

湘鄂西—川东中生代陆内递进扩展变形： 来自裂变径迹和平衡剖面的证据

梅廉夫^{1,2}, 刘昭茜^{1,2}, 汤济广³, 沈传波^{1,2}, 凡元芳⁴

1. 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
2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074
3. 长江大学, 湖北荆州 434023
4. 西安石油大学, 陕西西安 710065

摘要: 从湘鄂西到川东近 400 km 宽阔的中上扬子陆内中古生界变形是江南—雪峰陆内造山作用向西北方向递进扩展变形的结果。利用磷灰石裂变径迹年龄测定和埋藏热历史模拟以及雪峰山—华蓥山构造剖面的平衡演变分析方法, 揭示出自湘鄂西向川东华蓥山构造变形发展的时代从 165 Ma 到 95 Ma, 具有递进变新的趋势。湘鄂西断褶带厚皮构造变形缩短率小于川东断褶带薄皮构造的变形缩短率, 但侏罗纪时期湘鄂西断褶带的缩短速率却明显大于早白垩世早中时期川东断褶带东南段的缩短速率, 而早白垩世早中时期川东断褶带东南段的缩短速率又大于早白垩世晚期川东断褶带北西段的缩短速率。反映基底卷入程度和推挤力源的强度大小是控制缩短率和缩短速率的主要原因。这些结果表明湘鄂西—川东中生代陆内变形具有大跨度穿时递进扩展的特征和方式, 并且由于基底的差异和卷入程度的不同以及滑脱层参与深度和程度的不同, 不同构造带缩短率和缩短速率的变化反映出明显的陆内变形及其动力学的差异。研究推测, 如果江南—雪峰隆起是原地或准原地体, 则湘鄂西—川东陆内构造递进扩展变形的“发动机”在桃源—怀化一线, 该线亦是江南—雪峰中生代陆内造山作用开始发韧并向南北两侧呈花状扩展的位置。

关键词: 湘鄂西—川东; 中生代; 构造地质; 裂变径迹; 平衡剖面。

中图分类号: P551

文章编号: 1000-2383(2010)02-0161-14

收稿日期: 2009-05-23

Mesozoic Intra-Continental Progressive Deformation in Western Hunan-Hubei-Eastern Sichuan Provinces of China: Evidence from Apatite Fission Track and Balanced Cross-Section

MEI Lian-fu^{1,2}, LIU Zhao-qian^{1,2}, TANG Ji-guang³, SHEN Chuan-bo^{1,2}, FAN Yuan-fang⁴

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. Yangtze University, Jingzhou 434023, China
4. Xi'an Petroleum University, Xi'an 710065, China

Abstract: The Mesozoic intra-continental evolution of about 400 km wide middle-upper Yangtze thrust belt from western Hunan-Hubei-eastern Sichuan provinces has been established with a time interval of 70 Ma (from 165 Ma to 95 Ma). Based on apatite fission track (AFT), time-temperature thermal history and balanced cross-section, we conclude that the deformation evolution is progressive from southeast (Jiangnan-Xuefeng intra-continental orogeny) to northwest (Huayingshan thrust belt), and younger and younger. The shortening of thick-skinned fault-fold zone in western Hunan Province-Hubei Province is less than that of thin-skinned fault-fold zone in east Sichuan Province. The shortening rate of the fault-fold zone in western Hunan Province-Hubei Province during Jurassic is obviously more than that of the southeast region of the fault-fold zone of eastern

基金项目: 中国石化海相前瞻性研究项目 (Nos. YPH08, YPH08002); 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室开放研究基金项目 (Nos. TPR-2009-01, TPR-2009-06, TPR-2009-26).

作者简介: 梅廉夫(1961—), 男, 教授, 博导, 主要从事盆地构造和石油勘探构造分析的的教学和研究. E-mail: lfmei@cug.edu.cn

Sichuan Province during the early and middle periods of Early Crataceous. And the shortening rate of the southeast region of the fault-fold zone of eastern Sichuan Province during the early and middle periods of Early Crataceous is more than that of the northwest region of the fault-fold zone of eastern Sichuan Province during the late periods of Early Crataceous. The differences of the shortening rates in the different zones are controlled by the basement and the strength of the compressional deformation. These results indicate that Mesozoic intra-continental deformation in western Hunan Province-Hubei Province to eastern Sichuan Province is progressive with a large width and a long diachronous interval. Because of the different basement, basement involvement level and participation level of detachment layer, the differences of shortening and shortening rates reflect the obvious differences of intra-continental deformation and its dynamics. The “driving engine” of Mesozoic intra-continental progressive deformation is speculated to be in Taoyuan-Huaihua area, if the Jiangnan-Xuefeng uplift is in place or parautochthon. The Taoyuan-Huaihua area is also where the Jiangnan-Xuefeng Mesozoic intra-continental orogenesis began and expanded southward and northward with a flower-structure geometry.

Key words: western Hunan-Hubei-eastern Sichuan provinces; Mesozoic; tectonics; fission track; balanced cross-section.

从雪峰山隆起(或江南隆起西段)经鄂湘黔边境到川东华蓑山宽近 400 km、NE 走向,跨中上扬子区,主体由逆冲—褶皱组合组成的(雪峰山—)湘鄂西—川东构造带是中国南方非常独特的一道构造景观。长期以来,该构造带涉及到江南隆起或雪峰山隆起的形成及属性(黄汲清,1954;郭令智等,1984;朱夏等,1983;许靖华,1987;Hsü *et al.*, 1988;李继亮等,1989;陈海泓等,1993;樊光明,1993;Charvet *et al.*, 1996;Shu and Charvet, 1996;丘元禧等,1998;冯向阳等,2001,2003;Wang *et al.*, 2004)、中、新生代陆内造山作用(丁道桂等,1991;邓晋福等,1995;郭正吾等,1996;蔡立国和刘和甫,1997;刘和甫等,2000;冯向阳等,2001,2003;吴根耀,2002)、湘鄂西到川东构造发展和相关模式(Huang and Opdyke, 1996;蔡立国和刘和甫,1997;乐光禹,1998;童崇光,2000;颜丹平等,2000;Yan *et al.*, 2003;丁道桂等,2007),以及四川盆地东部到湘鄂西地区海相油气勘探(丁道桂等,1991;范小林,1996;郭正吾等,1996;蔡立国和刘和甫,1997;童崇光,2000;赵宗举等,2001;胡晓凤,2002;徐言岗等,2003)等重要问题而被地学界广为关注。

早先许靖华(1987)提出扬子地体与华南地体的碰撞型造山带,并认为扬子块体上的构造,特别是湘鄂西—川东构造带形成的“发动机”在福建海岸之外,可能是在台湾,也可能在日本(许靖华,1989)。这个推论可以说诱发了国内持续近 20 年关于扬子板块与华南板块的相互作用以及两板块间江南—雪峰隆起的形成、演化和属性的热烈讨论。随着大陆动力学理论、地球物质的垂向运动和地幔柱理论的研究深入,一些研究越来越趋向于将形成湘鄂西—川东构造带的“发动机”锁定在江南隆起(含雪峰山隆起或构造带)中生代以来的陆内造山作用上(刘和甫等,2000;颜丹平

等,2000;冯向阳等,2001,2003;Yan *et al.*, 2003;杨奎锋等,2004)。很长时间以来,湘鄂西—川东构造带就用薄皮和厚皮构造模式来解释(许靖华,1987;郭正吾等,1996;蔡立国和刘和甫,1997;颜丹平等,2000;Yan *et al.*, 2003),同时与阿巴拉契亚逆冲推覆构造进行对比分析(许靖华,1987);层滑模式、递进运移扩展、推移扩展以及递进(衰减)变形和有序变形等观点亦已用于川东构造带形成机制的解释(乐光禹,1998;李本亮等,1998;刘丽华等,1999;黄继钧,2000;冯向阳等,2003;丁道桂等,2005,2007)。在解释青藏高原的隆升机制时,近年也有研究者用递进式隆升模式来说明(马润勇等,2004)。阿尔卑斯、阿巴拉契亚等典型的逆冲—推覆带的发展模式过去也提出过,很多类似于递进推置(Baudin and Marquer, 1993)、递进发展(Mitra,2003)等模式。

由于对褶皱卷入地层和构造作用理解上的不同,长期以来众多的研究者虽然将湘鄂西—川东构造带作为一个整体来考虑,但从齐岳山断层分开的湘鄂西构造带和川东构造带的整体和分段形成时间(甚至川东断褶带同一构造带的形成时间)均有燕山期和喜马拉雅期认识上的极大差异(蔡学林等,1993;刘树根等,1993;郭正吾等,1996;蔡立国和刘和甫,1997;胡光灿和谢姚祥,1997;陈明是和张树淮,1998;乐光禹,1998;童崇光,2000;颜丹平等,2000;Yokoyama *et al.*, 2001;李忠权等,2002;Yan *et al.*, 2003)。我们看到在时间和空间发展模式上,湘鄂西—川东构造带的形成仍然没有被清晰地勾绘出来。系统地将湘鄂西构造带和川东构造带作为整体来考虑陆内变形时间和模式显然是一个非常迫切的问题。此外,通过湘鄂西—川东构造带形成时间和变形模式的解决来推导江南—雪峰隆起(雪峰山构造带)在中、新生代,特别是中生代的演化和属性具

有显而易见的大地构造意义,也可以据此来探讨湘鄂西构造带和川东构造带在海相油气成藏改造上的差异,用以评价和讨论湘鄂西构造带和川东构造带海相油气勘探前景和选区。

1 湘鄂西—川东构造带基本构造格局及地层记录

湘鄂西—川东构造带南东与江南—雪峰隆起以石门—慈利—保靖断裂为界,北西以华蓥山断裂与川中隆起分隔,北与大巴山弧形构造对突。从南东到北西为走向 NEE-NE-NNE 向的线形—弧形断褶带,由一系列被断层切割的复背斜和复向斜相间组成。齐岳山断裂将湘鄂西—川东构造带分为湘鄂西断褶带和川东断褶带两个不同的构造区,其中湘鄂西断褶带以厚皮“隔槽式”结构为主,川东断褶带主要为薄皮“隔挡式”结构(图 1,图 2)。

1.1 构造分区

(1)湘鄂西断褶带:该断褶带指自江南—雪峰隆起西北侧石门—慈利—保靖断裂至鄂西渝东区齐岳

山断裂之间走向 NEE-NE 向、向 NW 方向突出呈弧形展布、宽约 220 km 的构造区。从南东向北西由桑植—石门复向斜、宜都—鹤峰复背斜、花果坪复向斜、恩施复背斜和利川复向斜等构造带组成。断褶带内背斜呈宽阔的箱状,核部主要出露寒武系—奥陶系,基底新元古界部分卷入;向斜狭窄、不对称至倒转,呈线状,核部主要由上古生界及中生界组成。背、向斜相间组成“隔槽式”结构。由东南向西北褶皱的强度由大变小,隆升幅度由高变低,核部出露地层由老变新。由于基底卷入盖层程度较深,湘鄂西断褶带具厚皮结构特征。该断褶带部分逆断层在燕山晚期发生负反转成为正断层。

(2)川东断褶带:该断褶带西起华蓥山断裂,东至齐岳山断裂,宽约 170 km,分南东和北西两段。川东褶皱带南东段从齐岳山到七里峡南为川东弧形构造,北东近东西向展布,“搭”入齐岳山背斜北西翼,呈右行雁列式排列,与北部的大巴山弧形构造对突,形成“八”字型向西开口的收敛双弧构造(乐光禹, 1998);该段从南东向北西由石柱复向斜、方斗山复背斜和万县复向斜组成。川东褶皱带北西段从七里

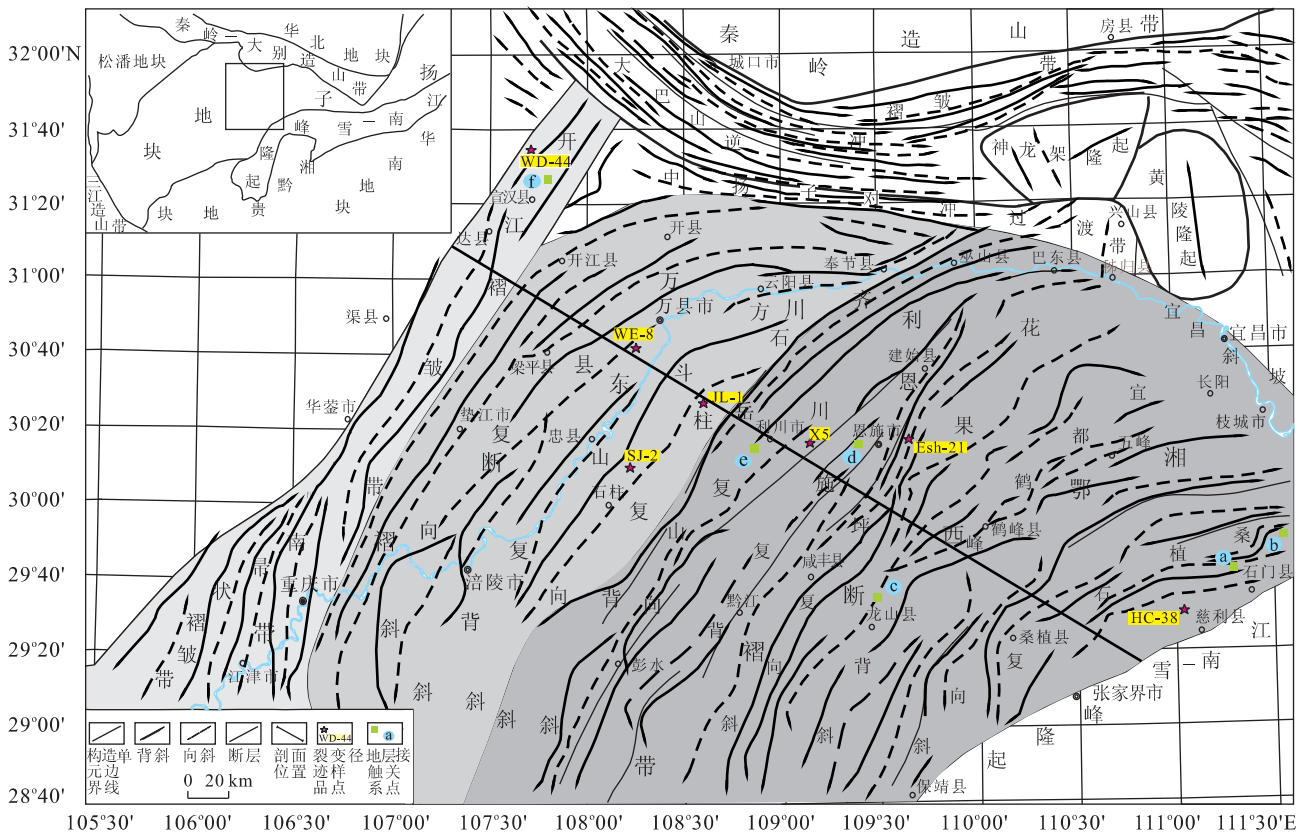


图 1 湘鄂西—川东构造带平面图

Fig. 1 Structural map of the fold belt in western Hunan Province-Hubei Province to eastern Sichuan Province

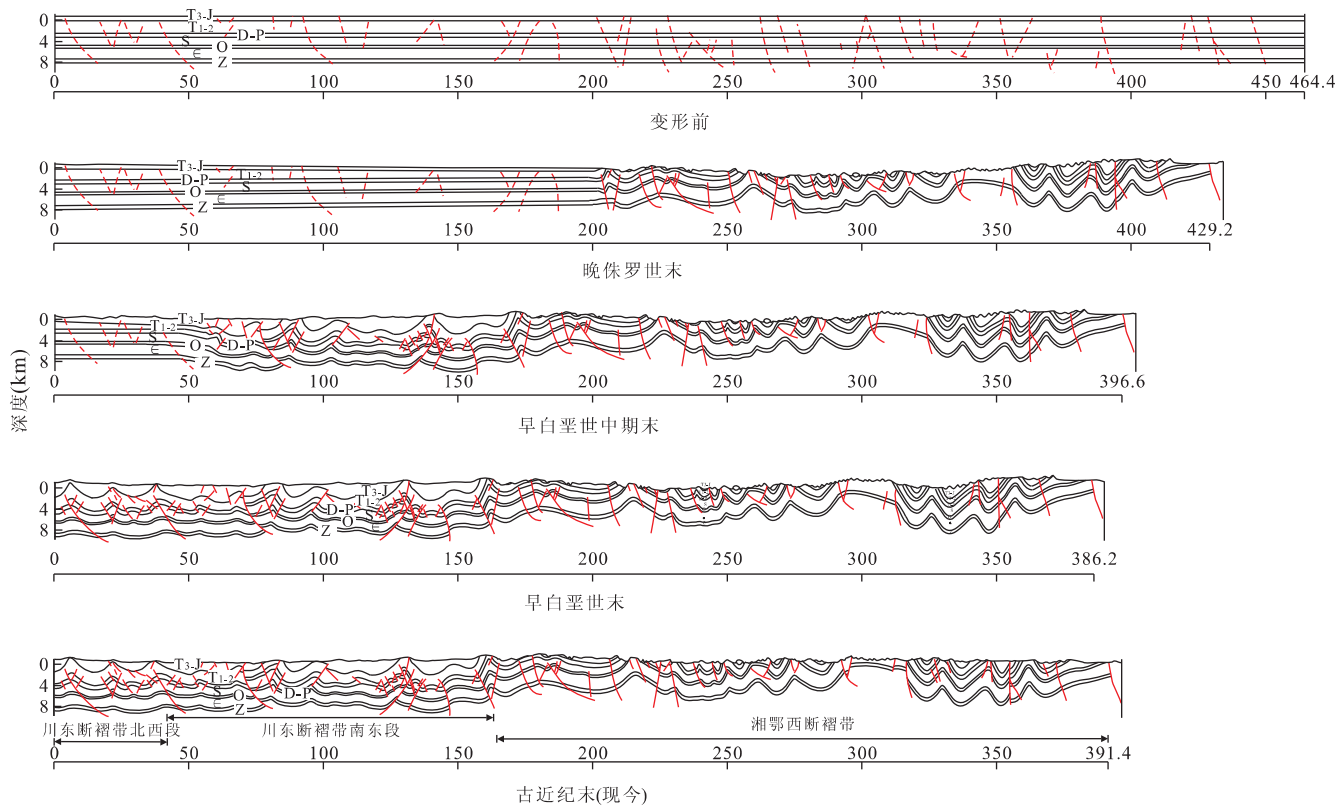


图 2 湘鄂西—川东构造带平衡演化剖面图

Fig. 2 Balanced cross-sections of the fold belt in western Hunan Province-Hubei Province to eastern Sichuan Province

峡到华蓥山为川东断褶带独立向北西扩展的一支,也称开江褶皱带,其北东直接正交于北部的南大巴山弧形构造。断褶带出露地层以中生界三叠系、侏罗系及下白垩统为主,从南东向北西变新。断褶带内褶皱大多呈线状,背斜通常窄、地层陡倾且紧闭,两翼常不对称,其中一翼陡倾甚至倒转,核部伴逆断层,不同构造层内部结构复杂并解体;向斜通常轴部宽阔,地层相对平缓,呈雁状,内部构造相对简单。紧闭的背斜与开阔平缓的向斜相间排列,以志留系等主要滑脱层组成“隔挡式”结构,基底多未卷入盖层构造中。

1.2 主要断裂特征

石门—慈利—保靖断裂:该断裂为江南—雪峰隆起与湘鄂西断褶带的分界断裂,由一系列断裂复合而成,走向 NEE-NE,断面倾向南东。断裂北西侧为北东向的重力梯度带,而断层南东侧为孤立的短轴或穹隆状重力异常。断裂北西侧和南东侧构造具有明显的差异,北西侧构造走向 NE,局部 NEE 向和 EW 向,除基底构造外,盖层褶皱构造大多表现为简单、宽缓;断裂东南侧构造 NE-NEE 走向,发育具有复杂结构的挤压逆冲构造。

齐岳山断裂:该断裂位于鄂西渝东区齐岳山一带,向北延至巫山附近,为上、中扬子传统分界断层。断层走向 NE,断面向南东倾斜。在重力上处于梯度异常带,磁力上位于不同的磁异常分界线上,在地震速度上断层两侧亦存在突变性的差异。断层北西为川东“隔挡式”断褶带,东南则为湘鄂西隔槽式断褶带。该断层同时还是燕山晚期负反转正断层的分界,东南侧湘鄂西断褶带发育负反转正断层,而北西侧川东断褶带则不发育。

华蓥山断裂:该断裂北起万源,经达县南到宜宾全长逾 400 km,为川中隆起与川东断褶带的分界断层。断层走向 NE,断面倾向 SE。断层东南侧为隔挡式褶皱带,背斜陡倾、向斜平缓;北西侧为低缓的穹隆和平缓褶皱带。

1.3 主要构造样式

湘鄂西—川东构造带自南东至北西构造卷入程度逐渐减弱和变浅,由厚皮构造过渡到薄皮构造,发育基底卷入型和盖层滑脱型两类基本的构造样式。

基底卷入型构造样式包括基底逆冲—褶皱组合和张性断块,主要发育于湘鄂西断褶带。湘鄂西断褶带基底逆冲—褶皱组合以印支—燕山早期自南东向

北西的挤压作用于基底构造层及盖层,在盖层中表现为一系列逆冲—褶皱组合和压性断块,在基底构造层中形成隐冲构造,向下收敛于中、上地壳中.基底卷入型张性断块仅发育于湘鄂西断褶带,形成于燕山晚期的伸展作用,以中、高角度正断层组成断块为主要特征.

盖层滑脱型构造样式以滑脱型逆冲褶皱组合为特征,主要发育于川东断褶带.在该断褶带,古生界至中生界发育多个区域性滑脱层(如寒武系底、志留系底和下三叠统嘉陵江组等),构造为沿滑脱面自南东向北西形成的断裂和断裂相关的褶皱组合(图 2).

1.4 地层记录

湘鄂西断褶带靠近江南—雪峰隆起印支面主要表现为中下侏罗统与下伏地层(中、下三叠统)间的微角度不整合(图 3a).该构造面南东向北西至华蓥山前逐渐过渡为平行不整合或整合接触关系,反映印支运动的主体水平褶皱运动发育于湘鄂西断褶带边界石门—慈利—保靖断裂一带、南东侧的江南—雪峰隆起区,边界区为印支褶皱运动的波及区,其他区域主要表现为垂直运动.湘鄂西断褶带燕山面主要表现为上白垩统—古近系(K_2 -E)与下伏地层间

的高角度不整合(湘鄂西断褶带缺失下白垩统),上白垩统—古近系以零星分布的小型断陷盆地的结构形式出现在石门新关盆地(图 3b)、龙山盆地(图 3c)、恩施盆地(图 3d)和忠路溪盆地(图 3e)等地区.上述印支面和燕山面的地层记录将湘鄂西断褶带的主体逆冲褶皱作用的时间限定在中、上侏罗统沉积之后、上白垩统沉积之前,即中、晚侏罗世末—早白垩世经历的构造运动造成了基底及中、古生界强烈的褶皱变形,而一系列小型断陷盆地的发育又指示了湘鄂西断褶带在晚白垩世燕山晚期经历了伸展作用.

川东断褶带南东段从齐岳山到七里峡南的川东弧形构造段卷入褶皱的最新地层为上侏罗统,显示褶皱作用的最早时间为晚侏罗世末及之后;北西段开江褶皱带卷入褶皱的最新地层为下白垩统,下白垩统与上侏罗统之间为平行不整合(图 3f),显示该段的褶皱变形发生在早白垩世末或之后.

上述地层接触关系的轮廓可以限制湘鄂西断褶带的褶皱作用在晚印支与早白垩世之间,而川东断褶带南东段的褶皱作用在晚侏罗世末之后,川东断褶带北西段的褶皱作用在早白垩世末及之后,大致揭示了从湘鄂西断褶带到川东断褶带发生褶皱作用

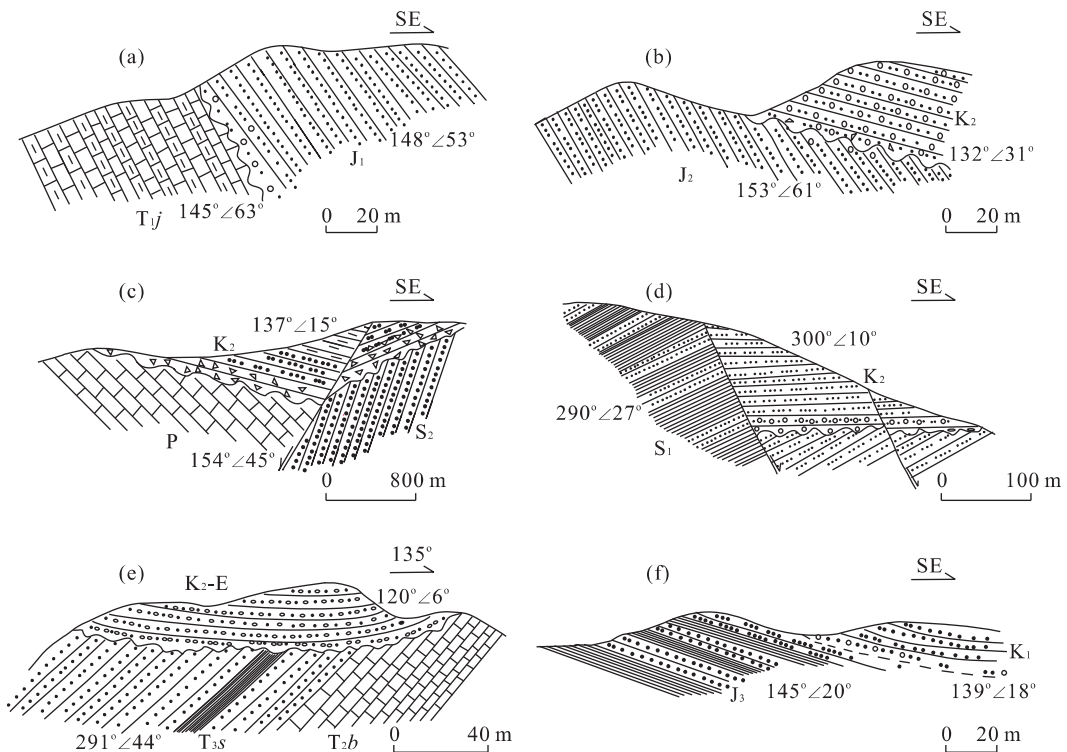


图 3 湘鄂西—川东构造带典型地层接触关系(点位见图 1)

Fig. 3 Profiles of unconformable contacts in study area

a. 石门雷山洞; b. 石门新关; c. 龙山北; d. 恩施西; e. 利川忠路溪; f. 宣汉毛坝场东

的时间有从印支晚期末(锥形,晚三叠世)、燕山早期(晚侏罗世)、燕山中期(早白垩世)到燕山晚期(晚白垩世)变新的趋势。胡召齐等(2009)通过地层记录综合分析将川东—湘鄂西北部的“侏罗山式”褶皱带的褶皱变形时间限定在晚侏罗世末至早白垩世初。

2 构造发展时序的裂变径迹证据

2.1 磷灰石裂变径迹样品及测试结果

本文获取自研究区南东桑植石门复向斜向北西到付家山背斜(华蓥山构造北东段)共 7 个磷灰石裂变径迹测试结果,其中湘鄂西地区 3 个、川东地区 4 个(图 1、表 1)。7 个样品的磷灰石裂变径迹长度为 11.2~13.2 μm ,标准差为 0.4~2.4 μm ,磷灰石裂变径迹长度都小于原始径迹长度(16.3 \pm 0.9 μm),表明

样品经历过较强的退火。径迹长度分布直方图(图 4)显示分布形态多具单峰特征,双峰并不明显,表明样品达到最大埋藏之后可能一直处于冷却的过程中。7 个样品裂变径迹年龄为 47.8~154.1 Ma,标准差为 5.1~10.2 Ma,各样品裂变径迹测试年龄值均远小于地层沉积年龄,反映现今处于地表低温环境的这些样品形成后均遭受了不同程度的地层剥蚀。裂变径迹分析中单颗粒年龄的 χ^2 检验值 $P(\chi^2)$ 均大于或远大于 5%,说明各样品单颗粒年龄的差别属于统计误差,具有单一的年龄平均值,属于同组年龄。

2.2 热历史模拟

7 个样品的裂变径迹平均封闭径迹长度都较短,并且各样品的平均封闭径迹长度在误差范围内基本一致,表明这些样品发生了严重的退火,对其进行热演化历史模拟可以进一步获得样品快速冷却、

表 1 湘鄂西—川东地区磷灰石裂变径迹测定结果

Table 1 Results of AFT of western Hunan Province-Hubei Province to eastern Sichuan Province

样号	构造位置	层位	颗粒数	$\rho_s(N_s)$ ($10^5/\text{cm}$)	$\rho_i(N_i)$ ($10^5/\text{cm}$)	$P(\chi^2)$ (%)	$t \pm 1\sigma$ (Ma)	L (μm)	n
WD-44*	华蓥山背斜	J ₃	28	1.618(153)	5.699(539)	58.70	47.8 \pm 7.1	11.5 \pm 1.7	59
WE-8*	万县复向斜	J ₃	17	3.309(587)	10.186(1807)	21.52	67.1 \pm 4.2	12.3 \pm 1.8	101
SJ-2*	方斗山复背斜	J ₃	16	2.378(264)	6.288(698)	79.41	78.2 \pm 6.0	12.0 \pm 1.9	74
JL-1*	石柱复向斜	J ₂	18	5.437(193)	14.535(516)	5.71	76.7 \pm 8.8	11.2 \pm 2.4	68
X5*	利川复向斜	J ₂	10	0.699(449)	2.076(1333)	9.00	61.0 \pm 5.1	13.2 \pm 0.4	43
Esh-21**	花果坪复向斜	P ₂	21	25.540(894)	13.770(482)	34.00	154.1 \pm 10.2	/	/
HC-38***	桑植石门复向斜	S	25	6.963(477)	13.124(899)	45.00	92.0 \pm 7.0	11.4 \pm 2.3	105

注: ρ_s 和 ρ_i 分别表示矿物中自发裂变径迹密度和云母外探测器记录的矿物中诱发裂变径迹密度; N_s 和 N_i 分别表示所测径迹数量; $P(\chi^2)$ 为 Chi-sq 检验概率,当 $P(\chi^2) > 5\%$ 时,通常认为所测单颗粒年龄属于同组年龄,否则,属于不同年龄组; t 为裂变径迹测定年龄,一般用 Central 年龄值,当单颗粒年龄为 0 时,用 Pooled 年龄值; L 为平均径迹长度; n 为所测径迹条数。* 样品测试由中国科学院高能物理研究所完成;** 样品数据引自苏勇(2007);*** 样品数据引自李双建等(2008)。

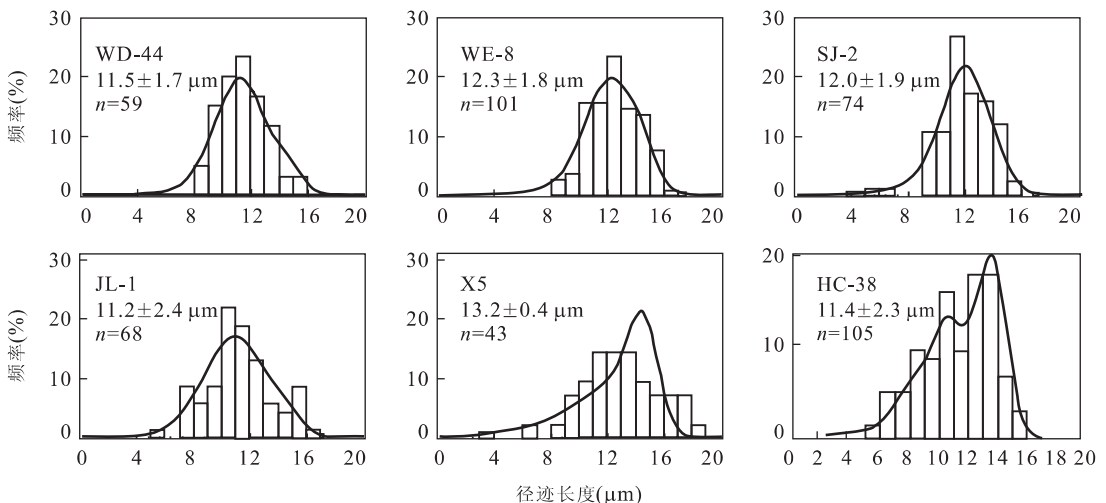


图 4 磷灰石裂变径迹长度分布直方图

Fig. 4 Distribution histograms of apatite fission track length

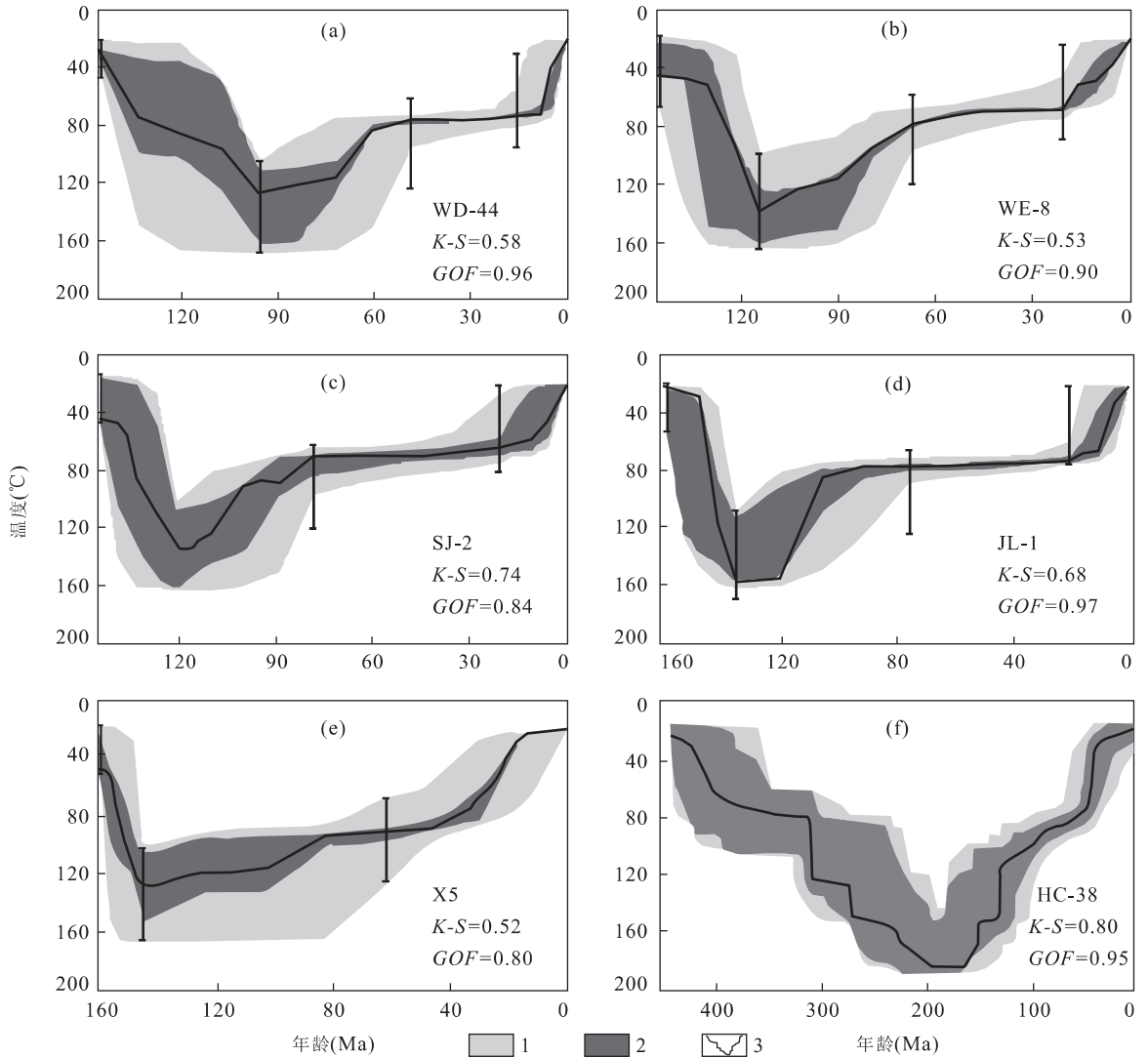


图 5 基于磷灰石裂变径迹分析结果的热历史模拟

Fig. 5 Time-temperature thermal history modeled based on apatite fission track analyses

1. 好的热史范围; 2. 可以接受的热史范围; 3. 最佳热史路径

隆升剥露的时间. 本文应用多元动力学退火模型 (Ketcham *et al.*, 1999) 和蒙特卡罗 (MonteCarlo) 逼近法以及 AFTSolve Version 1. 4. 1 模拟软件 (Ketcham, 2005), 基于裂变径迹长度数据和单颗粒年龄数据等参数模拟获得 6 个磷灰石样品的时间—温度热历史的反演模拟结果 (其中 HC-38 样品热历史反演模拟引自李双建等 2008 年的结果) (图 5).

Ketcham(2005)将热史模拟结果一般分为三部分: 可以接受的热史曲线范围、高质量的热史曲线范围和最佳热史拟合曲线, 并通过模拟的 $K-S$ 检验和年龄 GOF 表示. $K-S$ 检验表示径迹长度模拟值与实测值的吻合程度, 年龄 GOF 表示模拟年龄值与测试年龄值的吻合程度. 当年龄 GOF 、 $K-S$ 检验都大

于 0.05 时, 表明模拟结果“可以接受”, 介于 0.05~0.5 之间表示模拟结果是“好的”, 当它们超过 0.5 时, 表示模拟结果是“高质量的”. 在输入径迹长度和单颗粒年龄等数据后, 还应根据研究区的构造演化过程或规律、样品的地质背景等, 设置若干限定的时间—温度区间, 以使模拟结果更加符合地质过程. 热历史模拟结果(图 5)表明, 所有样品的 $K-S$ 检验和年龄 GOF 都大于 0.5, 说明这些样品的模拟结果都是高质量的, 可以用来反映湘鄂西—川东地区中生代隆升、剥露作用过程.

湘鄂西—川东地区自南东向北西方向裂变径迹热历史模拟结果显示(图 5, 表 1): (1) 桑植石门复向斜 HC-38 样品在印支末期约 200 Ma 左右达到最大埋深, 200 Ma 之后开始处于缓慢隆升或平静阶段,

到约 165 Ma 开始强烈隆升剥蚀阶段;(2)花果坪复向斜 Esh-21 样品测试年龄为 154.1 ± 10.2 Ma, 说明该样品在 154 Ma 或之前开始退火, 其最初隆升剥蚀时间应近似于或早于 154 Ma;(3)利川复向斜 X5 样品在约 145 Ma 达到最大埋深, 之后迅速抬升, 早白垩世开始处于持续隆升剥蚀阶段, 晚白垩世中期抬升速率减小, 缓慢隆升, 到喜山期再次迅速隆升直至地表;(4)石柱复向斜中 JL-1 样品在白垩世早期 136 Ma 左右达到最大埋深, 之后迅速隆升剥蚀, 到早白垩世末期约 105 Ma 之后进入平稳阶段, 喜山晚期约 20 Ma 再次快速隆升至地表;(5)方斗山复背斜 SJ-2 样品在早白垩世中期约 120 Ma 达到最大埋深, 之后进入快速隆升阶段, 在晚白垩世 80 Ma 左右处于相对稳定的阶段, 喜山晚期再次迅速抬升直到暴露地表;(6)万县复向斜上 WE-8 样品在早白垩世末期约 115 Ma 达到最大埋深, 之后整个晚白垩世都处于隆升阶段, 约 67 Ma 之后抬升速率减小, 处于相对稳定的缓慢隆升阶段, 喜山晚期再次迅速隆升剥蚀直到暴露地表;(7)华蓥山背斜 WD-44 样品在早、晚白垩世之交约 95 Ma 开始强烈隆升直到晚白垩世结束, 早喜山期进入相对平稳阶段, 晚喜山期约 10 Ma 再次迅速隆升至地表。

热史模拟清楚显示出自湘鄂西断褶带的桑植石门复向斜直到川东断褶带的华蓥山背斜, 开始强烈隆升作用的时间拐点分布从中侏罗世末的 165 Ma 直到早、晚白垩世之交的 95 Ma, 具有逐渐变新的趋势。在湘鄂西断褶带为侏罗纪晚期的燕山早期, 川东断褶带南东段为早白垩世早、中时期的燕山中期, 川东断褶带西北段为早白垩世末(或早、晚白垩世之交)的燕山中期末。

3 递进扩展变形的平衡剖面

3.1 平衡剖面正演模型

平衡剖面选取与区域构造运动方向近于一致、垂直于 NE 向构造、从江南—雪峰隆起带北西边界石门—慈利—保靖断裂到华蓥山背斜带北西翼的 NW-SE 向剖面。以华蓥山背斜与川中隆起分界位置为固定线。湘鄂西断褶带在燕山晚期经历了 NW-SE 向的伸展作用, 使原 NE 向的逆断层反转为正断层。由于同为垂直构造走向的构造反转, 可选用面积守恒原理进行剖面平衡恢复。现今剖面总长度为 391.4 km(图 1, 图 2)。

3.2 缩短量和缩短率

以志留系顶界面作为标志线进行平衡计算, 总剖面原始长度为 464.4 km(表 2, 图 2), 其中南东边界断裂(石门—慈利—保靖断裂)—齐岳山为湘鄂西断褶带, 齐岳山—七里峡为川东弧形构造带, 七里峡—华蓥山为开江褶皱带。总剖面实际变形量为 73 km, 其中燕山晚期以前的挤压作用导致的缩短量为 78.2 km, 燕山晚期伸展作用导致的拉张量为 5.2 km。

侏罗纪时期剖面挤压收缩变形主要集中在湘鄂西断褶带, 从剖面南东边界断裂到齐岳山变形前原始剖面长度为 258.3 km, 变形后剖面长度为 223.1 km, 缩短量为 35.2 km, 缩短率为 13.6%。该时期齐岳山到华蓥山尚未变形。

到早白垩世中期剖面变形向北西推进到七里峡, 川东断褶带的南东段从齐岳山到七里峡发生收缩变形, 变形前原始剖面长度为 153.9 km, 变形后剖面长度为 121.3 km, 缩短量为 32.6 km, 缩短率为 21.2%。该时期七里峡到华蓥山尚未变形。

到早白垩世末剖面变形继续向北西推进到华蓥山, 川东断褶带的北西段从七里峡到华蓥山发生收缩变形, 变形前原始剖面长度为 52.2 km, 变形后剖面长度为 41.8 km, 缩短量为 10.4 km, 缩短率为 19.9%。至此, 湘鄂西—川东的 SE 向 NW 的挤压收缩变形全部完成。

晚白垩世—古近纪湘鄂西断褶带受中国东部整体伸展环境的影响发生伸展变形, 原来的部分逆断层反转成正断层, 反转前剖面长度为 223.1 km, 反转后剖面长度为 228.3 km, 伸展量为 5.2 km, 伸展率为 2.3%。该反转作用向北西只影响到齐岳山断裂带, 川东断褶带没有受到伸展作用的影响。

3.3 缩短速率

基于磷灰石裂变径迹热历史模拟数据所限定的基本变形时间点(强烈隆升的时间起点)约束的范围和构造旋回的时间范围以及不同时期构造变形量, 可以计算出构造变形的速率。

到晚侏罗世末, 湘鄂西断褶带在侏罗纪中晚期缩短量为 35.2 km, 缩短速率为 1.76 mm/a; 早白垩世早中期, 川东断褶带南东段缩短量为 32.6 km, 缩短速率为 1.09 mm/a; 早白垩世晚期, 川东断褶带北西段缩短量为 10.4 km, 缩短速率为 0.52 mm/a(表 3)。

表 2 湘鄂西—川东地区平衡剖面变形量

Table 2 Deformation rate of balanced cross sections of western Hunan Province-Hubei Province to eastern Sichuan Province

时期	剖面位置	变形前剖面长度 L_0 (km)	变形后剖面长度 L (km)	缩短量 $\Delta L=L_0-L$ (km)	缩短率(%) $R=\Delta L/L_0$
侏罗纪末	南东边界断裂—齐岳山	258.3	223.1	35.2	13.6
	齐岳山—七里峡	153.9	153.9	0	0
	七里峡—华蓥山	52.2	52.2	0	0
早白垩世中期	南东边界断裂—齐岳山	223.1	223.1	0	0
	齐岳山—七里峡	153.9	121.3	32.6	21.2
	七里峡—华蓥山	52.2	52.2	0	0
早白垩世末	南东边界断裂—齐岳山	223.1	223.1	0	0
	齐岳山—七里峡	121.3	121.3	0	0
	七里峡—华蓥山	52.2	41.8	10.4	19.9
晚白垩世—古近纪	南东边界断裂—齐岳山	223.1	228.3	-5.2	-2.3
	齐岳山—七里峡	121.3	121.3	0	0
	七里峡—华蓥山	41.8	41.8	0	0

表 3 湘鄂西—川东地区平衡剖面缩短速率

Table 3 Shortening rate of balanced cross sections of western Hunan Province-Hubei Province to eastern Sichuan Province

时期	剖面位置	变形时间(起—止)(Ma)	缩短量(km)	缩短率(%)	缩短速率(mm/a)
侏罗纪中晚期	湘鄂西断褶带	20(165~145)	35.2	13.6	1.76
早白垩世早中期	川东断褶带南东段	30(145~115)	32.6	21.2	1.09
早白垩世晚期	川东断褶带北西段	20(115~95)	10.4	19.9	0.52

4 结论和讨论

(1)作为对构造热事件发生时间的记录,磷灰石裂变径迹记录的隆升年龄从湘鄂西地区向川东地区具有整体逐渐年轻的趋势,显示湘鄂西断褶带南东边缘在印支晚期具构造雏形,主体构造发育在中、晚侏罗世的燕山早期,川东断褶带南东段为早白垩世早中时期的燕山中期前段,川东断褶带西北段为早白垩世晚期的燕山中期后段;且从中、晚侏罗世到早白垩世川东断褶带是一个相对较连续的变形过程。该构造变形过程的重建和限制也得到了地层接触关系和卷入褶皱地层的时代以及与邻区大巴山弧形构造带交接关系的支持。从湘鄂西到川东构造发育具有从南东向北西逐步递进扩展的发育过程,与前展式扩展模式(Butler, 1987)进行对比,仍然属于挤压褶皱的范畴。其基底卷入程度的差异和湘鄂西厚皮断褶带以及川东“侏罗山式”的滑脱型薄皮断褶带的发育,是江南—雪峰中生代陆内变形向北西陆内进一步扩展时与推置力减弱以及不同滑脱层的参与程度等密切相关。类似的例子有阿尔卑斯侏罗山、扎格罗斯褶皱带、中阿巴拉契亚褶皱带、龙门山冲断带等(Laubscher, 1977; Baudin and Marquer, 1993; 刘和甫等, 1994; Hindle *et al.*, 2000; Mitra, 2003), 但

湘鄂西—川东如此宽阔的陆内挤压褶皱带显然有其自身的分异性变形、不同层次的滑脱层以及中深层基底物质差异等原因,其在大陆动力学中的响应应是其中的关键,值得进一步探讨(张国伟等, 2002; 李德威和庄育勋, 2006; 张国伟和郭安林, 2007)。

(2)从湘鄂西到川东构造,由于靠近推挤力源、基底卷入程度和不同级别的盖层滑脱层的不同,可能导致缩短量、缩短率和缩短速率的不同。湘鄂西断褶带由于基底卷入程度高,缩短率较低;随着构造向北西迁移,基底的卷入程度越来越低,盖层滑脱程度越来越高,缩短率变大。这也反映了陆内厚皮和薄皮构造在构造扩展上的不同(Leturmy *et al.*, 2000)。到侏罗纪末,湘鄂西断褶带的缩短速率为 1.76 mm/a;在早白垩世早中时期,川东断褶带东南段的缩短速率为 1.09 mm/a;到早白垩世晚期,川东断褶带北西段的缩短速率为 0.52 mm/a。上述缩短速率的不同明显地揭示出从侏罗纪到早白垩世缩短速率是逐渐减小的。越靠近江南—雪峰隆起推挤力源的构造带,其构造缩短速率越大,反之则越小。说明推挤力源的强度大小是控制缩短速率的主要原因,显然其与构造扩展衰减有关(丁道桂等, 2005)。上述数据也揭示出一个陆内变形方式整体连续变形与分块运动(王琪等, 2001; 许忠淮和石耀霖, 2003)

的对立统一。与现今或新生代陆内挤压缩短速率在几到几十 mm/a (Gretener, 1981; Zoetemeijer *et al.*, 1992; Delores *et al.*, 2002; 王小亚等, 2002; Echavarria *et al.*, 2003; Mugnier *et al.*, 2004; Robinson *et al.*, 2002) 相比, 湘鄂西到川东构造的缩短速率显然要低很多, 甚至达一个数量级。但与西阿尔卑斯 Barreme 盆地 0.003~0.2 mm/a 的冲断缩短速率 (Artoni and Meckel, 1998) 和库车坳陷 0.76 mm/a 的缩短速率 (张明山和陈发景, 1998) 相比, 湘鄂西到川东构造的缩短速率要高很多或者接近。由此可见, 陆内变形速率显然与不同区域大陆动力学背景和变形方式及相关约束条件密切相关, 也显示了陆内变形的复杂性和独特性。

(3) 平衡剖面显示, 湘鄂西—川东构造带南部边界的实际计算位移量为 73 km (总挤压缩短量 78.2 km 减去总伸展量 5.2 km)。按剖面在平衡过程中可能产生 10%~20% 的综合理论误差, 通过平衡得出的缩短量通常小于实际值 (Hossack, 1983; 张明山和陈发景, 1998), 因而湘鄂西—川东构造带南部边界的实际位移量约为 80~88 km, 向南应该在现今的江南—雪峰隆起中心部位的桃源—怀化一线。如果江南—雪峰隆起是原地或准原地体 (丘元禧等, 1998), 则湘鄂西—川东陆内构造递进扩展变形的“发动机”应在桃源—怀化一线。该线亦是江南—雪峰中生代陆内造山作用开始发轫并向南北两侧呈花状扩展的位置。

(4) 湘鄂西—川东陆内构造带的形成及演化作为“超越板块构造”的实验田, 此类“中国式”中、新生代陆内构造作用已超越传统的板块构造和世界范围典型模式的陆内构造, 难以用经典的板块构造理论解释 (郭安林等, 2004), 作为控制大陆岩石圈不同级别的分层和塑性流动主导因素的流变学以及滑脱作用则为“中国式”陆内造山作用研究指出了新的方向 (金振民和姚玉鹏, 2004; 张国伟和郭安林, 2007)。

References

Artoni, A., Meckel, L. D., 1998. History and deformation rates of a thrust sheet top basin; the Barreme basin, western Alps, SE France (in Cenozoic foreland basins of Western Europe). *Geological Society Special Publications*, 134: 213–237.

Baudin, T., Marquer, D., Persoz, F., 1993. Basement-cover relationships in the Tambo nappe (Central Alps, Switzerland): geometry, structure and kinematics. *Journal of*

Structural Geology, 15(3–5): 543–553. doi:10.1016/0191-8141(93)90147-3

Butler, R. W. H., 1987. Thrust sequences. *Journal of the Geological Society*, 144(4): 619–634. doi:10.1144/gsjgs.144.4.0619

Cai, L. G., Liu, H. F., 1997. Structural styles and characteristics of fold-thrust belts in Sichuan foreland basin. *Experimental Petroleum Geology*, 19(2): 115–120 (in Chinese with English abstract).

Cai, X. L., Deng, M. S., Wei, X. G., 1993. Analysis of the contact strain of fold structure in Sichuan basin. *Journal of Chengdu College of Geology*, 20(4): 1–10 (in Chinese with English abstract).

Charvet, J., Shu, L. S., Shi, Y. S., et al., 1996. The building of South China: collision of Yangzi and Cathaysia blocks, problems and tentative answers. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 13(3–5): 223–235. doi:10.1016/0743-9547(96)00029-3

Chen, H. H., Sun, S., Li, J. L., et al., 1993. A preliminary study on tectonics of the Xuefeng Mountains, western Hunan. *Scientia Geologica Sinica*, 28(3): 201–210 (in Chinese with English abstract).

Chen, M. S., Zhang, S. H., 1998. Characteristics and forming mechanism of opposite protruding arcuate structural zones in the Three Gorges area of the Yangtze River, South China. *Geology and Mineral Resources of South China*, 1: 47–55 (in Chinese with English abstract).

Deng, J. F., Zhao, H. L., Mo, X. X., et al., 1995. Intracontinental subduction of the Yangtze continent and continent reducing-inferred from muscovite (two mica) granites. *Geological Journal of Universities*, 1(1): 50–57 (in Chinese with English abstract).

Ding, D. G., Guo, T. L., Zhai, C. B., et al., 2005. Kink structure in the West Hubei and East Chongqing. *Petroleum Geology & Experiment*, 27(3): 205–210 (in Chinese with English abstract).

Ding, D. G., Liu, G. X., Lü, J. X., et al., 2007. Progressive deformation of Middle Paleozoic marine basins in the Yangtze plate, China. *Geological Bulletin of China*, 26(9): 1178–1188 (in Chinese with English abstract).

Ding, D. G., Zhu, Y., Chen, F. L., et al., 1991. Basal detaching reformation of Paleozoic basins in Central and Lower Yangtze regions and their hydrocarbon prospectings. *Oil & Gas Geology*, 12(4): 376–386 (in Chinese with English abstract).

Echavarria, L., Hernández, R., Allmendinger, R., et al., 2003. Subandean thrust and fold belt of northwestern Argentina: geometry and timing of the Andean evolu-

- tion. *AAPG Bulletin*, 87(6):965—985.
- Fan, G. M., 1993. Thrusting nappe-gliding nappe and geological tectonic model in overlying strata of middle section of Jiangnan uplift. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 18(4):393—402 (in Chinese with English abstract).
- Fan, X. L., 1996. The geological structure of the Xuefeng Mountains-Yuanma basin and its significance to oil exploration. *Experimental Petroleum Geology*, 18(1):64—70 (in Chinese with English abstract).
- Feng, X. Y., Meng, X. G., Shao, Z. G., et al., 2001. Deformation features and modeling experiments of nappe/detachment structure in Xuefeng Mountain intracontinental orogenic belt. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(5):419—424 (in Chinese with English abstract).
- Feng, X. Y., Meng, X. G., Shao, Z. G., et al., 2003. A preliminary discussion on features and dynamics of sequence deformation in South China and neighboring areas. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(2):115—120 (in Chinese with English abstract).
- Gretener, P. E., 1981. Pore pressure, discontinuities, isostasy and overthrusts. In: McClay, K. R., Price, N. J., eds., Thrust and nappe. Blackwell Scientific Publication, London, 33—39.
- Guo, A. L., Zhang, G. W., Cheng, S. Y., 2004. Beyond plate tectonics—review on the opportunity for continental geology research. *Progress in Natural Science*, 14(7):729—733 (in Chinese).
- Guo, L. Z., Shi, Y. S., Ma, R. S., et al., 1984. Tectonostratigraphic terranes of Southeast China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 20(4):732—739 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z. W., Deng, K. L., Han, Y. H., et al., 1996. Formation and evolution of Sichuan basin. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Hindle, D., Besson, O., Burkhard, M., 2000. A model of displacement and strain for arc-shaped mountain belts applied to the Jura arc. *Journal of Structural Geology*, 22(9):1285—1296. doi:10.1016/S0191-8141(00)00038-9
- Hossack, J. R., 1983. A cross-section through the Scandinavian Caledonides constructed with the aid of branchline maps. *Journal of Structural Geology*, 5(2):103—111. doi:10.1016/0191-8141(83)90036-6
- Hsü, K. J., Sun, S., Li, J. L., et al., 1988. Mesozoic overthrust tectonics in South China. *Geology*, 16(5):418—421. doi:10.1130/0091-7613(1988)016<0418:MO-TISC>2.3.CO;2
- Hu, G. C., Xie, Y. X., 2002. Carboniferous gas fields of steep structural zone in the eastern Sichuan basin, China. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Hu, X. F., 2002. Oil & gas reservoir types in the western region of Hunan and Hubei and exploration orientation. *Oil & Gas Geology*, 23(3):300—306 (in Chinese with English abstract).
- Hu, Z. Q., Zhu, G., Liu, G. S., et al., 2009. The folding time of the eastern Sichuan Jura-type fold belt; evidence from unconformity. *Geological Review*, 55(1):32—42 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J. J., 2000. Research on the stress fields in superposed fold area—an example from northeastern Sichuan. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 35(2):140—150 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J. Q., 1954. On major tectonic forms of China. Geological Memoirs, Beijing (in Chinese).
- Huang, K. N., Opdyke, N. D., 1996. Paleomagnetism of Middle Triassic redbeds from Hubei and northwestern Hunan provinces, South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 143(1—4):63—79. doi:10.1016/0012-821X(96)00133-1
- Jin, Z. M., Yao, Y. P., 2004. Beyond plate tectonics: What do we do in structural geology? *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(6):644—650 (in Chinese with English abstract).
- Ketcham, R. A., 2005. Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58:275—314. doi:10.2138/rmg.2005.58.11
- Ketcham, R. A., Donelick, R. A., Carlson, W. D., 1999. Variability of apatite fission-track annealing kinetics III: extrapolation to geological time scales. *American Mineralogist*, 84:1235—1255.
- Laubscher, H. P., 1977. Fold development in the Jura. *Tectonophysics*, 37(4):337—362.
- Leturmy, P., Mugnier, J. L., Vinour, P., et al., 2000. Piggy-back basin development above a thin-skinned thrust belt with two detachment levels as a function of interactions between tectonic and superficial mass transfer; the case of the Subandean Zone (Bolivia). *Tectonophysics*, 320(1):45—67. doi:10.1016/S0040-1951(00)00023-8
- Li, B. L., Sun, Y., Chen, W., 1998. Layer gliding systems in eastern Sichuan and their significance for petroleum geology. *Oil & Gas Geology*, 19(3):244—261 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. W., Zhuang, Y. X., 2006. Scientific problems of continental dynamics in the Qinghai-Tibet plateau. *Geolog-*

- ical Science and Technology Information*, 25(2): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. L., Sun, S., Xu, J. H., et al., 1989. New evidences about the evolution of the south Cathay orogenic belt. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 3: 217—225 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. J., Xiao, K. H., Wang, X. W., et al., 2008. Thermochronology of detrital minerals in the Silurian strata from southern China and its geological implications. *Acta Geologica Sinica*, 82(8): 1068—1076 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. Q., Ran, L. H., Chen, G. S., et al., 2002. Genetic geologic model and gas-bearing analysis of high and steep structures in East Sichuan. *Journal of Chengdu University of Technology*, 29(6): 605—609 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. F., Liang, H. S., Cai, L. G., et al., 1994. Structural styles of the Longmenshan thrust belt and evolution of the foreland basin in western Sichuan Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 68(2): 101—118 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. F., Liang, H. S., Li, X. Q., et al., 2000. The coupling mechanisms of Mesozoic-Cenozoic rift basins and extensional mountain system in eastern China. *Earth Science Frontiers*, 7(4): 477—486 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L. H., Fang, M. X., Xu, Q., 1999. Structure classification of high and steep structural zones in East Sichuan. *Natural Gas Industry*, 19(5): 88—90 (in Chinese).
- Liu, S. G., Wang, Y. C., Zhang, G. X., et al., 1993. The formation mechanism of Dachigan steep structural zone and its effect on the Upper Carboniferous reservoir in the eastern Sichuan basin. *Journal of Chengdu Institute of Technology*, 21(3): 102—111 (in Chinese with English abstract).
- Ma, R. Y., Peng, J. B., Xi, X. W., et al., 2004. Mechanism of progressive uplift of Qinghai-tibet plateau. *Advance in Earth Sciences*, 19(Suppl.): 41—45 (in Chinese with English abstract).
- Mitra, S., 2003. A unified kinematic model for the evolution of detachment folds. *Journal of Structural Geology*, 25(10): 1659—1673. doi: 10. 1016/S0191—8141(02)00198—0
- Mugnier, J. L., Huyghe, P., Leturmy, P., et al., 2004. Episodicity and rates of thrust-sheet motion in the Himalayas (western Nepal). *AAPG Memoir*, 82: 91—114.
- Qiu, Y. X., Zhang, Y. C., Ma, W. P., 1998. Tectonics and geological evolution of Xuefeng intra-continental orogen, South China. *Geological Journal of China Universities*, 4(4): 432—443 (in Chinese with English abstract).
- Robinson, D. M., DeCelles, P. G., 2002. Rates of shortening in the Himalayan fold-thrust belt, western Nepal. *Abstracts with Programs—Geological Society of America*, 34(6): 410.
- Shu, L., Charvet, J., 1996. Kinematics and geochronology of the Proterozoic Dongxiang-Shexian ductile shear zone; with HP metamorphism and ophiolitic melange (Jiangnan region, South China). *Tectonophysics*, 267(1—4): 291—302. doi: 10. 1016/S0040—1951C96700104—7
- Su, Y., 2007. