

# 琼东南盆地新近纪构造沉降特征 对 BSR 分布的影响

李胜利<sup>1</sup> 沙志彬<sup>2</sup> 于兴河<sup>1</sup> 丛晓荣<sup>1</sup> 姜龙燕<sup>1</sup> 王建忠<sup>1</sup> 方竞男<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083; 2. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760)

**摘要:** 琼东南盆地陆坡深水区晚中新世以来的地层中有比较明显的 BSR (似海底反射) 分布。由于 BSR 是识别天然气水合物存在与否的重要地球物理参考标志, 而构造变动是影响其分布的重要因素之一。本文结合南海发生的构造运动以及全球和莺—琼盆地海平面相对变化, 以 11.6 Ma, 5.3 Ma 和 1.8 Ma 3 个时间点为界, 将琼东南深水区晚中新世以来的地层划分为 3 个层, 自下而上分别为层序 III、层序 II、层序 I。通过对工区二维地震资料 301 个虚拟点进行盆地模拟, 结果表明, 3 个层序存在构造沉降加速的过程。其中层序 III 构造沉降速率变化相对最为缓慢, 层序 II 构造沉降速率整体增大, 同时其变化加剧; 层序 I 构造沉降速率变化剧烈, 最高沉降速率增至 170 m/Ma。但是 5.3 Ma 以来的构造沉降加速在时空上存在东西的差异。空间上构造沉降速率呈周边向中心地带递增的规律。研究区 BSR 主要分布在各凹陷与凸起次级构造单元相接、构造沉降速率在 70~110 m/Ma 且变化迅速的区域。

**关键词:** 琼东南盆地深水区; BSR 分布; 构造沉降速率; 中新世—全新世; 定量模拟

**中图分类号:** P544+.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2013)01-0163-13

## 1 前言

南海北部陆坡地区蕴含丰富的天然气水合物资源<sup>[1-6]</sup>。BSR (似海底反射) 作为天然气水合物聚集最有意义的地球物理标志, 通常指示天然气水合物相位稳定的底部反射特征<sup>[7-10]</sup>。琼东南盆地是南海北部重要的新生代盆地之一, 前人的研究业已证明, 该盆地具有天然气水合物生成与富集的基本条件<sup>[11-12]</sup>。研究证实 BSR 与构造升降、沉积层厚度、孔隙度、饱和度、含碳量及下部可能存在的游离气等因素的影响<sup>[13-15]</sup>, 也可能会受到地球物理处理中的误差影响<sup>[15]</sup>。前人业已在构造沉降或者 BSR 的影响因素等单方面工作上对琼东南盆地进行过较为系统的研究<sup>[11-20]</sup>, 但未曾就 BSR 与沉降的关系进行过细致的分析。在南海北部陆缘, BSR 主要分布在晚中新世以来的新近系地层

中, 为了更好地进行对该地区天然气水合物矿藏的研究, 有必要对这个时期的构造沉降史及其如何影响 BSR 的分布进行分析与研究。

本文依据 24 条二维地震剖面采集的数据, 在主测线与联络测线上每隔 10 km 左右取 1 个点, 选取琼东南深水区 301 个模拟点 (图 1) 进行盆地模拟, 研究不同构造区带剖面与平面构造沉降速率的变化, 探讨研究区构造沉降的时空演变规律, 最后将 BSR 分布图与构造沉降速率图叠加, 进而探讨琼东南深水区 BSR 分布与构造沉降之间的相互关系。

## 2 工区地理背景

琼东南盆地位于南海北部陆缘, 海南岛的东南部, 东经 108~111°、北纬 15~19°。盆地呈北东向伸展, 由北部箕状拗陷带、中央裂陷带和南部隆起区三

收稿日期: 2012-06-01; 改回日期: 2013-01-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目 (2009CB219502) 和国家自然科学基金 (41072084、41272132) 共同资助。

作者简介: 李胜利, 男, 1971 年生, 副教授, 硕士生导师, 主要从事油气储层沉积学与建模技术、含油气盆地分析与模拟的科研与教学工作; E-mail: slli@cugb.edu.cn。



图1 工区地理位置与构造区划图 (据佟殿君等,2009 修改)

Fig.1 Location and regional tectonic units in the study area (modified after Gong Zaisheng, 2004)

大部分组成,是一个在前新生界基底上发育起来的新生代陆缘拉张型盆地<sup>[11,21-24]</sup>。本文中的深水指位于陆架坡折向海一侧包括陆坡、陆隆和深海平原的深水环境(水深>200 m)<sup>[25]</sup>。根据这个深水概念,琼东南盆地深水区包括中央裂陷大部 and 南部隆起区。主要的次级构造有乐东凹陷、陵水凹陷、宝岛凹陷、松南凹陷、北礁凹陷、长昌凹陷 6 个凹陷,甘泉西凸起、永隆凸起两个凸起,以及陵南低凸起、松南低凸起两个低凸起(图 1)。

研究区由于缺乏钻井资料,依赖于二维地震资料。为了更加深入地研究琼东南深水区晚中新世以来的构造沉降及其与 BSR 的关系,结合南海发生的构

造运动以及全球和莺琼盆地海平面相对变化,在琼东南深水区识别出晚中新世以来的 3 个层序界面:自下而上分别为  $T_3$ 、 $T_2$  和  $T_1$ ,对应的的时间分别是 11.6 Ma、5.3 Ma、1.8 Ma(图 2)。相应的,自下而上可识别出层序 III、层序 II、层序 I 三个地层层序<sup>[26]</sup>,即本研究区的目的层位,大致对应于黄流组、莺歌海组及乐东组(表 1)。这 3 个层序界面中  $T_3$  界面对应于东沙运动,以不整合为主要特征; $T_2$  界面的形成是海平面变化和构造运动的综合结果,界面也以不整合接触为特征;更新世以来虽然在地质历史时期南海曾发生过两次较大规模的冰期事件,即里斯冰期(约 1 Ma)和玉木冰期(0.2~0.5 Ma),但由于冰期事件的

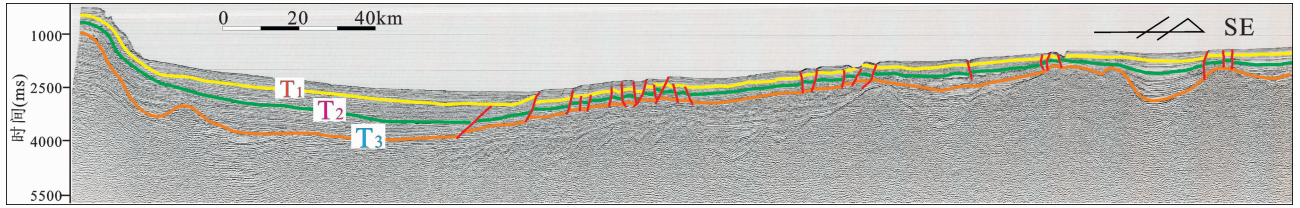


图 2 BB'地震剖面层序划分

T<sub>1</sub>—层序 I 的底界面;T<sub>2</sub>—层序 II 的底界面;T<sub>3</sub>—层序 III 的底界面

Fig.2 Sequence division of seismic profile BB'

(T<sub>1</sub>—Bottom surface of Sequence I ; T<sub>2</sub>—Bottom surface of Sequence II ; T<sub>3</sub>—Bottom surface of Sequence III)

