

# 盆地伸展系数求取方法与评价

——以苏北盆地为例

包汉勇<sup>1,2</sup>, 郭战峰<sup>1</sup>, 张罗磊<sup>3</sup>, 黄亚平<sup>4</sup>

(1. 中国石油化工股份有限公司 江汉油田分公司 勘探开发研究院, 武汉 430223;

2. 同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092; 3. 东京大学 地震研究所,

日本 东京 1130032; 4. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:**伸展系数是张性盆地运动学分析的关键参数之一,对其计算可采用定义法、平衡剖面法和构造热演化模拟法。该文介绍了用这3种方法求取伸展系数的原理,并对苏北盆地晚白垩世伸展拉张以来的伸展系数进行了计算,综合分析后认为:定义法在获取了区域地壳厚度的基础上便能勾画出平面上的伸展系数分布图,便于区域比较,但对多期拉张的盆地而言,难以准确计算各期次具体的伸展系数;平衡剖面法能够恢复多期拉张的伸展系数,但因其自身难以做到真正的平衡,且没有考虑到地壳下部的热沉降,因而计算结果常需辅以其他手段加以对比分析;构造热演化模拟法在研究盆地构造形变的同时,综合考虑了深部构造热沉降,并且能读取不同时期任一点的地壳厚度,因而较定义法和平衡剖面法更为精确和方便。

**关键词:**伸展盆地;伸展系数;定义法;平衡剖面;构造热模拟;苏北盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

## Calculating methods and assessment of stretching factor:

A case study of Northern Jiangsu Basin

Bao Hanyong<sup>1,2</sup>, Guo Zhanfeng<sup>1</sup>, Zhang Luolei<sup>3</sup>, Huang Yaping<sup>4</sup>

(1. Exploration and Development Research Institute of SINOPEC Jiangnan Oilfield Company, Wuhan, Hubei 430223, China; 2. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo 1130032, Japan; 4. School of Resource and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract:** Basin stretching factor is a key parameter of extensional basin study and it was normally calculated from definition, balanced cross-section and tectonic-thermal modeling. The principles of traditional methods were briefly introduced in this paper, and the stretching factor of extension rifting in the Northern Jiangsu Basin after the late Cretaceous was also calculated. Basin stretching factor can be acquired by definition based on crust thickness, and it can be easily compared in different regions. For multi-phases stretch basin, it is hard to determine the stretching factor in different phases. The balanced cross-section method can reconstruct the basin stretching factor of multi-phases stretch, but the real equilibrium is actually hard to reach while the tectonic-thermal subsidence of the lower crust is not taken into consideration, thus other methods are needed for better comparison. The tectonic-thermal modeling method considers tectonic-thermal subsidence, and can also read crust thickness in any period. As a result, the tectonic-thermal modeling method is regarded as the more precise and convenient approach to calculate basin stretching factor.

**Key words:** extensional basin; stretching factor; definition; balanced cross-section; tectonic-thermal modeling; Northern Jiangsu Basin

伸展盆地是在张性应力作用下与岩石圈伸展、减薄相关的盆地,作为沉积盆地的一种重要类型,对其运动学特征开展定量分析和模拟自 McKenzie<sup>[1]</sup>提出二维瞬时伸展模型以来就一直备受关

注<sup>[2-5]</sup>。事实上,对伸展盆地进行运动学定量分析的关键是要通过计算或模拟得到较为精确的伸展系数,因而选择哪种方法计算伸展系数以及计算得出的伸展系数精度如何也就成为开展伸展盆地运

动力学分析的关键所在了。为此,本文首先简要介绍了用定义法、平衡剖面法及构造热演化模拟法求取伸展系数的原理,然后以具有较好油气勘探前景的苏北盆地为例<sup>[6-7]</sup>,分别用这3种方法试求了苏北盆地晚白垩世以来的伸展系数,并对得出的结果予以了综合评价,因而具有较为重要的理论和实践意义。

## 1 伸展系数的计算方法

### 1.1 定义法

伸展系数又被称为拉张因子、拉张系数、伸展因子、拉伸指数、拉伸因子等,是指伸展前初始地壳厚度与拉张后地壳厚度的比值,常用 $\beta$ 表示, $\beta = t_0/t_{wc}$ 。式中: $t_0$ 为伸展前的初始地壳厚度; $t_{wc}$ 为伸展后的地壳厚度。

用定义法计算伸展系数时,笔者注意到多数学者都是直接将盆地现今地壳厚度当作 $t_{wc}$ ,将盆地周围未发生明显伸展变形的隆起区地壳厚度当作 $t_0$ ,而忽视了伸展期间盆地所接受的沉积埋深以及隆起区的剥蚀厚度。事实是,在盆地伸展期间,盆内常会接受一定厚度的沉积,而盆地周缘隆起区则会遭受一定厚度的剥蚀。因而,在用定义法求取伸展系数时,伸展后的地壳厚度应减去伸展期间新接受的沉积厚度,伸展前初始地壳厚度则应在周缘隆起区地壳厚度值的基础上,加上在伸展期间所遭受的剥蚀厚度。

### 1.2 平衡剖面法

平衡剖面技术自Dahlstrom<sup>[8]</sup>提出这一概念以来,该技术得到了不断发展、完善及应用<sup>[9-14]</sup>,该方法是根据物质守恒的原理,将变形剖面恢复到沉积地层的初始状态(反演)或者从其初始状态剖面按照变形顺序得出最终变形剖面(正演)。利用平衡剖面法进行伸展系数计算的具体步骤为:先用平衡剖面技术恢复研究区不同伸展阶段剖面的长度,然后将伸展后的剖面长度除以伸展前的剖面长度。

### 1.3 构造热模拟法

近年来,数值模拟技术的发展和伸展盆地理论模型的逐步完善,使得用数值模拟技术来正、反演伸展盆地的运动学过程得以可行。笔者2011年<sup>[15]</sup>基于岩石圈尺度,从地球物理的角度,采用正演的方法,通过求解二维热传导方程(式1)来研究伸展盆地在形成演化过程中的构造热历史。

$$Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \left( \frac{\partial^2 KT}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 KT}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

式中: $Q$ 为热流; $\rho$ 为密度; $c$ 为比热容; $T$ 为温度; $t$ 为时间; $K$ 为热导率。模型所采用的边界条件为:

上边界温度为 $0\text{ }^\circ\text{C}$ ,深度为 $0\text{ km}$ ,下边界温度为 $1\text{ }330\text{ }^\circ\text{C}$ ,深度为 $125\text{ km}$ ,假定地质体的横向热传导为零,侧向边界为绝热边界。

