

doi:10.3799/dqkx.2011.093

琼东南盆地裂后期 S40 界面特征及其地质意义

苏 明^{1,2,3}, 解习农³, 姜 涛³, 李俊良⁴, 孙志鹏⁴, 田姗姗³, 张 成³, 何云龙³, 张翠梅²

1. 中国科学院可再生能源与天然气水合物重点实验室, 广东广州 510640

2. 中国科学院南海海洋研究所边缘海地质重点实验室, 广东广州 510301

3. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

4. 中国海洋石油有限公司湛江分公司技术部, 广东湛江 524057

摘要: S40 界面是琼东南盆地新近系裂后期的重要地质界面, 发育时代为晚中新世末期(约 11.6 Ma), 是裂后期充填序列中梅山组和黄流组的分界面。通过对琼东南盆地大量二维测线的精细解释, 结合钻井、生物等资料, 从海平面变化、地震—沉积相跃迁、沉降速率等方面总结了该界面的特征, 指出 S40 界面在盆地东西部特征差异明显: 在盆地西北部浅水区, 该界面具有明显的角度不整合特征, “下削上超”特征明显, 在局部地区梅山组一段整套地层都被削蚀; 在盆地东南部半深水—深水区域, S40 界面上下反射具明显差异, 界面之上为一组中等连续性、中—强振幅的地震反射同相轴, 界面之下地震反射多呈强振幅、中等连续—丘状反射, 甚至局部出现前积反射。研究认为, S40 界面的东西差异性可能与该界面在盆地东西部受到的控制因素差异相关: 盆地西部主要受区域性海平面大规模下降的影响, S40 界面表现出对下伏地层的强烈削蚀; 盆地东部则可能是西沙海槽在晚中新世以来的加速沉降在琼东南盆地的具体表征。受这次区域性构造活动的影响, 盆地东部水体突然加深, 接受大规模的沉降, 界面上下表现为相的突变和跃迁, 此时盆地已经具有“东深西浅”的地貌特征, 这种结构一直延续至今。S40 界面的性质厘定及其地质意义的重新认识有可能为中国南海新生代盆地形成演化及其动力学背景研究提供新的信息。

关键词: 琼东南盆地; S40 界面; 构造; 沉降; 中新世; 海洋地质。

中图分类号: P738.4; P736.1

文章编号: 1000—2383(2011)05—0886—09

收稿日期: 2011—02—18

Characteristics of S40 Boundary and Its Significance in Qiongdongnan Basin, Northern Continental Margin of South China Sea

SU Ming^{1,2,3}, XIE Xi-nong³, JIANG Tao³, LI Jun-liang⁴, SUN Zhi-peng⁴,
TIAN Shan-shan³, ZHANG Cheng³, HE Yun-long³, ZHANG Cui-mei²

1. CAS Key Laboratory of Renewable Energy and Gas Hydrate, Guangzhou 510640, China

2. CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 510301, China

3. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Technical Department, China National Offshore Oil Corporation Limited, Zhanjiang 524057, China

Abstract: Based on the integrated study of 2D seismic data, well data and biostratigraphy in the Qiongdongnan basin (QDNB), the Late Miocene unconformity (S40) at about 11.6 Ma which separated the underlying Meishan and overlying Huangliu Formation is interpreted. The characters of S40 including sea level changes, seismic-sedimentary facies and subsidence rate show significant differences in its eastern and western areas as follows: (1) In the littoral-neritic area of the northwestern QDNB, it is angular with intense erosion of the underlying strata, and even erosion of the whole Meishan Formation. (2) In the bathyal-abyssal area of southeastern QDNB, Meishan Formation is characterized by higher amplitude, generally continuous-hummocky and even progradational reflection, whereas Huangliu Formation is featured with low-amplitude, continuous facies. We suggest that the S40 interface displaying different characteristics was controlled by different mechanism factors, the western basin was strongly eroded by the underlying strata under the influence of massive sea-level fall; whereas the eastern basin with great sub-

基金项目: 国家“973”项目(No. 2007CB411705-06); 国家自然科学基金青年基金(No. 41002031); 中国科学院边缘海地质重点实验室开放研究基金项目(No. MSGLO9-10)。

作者简介: 苏明(1983—), 男, 助理研究员, 目前主要从事深水沉积体系与油气勘探、海域天然气水合物成藏地质条件分析等方面的科研工作。
E-mail: suming@ms.giec.ac.cn

sidence occurred due to the Xisha trough activity since Late Miocene. This tectonic activity caused the eastern QDNB to change abruptly from shallow water to semi-deep or deep water environment, consequently the basin exhibits deep and shallow land-forms in the east and west respectively. This topography remains until the present day. The interpretation of S40 is helpful not only to explain the South China Sea evolution but also to predict potential reservoir target.

Key words: Qiongdongnan basin; S40 boundary; tectonics; subsidence; Miocene; marine geology.

重要地质界面往往指示了构造、气候、海平面等信息的变化,因此在盆地研究中其意义重大(李思田等,1998;杨木壮等,2003;任建业,2004;姚伯初等,2004a;陶宗普等,2005). 在南海北部琼东南盆地新生界中新统充填序列中,存在着一个特征明显且全区可追踪的不整合界面——S40 界面. 前人研究资料表明,该界面表现为区域性海平面大规模下降特征,下伏地层遭受明显的剥蚀. 本次研究以琼东南盆地大量二维地震的精细解释为基础,结合 ODP184 航次 1148 站位及琼东南盆地钻井资料,从海平面升降、地震相—沉积相变化和裂后期沉降特征 3 个方面阐明了 S40 界面的特征. 通过界面特征的识别和对比,指出在盆地东西部 S40 界面性质存在差异. 研究认为在 11.6 Ma 时期,琼东南盆地存在一次重要的构造活动,盆地东部迅速下沉,“突变”为深水环境,之后构造活动趋于稳定,整体盆地结构没有发生大的变动,自晚中新世以来盆地地貌一直表现为“东深西浅”的特征. S40 界面不仅是区域性海平面大规模下降界面和分隔裂后期热沉降充填与加速沉降充填的重要不整合界面,还很有可能是琼东南盆地一次重要构造事件的记录. 该界面的存在对南海北部油气聚集有重要的影响.

