科学通报 2008 年 第 53 卷 第 19 期: 2342 ~ 2351
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

南海北部深水盆地的裂陷过程及裂陷期延迟机制探讨

董冬冬[①②], 吴时国[①③*], 张功成[④], 袁圣强[①②]

① 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071;
② 中国科学院研究生院, 北京 100049;
③ 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 东营 266555;
④ 中国海洋石油有限公司研究中心, 北京 100027
* 联系人, E-mail: swu@ms.qdio.ac.cn

2008-02-21 收稿, 2008-05-27 接受
中国科学院知识创新工程重要方向性项目(批准号: KZCX2-YW-203)和国家重点基础研究发展计划资助项目(编号: 2007CB411703)

摘要 依据最新地震地质资料利用回剥法计算了南海北部深水区 3 条测线的构造沉降量. 结果显示研究区不同于典型的被动陆缘盆地, 虽然南海于 32 Ma 开始扩张, 但陆缘盆地的构造沉降速率此时没有减小反而增大, 23 Ma 左右才显著减小, 暗示裂陷作用一直持续到约 23 Ma 才结束, 地层厚度资料同样反映出这一现象, 即裂陷期出现了延迟, 热沉降开始时间滞后. 认为形成该现象的机制可能有 3 个: (1) 南海北部陆缘的岩石圈强度很弱, 塑性相对较强, 对南海扩张造成的应变衰减反应延迟; (2) 岩石圈分层独立伸展的差异性可能也是导致裂后热沉降滞后的原因; (3) 南海扩张脊在 24~21 Ma 之间的向南跃迁及对应的海底扩张增速事件进一步诱发了研究区 23 Ma 左右大规模裂后热沉降的开始.

关键词
南海
深水盆地
构造沉降
裂陷作用
破裂不整合

近年来深水盆地油气勘探日益成为油气勘探的主战场, 中国的油气勘探也正在向深水进军. 中国南海北部分布有面积巨大的深水盆地(水深大于 300 m), 由于其良好的油气远景而受到了国内科研单位和石油公司的重视[1]. 其中, 珠江口盆地深水区成为近年来的研究热点. 珠江口盆地是一个发育在前第三系基底之上的新生代陆缘裂陷盆地, 走向NE, 其深水区主要为珠 II 坳陷, 包括白云凹陷、荔湾凹陷、开平凹陷和顺德凹陷, 面积超过 40000 km^2(图 1). 该区在大地构造单元上属于洋陆过渡带, 其演化受欧亚板块、太平洋板块和印-澳板块三大板块的共同作用, 构造十分复杂.

陆缘裂陷盆地的构造演化阶段及其特征控制着含油气盆地的石油地质条件. 对珠江口盆地来说, 前人在其构造演化方面已经作了许多工作[2~8]. 珠江口盆地最重要的不整合面是破裂不整合面(Break-up unconformity)T_7, 为珠海组地层的底界, 发育时间为 32~33 Ma[2]. 李平鲁[3]通过分析不整合面、地层间断、断裂和岩浆活动等构造事件认为珠江口盆地的裂陷阶段为晚白垩世-早渐新世时期, 破裂不整合面(T_7)作为珠江口盆地裂陷期与裂后坳陷期划分的界限. 之后大多数学者均持此观点, 认为形成该不整合的构造事件为南海运动, 对应于南海中央海盆的扩张, 自此珠江口盆地的裂陷期结束, 开始进入裂后热沉降阶段, 并在其后接受了珠海组海陆过渡-局限海相沉积[4~10]. 然而, 在盆地演化阶段这一问题上尚具有不同的认识, 如有学者认为珠江口盆地深水区在晚渐新世-早中新世才开始进入裂后的坳陷演化阶段[1,11]. 因此, 对于珠江口盆地尤其是深水区的裂陷过程目前在学术界尚存在一定的争议, 研究这一问题有助于揭示珠江口盆地乃至整个南海北部陆缘深水区的构造演化特征, 并进一步深入认识研究区的石油地质条件.

盆地构造沉降史的恢复是了解盆地构造演化的重要手段. 在针对珠江口盆地构造演化的研究工作中, 前人主要是以识别地震剖面的不整合现象及断

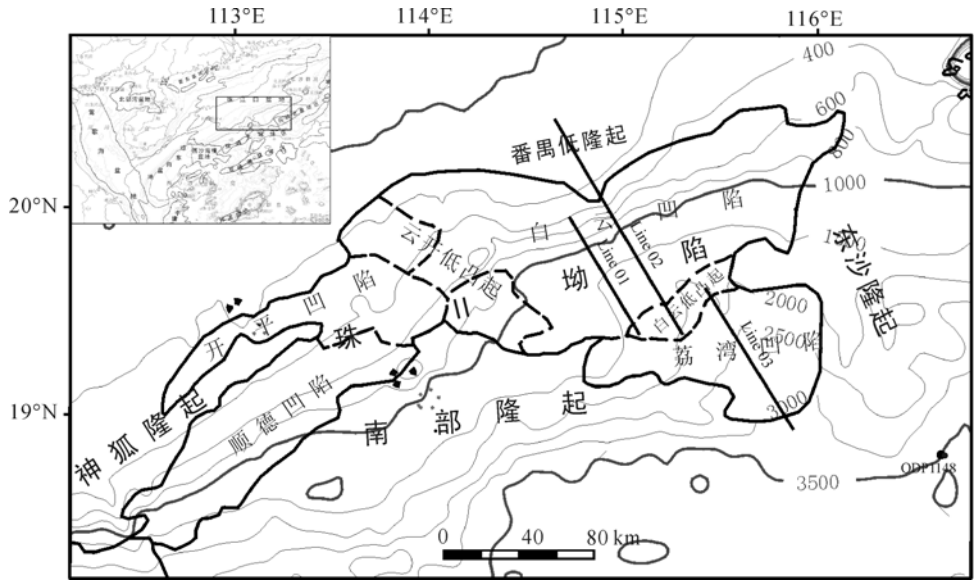

图 1　南海北部珠江口盆地深水区构造区划图

裂的活动期次为主要手段，缺乏较为详细的、定量的构造沉降史恢复．此外，受研究资料所限，前人研究多针对珠江口盆地浅水区，对于深水区的研究不足，且所用资料品质也较差，从而影响了研究的精度．本文运用珠江口盆地深水区 2004，2005 年采集的高分辨率的地震资料和最新的地质研究成果，利用回剥法对该区的 3 条典型测线计算了构造沉降量，恢复了该区的构造沉降史，并以此探讨珠江口盆地深水区的构造演化特征，以期能获得新的认识．

