

中国东部中生代断陷盆地幕式裂陷过程的动力学响应和模拟模型

林畅松¹, 张燕梅², 李思田³, 任建业³, 张英志¹

1. 中国地质大学地学实验中心, 北京 100083

2. 中国地质大学计算机系, 北京 100083

3. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

摘要: 结合盆地充填和构造演化的整体分析并进行计算机定量模拟, 揭示了中国东部中生代断陷盆地的沉降—充填、构造及热演化等对幕式裂陷过程的动力学响应。渤海湾和江汉等盆地的整个裂陷期常表现出 3~4 个裂陷作用幕, 不同裂陷幕的断裂展布方向、岩浆作用、沉降中心以及沉积体系分布等都发生了明显变化。如江汉盆地从白垩至新近纪同沉积断裂的展布就显示出从北西向北东转化的趋势。幕式裂陷构造沉降速率的变化控制着区域性(二级)沉积旋回和层序类型的发育和演化, 强烈裂陷沉降幕常发育深湖盆型层序, 而初始和晚期裂陷幕以发育浅湖和河流—浅湖型层序为特征。幕式裂陷过程不能用经典的单幕裂谷模型进行正确的描述; 通过校正每一裂陷幕的初始条件和拉伸系数, 建立了适用于幕式拉伸裂陷过程的多幕均匀瞬时拉伸模拟模型。应用这一模型对莺歌海盆地的模拟分析揭示了多幕裂陷过程中岩石圈结构及深部热流等的演化趋势, 其结果得到了地质和地球物理资料的佐证。

关键词: 幕式裂陷; 动力学响应; 定量模型; 中国东部。

中图分类号: P618.130.2; P628

文章编号: 1000-2383(2004)05-0583-06

收稿日期: 2004-05-12

Episodic Rifting Dynamic Process and Quantitative Model of Mesozoic-Cenozoic Faulted Basins in Eastern China

LIN Chang-song¹, ZHANG Yan-mei², LI Si-tian³, REN Jian-ye³, ZHANG Ying-zhi¹

1. *Geoscience Laboratories Center, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

2. *Department of Computer Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

3. *Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*

Abstract: Integrated analysis of basin filling and tectonic evolution, aimed with computer modeling technique, reveals the dynamic process of basin subsidence, sedimentary infill, structure and thermal evolution in response to the multiple rifting processes of the Mesozoic-Cenozoic rift basins in eastern China. The synrift phases of these basins, such as the Bohaiwan and Jianghan basins, usually include 3 to 4 rifting episodes, and the trends of syndepositional faults, the type of volcanic rocks and the distribution of depocenters and depositional systems changed significantly in different rifting stages. The episodic change in tectonic subsidence rate controls the development and evolution of the regional (the second order) sequences. In intensively rifting subsidence episodes, deep lacustrine basin sequences are usually observed, while during the initial and final rifting episodes shallow lacustrine and fluvial basin sequences commonly form. The process of episodic rifting significantly differs from that of the simple rifting in tectonic subsidence and deep heat flow, and can not be accurately described by a simple (one episode) stretching model. Through correction of the initial stretching condition of each rifting episode and stretching index, we have programmed a multiple uniform instantaneous stretching model to simulate the formation of the basins. This model has been applied to reconstruct the lithosphere structure and to evaluate the deep thermal evolution of the

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40072039); 国家重大基础研究规划项目(No. G1999043304)。

作者简介: 林畅松(1958—), 男, 教授, 主要研究方向为沉积盆地分析与模拟。E-mail: lincs@cugb.edu.cn

Yinggehai basin. The calculated results are in agreement with geophysical data and geological observation in the basin.

Key words: episodic rifting; dynamic process; quantitative model; eastern China.

中国东部大陆边缘广泛发育中新生代的裂陷盆地,如南海北部边缘盆地、东海陆架盆地、渤海湾盆地等。这些盆地蕴藏着巨大的油气资源,其形成演化是周边板块构造作用和岩石圈深部动力学过程的直接响应。近年来,以大量油气勘探资料为基础的盆地动力学研究的一个重要进展,是揭示了盆地的裂陷过程具有幕式的特点(Lin *et al.*, 1997; Li *et al.*, 1998; Ren *et al.*, 2002)。这种过程对盆地的构造格架、同沉积断裂活动、盆地沉降—充填史、沉积物埋藏和热演化等都产生了深刻的影响,因而对盆内的油气等沉积矿床的形成和分布起到了重要的控制作用。因此,研究这些盆地的幕式演化过程是阐明盆地各种要素和盆内油气资源形成和分布的重要基础。

关于多幕裂谷过程的研究在国内外一直受到广泛的关注。国际上大量研究表明,从相对长时间看,很多裂谷盆地都经历过多次的裂陷,如北海盆地就经历过多次盆地规模的拉伸作用,导致多个裂陷盆地的叠加(Keen and Dehler, 1993; Reemst and Cloetingh, 2000)。从相对小的规模上,如断裂的活动也表现出多期次或呈脉冲式发育(Hardy, 1993)。本文以一些典型盆地的研究为例,讨论幕式裂陷过程的断裂活动、构造沉降和充填的响应及其定量动力学模型。值得指出,这里讨论的主要是指在盆地总体的裂陷期,拉伸作用具有幕式进行的特点,拉伸幕间的热衰减期是相对短暂的。

1 断裂活动和构造格架

总体上,中国东部中生代断陷盆地一般都经历了从早期的裂陷到晚期的裂后拗陷阶段的演化。但裂陷阶段往往是幕式进行的,这种幕式的过程首先表现在断裂活动的多期性。由于盆地应力场和边界条件的变化,断裂的活动强度、展布方向和构造格架可发生明显的变化,从而对沉积充填产生了重要影响。如江汉盆地从晚白垩纪至古近纪盆地经历了 3 至 4 个明显的断裂活动期,主断裂的展布方向发生了从北西向、北东向到北东向的转化,导致了盆地构造格架的明显变化(图 1)。伴生的岩浆岩类型也发生了变化,从碱性玄武岩、石英拉斑玄武岩到橄榄拉斑玄武岩等。

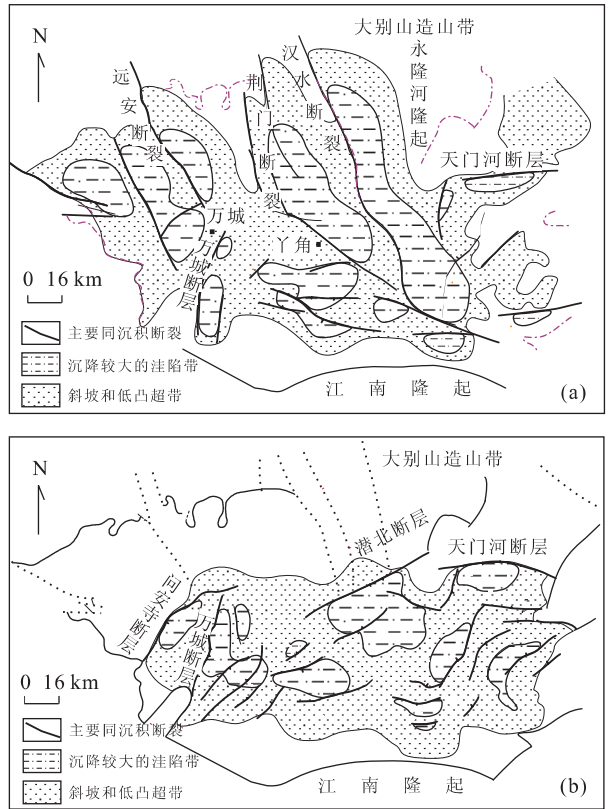


图 1 江汉盆地白垩纪裂陷幕(a)和古近纪早期裂陷幕(b)主要断裂和洼陷带分布

Fig. 1 Distribution of major faults and depressions formed during Cretaceous (a) and Eogene (b) rifting episodes

第三纪渤海湾盆地的裂陷过程也具有多幕的特征。在沾化、东营等凹陷,古近纪经历过 4 期的裂陷幕,从孔店裂陷幕到沙河街组沙三裂陷幕同沉积断裂走向存在由北西西向为主转向北东向为主的变化趋势,构造格架样式发生了相应的变化(Ren *et al.*, 2002; 任建业等, 2004)。在沙三裂陷幕,右旋走滑作用明显,还导致了大量帚状、雁行状同沉积断裂系的发育(林畅松等, 2003)。不同裂陷幕的岩浆岩类型也发生了变化,在孔店裂陷幕岩浆岩以石英拉斑玄武岩为主,到沙三裂陷幕则以橄榄拉斑玄武岩为主。主要同沉积断裂在不同裂陷幕的差异活动常常造成了沉降—沉积中心的明显变化,如东营凹陷从孔店裂陷幕至沙二—东营裂陷幕沉降中心的展布发生了相应变化,受控于不同裂陷幕主要同沉积断裂活动的差异或变化。在沾化凹陷的孤北洼陷,沙四裂

陷幕东次洼东缘的五号桩—长堤断裂带的强烈活动,控制着最大的沉降带.沙三裂陷幕最大沉降中心则迁至西次洼,这与西侧的埕东断裂带在这一时期的明显活动有关;而东侧的断裂活动相对减弱,形成翘翘板的构造—地层结构.

位于我国东北部的二连盆地的研究也发现从侏罗至白垩纪的裂陷作用具有 4 次幕式的演化过程.4 个裂陷幕的沉降速率显示出从快到慢的变化,产生了 4 个二级的沉积层序或三级层序组.不同裂陷幕都发育新的同沉积断裂,并随着盆地的扩张从盆地中部向外不断扩展,控制着不同时期沉积层序内沉积体系、沉积中心及沉积范围的分布.

2 幕式沉降和沉积充填响应

应用沉降回剥分析技术,经过去压实、沉积物重力均衡及古水深校正后,对莺歌海、琼东南、渤海湾、二连等中生代断陷盆地的构造沉降史的恢复结果,均显示出盆地的多个沉降幕,这显然受控于岩石圈拉伸和断裂作用的幕式过程.不同裂陷幕的构造沉降速率往往不同,早期裂陷幕构造沉降速率一般相对较小,中期较大,晚期变小.以渤海湾盆地沾化凹陷为例(图 2),从初始(孔店期)、早期(沙四期)、中期(沙三至沙二下段)、晚期(沙二上段至东营组)裂陷沉降幕的最大构造沉降速率分别约 120~170 m/Ma、140~120 m/Ma、250~350 m/Ma、150~200 m/Ma.在沙三期强烈裂陷幕常发育深湖盆沉积.明化镇组沉积期为裂后出现的一次总体的快速沉降,最大构造沉降速率达 200 m/Ma,并伴有断裂活动.

对渤海湾盆地、二连盆地、江汉盆地等沉积充填的研究均表明,幕式的裂陷过程对盆地的沉积充填具有重要的控制作用.每一幕的盆地充填常构成一个区域性的沉积旋回,其下部往往是相对快速的水进序列,上部逐渐水退,沉降速率变化显示出从加快到减小的趋势.不同裂陷幕的沉积充填往往构成多个相当于二级的沉积层序或三级的层序组,属于一种构造层序.它们多为区域性的古构造运动不整合面所限定.这表明各裂陷幕的后期沉降速率减小并出现抬升隆起.其间的不整合面的形成与每一裂陷幕末期的隆升和下一幕裂陷开始的构造变动和调整有关.

不同裂陷幕由于沉降速率、同沉积断裂的活动、

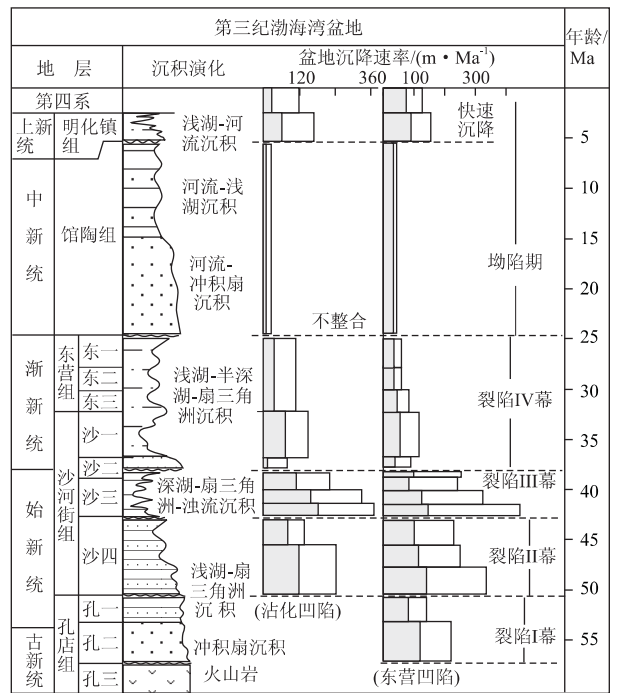


图 2 中国东部第三纪典型幕式裂陷盆地的构造沉降史和充填序列

Fig. 2 Tectonic subsidence history and basin filling sequence of representative Tertiary multiple rifted basins in eastern China

构造格局等的差异,沉积层序的几何形态、沉积体系域分布及其沉积相构成等也明显不同.在总体沉降较快的断陷湖盆中,早期裂陷幕的沉积层序以发育浅湖型或河流—浅湖型的沉积体系组合为特征(Lin *et al.*, 2001).中期的裂陷幕发育浅湖—半深湖的沉积层序,而中期强烈裂陷沉降幕以形成深水湖盆型的沉积层序为主.这在渤海湾盆地、二连盆地等断陷湖盆中表现十分明显(图 3).陡坡断裂带的边缘扇或扇三角洲体系的发育程度的变化也与间断性的断裂活动有关,每幕裂陷的早期形成巨厚的同构造活动期的扇砾岩,如冲积扇、扇三角洲或近岸湖底扇堆积;随后断裂活动的减弱伴随着扇体的衰退和水进.

3 定量模型和模拟

3.1 定量模型

中国东部新生代盆地主要形成于岩石圈变薄的边缘陆架区,是在东亚大陆边缘拉伸变薄或裂解的过程中发育的.从地球物理资料揭示的地壳结构与

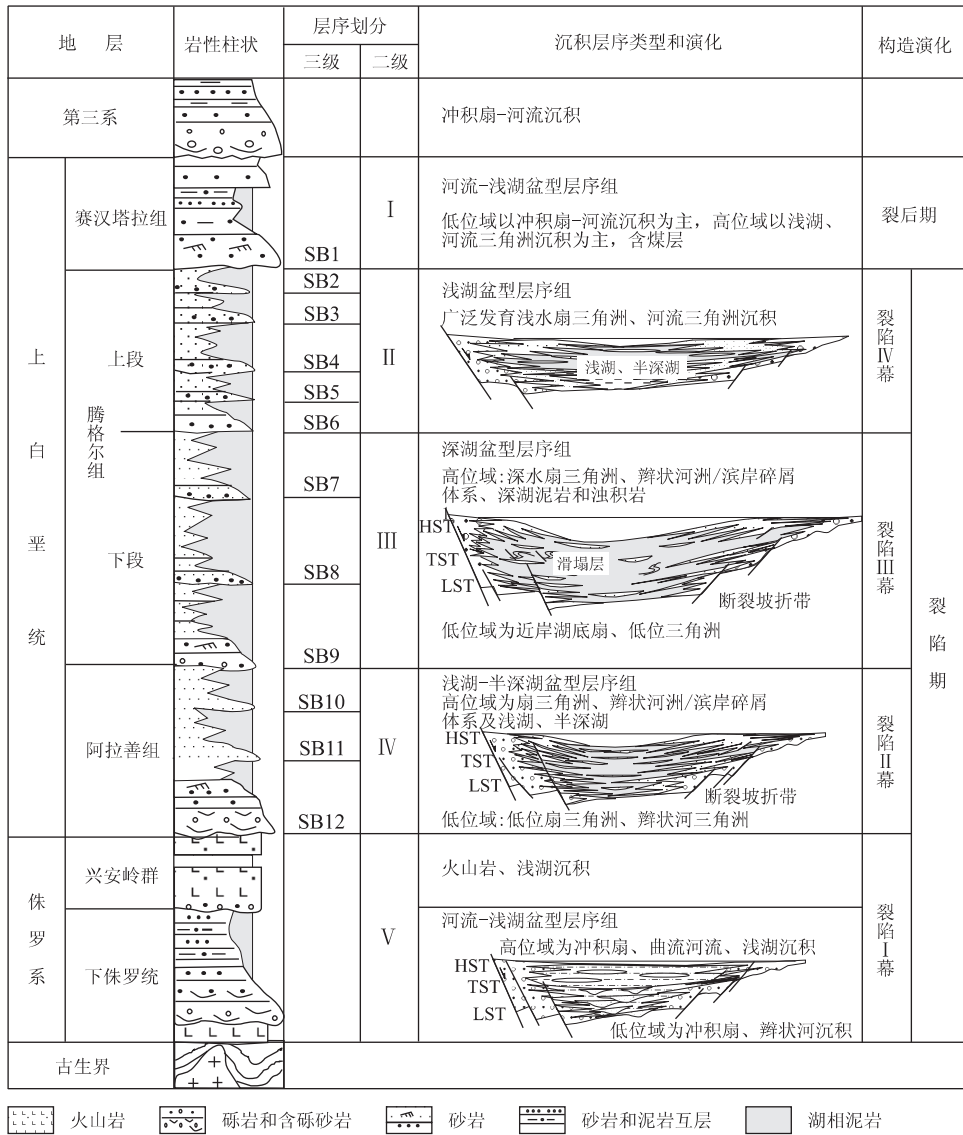


图 3 二连盆地的沉积层序发育与幕式裂陷构造演化

Fig. 3 Development of depositional sequences in response to multiple rifting of the Erlian basin

盆地分布等特征可看出,中国东部边缘盆地的发育主要与岩石圈的均匀拉伸变薄作用有关(Nissen *et al.*, 1995),总体上没有出现大规模的固体旋转.这种过程将使盆地的最大沉降带与岩石圈的最大变薄带或软流圈的隆升部位相一致,导致盆地中部具有高的热异常.为此,我们建立了裂陷盆地多幕瞬时均匀拉伸模型以模拟盆地的裂陷过程.如图 4 所示,在初始裂陷幕,拉伸前的边界条件是以岩石圈的原始条件来定义的,而以后各幕拉伸前的岩石圈状态必须以前一幕的终止状态为初始条件.因此,在计算下一裂陷幕的沉降和热演化时,必须确定前一幕结束时的岩石圈结构.多幕岩石圈拉伸及盆地热演化的数学模型详见 Lin *et al.* (2002) 文章的介绍,在此不

再赘述.

3.2 模拟实例分析

应用 Lin *et al.* (2002) 建立的动力学模型对莺歌海等第三纪盆地的模拟研究揭示了多幕裂陷过程中岩石圈结构及深部热流等的演化趋势.在模拟分析中应用反演回剥法进行古水深、沉积物压实及重力均衡等校正后获得构造沉降量,约束了正演模拟时盆地拉伸量的输入;由地球物理和钻井资料等获取的现今地壳厚度、大地热流及地温分布等数据可检验或拟合模拟结果(Reemst and Cloetingh, 2000).

在莺歌海盆地中北部(913393 测线)选择代表性剖面(最大深度为 11.82 km),从计算出的构造沉

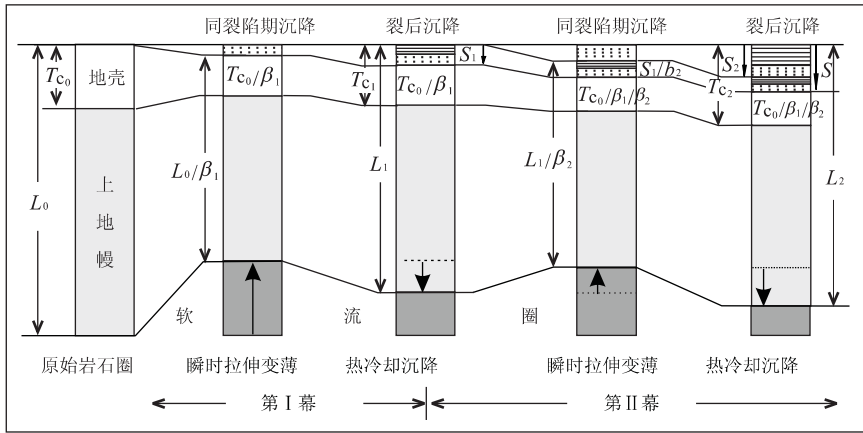


图 4 裂谷盆地幕式瞬时均匀拉伸模型

Fig. 4 Schematic map showing the process of multiple instantaneous uniform stretching model of a rift basin

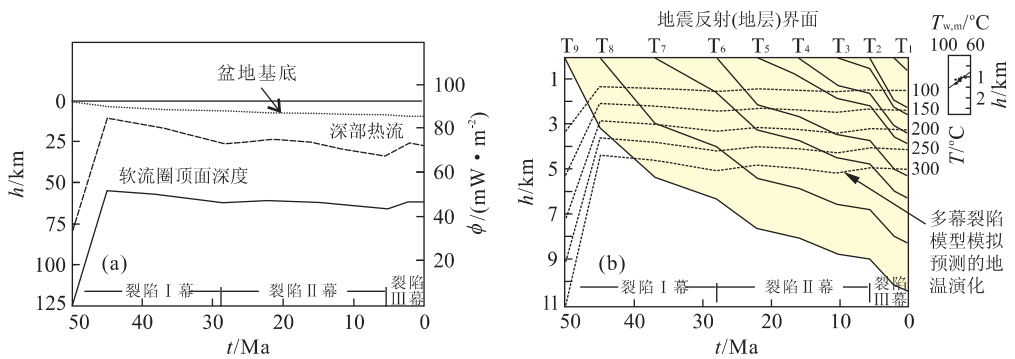


图 5 莺歌海盆地中北部以构造沉降速率约束计算的深部软流圈(a)和古地温演化(b)

Fig. 5 Evolution of the asthenosphere elevation (a) and the paleo-geothermal history (b) simulated by multiple rifting stretching model and constrained with tectonic subsidence rates from northern central part of Yinggehai basin

降速率变化可看出,盆地的沉降总体上可划分出从快到慢的 3 个沉降幕,每幕反映了裂隙作用从强到弱、直至停止沉降或隆起的过程.各幕的最大构造沉降速率分别为 630 m/Ma, 350 m/Ma 和 540 m/Ma.因此,盆地的演化可应用三幕式的瞬时均匀拉伸模型进行模拟(图 4).原始岩石圈的结构参数以 Parsons 和 Sclater 的为准(Allen and Allen, 1990),应用多幕拉伸模型与回剥反演构造沉降量拟合计算的每幕拉伸系数分别为 2.55, 1.04 和 1.05.地壳的最终拉伸系数则为 2.78,可得现今地壳厚度约为 11.22 km,而莫霍面的埋深应为 23.04 km.这一结果与地球物理资料反演的现今莫霍面高度(22~24 km)和地壳厚度(约 11 km)是相当吻合的.

模拟结果重塑了软流圈顶面高度和来自深部的热流和古地温的演化过程(图 5).模拟计算的裂后最大软流圈高度约为 50 km,所预测的现今软流圈的顶面高度约为 55 km.这与据火山岩资料反演的

软流圈隆升高度(60 km)相近(Parsons and Sclater, 1977).在强烈拉伸的裂谷盆地中,由于地壳和地幔经过了强烈的拉薄,放射性来源热量可忽略不计.因此,软流圈的顶面高度变化决定着盆地深部热流的总体变化.计算结果表明,最大的古热流达 85 mW · m⁻²,预测的现今深部热流量为 72~75 mW · m⁻²,这与现今的大地热流测量可比较(Hardy, 1993),预测的现今地温梯度与钻井的测量结果也相近(图 5b).在琼东南等其他第三纪盆地的模拟研究均取得与实际观察资料相近的结果.

4 结论

(1)中国东部中生代断陷盆地的拉伸过程常常具有幕式的特点.这种过程的动力学响应主要体现在多期性的同沉积断裂活动和构造格架的变化、幕式的沉降过程、多个由古构造运动面限定的区域

性沉积旋回(层序)的发育和沉积体系分布的变化等。(2)以单幕均匀瞬时拉伸模型难以正确地描述幕式裂隙过程,必须建立幕式拉伸定量动力学模型才能进行正确的模拟分析。以回剥法反演盆地的构造沉降,从而约束裂隙幕的划分和拉伸系数的估算。应用这一模型可恢复盆地幕式拉伸过程、岩石圈结构和深部热演化。

References

Allen, P., Allen, R., 1990. Basin analysis: Principle and processes. Blackwell Scientific Publications, London.

Hardy, S., 1993. Numerical modeling of the response to variable stretching rate of a domino fault block system. *Marine and Petroleum Geology*, 10: 145—152.

Keen, C. E., Dehler, S. A., 1993. Stretching and subsidence: Rifting of conjugate margins in the North Atlantic region. *Tectonics*, 12: 1219—1229.

Li, S., Lin, C. S., Zhang, Q. M., et al., 1998. Multiple rifting dynamics of the continental margin basins and tectonic events since 10 Ma in the northern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 43(8): 797—809.

Lin, C. S., Erikoson, K., Li, S., et al., 2001. Sequence architecture, depositional systems and their control of lacustrine sequence of the Erlian basin. *AAPG Bulletin*, 85(11): 2017—2043.

Lin, C. S., Li, S., Zhang, Q. M., et al., 1997. Subsidence and stretching of some Mesozoic and Cenozoic rift basins in East China. In: Liu, B. J., Li, S. T., eds., Basin analysis, globe sedimentology geology and sedimentology. *Proc. 30th Int. Geol. Congr.*, 1(b): 176—196.

Lin, C. S., Zheng, H. R., Ren, J. Y., et al., 2003. The control of syndepositional faulting on the Eogene sedimentary basin fills of the Dongying and Zhanhua sags, Bohai Bay

basin. *Science in China (Ser. D)*, 33(11): 1025—1036 (in Chinese).

Lin, C. S., Zhang, Y. M., Li, S. T., et al., 2002. Quantitative modelling of multiphase lithospheric stretching and deep thermal history of some tertiary rift basins in eastern China. *Acta Geologica Sinica*, 76(3): 324—330.

McKenzie, D., 1978. Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth and Planetary Science Letters*, 40: 25—32.

Nissen, S. S., 1995. Deep penetration seismic soundings across the northern margin of the South China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 22: 407—433.

Parsons, B., Sclater, J. G., 1977. An analysis of the variation of ocean floor bathymetry and heat flow and age. *J. Geophys. Res.*, 82: 803—827.

Reemst, P., Cloetingh, S., 2000. Polyphase rift evolution of the Voring margin (mid-Norway): Constraints from forward tectonostratigraphic modeling. *Tectonics*, 9(2): 225—240.

Ren, J. Y., Tamaki, K., Li, S. T., et al., 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344(3—4): 175—205.

Ren, J. Y., Zhang, Q. L., 2004. Analysis of development mechanism for center anticline high in dongying depression. *Geotectonica et metallogenia*, 28(3): 254—262.

附中文参考文献

林畅松, 郑和荣, 任建业, 等, 2003. 渤海湾盆地东营、沾化凹陷老第三纪同沉积断裂作用对沉积充填的控制. *中国科学(D)*, 33(11): 1025—1036.

任建业, 张青林, 2004. 东营凹陷中央背斜隆起带形成机制分析. *大地构造与成矿学*, 28(3): 254—262.

**《地球科学——中国地质大学学报》
2004 年 第 29 卷 第 6 期 要目预告**

走滑断裂、“挤压性盆—山构造”与油气资源关系的探讨..... 许志琴等

空间模式的广义自相似性分析与矿产资源评价 成秋明

地质流体状态方程 段振豪等

中国大陆科学钻探场址区的地壳速度结构研究 王有学等

中国晚始新世—早渐新世地层孢粉组合及其古气候特征 王晓梅等