1 区域地质概况

琼东南盆地位于中国南海西北部,海南岛以南、西沙群岛以北的海域中,是在中生代基底之上发育的一个大型的新生代裂谷型大陆边缘盆地,呈北东向展布,分别与莺歌海盆地和珠江口盆地相连(图 1)(姚伯初等,2004b). 整个盆地表现出明显的“南北分带”特征,自北向南划分为北部凹陷带、中央隆起带、中央拗陷带(包括乐东—陵水凹陷、松南低凸起、北礁凹陷、松南—宝岛凹陷和长昌凹陷)以及南部隆起带. 盆地现今水深表现为“东深西浅”和“南深北浅”的特征(图 1).

新生代地层自下而上依次为始新统、渐新统崖城组 and 陵水组,中新统三亚组、梅山组 and 黄流组,上新统莺歌海组以及第四系地层(图 2). 琼东南盆地构造演化总体经历了裂陷期和裂后期两大阶段,以破裂不整合面 S60(约 21 Ma)为界(图 2),发育了下、上两大构造层,分别代表裂陷作用和裂后作用的产物,上构造层为统一拗陷,断裂不发育,下构造层断裂发育,盆地内部次级构造单元分割性强.

S40 界面为中新世中、晚期分界线,发育时间约为 11.6 Ma,分割黄流组和梅山组地层. 总体来看,琼东南

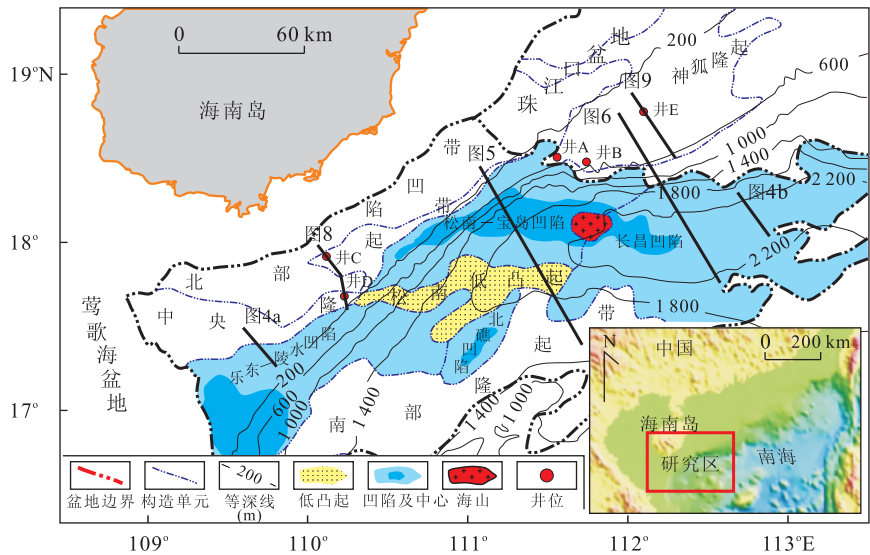


图 1 琼东南盆地区域位置及构造划分(黑色粗实线为剖面线)
Fig. 1 The location and structural units of Qiongdongnan basin

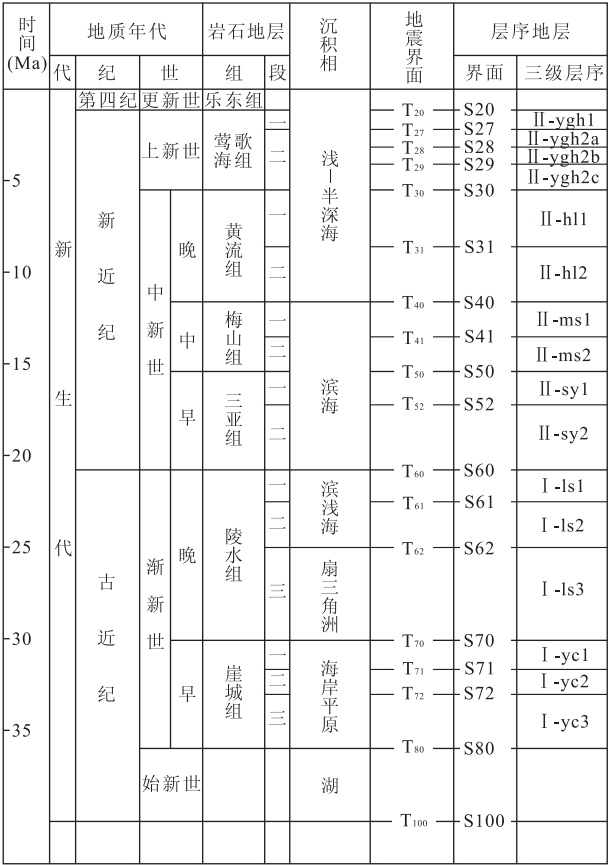


图 2 琼东南盆地新生界充填序列

Fig. 2 Cenozoic geological column of Qiongdongnan basin

盆地沉积环境在中中新世晚期发生了一次变化,由滨浅海相转变为半深海—深海相(Xie *et al.*, 2008)。

2 S40 界面特征

2.1 海平面变化

大量研究者利用南海 ODP184 航次 1148 站位 (18°50. 17'N, 116°33. 93'E, 水深 3 308. 3 m) 连续深海沉积物柱状样品, 通过沉积记录追踪海盆开裂历史, 并对南海重要的构造地质界面进行准确的年龄标定。赵泉鸿等(2001)分析了底栖有孔虫和浮游有孔虫的 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线, 指出碳同位素在 10. 2~9. 4 Ma 时期“负偏”特征明显。邵磊等(2004)指出中中新世—晚中新世时期, 在 10 Ma 界面附近, Zr/Hf、Th/Sc、La/Sc、La/Sm、Nb/Ta 等元素比以及 SiO_2 含量存在明显的突变, 并认为在该时期存在构造运动及沉积环境突变事件。综合前人研究结果, ODP1148 孔在中中新世末期(S40 界面附近)无论是沉积速率, 还是岩石地球化学分析、底栖有孔虫、碳氧同位素等都表现出突变特征, 且碳同位素“负偏”与全球

海平面变化在此时有大规模下降相一致(图 3)。

盆地西部的典型剖面中能够清晰的观察到这次海平面下降事件的记录: S40 界面显示出对下伏地层强烈的削截特征, 表现出明显的角度不整合, 局部甚至将梅山组一段地层全部削蚀。界面为低—中连续、中—强振幅的同相轴反射, 局部发育下切谷, 削截 S41 界面, 界面之上的地层超覆其上, 总体特征表现为“下削上超”的特征。在琼东南盆地西部乐东—陵水凹陷广泛发育这一特征, 指示了区域性海平面的大规模下降(图 4a)。这种典型的特征能够被记录下来至少需要 2 个前提条件: 一是 S40 界面时期存在一次大规模的海平面下降事件, 这点从之前的分析中已经得到证实; 二是选择位置处于一定的水深范围之内, 海平面下降幅度能够对其造成明显的影响。值得注意的是, 在剖面中可以看到 S30 界面(5. 7 Ma)的特征与 S40 界面(11. 6 Ma)非常相似, 也是一次大规模海平面下降的记录, 这点在 1148 站位资料中也有记录(图 3)。

2.2 相跃迁

与盆地西部“下削上超”的特征不同, 盆地东部(如长昌凹陷)S40 界面特征表现出明显的上下差异、地震相跃迁的特征: 界面之下为一套强振幅、连续性差的丘状反射, 局部存在小规模的前积结构; 界面之上为一套连续性好、中振幅的亚平行反射, 厚度变化小。这种特征从 S40 界面往上至今都可以观察到, 均为连续性好的地震反射轴, 差异在于能量的强弱会发生一些轻微的改变, 往上振幅增强, 显示出良好的垂向连续性(图 4b)。此外, 5. 7 Ma 时, 盆地西部中对应于海平面下降的 S30 界面(图 4a), 在盆地东部中并没有出现强烈的剥蚀特征, 而是表现为连续性沉积的特征, 也就是说这次事件在盆地东部并没有被记录下来。同时从地震剖面中还能够发现在盆地东南部, 断层往往发育在 S40 界面以下的地层中, 界面之上应该处于一个相对“稳定”的环境中(图 4b)。

2.3 构造沉降变化

前人研究表明, 南海北部裂后期沉降可以进一步划分为热沉降阶段和加速沉降阶段, 二者的分界即为 S40 界面。本次研究使用 Steckler and Watts (1978)提出的回剥计算方法, 对 EBM 盆地模拟系统进行了重新修编和开发, 选取盆地东部松南—宝岛凹陷和长昌凹陷内的 2 条剖面进行沉降速率的计算及系统分析。

参数的选取包括以下 3 个方面: (1)地层格架数据, 利用前人研究成果及全区高精度层序地层格架,

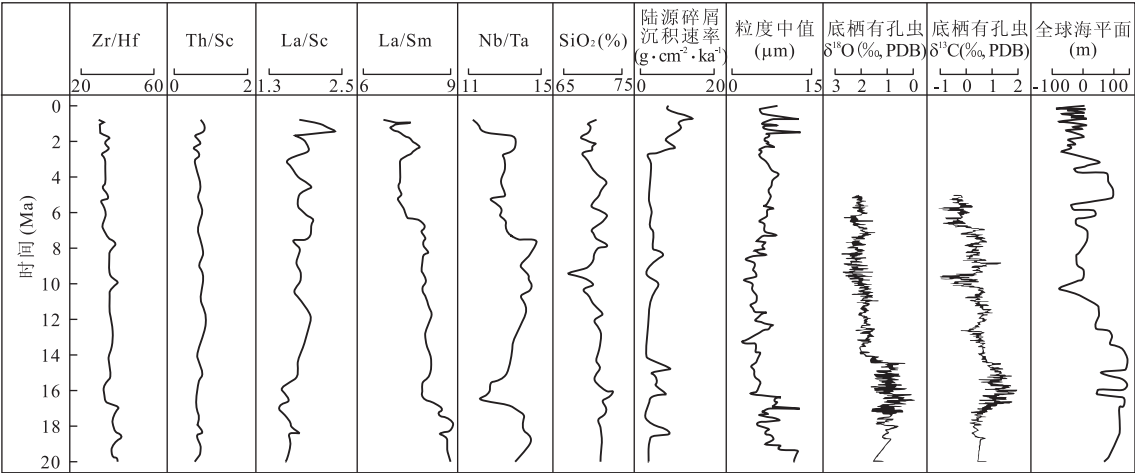


图 3 ODP1148 站位 20 Ma 以来元素含量比、沉积速率、粒度及有孔虫碳氧同位素分布特征

Fig. 3 The characteristics of elements rates, sedimentary rate, grain size and oxygen-carbon isotopes in ODP Site 1148
其中全球海平面变化来自 Haq *et al.*, 1987; 同位素资料源自赵泉鸿等, 2001; 其余资料源自邵磊等, 2004

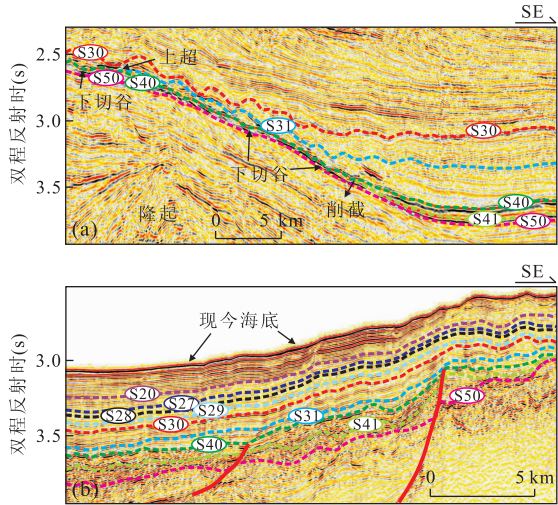


图 4 琼东南盆地西部(a)和东部(b)S40 界面地震反射特征(剖面位置见图 1)