表 1 研究区地层与层序划分

Table 1 Stratigraphic and sequence division in the study area

系	地层			年龄/Ma	地震界面	层序	层序界面特征	沉积相	相对海平面			构造运动
	统	组	段						200	100	0(m)	
新近系	全新统	乐东组		1.8	T <sub>1</sub>	I	地震同向轴出现较强反射,连续性较好,可连续追踪	浅海—半深海相				
	更新统											
	上新统	莺歌海组		5.3	T <sub>2</sub>	II	可连续追踪,同轴时可见区域不整合,局部区域出现超覆削截现象					
新近系	中	黄流组		11.6	T <sub>3</sub>	III	同向轴具较强反射,连续性较好,可连续追踪,可见区域不整合,盆地中心附近见整合接触	滨海相(浅水台地亚相)			东沙运动	
	新		梅山组									
古近系	渐新统	陵水组	一	23.3				滨海浅海相、扇三角洲亚相			南海运动	
			二									
	上新统	三	28.4									

层序界面影响作用和构造运动对层序界面影响作用相对来说小得多,所以仅根据冰期事件很难识别出明显的层序界面。T<sub>1</sub>界面主要依据地震剖面的上超进行识别。

### 3 构造沉降计算方法

沉降史决定了盆地的大小、几何形态及构造特

征<sup>[27]</sup>。总沉降可分为构造沉降和负载沉降两大部分,可用沉积厚度及其之上的古水深表示<sup>[28]</sup>,即:

$$\text{总沉降}(D_B) = \text{负载沉降}(D_L) + \text{构造沉降}(D_T) = \text{古水深}(W_d) + \text{沉积层厚度}(H) \quad (1)$$

利用(1)式可以求取构造沉降量,需要注意的是,式中的 H 代表的是初始沉积物厚度,也即未经

压实的沉积层厚度。沉降过程受构造作用、上覆沉积物和古水深的影响，要较准确地计算盆地的构造沉降量，须对式中相关各参数进行校正。

### 3.1 负载沉降的计算

当盆地基底因产生沉降时，地壳表面形成的空间早期将由水来充填。由于沉积作用，这些水域全部或部分由沉积物取代<sup>[29]</sup>。由于密度的增加，地壳表面将产生一定的负载沉降(DL)，从而达到地壳变形后的均衡<sup>[27]</sup>。据 Airy 均衡模型推导，便可以得到负载沉降幅度的计算公式：

$$D_L = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_m - \rho_w} \times H \quad (2)$$

其中  $D_L$  为负载沉降量 (m)， $H$  为原始地层厚度 (m)， $\rho_w$ 、 $\rho_s$ 、 $\rho_m$  分别代表水、沉积物及地幔的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )，本次研究中取  $\rho_m$  值为  $3.3 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

### 3.2 古水深校正

水深较浅时其对构造沉降的作用可忽略，但当水深达数百至千米之上时，巨大的水压对基底的作用力便不可忽略<sup>[31]</sup>。南海北部陆坡在中新世已经成为海相沉积<sup>[21,33]</sup>，至晚中新世时已为浅海—深海环境 (表 1)，水深的影响已经不可忽略，需要进行计算。古水深可通过沉积相、古生物组合等资料进行估算。但是由于研究区位于南海北部古大陆坡上计算的时间跨度比较小，所以本次研究中参考林畅松计算莺琼盆地盆地沉降曲线的方法<sup>[28]</sup>，取 28.4 Ma 初始海泛时间的水深为 0 值 (表 1)<sup>[30]</sup>，其后按线性增加处理，插值求取各目的层位的古水深<sup>[21]</sup>，差值公式为：

$$h_m = h_w \times \frac{28.4 - y_i}{28.4} \quad (3)$$

其中， $y_i$  表示第  $i$  个百万年， $h_w$  表示  $i \text{ Ma}$  时对应的水深 (m)， $h_m$  表示该点的现今水深 (m)。值得一提的是，由于海平面的升降会造成古水深的变化，构造沉降计算的过程中还需要进行海平面升降的校正。但是晚中新世以来，琼东南的海平面变化较小，相对于上千米的水深微不足道，因此研究过程中可以忽略该因素的影响。

### 3.3 地层的去压实校正

为了得到原始的沉积厚度  $H$ ，需将地层厚度通过计算还原为初始沉积时的厚度，即去压实校正。国际上普遍应用“回剥法”来得到地层的原始厚度值<sup>[27]</sup>。在正常压实情况下，一般认为沉积物孔隙度和埋深呈指数关系<sup>[34]</sup>，即：

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-CY) \quad (4)$$

式中， $\Phi$  为深度  $Y$  处的孔隙度 (小数)； $\Phi_0$  为地表孔隙度 (小数)； $C$  为压实系数 (单位)； $Y$  为深度 (单位  $\text{m}^{-1}$ )。本公式为单一岩性的计算公式，混合岩性的按比例通过加权的方法近似即可求出。最终的去压实厚度方程为<sup>[29]</sup>：

$$H = y_2 - y_1 - \frac{\Phi_0}{c} [(e^{-cy_1} - e^{-cy_2}) + (e^{-cy_1'} - e^{-cy_2'})] \quad (5)$$

其中  $y_1$ 、 $y_2$  分别为某一地层的现今顶底埋深， $y_1'$ 、 $y_2'$  分别对应于地层上移后的埋深 (图 3)。和  $c$  与岩性有关，目前国际上对其已有比较成熟的定量值，本文根据研究区情况选用 Hegarty 在 1988 年提出的定量值<sup>[35]</sup> (表 2)。

### 3.4 构造沉降量与速率的计算

将 (2) 和 (3) 以及由 (5) 计算的去压实后的沉积层厚度值代入 (1) 中经过变形可得到本次求取构造沉降量的一般公式：

$$D_T = \frac{\overline{\rho_s} - \rho_w}{\rho_m - \rho_w} \times H + h_w \times \frac{28.4 - y_i}{28.4} \quad (6)$$

式中  $\overline{\rho_s}$  为地层中各岩性密度的平均值，参考他人计算南海区域构造沉降特征的取值<sup>[36,37]</sup>，取砂岩密度为  $2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、泥岩密度为  $2.7 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。而构造沉降速率通过构造沉降量与时间之比即可求出。

## 4 沉降史及其与 BSR 的关系

如前所述，琼东南盆地深水区钻井资料较少，但二维地震测线覆盖广。因此，从主测线和联络测线中选出 301 个虚拟点，按照点—线—面的研究思路，根

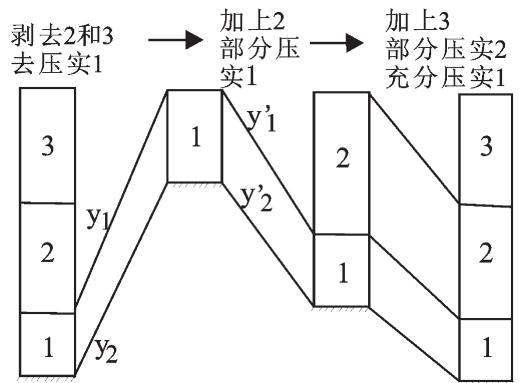


图 3 连续去压实概念模型 (据 Allen P A 和 Allen J R, 1990)

Fig.3 Conceptual model of continuous compaction (after Allen P A and Allen J R, 1990)

表 2 不同岩性的压实系数与地表孔隙度(据 Hegarty et al., 1988 修改)

Table 2 Compacting factor and surface porosity of different lithologies (modified after Hegarty et al., 1988)

岩性	砂岩	粉砂岩	灰质粉砂岩	砂屑灰岩	微晶灰岩	泥岩
压实系数 $C/(10^{-3}m^{-1})$	0.4	0.33	0.2	0.56	0.41	0.7
地表孔隙度/%	45	55	41	42	30	60