具体方法是通过有限元的方法,在拉格朗日坐标系下,通过网格节点位移来描述伸展盆地的地质、地球物理构造形变,通过变节点温度来描述温度场的动态变化。模拟过程中要不断将构造沉降曲线与实测的沉降史曲线进行拟合,拟合较好时,会得出该盆地的构造热演化史,也会一并得到地壳从开始伸展以来各时期具体的厚度。在求取某一期盆地伸展系数时,只需读取这一阶段伸展拉伸的厚度与前一阶段的地壳厚度,然后将前者除上后者便可得到具体的伸展系数。

## 2 苏北盆地伸展系数的计算

苏北盆地位于下扬子地块的北部,北以郯庐断裂为界与苏鲁造山带接壤,南与苏南隆起(张八岭隆起等)和江南隆起区相邻,自晚白垩世以来苏北盆地主要经历了3期拉张,分别为第一期(浦口组—赤山组,95~83 Ma)、第二期(泰州组—阜宁组,83~54.9 Ma)和第三期(戴南组—三垛组,54.9~38 Ma)<sup>[16]</sup>及之后的构造反转,但是这次反转强度较弱,可以近似地认为三垛组沉积之后构造背景趋于稳定。另外,因其富含油气及固体矿产资源,近年来对该盆地的研究程度较高,可系统收集各种地质和地球物理资料,因而为本次开展张性盆地的伸展系数计算和评价提供了得天独厚的场所及资料支撑。

### 2.1 定义法求取伸展系数

从前文用定义法求伸展系数的原理描述可以看出,要求得苏北盆地的伸展系数,关键是要获得晚白垩世伸展拉张前的地壳厚度和拉张结束之后的地壳厚度。

对于拉张前的地壳厚度,常近似地选择与盆地相邻的隆起区地壳厚度,因而本文选择了苏北盆地南部的江南隆起区的地壳厚度当作其伸展前的地壳厚度。但是自 $K_2$ 以来,依据下扬子区浦口组磷灰石裂变径迹的分析<sup>[17]</sup>,证实这一阶段隆起区遭受了近 $2\text{ km}$ 的剥蚀,因而计算伸展前的地壳厚度时应在原地壳厚度上再增加剥蚀的 $2\text{ km}$ 。而对于拉张后的地壳厚度,可通过现今地壳厚度减去 $K_2$ 以来盆地区接受的沉积厚度得到。从近年发表的穿越苏北盆地的g78等多条综合地质—地球物理构造剖面可以看出,苏北盆地 $K_2$ 以来接受了 $2\sim 4\text{ km}$ 的沉积<sup>[18]</sup>,平均约为 $3\text{ km}$ ,因而伸展后的地壳厚度在实测值的基础上减去 $3\text{ km}$ 就可得到。

近年来,黄耘<sup>[19]</sup>利用地震台网体波资料反演研究区的速度结构后得出,苏北盆地地壳平均厚度为33 km,而苏南隆起和江南隆起区厚度则多在35~36.6 km。依据定义法的公式,如果将苏北盆地自晚白垩世以来看成是一期拉张的话,总的伸展系数为1.23~1.29。另外,笔者通过对新采集的地球物理资料应用层析成像和多种反演方法<sup>[14]</sup>,分析了下扬子及其邻区的速度结构、电性结构和热结构,得出了苏北盆地及周缘下扬子区地壳厚度的平面展布图。在此图基础上,依据将苏北盆地实测厚度扣除沉积埋深的3 km当作伸展后的厚度,而将苏南隆起区和江南隆起区地壳厚度加上剥蚀掉的平均厚度2 km当作拉伸前的初始厚度,将两者厚度相除后得到了苏北盆地及其邻区  $K_2$  以来伸展系数的平面分布图(图1)。从图1上可以看出,苏北盆地晚白垩世以来伸展系数多在1.22~1.28之间变化。

### 2.2 平衡剖面法求取伸展系数

本次用平衡剖面法求苏北盆地伸展系数时,选

择长度较大、横跨苏北盆地及其邻区的两条地震剖面 g78 和 g44 进行。在平衡剖面恢复时,考虑到晚白垩世以来苏北盆地经历了多期拉张,本文选取了多个时期进行平衡剖面恢复(图2,3),即:伸展之前( $T_3-K_1$ )、第一期伸展( $K_2p-K_2c$ )、第二—三期伸展( $K_2t-E_2s$ )和伸展之后至今( $Ny-Q$ )这样四个阶段。

基于前文用平衡剖面法计算伸展系数的原理,可算出 g78 和 g44 两条剖面在不同演化阶段的伸展系数(表1)。g44 和 g78 线计算出的第一期拉张( $K_2p-K_2c$ )的伸展系数分别为1.055和1.082;第

表1 苏北盆地 g44 和 g78 线平衡剖面伸展系数  
Table 1 Stretching factors of balanced cross-sections g44 and g78 in Northern Jiangsu Basin

期次		g44 线	g78 线
K <sub>2</sub> p-Q 总的伸展系数		1.18	1.15
各期次 伸展系数	Ny-Q	1.02	1.03
	K <sub>2</sub> t-E <sub>2</sub> s	1.12	1.06
	K <sub>2</sub> p-K <sub>2</sub> c	1.055	1.082