Fig. 4 The seismic reflection character of boundary S40 in western (a) and eastern (b) of Qiongdongnan basin

以地层组为单元,采集了 5 个地层组(自下而上为:三亚组、梅山组、黄流组、莺歌海组和乐东组)的顶底层位数据,应用 Earthvision 软件进行时深转换;(2)压实校正,分析层序内的岩性或者岩性组合,以便恢复各层序压实前的地层厚度,混合岩性可根据正常压实情况下单一岩性的岩石物理参数按比例加权得出;(3)古水深校正,可分为 2 个部分,自 S40 至今,构造格局稳定,沉积具有一定的连续性(图 4b),参考 ODP1148 站位得到相对海平面变化曲线,利用现今水深推测古水深;S60—S40 阶段,水体深度相对较浅,与现今水深缺乏继承性关系,依据琼东南盆地的沉积古地理环

境及单井的海平面变化曲线推断古水深。
计算结果表明,在盆地东南部,无论是总沉降速率还是构造沉降速率,在 S40 界面上下都存在突变,东北部这种突变现象也存在,但变化幅度较小. 这一突变峰值的存在以 S40 为界将琼东南盆地裂后期沉降一分为二,即三亚组、梅山组沉积期的热沉降阶段和莺歌海组、乐东组沉积期的加速沉降阶段. 盆地东部地区在热沉降阶段,沉降速率总体较小,在盆地中央处略大,可达到 140 m/Ma;而在加速沉降阶段,沉降速率明显增大,达到 200 m/Ma,东南部甚至可达 320 m/Ma(图 5, 6).

3 讨论

3.1 S40 界面性质的厘定

通过对 S40 界面特征的描述,结合区域地质背景,不难发现在 11.6 Ma 时期,琼东南盆地经历了一次较大的“事件”. 这次事件在盆地东西部均有记录,但是二者所表现出来的特征则是截然不同的(图 4a, 4b). 是什么原因导致盆地东部无法将 11.6 Ma 和 5.7 Ma 这 2 次大规模海平面下降记录下来呢? 盆地东部 S40 界面上下的地震相跃迁是否意味着盆地东部在该时期沉积环境发生了“突变”呢? 构造沉降速率为何在 11.6 Ma 处发生突然的增加呢? 通过对比琼东南盆地(特别是盆地东部)的相对水深变化和沉积物供给,笔者重新厘定了 S40 界面的性质。
在盆地东部的地震剖面中,自 S40 界面以来,整套地层都表现为相似的沉积特征,连续性好,但是在

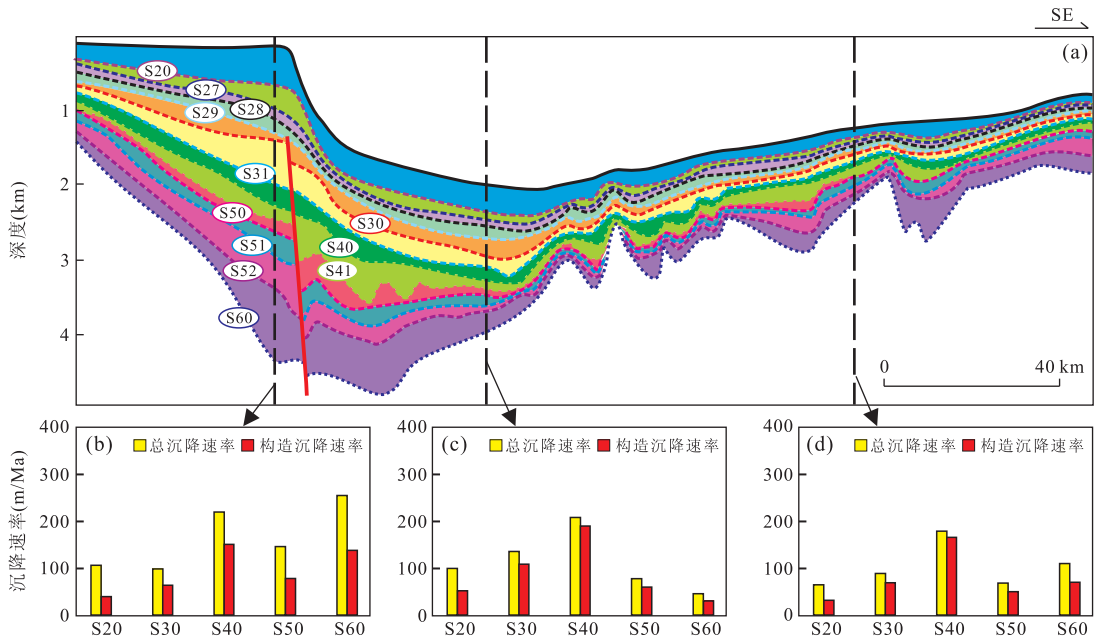


图 5 琼东南盆地东部松南—宝岛凹陷裂后期沉降特征(剖面位置见图 1)

Fig. 5 The characteristics of post-rift subsidence in Songnan-Baodao depression in eastern of Qiongdongnan basin