据上述计算方法, 定量计算各点的构造沉降量及构造沉降速率。

### 4.1 虚拟井点沉降史埋藏史分析

沉降史图可以很直观地反映出某点在整个地质时间内沉降的变化情况。从次级构造中选取 8 个代表虚拟点(井位见图 1)绘制埋藏史与沉降史图(图 4), 这 8 个点基本平均分配在工区范围内并且处于该点所在次级构造单元的中心位置, 能较准确地反映所处次级构造单元的沉降史、埋藏史。

位于乐东凹陷内的 Q1 点(图 4)以 5.3 Ma 和 1.8 Ma 为转折点, 呈现不明显的三段式加速沉降。其中 1.8 Ma 以来构造沉降明显加速。位于陵水凹陷的 Q2 点和位于工区中部北礁凹陷内的 Q5 点的构

造沉降速率都无明显的变化, 一直呈平稳态势。位于宝岛凹陷的 Q3 点、长昌凹陷的 Q4 点、位于南部华光凹陷的 Q6 点以及甘泉西凸起的 Q7 点以 5.3 Ma 为界呈现慢—快两段式的构造沉降特点。位于永乐凸起的 Q8 点以 5.3 Ma 和 1.8 Ma 两点为界, 呈现慢—快—慢的构造沉降特点。只是永乐凸起内在 1.8 Ma 以来构造沉降速率略有减小。总体而言, 晚中新世以来, 琼东南深水区的构造沉降呈缓慢加速状态。空间上, 乐东凹陷部位的构造沉降速率的加速过程较之于其他构造部位快, 愈往东、往南, 构造沉降速率的变化愈不明显, 呈现空间上西部变化快、东部变化慢, 北部变化快、南部变化慢的特点。这种不均匀的分布情况反映了琼东南深水区各次级构造单

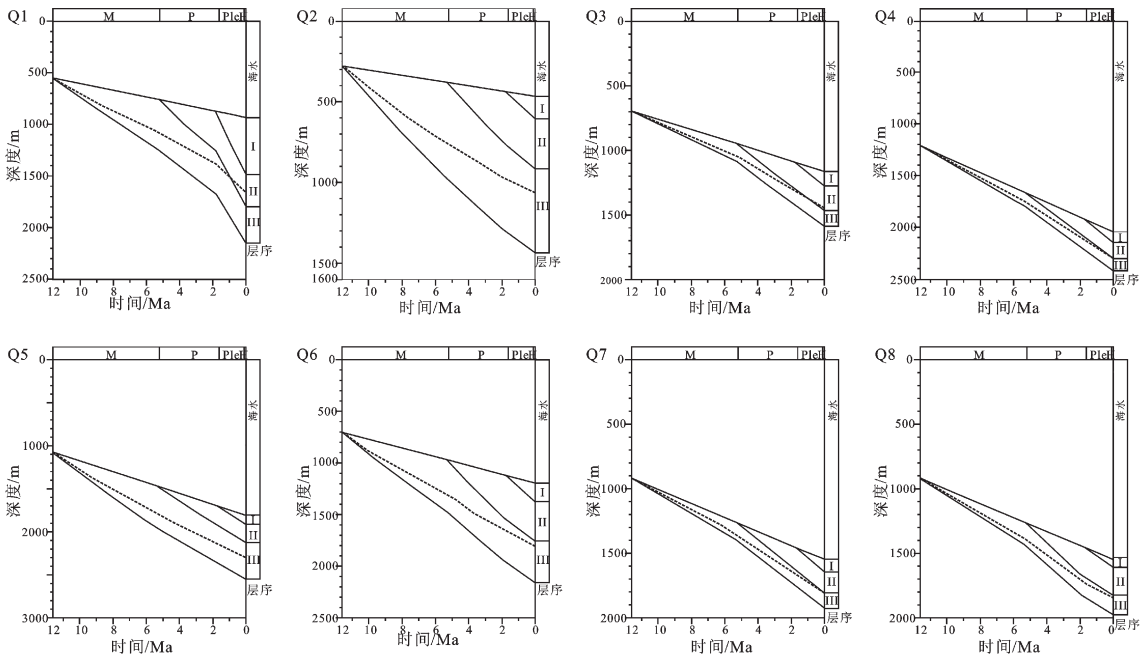


图 4 琼东南深水区中南部单井埋藏史与构造沉降史曲线(虚线表示构造沉降曲线, 其斜率为构造沉降速率) Q1~Q8 位置见图 1

Fig.4 The single well burial history and tectonic subsidence history curve in central and southern deep water area of Qiongdongnan Basin (dotted line indicates the tectonic subsidence curve, its slope indicates the tectonic subsidence rate)

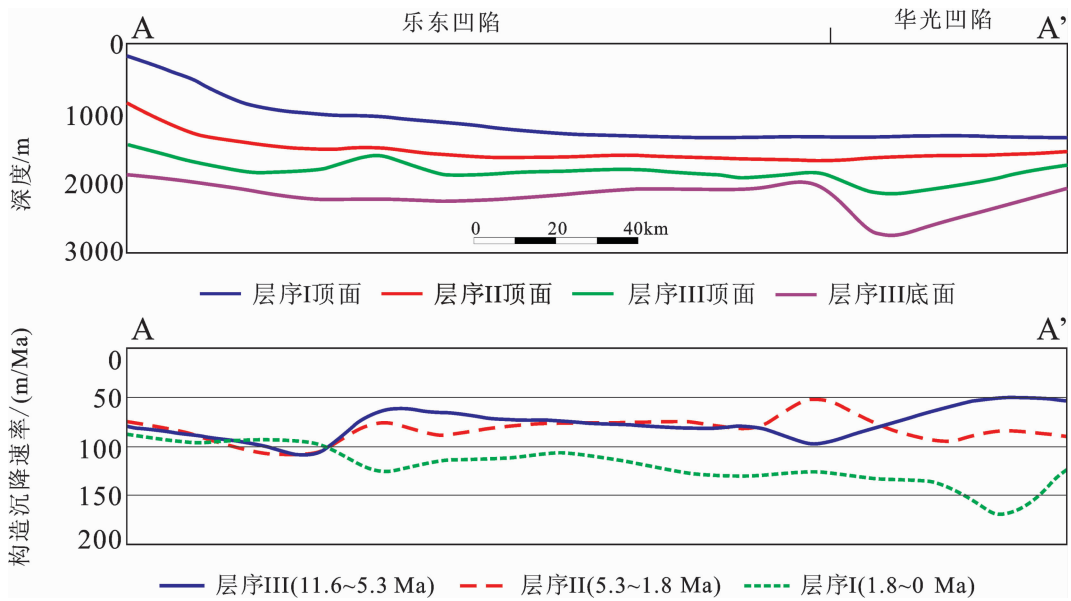


图5 AA'剖面地层格架与不同时期构造沉降速率变化图

Fig.5 Stratigraphic framework and changes of tectonic subsidence rate of profile AA' in different periods

元受构造运动影响程度的不同。

#### 4.2 典型剖面沉降史分析

从工区的纵向和横向上共选取4条剖面AA'、BB'、CC'和DD'(各剖面地理位置见图1)进行构造沉降速率的计算,分析研究区纵向及横向上的构造沉降变化特征。

AA'剖面自乐东凹陷的中部偏北地带向南经过华光凹陷西部(图5)。11.6 Ma以来,乐东凹陷的构造沉降活动较活跃,速率一直呈现波动状态,层序I以来构造沉降速率迅猛增加,最高值可达170 m/Ma,说明乐东凹陷在层序I时期进入了快速沉降的状态。沉降加速从北向南减小,至华光凹陷境内时,沉降加速过程消失。与乐东凹陷不同,华光凹陷的构造沉降速率一直保持着相对稳定状态。在层序II与层序III中,研究区西部的构造沉降中心位于华光凹陷内,之后转移至乐东凹陷中部偏北的地带。