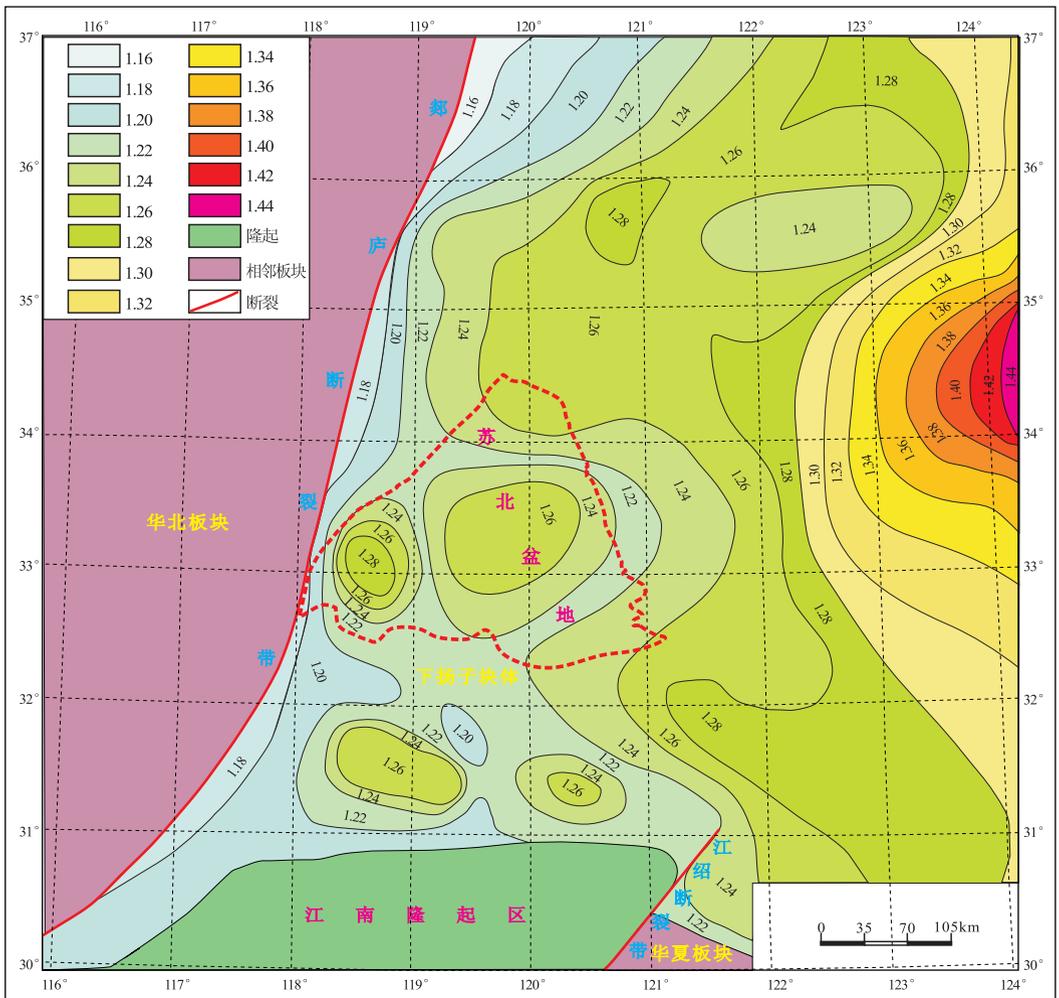


图1 苏北盆地及其邻区定义法求取的伸展系数平面分布

Fig. 1 Distribution of stretching factor calculated by definition method in Northern Jiangsu Basin and adjacent areas