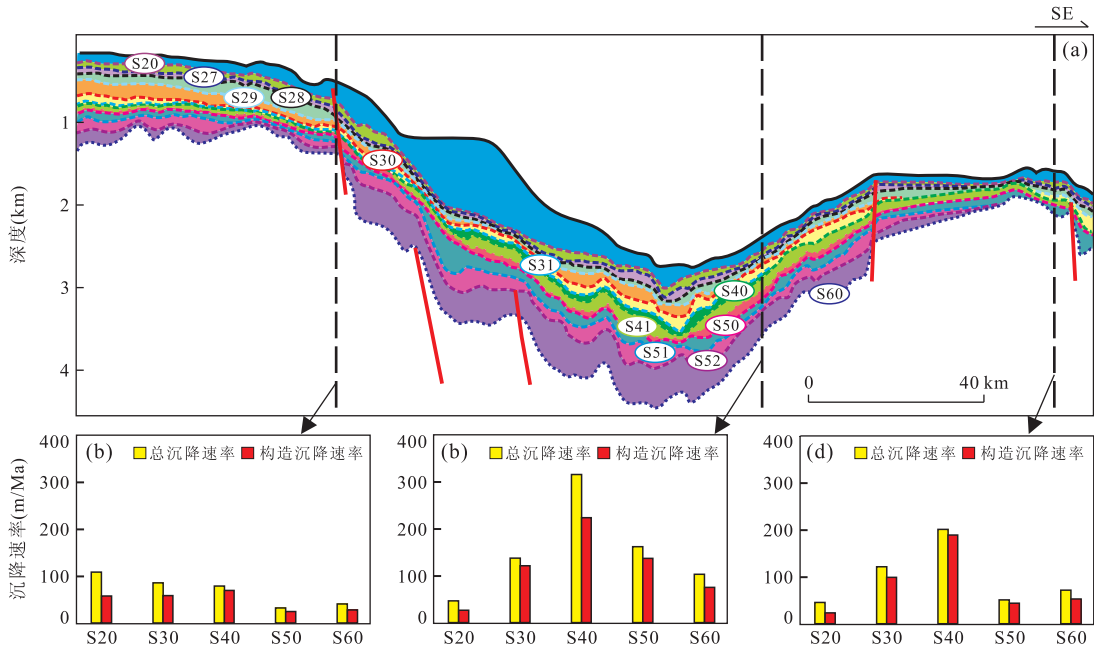


图 6 琼东南盆地东部长昌凹陷裂后期沉降特征(剖面位置见图 1)

Fig. 6 The characteristics of post-rift subsidence in Changchang depression in eastern of Qiongdongnan basin

反射能量上存在差异(图 4b)。这些特征指示 S40 界面之上的地层具有在相似背景下连续性沉积的特点。ODP184 航次 1148 站位的数据显示,在 11.6 Ma 和 5.7 Ma 时存在 2 次较大规模的海平面下降事件,但整体水深从 S40 至今变化不大(图 3)。琼东南盆地现今的水深特征为“东深西浅”,盆地东部处于半深水—深水的环境中(图 1)。基于以上的分析,笔者

认为自 S40 至今,在盆地东部基本上处于半深水—深水的沉积环境。反观 S40 界面之下沉积特征,地震同相轴的截然差异说明,界面之下的沉积环境与界面之上的沉积环境是不同的,这种杂乱的、轻微的前积特征可能代表了浅水的沉积背景(图 4b)。从盆地东部的井 A 和井 B 中也能发现,S40 界面之下的梅山组和三亚组是以细砂—中砂岩为主,局部含砾,砂

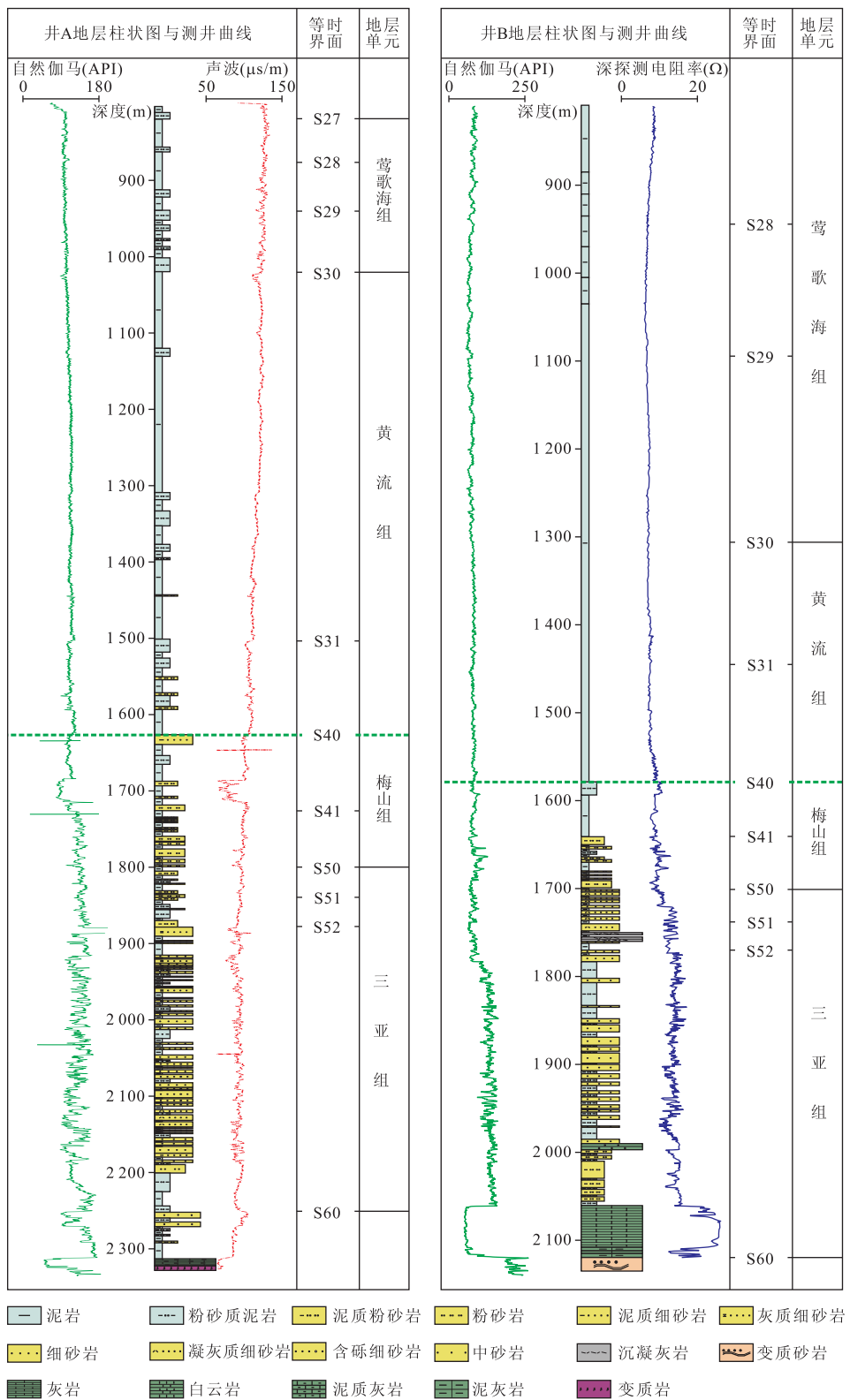


图 7 琼东南盆地东部单井 S40 界面特征(井位见图 1)

Fig. 7 The characteristic of boundary S40 in boreholes in the eastern of Qiongdongnan basin

质含量较高,夹有粉砂质泥岩和泥岩薄层,测井曲线的齿化程度较高,表现出滨浅海沉积特征;界面之上黄流组和莺歌海组沉积了大套泥岩,局部含有一些

粉砂质泥岩或泥质粉砂岩互层,表现为半深水—深水细粒沉积(图 7)。盆地东部的单井特征也进一步佐证界面上下沉积环境发生了变化。

S40 界面之上的这种连续性反射结构和盆地东部典型单井的岩性一曲线特征有可能是由于 11.6 Ma 的海平面下降之后大规模的海平面上升所造成的. 但是问题就在于既然通过之前的分析将 S40 界面之下的沉积背景定义为浅水沉积环境, 而整个盆地东南部发育着规模巨大的隆起和海山, 那么为什么在 11.6 Ma 海平面下降阶段, 并没有产生与盆地西部相似的“下削上超”地层结构, 而是表现出界面上下差异明显的“双层结构”特征呢? 此外前人研究表明, 黄流组时期, 在海平面下降阶段, 盆地东部并没有发育受强烈侵蚀而形成的三角洲、扇三角洲、盆底扇和斜坡扇等沉积体. 上述特征均指示了盆地东部在 11.6 Ma 时期并不是从浅水“逐渐”过渡为深水环境, 即并不是区域性海退之后的海平面大规模上升那么简单, 而是发生了沉积环境的“突变”. 在这次海平面变化的过程中, 应该还叠加了一次“突发事件”, 该次事件对于盆地东部的影响远大于海平面的变化.

11.6 Ma 前后, 琼东南盆地的主要物源为西北部的红河物源、北部的海南岛物源以及东北部的珠江水系物源. 受搬运距离的限制, 红河物源并没有影响到整个盆地东部; 而神狐隆起使得海南岛物源和珠江水系物源并未在盆地东部形成大型的陆架边缘三角洲, 整个东北部地层厚度很薄(图 4b). 沉积物供给差异性造成了该阶段盆地东西部沉积厚度的巨大差异. 但是, 与盆地东部低沉积物供给不同的是, 该区域在 11.6 Ma 前后总沉降速率发生了非常大

的变化(图 5, 6). 在低沉积物供给的条件下, 沉降速率如此大幅度的增加(如图 5 中从 70~90 m/Ma 增加至 180~200 m/Ma; 图 6 中从 50~160 m/Ma 增加至 200~350 m/Ma), 并不能用单一海平面上升因素加以解释.

以上分析说明, 11.6 Ma(S40 界面)时期, 盆地东部除了海平面下降之外, 存在一次构造突变事件. 也就是说, S40 界面在琼东南盆地东西部具有不同的性质: 在盆地西部, S40 界面受控于区域性海平面下降, 表现出对下伏地层的强烈削蚀, 典型地震剖面上为“下削上超”结构; 在盆地东部, S40 界面受控于构造作用, 表现出明显的相跃迁特征.

3.2 S40 界面与琼东南盆地的演化

琼东南盆地位于欧亚板块、印—澳板块和菲律宾海板块的交汇部位, 因此其形成演化分别受控于这些板块的运动. 研究资料表明, 琼东南盆地自 S60 界面(23 Ma)之后构造格局趋于稳定, 只发育一些小型断层. 但是通过对盆地东西部 S40 界面特征的识别、分析以及性质的厘定, 笔者认为在 11.6 Ma 时期, 琼东南盆地东部可能还存在着一次强烈的局部构造活动.

刘方兰和吴庐山(2006)认为, 晚中新世开始, 由于周缘板块再度活动, 上地幔衍生物上涌, 造成西沙海槽区域隆升, 同时由于热扩散作用穿过海槽内地壳减薄的速度比两侧陆壳迅速, 热扩散沿断裂衰减, 引起槽谷基底沉降比两壁快, 使槽底加深、槽壁变

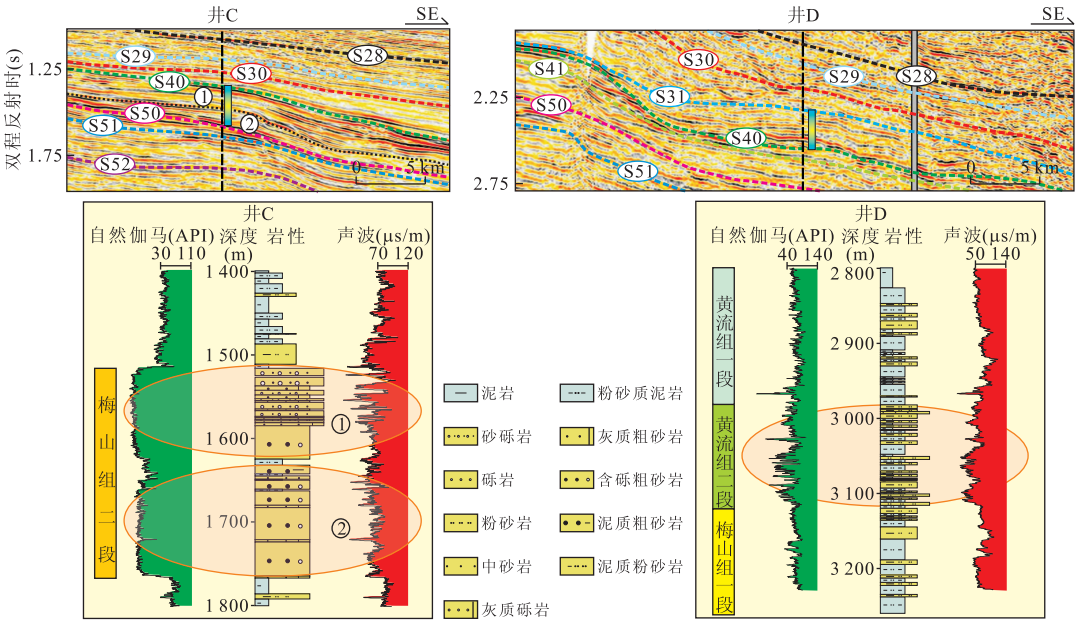


图 8 琼东南盆地西部 S40 界面与储层分布之间的关系(剖面位置见图 1)

Fig. 8 The relationship between reservoirs and S40 boundary in western of Qiongdongnan basin

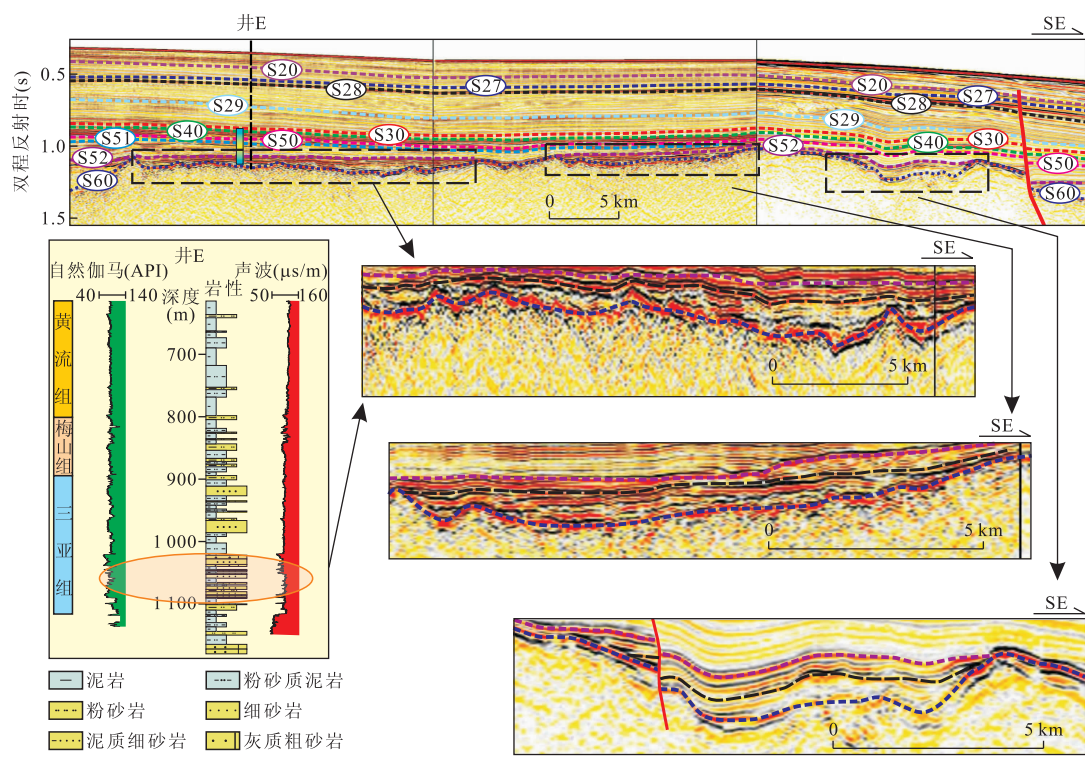


图 9 琼东南盆地东部 S40 界面油气成藏的贡献(剖面位置见图 1)

Fig. 9 The contribution of hydrocarbon accumulation from S40 boundary in eastern of Qiongdongnan basin

陡。笔者认为西沙海槽的这种特征与琼东南盆地东部(长昌凹陷内)中央峡谷体系的特征非常相似:东深西浅、东窄西宽、槽壁陡峭、近东西向延伸(苏明等,2009)。这就暗示了琼东南盆地东部在 11.6 Ma 时期的构造事件很可能是西沙海槽发育和演化在临区(琼东南盆地东部)的进一步响应。

受西沙海槽发育演化影响,盆地东部下沉,由浅水背景“突变”为半深水—深水背景。由于北侧神狐隆起和南侧永乐隆起的存在,在这两个隆起中间会形成一个轴向“负地形”特征明显的“小型盆地”(sub-basin/minibasin),并且呈“东深西浅”的特征,该构造地貌自 11.6 Ma(S40 界面)开始形成,并维持至今。从现今的水深等深线,可以观察到在盆地东南部显示出明显的海底峡谷特征(图 1,2 200 m 等深线),这一地貌最初也可能受控于 11.6 Ma 时期的构造事件。

3.3 S40 界面与琼东南盆地的油气资源效应

S40 界面的“下削上超”和“相跃迁”特征对于琼东南盆地油气成藏有重要贡献。在盆地西部,由于区域性海平面快速下降,S40 界面对下伏地层强烈削截,整个梅山组一段完全被削蚀。将位于盆地西部的上陆坡区域井 C 沉积的一套高位三角洲砂体(砂砾岩—含砾粗砂岩)剥蚀并输送到下陆坡区域,形成斜

坡扇和盆底扇等浊积扇体,如井 D 黄流组二段低位斜坡扇砂体,表现为一套较细的粉砂岩—灰质粉砂岩(图 8)。在盆地西部,S40 界面控制了储层的发育并改善了储集物性。

在盆地东部,由于 11.6 Ma 之后盆地东部水体突然加深,沉积相的“相跃迁”特征会在 S40 界面之上沉积大套的海相泥岩,这些泥岩既可作为三亚组和梅山组砂体(如低位盆底扇砂体)良好的盖层,也可以作为晚中新世之后潜在的烃源岩(图 9)。

4 结论及认识

(1)S40 界面在盆地西北部浅水区,多表现为角度不整合,削截下伏地层特征,在局部地区梅山组一段整套地层都被削蚀;在盆地东部半深水—深水区域,S40 界面上下差异性非常明显,之上为一组中等连续性、振幅较强的同相轴,对应半深水—深水沉积背景,界面之下地震反射多表现出强振幅、中等连续—丘状反射的特征,局部甚至有前积反射特征,对应浅水沉积背景。

(2)S40 界面在琼东南盆地东西部具有不同的性质:在盆地西部,S40 界面受控于区域性海平面下

降;在盆地东部,S40 界面受控于构造作用。

(3)11.6 Ma 时期,琼东南盆地东部可能发生了一次局限性的构造活动,使得盆地东部下沉,由浅水背景“突变”为半深水—深水背景,形成“东深西浅”的地貌;自晚中新世以来,盆地趋于稳定,这一地貌特征保存至今;S40 界面在盆地东南部的特征即是这一次构造突变事件的记录。

(4)S40 界面不仅是区域性海平面大规模下降界面和分隔裂后期热沉降充填和加速沉降充填的重要不整合界面,还很有可能是琼东南盆地一次重要构造事件的记录,该界面的存在对南海北部油气聚集有重要的影响。

References

Haq, B. U., Hardenbol, J., Vail, P. R., 1987. Chronology of fluctuating sea-levels since the Triassic. *Science*, 235 (4793): 1156—1167. doi: 10.1126/science.235.4793.1156

Li, S. T., Lin, C. S., Zhang, Q. M., et al., 1998. The dynamic process of screen rift of continental marginal basin in the northern South China Sea and the tectonic events since 10 Ma. *Chinese Science Bulletin*, 43(8): 797—810 (in Chinese).

Liu, F. L., Wu, L. S., 2006. Topographic and morphologic characteristics and genesis analysis of Xisha trough Sea area in the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(3): 7—14 (in Chinese with English abstract).

Ren, J. Y., 2004. Tectonic significance of S6' boundary in Dongying depression, Bohai Gulf basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(1): 69—76, 92 (in Chinese with English abstract).

Shao, L., Li, X. H., Wang, P. X., et al., 2004. Sedimentary record of the tectonic evolution of the South China Sea since the Oligocene: evidence from deep sea sediments of ODP Site 1148. *Advances in Earth Science*, 19(4): 539—544 (in Chinese with English abstract).

Steckler, M. S., Watts, A. B., 1978. Subsidence of the Atlantic-type continental margin off New York. *Earth and Planetary Science Letters*, 41(1): 1—13. doi:10.1016/0012-821X(78)90036-5

Su, M., Li, J. L., Jiang, T., et al., 2009. Morphological features and formation mechanism of central Canyon in the Qiongdongnan basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 29(4): 85—93 (in Chinese with English abstract).

Tao, Z. P., Deng, H. W., Su, Z. F., et al., 2005. Transformation characteristics of sequence boundary and stratum statistics of Paleogene third-order sequences. *Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jiangnan Petroleum Institute-J. JPI)*, 27(3): 409—412 (in Chi-

nese with English abstract).

Xie, X. N., Müller, R. D., Ren, J. Y., et al., 2008. Stratigraphic architecture and evolution of the continental slope system in offshore Hainan, northern South China Sea. *Marine Geology*, 247(3—4): 129—144. doi:10.1016/j.margeo.2007.08.005

Yang, M. Z., Wang, M. J., Liang, J. Q., et al., 2003. Tectonic subsidence and its control on hydrocarbon resources in the Wan'an basin in the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 23(2): 85—88 (in Chinese with English abstract).

Yao, B. C., Wan, L., Liu, Z. H., et al., 2004a. Tectonic significance and its petroleum effect of the Wan'an tectonic movement in the south of the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 24(1): 69—77 (in Chinese with English abstract).

Yao, B. C., Wan, L., Wu, N. Y., 2004b. Cenozoic plate tectonic activities in the great South China Sea area. *Geology in China*, 31(2): 113—122 (in Chinese with English abstract).

Zhao, Q. H., Wang, P. X., Cheng, X. R., et al., 2001. A record of Miocene carbon excursions in the South China Sea. *Science in China (Ser. D)*, 31(10): 808—815 (in Chinese).

附中文参考文献

李思田, 林畅松, 张启明, 等, 1998. 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. *科学通报*, 43(8): 797—810.

刘方兰, 吴庐山, 2006. 西沙海槽海域地形地貌特征及成因. *海洋地质与第四纪地质*, 26(3): 7—14.

任建业, 2004. 渤海湾盆地东营凹陷 S6' 界面的构造变革意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(1): 69—76, 92.

邵磊, 李献华, 汪品先, 等, 2004. 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. *地球科学进展*, 19(4): 539—544.

苏明, 李俊良, 姜涛, 等, 2009. 琼东南盆地中央峡谷的形态及成因. *海洋地质与第四纪地质*, 29(4): 85—93.

陶宗普, 邓宏文, 苏宗富, 等, 2005. 层序界面的转换性质与济阳拗陷下第三系三级层序统层. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 27(3): 409—412.

杨木壮, 王明君, 梁金强, 等, 2003. 南海万安盆地构造沉降及其油气成藏控制作用. *海洋地质与第四纪地质*, 23(2): 85—88.

姚伯初, 万玲, 刘振湖, 等, 2004a. 南海南部海域新生代万安运动的构造意义及其油气资源效应. *海洋地质与第四纪地质*, 24(1): 69—77.

姚伯初, 万玲, 吴能友, 2004b. 大南海地区新生代板块构造活动. *中国地质*, 31(2): 113—122.

赵泉鸿, 汪品先, 成鑫荣, 等, 2001. 中新世“碳位移”事件在南海的记录. *中国科学(D 辑)*, 31(10): 808—815.