1　构造沉降量的计算

沉降是形成盆地的前提，沉降史分析是含油气盆地分析的中心问题之一．盆地的沉降包括两部分的因素：构造作用力造成的沉降(构造沉降量)和沉积负荷造成的沉降(负载沉降量)，其中，构造沉降量对于研究盆地的形成机制有着重要的作用．为了获得构造沉降量而将负载沉降量从总沉降量中去除的技术称之为回剥方法(Backstripping)．该方法需要进行 3 种校正：(1) 地层脱压实校正；(2) 古水深校正；(3) 古海平面变化校正．

经过综合校正后的构造沉降量可以表示为[12,13]

$$Y=\Phi\left[S\left(\frac{\rho_m-\rho_s}{\rho_m-\rho_w}\right)-\Delta_{SL}\left(\frac{\rho_w}{\rho_m-\rho_w}\right)\right]+(W_d-\Delta_{SL}),\quad(1)$$

式中，Y：构造沉降量；Φ：补偿度(衡量达到艾里均衡的程度)；S：经压实校正后的沉积物厚度；ρ_m：地幔密度；ρ_s：沉积物柱的平均密度；ρ_w：水的密度；W_d：古水深；Δ_{SL}：古海平面相对于现今海平面的高度．

因为珠江口盆地的岩石圈强度很低，可以认为已达到完全的重力均衡[14,15]，Φ取作 1；这样构造沉降量可以表示为

$$Y=S\left(\frac{\rho_m-\rho_s}{\rho_m-\rho_w}\right)-\Delta_{SL}\left(\frac{\rho_m}{\rho_m-\rho_w}\right)+W_d\,.\quad(2)$$

本次研究依据Sclater和Christie[16]的回剥方法，运用“沉积盆地热史恢复模拟系统”(Thermodel for Windows 2004)对珠江口盆地深水区的 3 条典型测线进行了构造沉降量的计算，定量的恢复了研究区的构造沉降史，进而探讨珠江口盆地深水区的构造演化特征．

1.1　地层年代

构造沉降史的恢复是研究盆地在不同地质年代构造沉降量的变化，地层单元的年龄直接影响构造沉降速率的计算精度，因而精确的地质年代是准确恢复构造沉降史的重要基础参数．

珠江口盆地T_7不整合界面之上的层序属于海相地层，有丰富的古生物资料为地层定年提供约束，地层年代较为准确；而T_7之下的地层多属陆相的河湖相地层，缺乏有力的古生物地层学证据，大多只能靠精度较低的孢粉资料来定年，且很少有钻井钻遇T_7以下的层序，因而早期层序的年代划分有多种方案，历来争议较大．裂陷盆地的基底年龄往往直接约束裂陷的开始时间．珠江口盆地新生代最老的沉积层

为古新统神狐组，因此，新生代拉张裂陷开始的时间至少晚于 65 Ma(新生代的底界年龄). 但珠江口盆地深水区缺失神狐组，因此 65 Ma不能代表南海北部陆缘大规模拉张的开始. Zhou[17]通过研究南海北部陆缘不同部位的多条拉张时间曲线认为，南海北部裂谷开始时间不早于 50 Ma.

鉴于地层年代的重要性，本研究综合深水区的地震层序划分结果，参考大量的相关文献[3,4,17~20]，地层年代数据依据 2004 年国际地层表，在此基础上重新编制了珠江口盆地深水区的综合地层年代表(图 2). 该地层年代表反复对比了前人的研究成果，准确度较高，为构造沉降史的恢复提供了重要的基础资料.