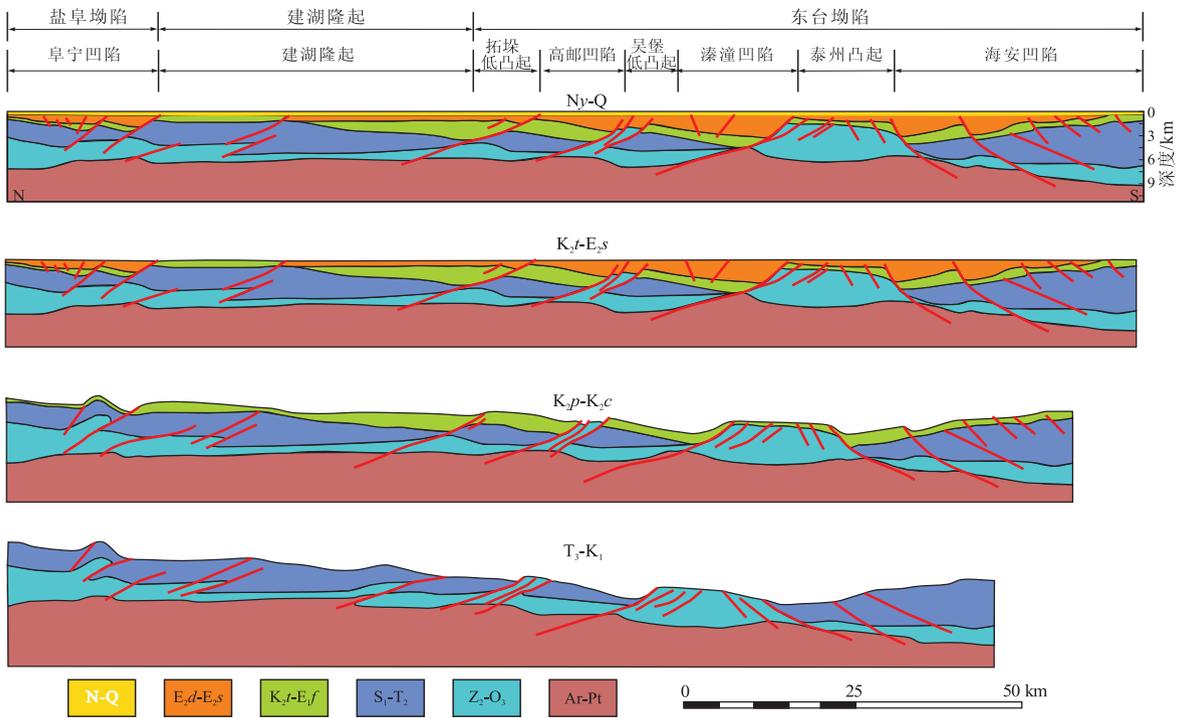


图2 苏北盆地 g78 线平衡地质剖面

Fig. 2 Balanced cross-section g78 in Northern Jiangsu Basin

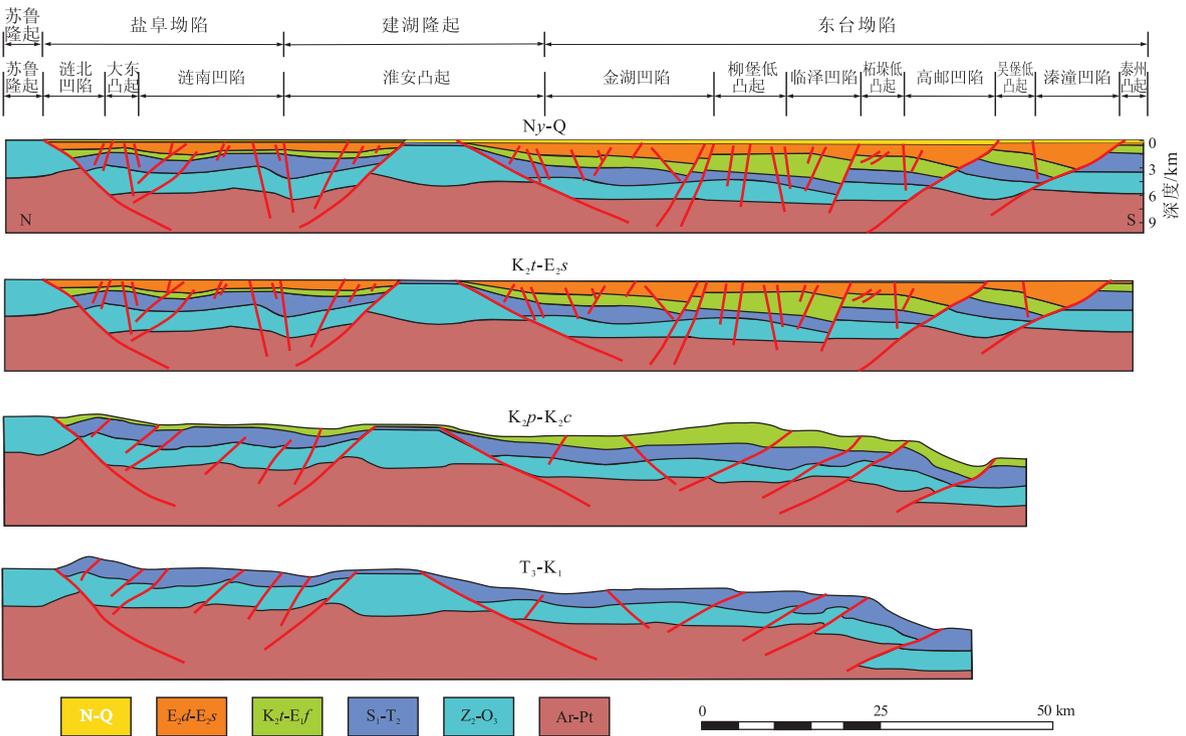


图3 苏北盆地 g44 线平衡地质剖面

Fig. 3 Balanced cross-section g44 in Northern Jiangsu Basin

二—三期拉张的伸展系数分别为 1.12 和 1.06; 之后的反转期至今这一阶段, 伸展系数很小, 几乎没有发生拉张, 这应与前文所述的下扬子区新近纪以来反转速率很小, 仅发育在个别凹陷, 整体上可能

还是继承了前期的伸展拉张有关。

另外, 如果近似地将苏北盆地  $K_2$  以来的构造演化简化当作一期拉张考虑时, 用伸展后 (Ny-Q) 的剖面长度除以伸展之前 ( $T_3-K_1$ ) 的剖面长度时,

则基于 g78 剖面(图 2)恢复得出的总的伸展系数为 1.15。但是对于次一级的凹陷和隆起,它们的伸展系数存在较大差异,其中:阜宁凹陷为 1.24,盐城凹陷为 1.32,高邮凹陷为 1.27,溱潼凹陷为 1.32,泰州隆起为 1,海安凹陷为 1.1,而建湖隆起伸展系数近似为 1。显示出晚白垩世以来凹陷区的拉伸要明显强于隆起区,并且各凹陷的伸展强度也各自不同。

同样,如果将苏北盆地  $K_2$  以来的构造演化简化当作一期拉张考虑时,基于 g44 平衡剖面(图 3)可以计算出总的伸展系数为 1.18,与 g78 相近。对于具体的隆起(凸起)和坳陷(凹陷)而言,伸展系数也存在明显不同,例如:盐阜坳陷和东台坳陷的伸展系数则分别为 1.16 和 1.32,而建湖隆起的伸展系数近似于 1。

### 2.3 构造热模拟法求取伸展系数

为了便于与前面用平衡剖面法恢复出的结果进行比较,同样选择了地震剖面 g78 和 g44 进行构

造热演化模拟,时间节点选择了开始伸展时( $K_1$ 末,95 Ma)、第一、二和三期伸展结束时(83,54.9,38 Ma)以及现今(0 Ma)这样几个节点。

先通过构造热模拟法得出 g78 和 g44 两条剖面自 95 Ma(即开始拉张时)以来的地壳厚度,并分别读取 83,54.9,38 Ma 和现今 4 个时间节点上的具体厚度值,然后依据前面所述的伸展系数求取原理,将前期厚度除以后一阶段地壳厚度,便得出了某一阶段的伸展系数。在厚度读取时,为求取不同构造单元的伸展系数,假定单一的隆起(凸起)与坳陷(凹陷)的伸展是均匀的,这样坳陷(凹陷)部位伸展系数可用沉降最深部位这一点的伸展量来表示,如 g78 线(图 4,表 2)中海安凹陷、溱潼凹陷、高邮凹陷和阜宁凹陷的伸展系数可通过 b、e、h 和 l 点予以求取;而隆起部位的伸展系数则可参考其两个端点的伸展系数,如泰州凸起的伸展系数可参考 c 点和 d 点。

苏北盆地自 95 Ma 左右(浦口组接受沉积)开

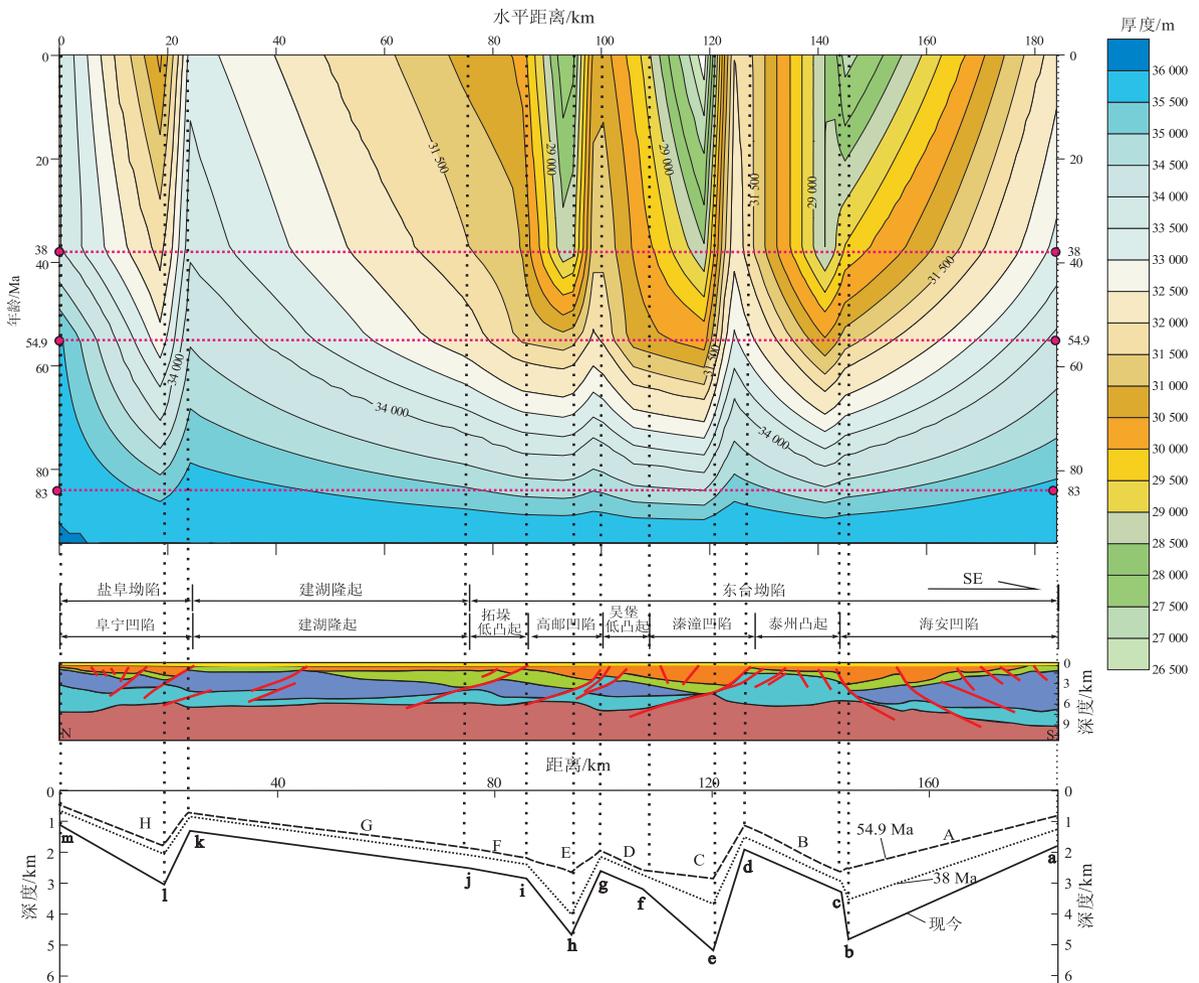


图 4 构造热模拟法得出的苏北盆地 g78 线地壳厚度及构造单元控制点

Fig.4 Crust thickness and controlling points of tectonic units crossing g78 in Northern Jiangsu Basin, modelled by tectonic-thermal evolution

表2 构造热模拟法得出的苏北盆地 g78 线地壳厚度

Table 2 Crust thickness crossing g78 in Northern Jiangsu Basin, modelled by tectonic-thermal evolution m

水平距离/km	0	19	24	75	85	94	99	106	119	124	142	144	184
控制点	m	l	k	j	i	h	g	f	e	d	c	b	a
0 Ma	33 999	30 380	33 264	30 872	30 238	27 869	30 589	29 806	26 154	31 951	28 501	27 205	32 227
38 Ma	34 038	31 828	33 842	31 556	30 939	28 804	31 292	30 437	28 534	32 380	28 509	29 516	33 131
54.9 Ma	35 606	32 727	34 460	32 256	31 488	31 411	32 158	30 859	30 271	33 130	30 614	31 323	34 250
83 Ma	35 966	35 020	35 630	34 762	34 451	34 413	34 647	34 220	34 078	35 032	34 269	34 407	35 460

注:表2和表3中控制点位置见图4。

表3 构造热模拟法得出的苏北盆地 g78 线伸展系数

Table 3 Stretching factor crossing g78 in Northern Jiangsu Basin, modelled by tectonic-thermal evolution

水平距离/km	0	19	24	75	85	94	99	106	119	124	142	144	184
控制点	m	l	k	j	i	h	g	f	e	d	c	b	a
95 ~ 83 Ma	1.00	1.03	1.01	1.04	1.04	1.05	1.04	1.05	1.06	1.03	1.05	1.05	1.02
83 ~ 54.9 Ma	1.01	1.07	1.03	1.08	1.09	1.10	1.08	1.11	1.13	1.06	1.12	1.10	1.04
54.9 ~ 38 Ma	1.05	1.03	1.02	1.02	1.02	1.09	1.03	1.01	1.06	1.02	1.07	1.06	1.03
38 Ma—今	1.00	1.05	1.02	1.02	1.02	1.03	1.02	1.02	1.09	1.01	1.00	1.08	1.03
95 Ma—今	1.06	1.18	1.08	1.17	1.19	1.29	1.18	1.21	1.38	1.13	1.26	1.32	1.12

始发生第一期伸展拉张,对于拉张前的地壳厚度,依据黄耘<sup>[19]</sup>在江南隆起的实测值,近似取值 36 km,用此值除以 83 Ma 时的地壳厚度(表 2),就可求得 95 ~ 83 Ma ( $K_2p-K_2c$ ) 期间地壳的伸展系数。同理,用前一期的地壳厚度除上后一期的伸展厚度便可依次求出 83 ~ 54.9 Ma, 54.9 ~ 38 Ma, 38 Ma 至今这三期各构造单元的伸展系数。为了便于与前文用定义法和平衡剖面法求得的晚白垩世以来总的伸展系数进行比较,也用构造热演化模拟法对总的伸展系数进行了计算。

从图 4 和表 3 上可以看出,苏北盆地晚白垩世以来的伸展系数呈现出以下几个明显的特征:

其一,苏北盆地在刚开始拉张期间(95 ~ 83 Ma)伸展系数并不太大,到了 83 ~ 54.9 Ma 期间伸展系数达到最大值,紧接着的 54.9 ~ 38 Ma 这一期伸展系数较前一期有所减小,而到了 38 Ma 至今这一阶段,伸展变得更小,有些区域几乎没有发生伸展。

其二,凹陷(坳陷)部位的伸展系数要明显大于凸起(隆起)部位。如凹陷(坳陷)沉积中心部位的 b、e、h 和 l 点处(分别取自海安凹陷、溱潼凹陷、高邮凹陷和阜宁凹陷)求取的伸展系数要较凸起(隆起)部位,如 d、g 和 k 点处(分别取自泰州凸起、吴堡低凸起和建湖隆起)的伸展系数大得多。

