.
- [16] 王秀娟,靳佳澎,郭依群,等.南海北部天然气水合物富集特征及定量评价[J].地球科学,2020,46(3):10-15.

Sequence stratigraphic architecture of the Quaternary Ledong Formation in the deep-water area of the Qiongdongnan Basin and its significance to gas hydrate exploration

FANG Xiaoyu¹, YAO Zhe^{1,2}, LIAO Jin^{1,2}, GE Jiawang^{1,3*}, ZHAO Xiaoming³,
SONG Peng^{1,2}, XIANG Zhu³, MA Chang³

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

Abstract: The Quaternary Ledong Formation in the deep-water area of the Qiongdongnan Basin is a proven gas hydrate enriched zone in the northern South China Sea. The sequence stratigraphic architecture, depositional patterns, and their influences on the gas hydrate stability, migration and accumulation have become hot topics internationally and attracted great attention from the geological society of the region. Based on the theory of sequence stratigraphy, and combined with the high-resolution seismic surveys in the working area, a detailed sequence stratigraphic framework of the Quaternary Ledong Formation is established in this paper, which includes 4 second-order sequence boundaries and 13 third-order sequence boundaries. In addition, the maximum flooding surface (MFS), first flooding surface (FTS) and maximum regression surface (MRS) are also identified. The third level of sequence is further divided into system tracts. Since 1.8 Ma, the Red River provenance system has supplied sufficient sediments to the basin, which led to the progradation of deltaic deposits of Lower Ledong Formation, and a sequence of H-type was formed. In the upper part of Ledong Formation, however, the stratigraphic sequence is dominated by an accretionary architecture, and the sequence style was mainly of L-H type. Finally, this paper established the depositional model under the constraints of the sequence framework, and discussed the deltaic-gravity flow related deposits in the study area. This study has provided an important clue for prediction and exploration of natural gas hydrate in the future.

Key words: Qiongdongnan Basin; Ledong Formation; sequence stratigraphy; system tract; sequence architecture