BB'剖面位于琼东南盆地中部偏北的地方,横穿宝岛凹陷、松南低凸起、北礁凹陷和永乐凸起,跨越中央裂陷区和南部隆起区两大二级构造单元(图6)。就构造沉降速率分布而言,该剖面大致可以分为3段:西北部的宝岛凹陷与松南低凸起部分的快速沉降区,中部北礁凹陷与永乐凸起大部分地区的缓慢沉降区以及永乐凸起东南部的异常快速沉降区。初始沉降中心位于宝岛凹陷境内,之后一直向东南

方向转移。更新世以来,中央裂陷带与永乐凸起接触地带构造沉降明显加速,至全新世,沉降中心转至北礁凹陷与永乐凸起接触的地带。

CC'剖面位于工区东北部边界,横穿长昌凹陷,向南延伸值永乐凸起西部边界处(图7)。该剖面所经过地区的构造活动比较活跃,沉降速率一直呈上升趋势。长昌凹陷内的构造沉降速率变化较之永乐凸起要强烈一些,但其北部的构造沉降速率一直较小,接近永乐凸起的西南部地区构造沉降速率较大,一直维持在100 m/Ma以上。整体来看,层序I的构造沉降速率的涨幅明显超过之前两个时期。

DD'剖面横穿中央裂陷带的大部分次级构造(图8)。中央裂陷带的构造沉降速率一直比较高且呈增长的趋势,最低值不曾小于60 m/Ma,更新世以来(层序I以来),大部分地区的构造沉降出现了加速,只有陵水凹陷和松南低凸起交界地带出现了速率的下降。在1.8 Ma之前,构造沉降速率从西向东增大,沉降中心位于长昌凹陷境内。之后,沉降中心转移至乐东凹陷境内。整体上,琼东南地区晚中新世以来的沉降在时间上也有差异性,西早东晚,其中西部乐东凹陷自晚中新世开始加速沉降,而中东部自上新世才开始<sup>[20]</sup>。

对比4条剖面可以看出:空间上AA'剖面与BB'剖面经历了相似的演化过程,即由北向南构造

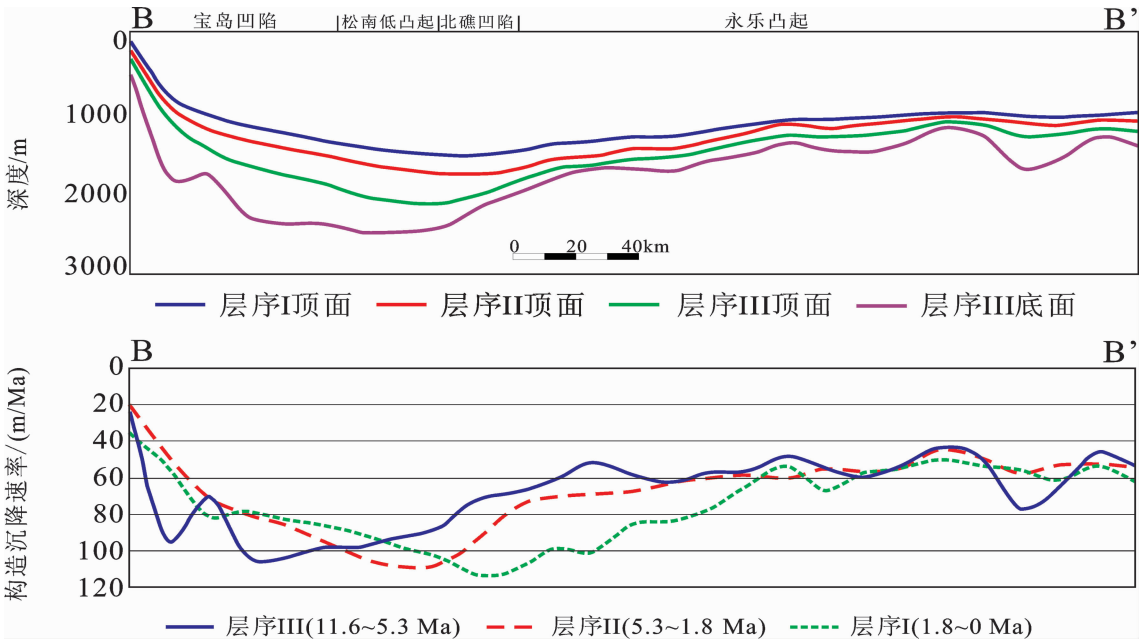


图 6 BB'剖面地层格架与不同时期构造沉降速率变化图

Fig.6 Stratigraphic framework and changes of tectonic subsidence rate of profile BB' in different periods

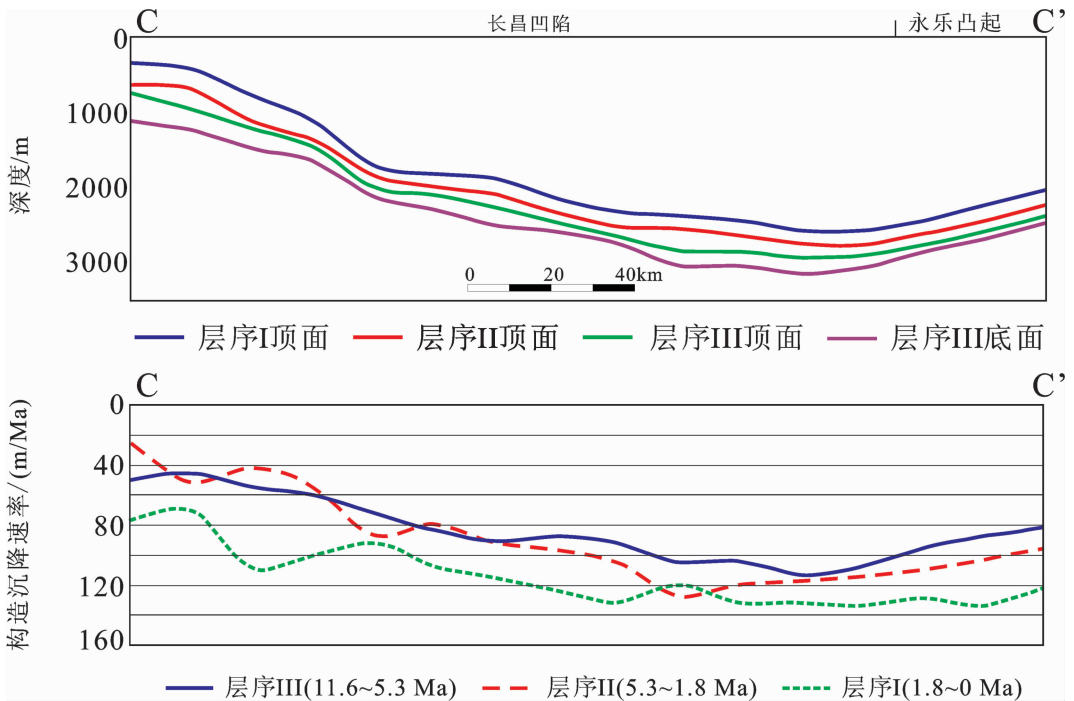


图 7 CC'剖面地层格架与不同时期构造沉降速率变化图

Fig.7 Stratigraphic framework and changes of tectonic subsidence rate of profile CC' in different periods

沉降速率逐渐降低,CC'剖面则与之相反,呈现了由北向南构造沉降速率逐渐增加的过程,原因可能是前两条剖面靠近莺歌海盆地,受红河走滑运动影响较为强烈,而 CC'剖面靠近珠江口盆地,其南部受

到东沙运动影响进而构造沉降相对强烈。DD'剖面各构造单元构造沉降速率无甚区别。时间上各剖面大致经历了相似的演化过程,代表了 3 期构造沉降事件,反映了层序 II,层序 I 时期构造沉降加速的过

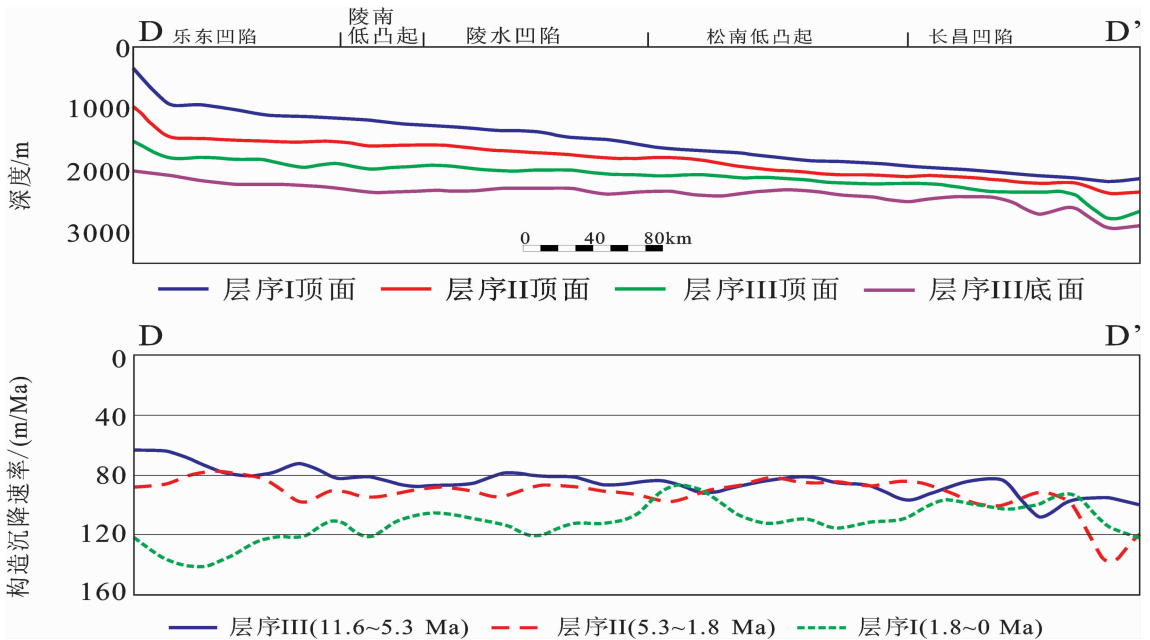


图 8 DD' 剖面地层格架与不同时期构造沉降速率变化图

Fig.8 Stratigraphic framework and changes of tectonic subsidence rate of profile DD' in different periods

程,而以层序 I 时期更为明显。

#### 4.3 构造沉降速率与 BSR 的平面分布

构造沉降方面,对于这 3 套地层,时间上:晚中新世期间(11.6~5.3 Ma)(图 9-A)构造沉降速率变化最为缓慢,沉降中心位于东南部的甘泉西凸起与东北部的长昌凹陷地区。上新统(5.3 Ma)以来(图 9-B)构造沉降速率整体增大的同时,变化强度越来越剧烈,东南部地沉降中心向西南部转移。至更新统与全新统之时(图 9-C),进入了新一轮的加速沉降期,构造沉降速率变化剧烈,最高沉降速率增至 170 m/Ma,沉降中心转移至西南部的乐东凹陷境内与长昌凹陷西北部近边界处。

空间上:研究区的构造沉降速率呈周边向中心地带递增的规律。中央裂陷带(尤其是 1.8 Ma 以来)的构造沉降速率变化较之南部隆起区要快。而中央裂陷带与南部隆起之间的区域,构造沉降一直维持处于快速沉降状态。

在 BSR 方面。综观全区,BSR 在 3 套地层中都有所分布,皆沿研究区长轴方向,对应的速率范围比较广,从 30 m/Ma 到 120 m/Ma 之间皆有分布,其中主要是 70~110 m/Ma 的各凹陷与凸起次级构造单元相接的地带(图 9)。这是由于沉积盆地坳陷接合部位往往是断层和褶皱发育的有利部位,这里有很

多断层切穿下部的沉积层并延伸至海底沉积层附近,这样可为下部天然气向浅部运移开辟有利通道。褶皱构造易于天然气的捕获,进而形成水合物矿藏。另外坳陷接合部位,不仅断层发育,而且沉积岩性偏粗,为气体侧向运移提供了良好的疏导系统。另外,要想在地震剖面上看到 BSR,需要其下伏地层中含有一定的游离气<sup>[9]</sup>。而后续构造运动会对其之前形成的地层产生影响,释放其中的游离气。所以,在目前研究的这 3 套地层中,层序 III 对应的地层中分布着远多于其他两层的 BSR。1.8 Ma 以来的构造加速对层序 II 的地层起了较大的破坏作用,导致该套层序中几乎识别不出 BSR。

## 5 讨论

### 5.1 断裂演化对构造沉降的影响

琼东南盆地晚中新世以来的构造沉降主要与红河走滑断裂有关。红河走滑断裂从约 58 Ma 开始左旋走滑,左旋走滑持续到 10~5 Ma,之后开始转变为右旋走滑<sup>[20]</sup>。5.3~4.7 Ma 右旋走滑活动进入高潮<sup>[38]</sup>。10~5.3 Ma 以来加速沉降与红河断裂的右旋走滑运动更为对应,红河断裂晚期右旋走滑活动对盆地构造沉降影响由西往东逐渐减弱。琼东南盆地 12~5.3 Ma 以来的晚期快速沉降过程由西往东逐渐减弱,离红河



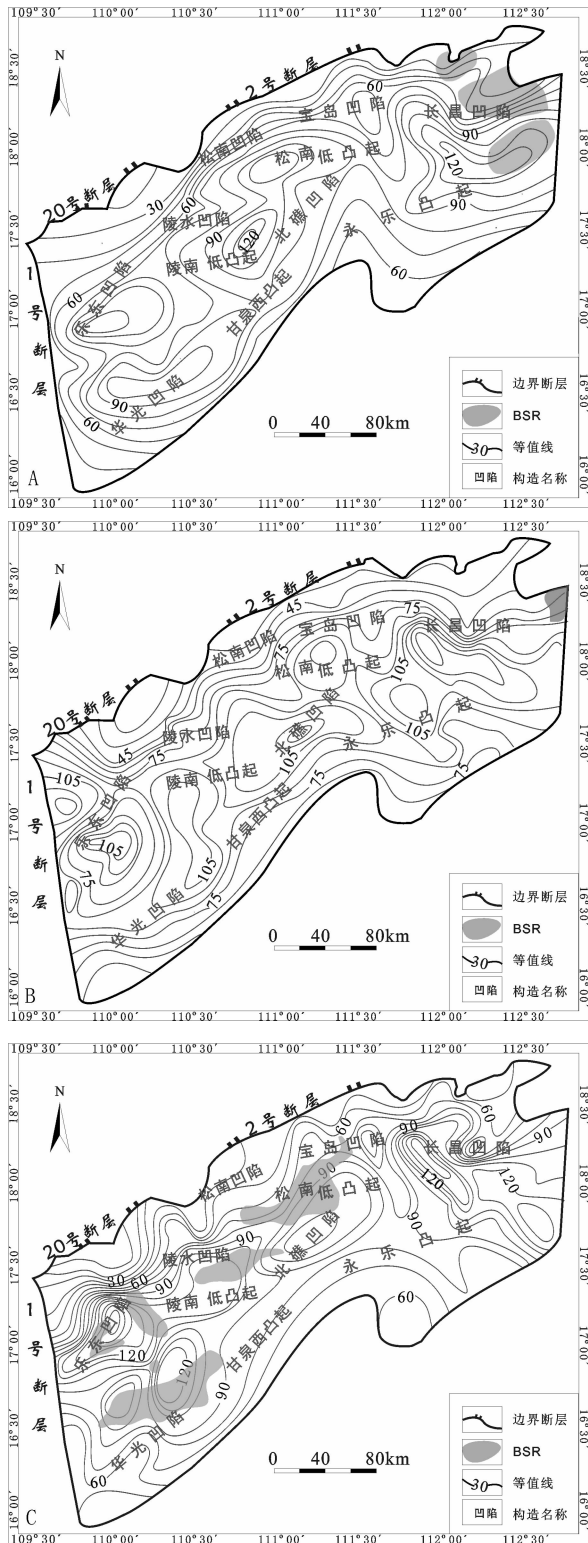


图 9 琼东南深水区不同时段构造沉降速率与 BSR 分布平面图

A—11.6~5.3 Ma; B—5.3~1.8 Ma; C—1.8~0 Ma

Fig.9 Different periods of tectonic subsidence rate in deep water area of Qiongdongnan Basin

A—11.6~5.3 Ma; B—5.3~1.8 Ma; C—1.8~0 Ma

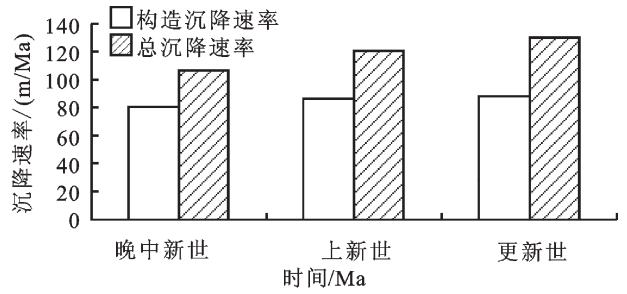


图 10 构造沉降与总沉降速率关系图

Fig.10 Relationship between tectonic subsidence rate and total subsidence rate

断裂越近的地区,晚期加速沉降越强烈,这进一步反映了红河走滑断裂对琼东南盆地构造沉降的影响。此期间,盆地的东部也受到菲律宾板块 NWW 向的推挤作用,使得东部的构造沉降作用并不逊色于西部<sup>[40]</sup>。5 Ma 以来,在红河断裂走滑的基础上,吕宋岛弧向欧亚大陆及南海构造域碰撞,产生了密集的近东西向张性、张剪性断裂<sup>[41]</sup>,加剧了构造沉降的幅度。层序 I 以来的构造沉降的加速过程可能与区域性的幔源基性岩浆喷发活动有关<sup>[41]</sup>。

### 5.2 琼东南深水区构造沉降与总沉降的关系以及分布特点

用前述方法计算了工区平均构造沉降速率与平均总沉降速率,发现构造沉降速率在琼东南盆地深水区的一直占总沉降速率的 60%以上(图 10),在整个盆地的总沉降过程中起着主导的作用。构造沉降表现为从边缘向中心逐渐递增的过程(图 10)。西北部和东北部构造沉降速率变化剧烈,中间地带变化缓慢。沉降速率的变化存在空间上的差异,西快东慢,边缘部位较之中间部位要快。从时间上看,总沉降速率与构造沉降速率差值越来越大表明盆地慢慢由构造沉降阶段向热沉降阶段演化的过程。

### 5.3 构造沉降与 BSR 的关系

BSR 主要分布在研究区中部次级构造单元的交界地带或者次级构造的中心地带。交界地带以断裂为主的多重构造影响再加之大陆边缘陆坡的控制作用,能够为天然气水合物的气源运移、最终形成储藏提供优越条件<sup>[12]</sup>。构造中心一般是沉降最快的地方。盆地的快速沉降促成了巨厚的富泥质沉积物的充填,加之高热流导致了规模巨大的异常压力体系形成,并在其周围常压区形成了气藏<sup>[41]</sup>。中西部地区 5.3 Ma 以来的持续平稳沉降为与天然气水合物有关

表 3 深水区各构造沉降参数与 BSR 对应关系  
Table 3 Relationship between parameters of the tectonic subsidence in deep water and the BSR

地层年代	更/全新统	上新统	上中新统
沉降量/m	120~225	210~300	300~700
沉降速率/(m/Ma)	70~140	70~110	50~100

的 BSR 的形成提供了有利条件。值得注意的是,BSR 与天然气水合物并不是完全对应的,没有 BSR 的地方也可能有天然气水合物。当海底产状与地层产状不一致时,BSR 也有可能是某种岩性界面<sup>[14,42-43]</sup>。

另外,BSR 的分布对构造沉降速率范围也有一定的要求<sup>[44]</sup>,从本区的研究来看它可以出现在较大的构造沉降速率范围内,但是主要出现构造沉降速率在 70~110 m/Ma 范围内(表 3)。过低的构造沉降速率不能提供足够的可容纳空间,过高的沉降速率则会导致气体的散逸,皆不利于对应于天然气水合物的 BSR 的形成。

## 6 结 论

(1)晚中新世以来,琼东南深水区可识别出 3 套地层层序,从下至上,各层序的沉降速率呈逐渐加速的趋势,且构造沉降加速的规律在时空上存在着较大的差异。

(2)不同构造单元构造沉降规律有所差异,伴随沉降中心的迁移,中央裂陷带与南部隆起之间的区域,一直维持着较高的构造沉降速率。其中,更新世以来(层序 I 以来),研究区大部分区域的构造沉降出现了加速,这为天然气水合物的保存提供了有利条件。

(3)晚中新世以来,红河断裂的右旋走滑活动是造成盆地构造沉降由西往东逐渐减弱的主要原因。

(4)次级构造单元中部以及交界地带构造沉降变化迅速。由于这些地带的沉降速率变化较快,断层等发育,可以提供良好的运移通道,构造沉降速率的快速变化有利于 BSR 的形成。较高的构造沉降速率有利于提供充足的容纳空间。

**致谢:**广州海洋地质调查局的梁金强、王宏斌等为此研究提供了相关资料与帮助,在此一并表示感谢!

## 参考文献 (References):

[1] 于兴河,张志杰,苏新,等.中国南海天然气水合物沉积成藏条件初探及其分布[J].地学前缘,2004,11(1):311-315.

Yu Xinghe, Zhang Zhijie, Su Xin, et al. Primary discussion on accumulation conditions for sedimentation of gas hydrate and its distribution in south China sea[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11 (1):311-315(in Chinese with English abstract).

[2] 姚伯初,杨木壮,吴时国,等.中国海域的天然气水合物资源[J].现代地质,2008,22(3):333-341.

Yao Bochu, Yang Muzhuang, Wu Shiguo, et al. The gas hydrate resources in the China seas[J]. Geoscience, 2008, 22(3):333-341(in Chinese with English abstract).

[3] 姚伯初.南海北部陆缘天然气水合物初探[J].海洋地质与第四纪地质,1998,18(4):11-18.

Yao Bochu. Preliminary exploration of gas hydrate in the northern margin of the south China sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1998, 18(4):11-18(in Chinese with English abstract).

[4] 祝有海,吴必豪,卢振权.中国近海天然气水合物找矿前景[J].矿床地质,2001,20(2):174-180.

Zhu Youhai, Wu Bihao, Lu Zhenquan. The Prospecting for Gas Hydrate Offshore China[J]. Mineral Deposits, 2001, 20(2):174-180 (in Chinese with English abstract).

[5] Wu S, Zhang G, Huang Y, et al. Gas hydrate occurrence on the continent sope of the northern South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2005, 22:403-412.

[6] 杨木壮,潘安定,沙志彬.陆缘地区天然气水合物成藏地质模式[J].海洋地质与第四纪地质,2010,30(6):85-90.

Yang Muzhuang, Pan Anding, Sha Zhibin. Geological Models of gas hydrates deposits along the continental margin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2010, 30 (6):85-90 (in Chinese with English abstract).

[7] Horoza S, Lee G H, Yi B Y, et al. Seismic indicators of gas hydrate and associated gas in the Ullung Basin, East Sea (Japan Sea) and implications of heat flows derived from depths of the bottomsimitating reflector[J]. Marine Geology, 2009, 258:126-138.

[8] 王健,邱文弦,赵俐红.天然气水合物发育的构造背景分析[J].地质科技情报,2010,29(2):100-106.

Wang Jian, Qiu Wenxian, Zhao Lihong. Tectonic settings analysis of gas hydrate deposits development [J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29 (2):100-106 (in Chinese with English abstract).

[9] Wenfeng Hao, Wang Jinqu, Fan Shuanshi, et al. Evaluation and analysis method for natural gas hydrate storage and transportation processes [J]. Energy Conversion and Management 2008, 49:2456-2553.

[10] Lanoil B D, Sassen R, LaDuc, M T, et al. Bacteria and Archaea physically associated with Gulf of Mexico gas hydrates [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2001, 67:5143.

[11] 黄保家.琼东南盆地天然气潜力及有利勘探方向[J].天然气工业,1999,19(1):34-39.

Huang Baojia. Gas potential and its favorable exploration areas in

- Qiongdongnan basin[J]. Natural Gas Industry, 1999, 19(1):34-39 (in Chinese with English abstract).
- [12] 蒲燕萍, 孙春岩, 陈世成, 等. 南海琼东南盆地-西沙海槽天然气水合物地球化学勘探与资源远景评价 [J]. 地质通报, 2009, 28(11):1656-1661.
- Pu Yanping, Sun Chunyan, Chen Shicheng. Geochemical prospecting of natural gas hydrate and resource evaluation in Qiongdongnan basin -Xisha trough of South China Sea [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(11):1656-1661(in Chinese with English abstract).
- [13] Millov A V. Worldwide distribution of submar inemud volcanoes and associated gas hydrates [J]. Marine Geology, 2000, (167):29-42.
- [14] Holbrook W S, Hoskinsh, Wood W T, et al. Methane hydrate and free gas on the Blake ridge from vertical seismic profiling[J]. Science, 1996, 273:1840-1843.
- [15] 姜辉, 岑芳, 于兴河. 天然气水合物 BSR 的影响因素分析[J]. 天然气工业, 2008, 28(1):64-66.
- Jiang Hui, Cen Fang, Yu Xinghe. Study on the influencing factors of BSR [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28 (1):64-66 (in Chinese with English abstract).
- [16] 陈多福, 姚伯初, 赵振华, 等. 珠江口和琼东南盆地天然气水合物形成和稳定分布的地球化学边界条件及其分布区 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(4):73-78.
- Chen Duofu, Yao Bochu, Zhao Zhenhua, et al. Geochemical constraints and potential distributions of gas hydrates in pearl river mouth basin and Qiongdongnan basin in the northern margin of the South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(4):73-78(in Chinese with English abstract).
- [17] 高耀斌, 黄志龙, 郝石生. 琼东南盆地天然气运聚平衡研究[J]. 中国海上油气地质, 1995, 9(2):77-81.
- Gao Yaobin, Huang Zhilong, Hao Shisheng. Equilibrium study on natural gas migration and accumulation in Qiongdongnan basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1995, 9 (2):77-81 (in Chinese with English abstract).
- [18] 孙春岩, 吴能有, 牛滨华, 等. 南海琼东南盆地气态烃地球化学特征及天然气水合物资源远景预测 [J]. 现代地质, 2007, 21(1):95-100.
- Sun Chunyan, Wu Nengyou, Niu Binhua, et al. Geochemical characteristics of gaseous hydrocarbons and hydrate resource prediction in the Qiongdongnan basin of the South China Sea [J]. Geoscience, 2007, 21(1):95-100(in Chinese with English abstract).
- [19] 佟殿君, 任建业, 雷超, 等. 琼东南盆地深水区岩石圈伸展模式及其对裂后期沉降的控制[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2009, 34(6):963-974.
- Tong Dianjun, Ren Jianye, Lei Chao, et al. Lithosphere stretching model of deep water in Qiongdongnan Basin, northern continental margin of South China Sea, and controlling of the post-rift subsidence [J]. Earth Science —Journal of China University of Geosciences, 2009, 34 (6):963-974 (in Chinese with English abstract).
- [20] 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.
- Yuan Yusong, Yang Shuchun, Hu Shengbiao, et al. Tectonic subsidence of Qiongdongnan Basin and its main control factors [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51 (2):376-383 (in Chinese with English abstract).
- [21] 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.
- Zhang Yunfan, Sun Zhen, Guo Xingwei, et al. Tectonic subsidence characteristics of Qiongdongnan Basin in Cenozoic [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2008, 27(5):30-36(in Chinese with English abstract).
- [22] 郝治纯, 陈平富, 万晓樵, 等. 南海北部莺歌海—琼东南盆地晚第三纪层序地层与海平面变化[J]. 现代地质, 2000, 14(3):237-245.
- Hao Yichun, Chen Pingfu, Wan Xiaoqiao, et al. Late Tertiary sequence stratigraphy and sea level changes in Yinggehai - Qiongdongnan basin [J]. Geoscience, 2000, 14 (3):237-245 (in Chinese with English abstract).
- [23] 张功成, 李增学, 何玉平, 等. 琼东南盆地煤地球化学特征[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(5):693-699.
- Zhang Gongcheng, Li Zengxue, He Yuping, et al. Coal Geochemistry of Qiongdongnan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(5):693-699(in Chinese with English abstract).
- [24] 姚伯初. 南海的地质构造与矿产资源 [J]. 中国地质, 1998, (4):27-29.
- Yao Bochu. Geological structure and mineral resources in Southern Chinese Sea [J]. Geology in China, 1998, (4):27-29 (in Chinese with English abstract).
- [25] 于兴河. 碎屑岩系油气储层沉积学(第二版)[M]. 北京:石油工业出版社, 2008:467-469.
- Yu Xinghe. Clastic Rock Oil and Gas Reservoir Sedimentology (Second Edition) [M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 2008:467-469(in Chinese).
- [26] 沙志彬, 郭依群, 杨木壮, 等. 南海北部陆坡区沉积与天然气水合物成藏关系[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(5):90-98.
- Sha Zhibin, Guo Yiqun, Yang Muzhuang, et al. Relationship between deposition and Natural gas hydrate reservoiring in northern continental slope, Southern China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(5):90-98(in Chinese with English abstract).
- [27] 郭秋麟, 米石云, 石广仁, 等. 盆地模拟原理方法[M]. 北京:石油工业出版社, 1998:39-44.
- Guo Qiulin, Mi Shiyun, Shi Guangren, et al. Principle Method of Basin modeling[M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 1998:39-44

- (in Chinese).
- [28] 庞雄奇, 陈发景. 地质过程定量模拟[M]. 北京:石油工业出版社, 2003:39-46.  
Pang Xiongqi, Chen Fajing. Quantitative Modeling of Geological Processes [J]. Beijing:Petroleum Industry Press, 2003:39-46 (in Chinese).
- [29] Airy G B. On the computation of the effect of the attraction of the mountain-masses as disturbing the apparent astronomical latitude of stations at geodetic surveys [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 145, 1855:101-104.
- [30] 魏魁生, 崔旱云, 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.  
Wei Kuisheng, Cun Hanyun, Ye Shufen, et al. High-precision sequence stratigraphy in Qiongdongnan basin [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2001, 26 (1):59-66(in Chinese with English abstract).
- [31] 陆克政, 朱筱敏, 漆家福, 等. 含油气盆地分析[M]. 东营:中国石油大学出版社, 2006:294-298.  
Lu Kezheng, Zhu Xiaomin, Qi Jiafu, et al. Petroliferous Basin Analysis [M]. Dongying:China University of Petroleum Press, 2006:294-298(in Chinese).
- [32] 于兴河, 张志杰. 南海北部陆坡区新近系沉积体系特征与天然气水合物分布的关系[J]. 中国地质, 2005, 32(3):470-476.  
Yu Xinghe, Zhang Zhijie. Characteristics of Neogene depositional systems on the northern continental slope of the South China Sea and their relationships with gas hydrate[J]. Geology in China, 2005, 32(3):470-476(in Chinese with English abstract).
- [33] 林畅松, 张艳梅. 盆地沉降史模拟分析[C]//龚再升,李思田. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集. 北京:科学出版社, 1997:75-86.  
Lin Changsong, Zhang Yanmei. Simulation of basin subsidence history [C]//Gong Zaisheng, Li Sitian (eds.). Basin Analysis of the Northern South China Sea Continental Margin and Hydrocarbon accumulation. Beijing:Science Press, 1997:75-86(in Chinese with English abstract).
- [34] Allen J R, Allen P A. Basin Analysis:Principles and Application[M]. Blackwell Scientific Publications, Oxford, London, 1990:1-451.
- [35] Hegarty K A, Weissel J K, Mutter J C. Subsidence history of Australian southern margin: constraints on basin models [J]. AAPG Bulletin, 1988, 72:615-633.
- [36] 吴能友, 曾维军, 宋海斌, 等. 南海区域构造沉降特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(1):55-65.  
Wu Nengyou, Zeng Weijun, Song Haibin, et al. Tectonic subsidence of the South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23(1):55-65(in Chinese with English abstract).
- [37] 吴哲, 杨风丽, 吴建勋. 琼东南盆地岩石圈特征的构造模拟约束[J]. 高校地质学报, 2010, 16(4):483-491.  
Wu Zhe, Yang Fengli, Wu Jianxun. Tectonic modeling constraints on lithospheric characteristics of the Qiongdongnan basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 16 (4):483-491(in Chinese with English abstract).
- [38] 向宏发, 韩竹军, 魏顺民, 等. 红河断裂带大型右旋走滑运动定量研究的若干问题[J]. 地球科学进展, 2004, 19(增刊):56-59.  
Xiang Hongfa, Han Zhujun, Guo Shunmin, et al. Processing about quantitative study of large-scale strike-slip movement on red river fault zone[J]. Advance in Earth Sciences, 2004,19(Supp.):56-59(in Chinese with English abstract).
- [39] 吴志强, 陈建文, 龚建明, 等. 海域天然气水合物的 BSR 成因[J]. 海洋地质动态, 2004, 24(6):25-30.  
Wu Zhiqiang, Chen Jianwen, Gong Jiangming, et al. Formation of BSR in marine Gas Hydrate [J]. Marine Geology Letters, 2004, 24 (6):25-30(in Chinese with English abstract).
- [40] 米立军, 张功成, 等. 南海北部陆坡深水海域油气资源战略调查及评价[M]. 北京:地质出版社, 2011:148-150.  
Mi Lijun, Zhang Gongcheng, et al. Strategy Survey and Evaluation About Northern Continental Slope Deep-water Area in South China sea[M]. Beijing:Geological Publishing House, 2011:148-150.
- [41] 李思田, 林畅松, 张启明, 等. 南海北部大陆边缘盆地幕式裂陷的动力过程及 10 Ma 以来的构造事件 [J]. 科学通报, 1998, 43(8):797-810.  
Li Sitian, Lin Changsong, Zhang Qiming, et al. Northern south China sea continental margin rift basin episodic dynamic process and tectonic events since 10Ma[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(8):797-810(in Chinese).
- [42] Shipboard Scientific Party. Proceedings of Ocean Drilling Program [J]. Initial Reports 1996(164), 277-334.
- [43] 张光学, 黄永祥, 祝有海, 等. 南海天然气水合物的成矿远景[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 22(1):71-81.  
Zhang Guangxue, Huang Yongyang, Zhu Youhai, et al. Prospect of gas hydrate resources in the south China sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 22 (1):71-81 (in Chinese with English abstract).
- [44] 于兴河, 梁金强, 方竞男, 等. 珠江口盆地深水区晚中新世以来构造沉降与似海底反射(BSR)分布的关系[J]. 古地理学报, 2012, 14(6):787-800.  
Tectonic subsidence characteristics and its relationship to BSR distribution in deep water area of Pearl River Mouth Basin since the late Miocene[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(6):787-800.

## Impact of neogene tectonic subsidence characteristics on the BSR Distribution in Qiongdongnan Basin

LI Sheng-li<sup>1</sup>, SHA Zhi-bing<sup>2</sup>, YU Xing-he<sup>1</sup>, CONG Xiao-rong<sup>1</sup>,  
JIANG Long-yan<sup>1</sup>, WANG Jian-zhong<sup>1</sup>, FANG Jing-nan<sup>1</sup>

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing, 100083, China; 2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, Guangdong, China)

**Abstract:** BSR found in the formation has been distributed since Late Miocene in the deep water area of Qiongdongnan (Southeast Hainan) Basin, influenced by the tectonic movements. The BSR is one of the important indicators to identify gas hydrate. Based on data analyses from 301 virtual points, the authors worked out the relationship between the BSR's distribution and the tectonic subsidence. The study shows that under the influence of the Red River strike slip motion and mantle-derived basic magma eruption, there are three different tectonic subsidence acceleration periods bounded by 5.3Ma and 1.8Ma in the deep water area of the Qiongdongnan Basin, of which the third phase (since 1.8Ma) is the fastest stage. From border to center, the tectonic subsidence rate is getting higher and higher, and it changes faster in the central hollow zone than in the southern uplift zone. In the area between them it remains high. BSR is mainly observed in the borderland between secondary structure unit where the tectonic subsidence rate is high and changes faster and the area which can afford higher tectonic subsidence rates varying from 70m/Ma to 110m/Ma.

**Key words:** deep water area of Qiongdongnan basin; BSR distribution; tectonic subsidence rate; Miocene - Holocene; quantitative simulation

---

**About the first author:** LI Sheng-li, male, born in 1971, Associate Professor, Research interests focus on sedimentology, petroleum geology, reservoir characterization and modeling; E-mail: slli@cugb.edu.cn.