其三,从 95 Ma 以来总的伸展系数分布在 1.06 ~ 1.38 之间。

同样,基于 g44 线用构造热模拟的方法,模拟得出自 95 Ma 以来的地壳厚度(图 5),然后,在 83,

54.9, 38, 0 Ma 四个时间点上读取了地壳厚度值(表 4),按照与 g78 线相同的求取各时期伸展系数的方法,计算出了 g44 线上主要隆起(凸起)与坳陷(凹陷)从 a 至 u(图 5),共 21 个控制点处的伸展系数(表 5)。

从图 5 和表 5 可以看出,g44 线反映出了与 g78 线类似的伸展拉张特征,即苏北盆地的几期拉张中,整体上还是显示出第一期伸展拉张(95 ~ 83 Ma)的伸展系数要小于紧接着的 83 ~ 54.9 和 54.9 ~ 38 Ma 这两期,且最后 38 Ma 至今这一期的伸展系数也很小。凹陷(坳陷)区的伸展系数也要较凸起(隆起)区的大得多。另外,依据 g44 线计算出的晚白垩世以来的总的伸展系数分布在 1.04 ~ 1.40 之间,这与 g78 线计算出的 1.06 ~ 1.38 也较吻合。

### 3 伸展系数计算方法综合评述

前文很好地用定义法、平衡剖面法和构造热模拟法求取了苏北盆地晚白垩世以来的伸展系数,究竟这三种方法在求取伸展系数时各有何特点,在此作以下讨论。

用定义法求伸展系数时,只能将 95 Ma 以来苏北盆地的构造演化当作一期拉张完成,计算得出的伸展系数范围为 1.23 ~ 1.33,这与用平衡剖面法计算得到的 g78 线为 1.15、g44 线为 1.18,以及用构造热模拟得出的 g78 线为 1.06 ~ 1.38 和 g44 线为 1.04 ~ 1.4 范围都较接近。并且在获得了苏北盆地及其相邻隆起区的地壳厚度图时,可以很好地

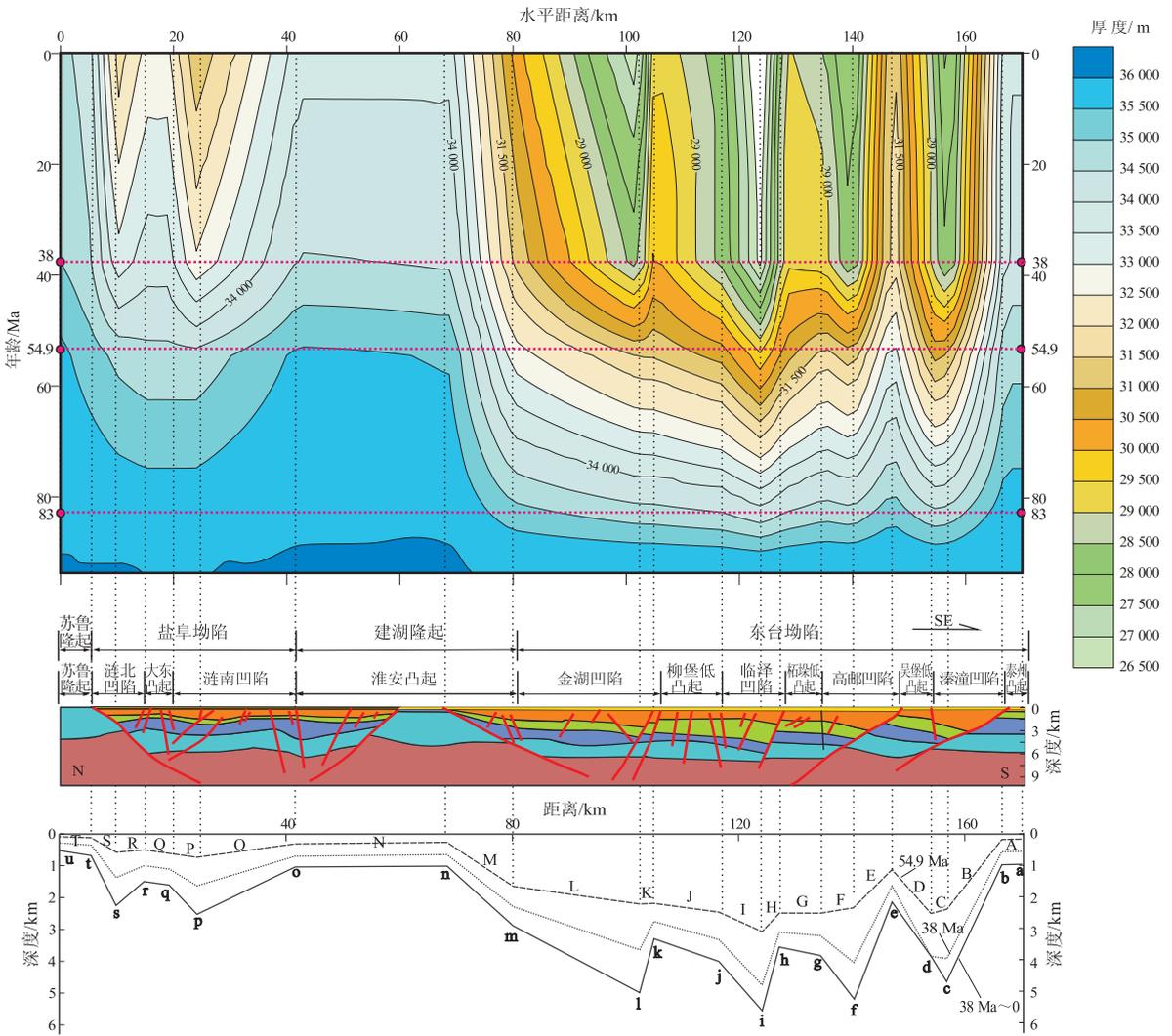


图5 构造热模拟法得出的苏北盆地 g44 线地壳厚度及构造单元控制点  
Fig.5 Crust thickness and controlling points of tectonic units crossing g44 in Northern Jiangsu Basin, modelled by tectonic-thermal evolution

表4 构造热模拟法得出的苏北盆地 g44 线地壳厚度

Table 4 Crust thickness crossing g44 in Northern Jiangsu Basin, modelled by tectonic-thermal evolution m