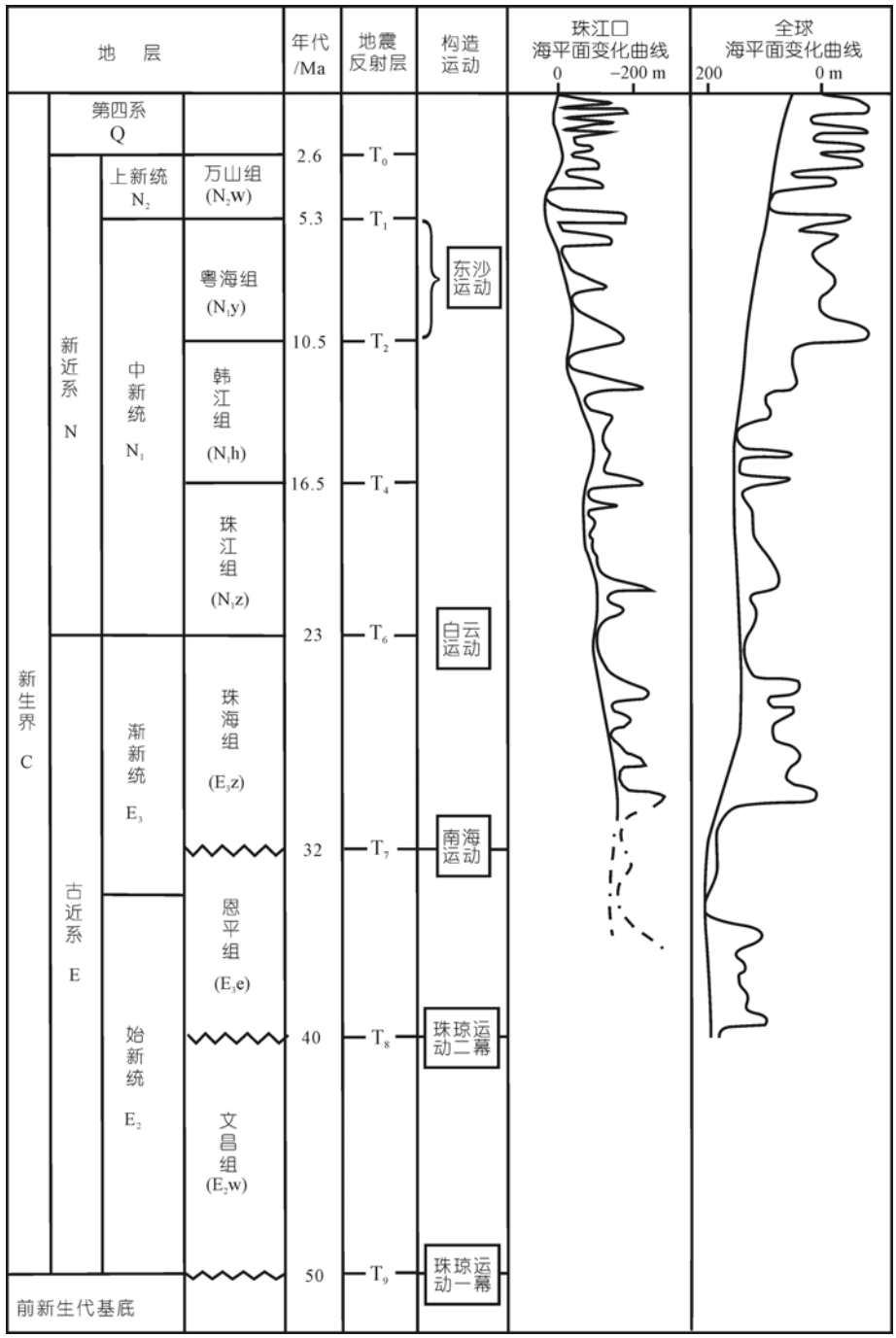

图 2　南海北部珠江口盆地深水区综合地层年代表

1.2 岩性组成及孔隙度深度关系

地层单元的岩性是脱压实计算中影响孔隙度恢复的重要参数. 通过系统地分析珠江口盆地的 41 口单井, 其中包括 4 口深水区的井, 统计出不同地层单元的岩性厚度百分比, 并由此得到珠江口盆地的综合地层岩性(表 1). 珠江口盆地岩性特征总体表现为古近系以砂岩为主, 而新近系则以泥岩为主; 灰岩主要出现在恩平组、珠海组和珠江组三套地层中, 仅在少数钻井中含量较高; 另外也有少量煤层出现.

孔隙度随深度变化关系采用指数形式[21]:

$$\phi = \phi_0 e^{-cy}, \tag{3}$$

式中, ϕ为深度y处的孔隙度, ϕ_0为沉积表面的初始孔隙度, c为压实系数. 对于不同的研究区, 砂岩孔隙度随深度变化一般不大, 但泥岩可能会有大的变化. 毗邻珠江口盆地深水区的ODP1148 井显示, 该井位泥质沉积物的孔隙度变化规律很接近Sclater和Christie在北海盆地的实测结果[14,16,22]. 因此, 南海北部珠江口深水盆地不同岩性的压实参数主要参考Sclater和Christie的研究[16], 具体参数如表 2 所示.

表 1 珠江口盆地岩性组成比例统计

地层	泥岩%	砂岩%	灰岩%	煤%
Q	86.01	13.99		
N_2w	65.40	34.60		
N_1y	63.48	36.52		
N_1h	62.55	37.45		
N_1z	46.59	43.88	9.14	0.39
E_3z	24.31	71.75	2.91	1.03
E_3e	45.84	53.53		0.63
E_2w	54.51	44.49		1.00

表 2 不同岩性的岩石物理参数

岩性	泥岩	砂岩	灰岩	煤
初始孔隙度	0.6	0.52	0.6	0.9
压实系数(km^{-1})	0.515	0.217	0.22	0.7
密度/$g\cdot cm^{-3}$	2.402	2.8	2.72	1.8

1.3 古水深及相对海平面变化

对于深水盆地而言, 古水深估算是回剥法分析中的重要误差来源. 我们依据珠江口盆地深水区的沉积古地理环境推断古水深. 一般来说, 冲积-河流相沉积可忽略水深, 滨-浅海水深 20~200 m, 上陆坡 200~500 m左右, 下陆坡至深海平原的浊积相沉积约为 500~2000 m[18]. 另外参考珠江口深水区的最新研究成果, 认为陆架坡折带在 23 Ma以前位于白云凹陷南侧, 之后一直维持在白云凹陷北侧, 与现今位置基本一致[23]. 这些研究均有助于我们对于古水深的推测.

相对海平面变化也是影响回剥计算精度的重要影响因素. Haq曲线[24]是被广泛使用的全球古海平面变化的依据, 但针对珠江口盆地的研究认为, 尽管盆地三级海平面变化与全球海平面变化基本一致, 但二级海平面变化却存在明显差异(图 2). 自新近纪 23 Ma以来, 全球海平面呈现海退的总趋势, 而珠江口盆地则表现为海侵的背景, 反映了岸线逐渐向北推进, 盆地范围逐步扩大的发育过程. 特别是 13.8~8.2 Ma的时段, 二级旋回曲线出现完全相反的趋势[7,8,25]. 在本研究中, 我们利用珠江口盆地的二级海平面变化曲线进行相对海平面变化的校正.

2 计算结果

本文选取过珠江口盆地深水区的三条主要测线作为研究资料, 测线自西向东分别命名为 Line 01, 02 和 03, 位置如图 1 所示. Line01 测线主要经过白云凹陷中心及白云低凸起, 总长约 110 km, 剖面基本呈现整体下坳的特征, 基底断层不发育(图 3(a)); Line02 测线横跨北部番禺低隆起、白云凹陷中心及南部的白云低凸起, 总长约 190 km, 番禺低隆起发育多个半地堑, 白云凹陷在该剖面上也呈现南断北超的结构特征, 白云低凸起上有火山发育(图 3(b)); Line03 测线主要横跨荔湾凹陷、白云低凸起及南部隆起, 总长约 100 km, 荔湾凹陷由数个半地堑组成(图 3(c)). 3 条剖面均显示了巨厚的古近系层序(T_6-T_g), 新近系层序相对较薄, 10.5 Ma(T_2)以来的地层向洋盆方向(SE)呈现明显的减薄. 这三条测线包括了珠江口盆地深水区的主要构造单元, 以它们作为典型测线来研究可整体反映深水区的主要构造特征.

对这三条测线每隔 2.5 km 抽取一道的层位信息生成伪井数据, 共包括 T_0, T_1, T_2, T_4, T_6, T_7, T_8和 T_g 八个层位的数据, 地层年代如图 2 所示. 利用前一节所述的研究方法和参数计算了三条测线各伪井的构造沉降量, 并绘制了构造沉降曲线(图 4). 为便于直观分析, 进一步计算了各伪井不同时期的构造沉降速率及平均速率(图 5).