水平距离/km	0	5	10	15	19	24	42	69	80	102	105
控制点	u	t	s	r	q	p	o	n	m	l	k
0 Ma	34 658	34 218	31 818	32 660	32 654	31 040	33 647	33 733	30 250	27 563	29 258
38 Ma	34 998	34 576	33 193	33 743	33 731	32 564	34 453	34 511	31 329	28 859	30 009
54.9 Ma	35 637	35 246	34 861	34 681	34 680	34 679	35 564	35 452	32 711	31 464	31 452
83 Ma	35 938	35 875	35 814	35 779	35 780	35 781	35 938	35 872	35 064	34 590	34 565

水平距离/km	117	124	128	135	140	147	154	157	167	170
控制点	j	i	h	g	f	e	d	c	b	a
0 Ma	28 160	25 700	29 055	28 350	27 734	31 372	26 266	27 697	33 579	33 858
38 Ma	28 347	26 348	29 382	29 047	28 384	31 729	28 664	28 369	33 831	34 071
54.9 Ma	30 823	29 600	30 881	31 672	31 437	33 129	30 865	31 649	34 754	34 859
83 Ma	34 357	34 031	34 388	34 644	34 591	35 161	34 453	34 640	35 726	35 775

注:表4和表5中控制点位置见图5。

识别出苏北盆地平面上(图1)不同区域的伸展强度。因而,用定义法求取伸展系数的优势在于一旦

获取了区域的地壳厚度,便可较为容易地勾画出平面上的伸展系数分布图。其缺点在于对于有多期

表5 构造热模拟法得出的苏北盆地g44线伸展系数

Table 5 Stretching factor crossing g44 in Northern Jiangsu Basin, modelled by tectonic-thermal evolution

水平距离/km	0	5	10	15	19	24	42	69	80	102	105	117	124	128	135	140	147	154	157	167	170
控制点	u	t	s	r	q	p	o	n	m	l	k	j	i	h	g	f	e	d	c	b	a
95~83 Ma	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00	1.03	1.04	1.04	1.05	1.06	1.05	1.04	1.04	1.02	1.04	1.04	1.01	1.01
83~54.9 Ma	1.01	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.01	1.01	1.07	1.10	1.10	1.11	1.15	1.11	1.09	1.10	1.06	1.12	1.09	1.03	1.03
54.9~38 Ma	1.02	1.02	1.05	1.03	1.03	1.06	1.03	1.03	1.04	1.09	1.05	1.09	1.12	1.05	1.09	1.11	1.04	1.08	1.12	1.03	1.02
38 Ma—今	1.01	1.01	1.04	1.03	1.03	1.05	1.02	1.02	1.04	1.05	1.03	1.01	1.03	1.01	1.02	1.02	1.01	1.09	1.02	1.01	1.01
95 Ma—今	1.04	1.05	1.13	1.10	1.10	1.16	1.07	1.07	1.19	1.31	1.23	1.28	1.40	1.24	1.27	1.30	1.15	1.37	1.30	1.07	1.06

拉张的盆地而言,难以准确计算每期拉张后的地壳厚度,因而也就难以计算出多期伸展系数。

用平衡剖面法恢复盆地的伸展系数时,优势表现在能够分期次较为直观地恢复出各拉张过程(如本文中就分3个期次进行讨论),计算相应期次伸展系数的大小。另外,可分别计算出剖面上隆、坳部位的伸展系数,便于横向比较。但是,该方法也存在诸多不足,首先,尽管平衡剖面技术已经经历了较长时间的发展,但是因断裂数目和断距常难以精确计算等因素的影响,难以做到真正的“剖面平衡”;另外,用此方法计算伸展系数时,恢复的剖面主要针对的是地壳表层沉积层部分,而难以考虑其下的地球岩石圈,但事实上,引起岩石圈伸展的因素较多,比如基底热穹窿等不均匀热源体的存在而导致地壳热沉降也可能致使地壳产生伸展<sup>[20]</sup>。因而用平衡剖面法恢复盆地的伸展系数时,常需要辅以其他的手段加以对比分析。

用构造热模拟法对伸展系数进行恢复时,通过求解二维热传导方程来研究伸展盆地在形成演化过程中的构造、热历史,即在研究地质体构造形变的同时,综合考虑温度场和热流在时空上的演变规律,将伸展开始的构造沉降和随之出现的热沉降有机结合,因而较用定义法和平衡剖面法求取的伸展系数精度更高。另外,它能够读取自拉张以来任一时刻及剖面上任一点的地壳厚度,因而较定义法和平衡剖面法能更方便地计算伸展系数。此外,它也可以很好地考虑到隆起(凸起)和坳陷(凹陷)不同部位的伸展横向不均匀性。因此,综合比较后可以得出,构造热演化模拟法较定义法和平衡剖面法计算伸展系数更为精确。

## 4 结论

伸展系数是张性盆地运动学分析的关键参数之一,对其计算可采用定义法、平衡剖面法和构造热演化模拟法。

当将苏北盆地晚白垩世的构造演化当作一期拉

张过程时,用不同方法求取的伸展系数略有差异,其中用定义法计算出的伸展系数范围为1.23~1.33;以g44和g78线为例用平衡剖面法计算得出的伸展系数为1.15和1.18,而用构造热模拟得出的伸展系数为1.06~1.38和1.04~1.40。

定义法主要参考区域地壳厚度,能从平面上勾画出伸展系数分布图,但难以准确计算多期拉张盆地的伸展系数;平衡剖面法能够恢复多期伸展系数,但因很难做到真正平衡等,因而常需辅以其他手段加以对比分析;构造热模拟法在研究盆地构造形变的同时,通过求解二维热传导方程来研究伸展盆地在形成演化过程中的构造、热历史,将伸展初期的构造沉降和随之出现的热沉降有机结合,模拟得出的地壳厚度更贴近于真实,并且能读取不同时期、任一点的地壳厚度等,因而是伸展系数计算较为精确的方法。

## 参考文献:

- [1] McKenzie D P. Some remarks on the development of sedimentary basins[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 40: 25-32.
- [2] Lin Changsong, Zhang Yanmei, Li Sitian, et al. Quantitative modeling of multiphase lithospheric stretching and deep thermal history of some Tertiary rift basins in Eastern China[J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(3): 324-330.
- [3] Hantschel F, Kauerauf A I. Fundamentals of basin and petroleum system modeling[M]. Berlin: Springer, 2009: 103-150.
- [4] 高长林, 何将启, 黄泽光, 等. 中国油气盆地研究新阶段: 数字盆地[J]. 石油实验地质, 2009, 31(5): 432-440.
- [5] Baur F, Litke R, Wielens H, et al. Basin modeling meets rift analysis: A numerical modeling study from the Jeanne d'Arc basin, offshore Newfoundland, Canada[J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(3): 585-599.
- [6] 李亚辉, 段宏亮, 邱旭明, 等. 苏北盆地古潜山岩溶储层形成机制探讨[J]. 石油实验地质, 2011, 33(5): 495-498.
- [7] 赵高攀. 苏北盆地海安凹陷泰州组油层识别方法研究[J]. 石油实验地质, 2012, 34(5): 553-558.
- [8] Dahlstrom C D A. Balanced cross section[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1969, 36(6): 743-759.

理面扩展;大于 45°时,穿过层理面扩展,断裂韧性值随夹角增大有逐渐增大趋势。此规律可用于认识天然裂缝同主裂缝的夹角对裂缝扩展的影响。

参考文献:

[1] Mayerhofer M J, Lolon E P, Warpinski N R, et al. What is stimulated rock volume? [R]. SPE 119890, 2008.

[2] Cipolla C L, Warpinski N R, Mayerhofer M J, et al. The relationship between fracture complexity, reservoir properties, and fracture-treatment design [R]. SPE 115769, 2008.

[3] Sondergeld C H, Newsham K E, Comisky J T, et al. Petrophysical considerations in evaluating and producing shale gas resources [R]. SPE 131768, 2010.

[4] Cipolla C, Weng X, Mack M, et al. Integrating microseismic mapping and complex fracture modeling to characterize fracture complexity [R]. SPE 140185, 2011.

[5] King G E. Thirty years of gas shale fracturing; what have we learned? [R]. SPE 133456, 2010.

[6] Rickman R, Mullen M, Petre E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization; all shale plays are not clones of the Barnett shale [R]. SPE 115258, 2008.

[7] Matthews H L, Schein G, Malone M. Stimulation of gas shales; they're all the same—right? [R]. SPE 106070, 2007.

[8] Britt L K, Schoeffler J. The geomechanics of a shale play: what makes a shale prospective? [R]. SPE 125525, 2009.

[9] Olson J E. Multi-fracture propagation modeling: Applications to hydraulic fracturing in shales and tight gas sands [R]. ARMA 08-327, 2008.

[10] Cipolla C L, Warpinski N R, Mayerhofer M J. Hydraulic fracture complexity: diagnosis, remediation, and exploitation [R]. SPE 115771, 2008.

[11] Wang Y, Miskimins J L. Experimental investigations of hydraulic fracture growth complexity in slick water fracturing treatments [R]. SPE 137515, 2010.

[12] Soliman M Y, East L, Augustine J. Fracturing design aimed at enhancing fracture complexity [R]. SPE 130043, 2010.

[13] 陈作, 薛承瑾, 蒋廷学, 等. 页岩气井体积压裂技术在我国的应用建议 [J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 30-32.

[14] Waters G, Dean B, Downie R, et al. Simultaneous hydraulic fracturing of adjacent horizontal wells in the Woodford shale [R]. SPE 119635, 2009.

[15] 朱日房, 张林晔, 李钜源, 等. 渤海湾盆地东营凹陷泥页岩有机储集空间研究 [J]. 石油实验地质, 2012, 34(4): 352-356.

[16] Goktan R M, Yilmaz N G. A new methodology for the analysis of the relationship between rock brittleness index and drag pick cutting [J]. The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2005, 105: 727-733.

[17] Mullen M, Roundtree R, Barree B. A composite determination of mechanical rock properties for stimulation design (what to do when you don't have a sonic log) [R]. SPE 108139, 2007.

[18] Beugelsdijk L J L, Pater C J, Sato K, et al. Experimental hydraulic fracture propagation in a multi fractured medium [R]. SPE 59419, 2000.

[19] 卢运虎, 陈勉, 金衍, 等. 深层地应力地理方位确定的新方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 233-237.

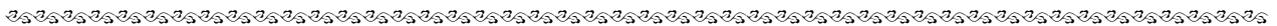
[20] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 42-55.

[21] 易顺民, 朱珍德. 裂隙岩体损伤力学导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 38-47.

[22] Grieser B, Bray J. Identification of production potential in unconventional reservoirs [R]. SPE 106623, 2007.

[23] 聂海宽, 张金川. 页岩气储层类型和特征研究 [J]. 石油实验地质, 2012, 33(3): 219-225.

(编辑 韩 斌)



(上接第 338 页)

[9] 王丹萍, 许长海, 焦若鸿, 等. 基于碎屑锆石裂变径迹记录的下扬子构造热演化史研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(2): 227-234.

[10] 施泽进, 张渝昌, 施央申, 等. 苏北溱潼凹陷形成演化的运动学模拟 [J]. 石油实验地质, 1994, 16(4): 326-333.

[11] 张世奇. 平衡剖面分析技术在松辽盆地构造演化恢复中的应用 [J]. 新疆地质, 2003, 21(4): 489-498.

[12] Chase R B, Kehew A E, Glynn M E, et al. Modeling debris slide geometry with balanced cross sections; a rigorous field test [J]. Environmental and Engineering Geoscience, 2007, 13(1): 45-53.

[13] 胡望水, 柴浩栋, 李瑞升, 等. 平衡剖面技术对东海西湖凹陷正反转构造及其成藏控制的研究 [J]. 特种油气藏, 2010, 17(1): 15-19.

[14] 张建培, 唐贤君, 张田, 等. 平衡剖面技术在东海西湖凹陷构造演化研究中的应用 [J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(8): 31-37.

[15] 包汉勇. 下扬子区白垩纪以来的构造热演化 [D]. 上海: 同

济大学, 2011.

[16] 邱旭明, 刘玉瑞, 傅强, 等. 苏北盆地上白垩统一第三系层序地层与沉积演化 [M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1-153.

[17] 张沛, 周祖翼, 许长海. 苏皖下扬子区晚白垩世以来的构造—热历史: 浦口组砂岩磷灰石裂变径迹证据 [J]. 海洋石油, 2009, 29(4): 26-32.

[18] 国家地震局地质学断面编委会. 上海奉贤至内蒙古阿拉善左旗地质断面 [M]. 北京: 地质出版社, 1992: 1-66.

[19] 黄耘. 江苏及邻区地壳上地幔结构研究 [D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2009.

[20] Zhou Meifu, Yan Danping, Vasconcelos P M, et al. Structural and geochronological constraints on the tectono-thermal evolution of the Danba domal terrane, eastern margin of the Tibetan plateau [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 33(5/6): 414-427.

(编辑 韩 斌)