从三条测线的构造沉降曲线上可以看出(图 4), 珠江口盆地深水区新生代以来的构造沉降量在不同

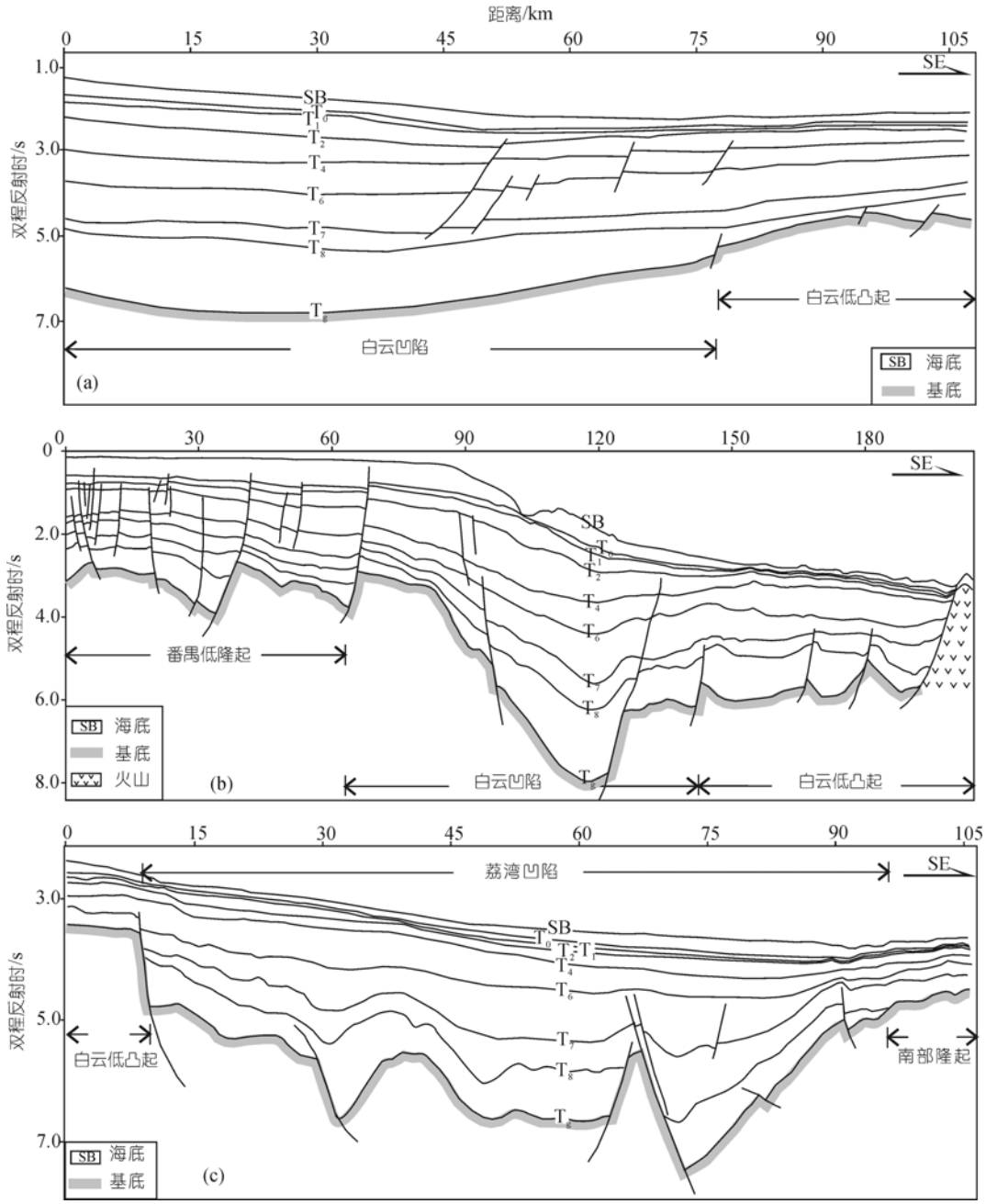

图 3 三条计算剖面的地震层序格架图

(a) Line 01; (b) Line 02; (c) Line 03

的构造部位变化非常大，在构造高部位沉降量较小，而在凹陷的中心部位往往具有很大的沉降量. 如番禺低隆起最小仅有约 2 km 的沉降量，白云低凸起沉降量在 2~4 km 之间，而白云凹陷的构造沉降量最大超过 10 km，荔湾凹陷的最大沉降量也超过了 6 km. 不同构造单元具有巨大差异的构造沉降主要反映了盆地在裂谷期断陷作用的分块性，沉降中心被构造隆起强烈分割.

50~40 Ma 为珠江口盆地深水区的主要沉降时期，构造沉降量大，速率非常快, Line 02 测线反映的白云凹陷在该时期的最大沉降量达 4.4 km，该期沉降奠定了盆地的基本构造格局; 40 Ma 之后全区的沉降速率开始变小，沉降量也有所减小，反映了一期相对较弱的构造沉降作用，该期使盆地的构造格局进一步

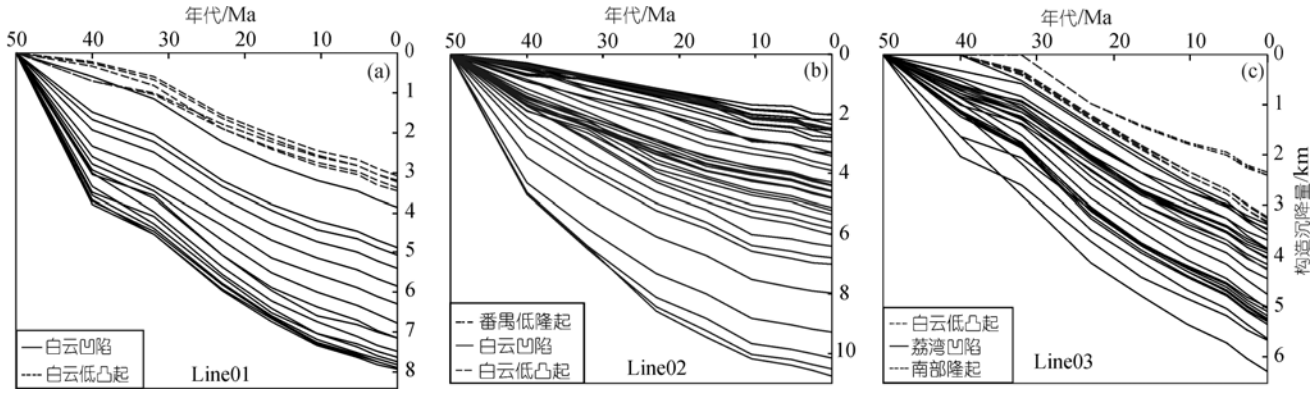

图 4　Line 01, 02 和 03 测线的构造沉降曲线

发育. 32 Ma 左右南海中央海盆开始扩张，洋壳开始形成，在全区形成了破裂不整合面(T_7). 32~23 Ma 之间盆地进一步沉降，但值得注意的是，对所有伪井计算数据进行统计发现，32~23 Ma 之间盆地的构造沉降速率相比 40~32 Ma 没有变小，反而在绝大部分的计算点处出现了增大的现象(图 5). 这一现象在 3 条典型测线的不同构造单元都有所反映. 不同构造期的平均构造沉降速率同样也反映了这样的现象，其中 Line 01 和 Line 03 线尤其明显，其中, Line 03 测线 32~23 Ma之间的构造沉降速率比40~32 Ma之间的增大了 77%. 计算结果同时表明，自从 23 Ma(对应于全区的 T_6 反射界面)开始，无论单个伪井的构造沉降速率还是平均沉降速率都出现了明显的减缓(图 5).

3　讨论

3.1　珠江口盆地深水区裂陷期的时限

对于被动大陆边缘伸展型盆地来说，一个完整的构造旋回包括裂陷期(syn-rift stage)和裂后期(post-rift stage)或热沉降期(thermal subsidence). 裂陷期地壳在地幔的伸展减薄作用下产生快速下沉，裂后期常被解释为深部地幔发生热衰减，物质开始冷却、密度加大，进一步引起地壳的缓慢下沉. 因此，一个完整的构造旋回在构造沉降曲线上通常表现为斜率不同的两段式，即较陡的裂陷期和较缓的裂后期[26,27].

多数学者通常将对应于 32 Ma的破裂不整合面 T_7 作为珠江口盆地由裂陷期向裂后热沉降期转换的界面，认为 32 Ma之后盆地的拉张断陷结束，并开始进入热沉降期[4~10]. 本次研究通过对珠江口盆地深水区构造沉降量的计算结果进行分析发现，32 Ma并没有发生构造沉降速率的显著变小，相反，绝大多数伪井的构造沉降速率在 32 Ma处都出现了增大的现象. 但是从 23 Ma开始所有的计算点均显示出了构造沉降速率的明显减缓. 由此我们认为T_7 虽然对应着南海中央海盆扩张这一构造事件，但是并不代表着珠江口盆地由裂陷期开始向裂后期的转换, 32~23 Ma之间盆地的裂陷作用仍在继续.

沉积地层对构造地形具有“填平补齐”的效应，凹陷部位地层厚度大而隆起部位地层厚度小，因此地层厚度保留着地史时期的构造格局信息，分析不同构造时期的地层厚度有助于了解盆地的构造演化阶段. 图 6 显示了珠 II 坳陷恩平组、珠海组和珠江组的地层等厚图，从图中可以发现，恩平组地层(40~32 Ma)的厚薄分布非常不均匀，沉积中心分割性很强，在凹陷中心部位地层较厚，构造隆起部位地层很薄甚至出现缺失，反映了盆地裂陷期强烈的分块断陷作用；珠海组地层(32~23 Ma)仍呈现出沉积中心分块的现象，局部构造高部位仍有地层缺失现象，显示出与恩平组地层具有一定的继承性；而珠江组地层(23~16.5 Ma)的厚度不均匀现象明显减弱，地层在全区均匀分布，无地层缺失，并且开始出现有规律的变化，地层整体向着南部洋陆边界变薄，展现出与恩平组和珠海组截然不同的特点，呈现出了裂后热沉降的特征. 因此，珠江口盆地深水区不同构造时期的地层厚度分布格局也反映出32 Ma之后，盆地的裂陷作用仍在进行，与前期的构造作用具有一定的继承性，大约在 23 Ma 全区才开始出现大规模的裂后热沉降，盆地整体均匀的接受沉积.

3.2　裂陷期延迟机制的探讨

南海中央海盆在32 Ma时开始海底扩张，吸收了陆缘张裂产生的应变量. 如果岩石圈的扰曲强度足

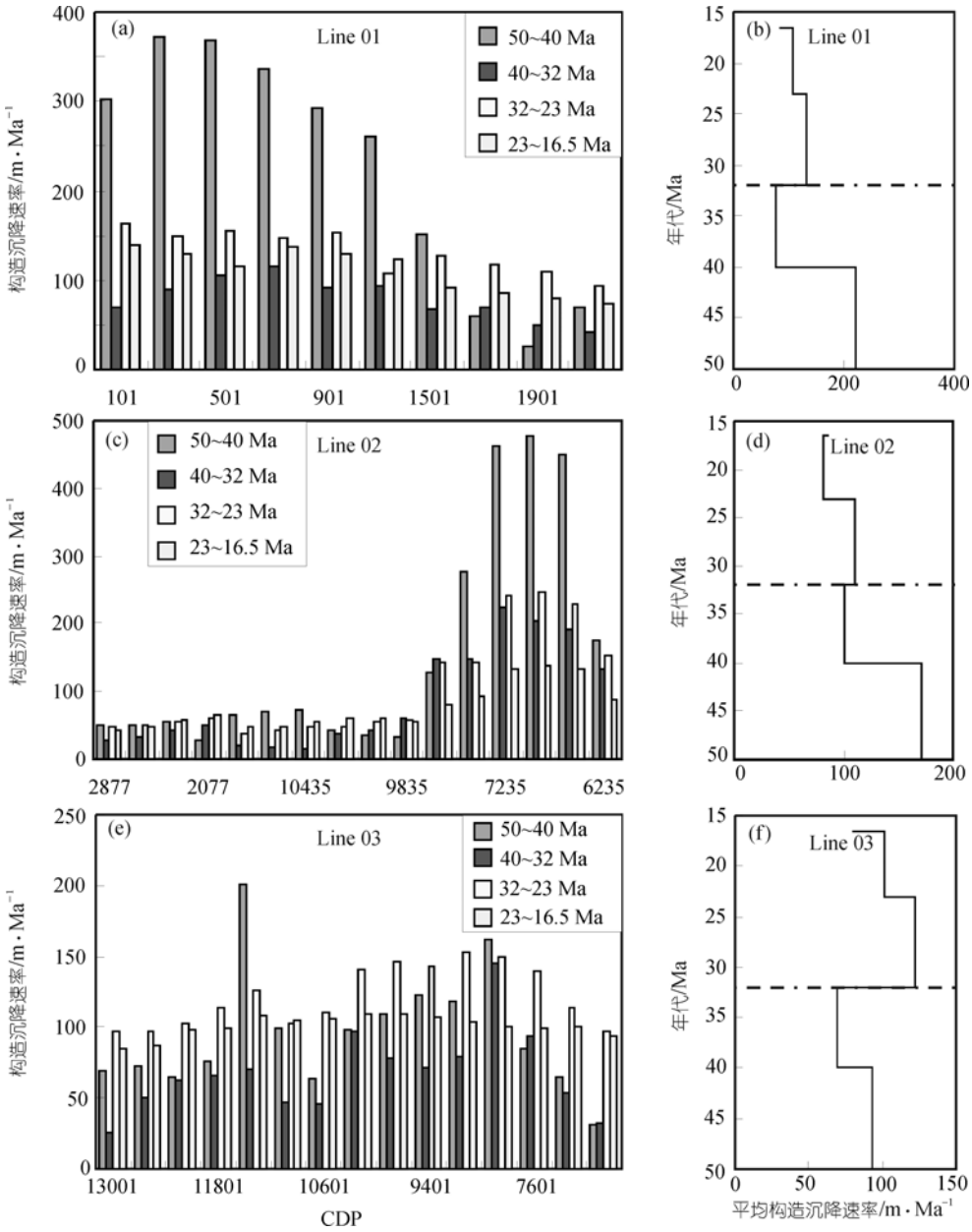

图 5 Line01, 02 和 03 线不同构造期的构造沉降速率及平均构造沉降速率

够大，这种应变衰减现象会立即传递到裂谷盆地，导致盆地结束张裂，随后开始稳定的热沉降. 但是研究认为南海陆缘岩石圈的强度很低[15,28~30]，从反映岩石圈不同部位相对软硬程度的有效黏滞系数来看，岩石圈地幔的有效粘滞系数与地壳有效黏滞系数相比低了约两个数量级，且在南海大片区域变化平缓，说明南海岩石圈地幔相当软[28,29]. 在渐新世期间，岩石圈的有效弹性厚度(Te)不超过 3~5 km，而白云凹陷处的岩石圈强度更是非常弱[15,30]. 弱的岩石圈强度意味着南海北部陆缘具有较强的塑性，其应变速率较低，具有一定的应变延迟性. 因此，南海中央海盆扩张所引起的应变衰减不会立刻作用于裂谷盆地，32 Ma后珠江口盆地深水区仍然处于裂陷阶段，断陷作用仍在进行. 随着南海中央海盆的扩张逐步释放了地幔深部的能量，南海北部陆缘的岩石圈地幔开始逐渐变冷收缩，至大约 23 Ma时才开始了大规模的热沉降.

Clift等人[14]通过对南海北部 30 口钻井数据进行

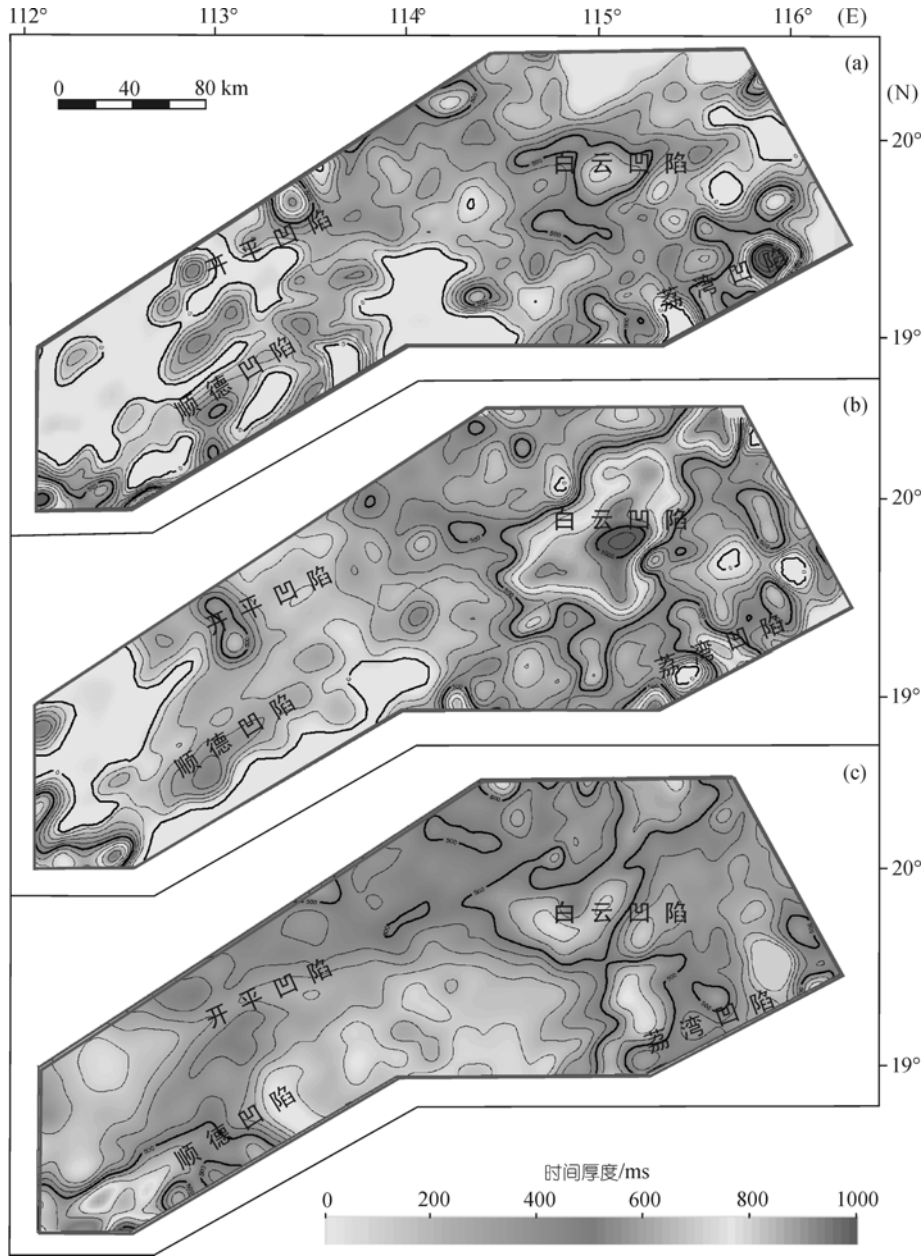

图 6 珠江口盆地深水区地层时间等厚图

(a) 40~32 Ma (恩平组); (b) 32~23 Ma (珠海组); (c) 23~16.5 Ma (珠江组)

回剥计算发现，在海底扩张开始之前珠江口盆地岩石圈地幔的伸展率超过地壳的伸展率. Xie等人[31]对珠江口盆地南部区域作了构造沉降分析，发现裂谷期沉降量比理论值要小，认为是由于下地壳相对于上地壳发生了优势伸展作用，补偿了裂陷期构造沉降造成的可容空间所致，Clift等人[15]的研究也得出了相同的结论. 因此，对于珠江口盆地尤其是深水区而言，上下地壳以及岩石圈地幔的伸展显示出明显的分层现象，各构造单元之间发生了相对独立的伸展作用，下部单元相对上部单元具有更大的伸展率. 岩石圈地幔相对强烈的伸展会引起裂后热冷却松弛的相对延迟，从而使盆地进入大规模热沉降期的时间会相对滞后. 因此，岩石圈的这种分层独立伸展的差异性可能也是导致大规模裂后沉降滞后的原因.

庞雄等人[23]研究发现珠江口盆地海域的陆架坡折带于 23 Ma以前位于白云凹陷的南侧，之后便维持

在白云凹陷的北侧，与今天的陆架坡折带位置基本一致，认为 23 Ma左右很可能是一个重要的构造作用转换期，并将对应的构造事件称之为“白云运动”. 有学者也指出，南海中央海盆的扩张脊在 24~21 Ma之间曾发生向南的跃迁[32]，对应于此出现了海底扩张增速的现象，从早期的 30.54 km/Ma增加到晚期的 42.88 km/Ma[33]. 我们认为这一构造事件使得南海北部陆缘盆地在大约 23 Ma的时候突然远离南海的扩张脊，而且海底扩张的增速也造成了新洋壳产生的速度加快，大量熔融的岩浆出露海底，从而加速了岩石圈的冷却速度，并进一步诱发了盆地全面进入裂后热沉降阶段.

李思田等人[34]通过对南海北部大陆边缘盆地张裂动力过程的研究认为在破裂不整合面形成之后(32 Ma)，裂陷作用在南海北部陆架盆地(浅水区)的局部仍然持续. Clift等人[14]通过对珠江口盆地浅水区钻井数据的构造沉降分析后认为南海中央海盆扩张开始以后，裂陷期的拉张事件仍然持续到 25 Ma才结束. 依据构造沉降分析结果，我们认为珠江口盆地深水区的裂陷期可能持续到 23 Ma左右，这一结论与陆架盆地研究结果基本相符.

3.3 珠江口盆地深水区的构造演化

在对南海北部深水盆地的张裂过程有了新的认识之后，可以进一步对该区的新生代构造演化进行分析. 在珠江口盆地内，古新世的神狐组地层仅在浅水区的珠Ⅰ和珠Ⅲ坳陷的部分凹陷内有发育，深水区缺少神狐组地层，因此珠江口盆地于晚白垩-古新世时期的最早期伸展仅仅形成了现今的浅水区坳陷，而处于深水区的珠Ⅱ坳陷尚未形成. 从早中始新世开始，珠江口盆地深水区逐渐形成，并开始了新生代的构造演化阶段. 根据本研究的分析结果并参考前人的研究，珠江口盆地深水区的裂陷期可以分为三期. 早中始新世的珠琼运动一幕引发了第一期裂陷，发育了文昌组的中深湖相沉积，该期断陷作用强烈，奠定了深水区的基本构造格局；晚始新世至早渐新世的珠琼运动二幕引发了第二期裂陷，沉积了中深湖相及半封闭浅海相恩平组，该期与第一期具有一定的构造继承性，但沉降量和沉降速率都有所减小；从中晚渐新世的南海运动开始进入了裂陷的第三期，该期盆地进一步发育并发生区域性抬升，形成区域不整合面 T_7，之后全区出现大规模海侵，发育了珠海组的三角洲和滨浅海碳酸盐沉积，晚期断陷作用开始减弱并逐渐向裂后期转化；晚渐新世至早中新世的白云运动是深水区进入大规模裂后热沉降的开始，同时也是现今陆坡体系演化的开始，自此南海北部陆缘盆地进入持续的整体拗陷阶段.

4 结论

(ⅰ) 南海北部珠江口盆地深水区 50~40 Ma 为最大构造沉降期，构造沉降速率在 40~32 Ma 开始减小，而在 32~23 Ma 期间再次明显增大，于 23 Ma 之后开始显著减小. 认为 32 Ma 南海中央海盆扩张形成的破裂不整合面并非裂陷期和裂后期的分界，之后裂陷作用仍在持续，直到 23 Ma 左右才开始大规模裂后热沉降，即裂陷期出现了延迟，裂后热沉降开始时间滞后.

(ⅱ) 形成裂陷期延迟现象的机制有 3 个: a) 南海陆缘岩石圈的强度较弱，对海底扩张造成的应变效应具有一定的延迟，没有立即引起陆缘的应变衰减. 随着地幔的逐渐冷却收缩，直到约 23 Ma 时全区才开始出现大规模的裂后热沉降; b) 岩石圈分层伸展的差异性也可能是导致裂后热沉降相对于海底扩张滞后的原因; c) 中央海盆扩张脊在 24~21 Ma 之间的向南跃迁及相对应的海底扩张增速事件进一步诱发了 23 Ma 前后的大规模裂后热沉降.

(ⅲ) 南海北部珠江口盆地深水区新生代裂陷作用始于早始新世，可以分为三期. 早中始新世为第一期，强烈的断陷作用奠定了深水区的基本构造格局；晚始新世至早渐新世为第二期，该期与第一期具有一定的构造继承性，但沉降量和沉降速率都有所减小；中晚渐新世为第三期，早期裂陷作用较前一期明显增强，晚期减弱并逐渐进入裂后热沉降阶段.

致谢 构造沉降量的计算采用了中国科学院地质与地球物理研究所的“沉积盆地热史恢复模拟系统”，广州海洋地质调查局姚伯初教授对本文观点给予了有益指导，几位匿名评审专家提出了很多中肯的建议，在此一并致谢.

参考文献

1 张功成，米立军，吴时国，等. 深水区——南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域. 石油学报, 2007, 28(2): 15—21

2 茹克. 南海北部边缘叠合式盆地的发育及其大地构造意义. 石油与天然气地质, 1988, 9(1): 22—31
3 李平鲁. 珠江口盆地新生代构造运动. 中国海上油气(地质), 1993, 7(6): 11—17
4 许仕策. 预测勘探目标中的层序地层学理论与实践——以珠江口盆地为例. 中国海上油气, 1999, 13(3): 152—158
5 刘铁树, 何仕斌. 南海北部陆缘盆地深水区油气勘探前景. 中国海上油气, 2001, 15(3): 164—170
6 孙珍, 庞雄, 钟志洪, 等. 珠江口盆地白云凹陷新生代构造演化动力学. 地学前缘, 2005, 12(4): 489—498
7 彭大均, 庞雄, 陈长民, 等. 从浅水陆架走向深水陆坡——南海深水扇系统的研究. 沉积学报, 2005, 23(1): 1—11
8 庞雄, 陈长民, 吴梦霜, 等. 珠江深水扇系统沉积和周边重要地质事件. 地球科学进展, 2006, 21(8): 793—799
9 戴一丁, 庞雄, 李平鲁. 珠江口盆地开平凹陷油气聚集条件分析. 中国海上油气, 1998, 12(1): 12—18
10 郭令智, 钟志洪, 王良书, 等. 莺歌海盆地周边区域构造演化. 高校地质学报, 2001, 7(1): 1—12
11 王家豪, 庞雄, 王存武, 等. 珠江口盆地白云凹陷中央底辟带的发现及识别. 地球科学——中国地质大学学报, 2006, 31(2): 209—213
12 Allen P A, Allen J R. Basin Analysis: Principles and Applications. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1990
13 Bond G C, Kominz M A. Construction of tectonic subsidence curves for the early Paleozoic miogeocline, southern Canadian Rocky Mountains: Implications for subsidence mechanisms, age of breakup, and crustal thinning. Bull Geol Soc Am, 1984, 95: 155—173[doi]
14 Clift P D, Lin J. Preferential mantle lithosphere extension under the South China margin. Mar Petrol Geol, 2001, 18: 929—945[doi]
15 Clift P D, Lin J, Barckhausen U. Evidence of low flexural rigidity and low viscosity lower continental crust during continental break-up in the South China Sea. Mar Petrol Geol, 2002, 19: 951—970[doi]
16 Sclater J G, Christie P A F. Continental stretching: An explanation of the post Mid-Cretaceous subsidence of the central North Sea basin. J Geophys Res, 1980, 85: 3711—3739[doi]
17 Zhou D. Studies in the Tectonics of China: Extensional tectonics of the northern margin of the South China Sea; Amalgamation and uplift of the Tian Shan; and wedge extrusion model for the Altyn Tagh fault. Dissertation for the Doctoral Degree. Stanford: Stanford University, 1997
18 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
19 Yan P, Zhou D, Liu Z. A crustal structure profile across the northern continental margin of the South China Sea. Tectonophysics, 2001, 338: 1—21[doi]
20 黄春菊, 周蒂, 陈长民, 等. 深反射地震剖面所揭示的白云凹陷的深部地壳结构. 科学通报, 2005, 50(10): 1024—1031
21 Ruby W W, Hubbert M K. Role of fluid pressure in the mechanics of overthrust faulting, II, overthrust belt in geosynclinal area of western Wyoming in light of fluid pressure hypothesis. Geol Soc Am Bull, 1960, 60: 167—205
22 Wang P, Prell W L, Blum P, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports, 184, College Station. Texas: Ocean Drilling Program, 2000
23 庞雄, 陈长民, 邵磊, 等. 白云运动: 南海北部渐新统——中新统重大地质事件及其意义. 地质论评, 2007, 53(2): 145—152
24 Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of fluctuating sealevels since the Triassic. Science, 1987, 235: 1156—1167
25 杨少坤, 黄丽芬, 李希宗, 等. 珠江口盆地特殊层序地层模式及其对勘探的指导意义. 中国海上油气(地质), 1996, 10(3): 137—143
26 Falvey D A. The development of continental margins in plate tectonic theory. APEA J, 1974, 14: 95—106
27 陆克政, 朱筱敏, 漆家福. 含油气盆地分析. 东营: 中国石油大学出版社, 2006
28 张健, 熊亮萍, 汪集旸. 南海深部地球动力学特征及其演化机制. 地球物理学报, 2001, 44(5): 602—610
29 张健, 汪集旸. 南海北部陆缘带构造扩张的深部地球动力学特征. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2000, 30(6): 561—567
30 Shi X, Burov E , Leroy S, et al. Intrusion and its implication for subsidence: A case from the Baiyun Sag, on the northern margin of the South China Sea. Tectonophysics, 2005, 407: 117—134[doi]
31 Xie X N, Müller R D, Li S T, et al. Origin of anomalous subsidence along the Northern South China Sea margin and its relationship to dynamic topography. Mar Petrol Geol, 2006, 23: 745—765[doi]
32 钟志洪, 王良书, 李绪宣, 等. 琼东南盆地古近纪沉积充填演化及其区域构造意义. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(1): 29—36
33 李家彪, 金翔龙, 高金耀. 南海东部海盆晚期扩张的构造地貌研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32(3): 239—248
34 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. 科学通报, 1998, 43(8): 797—810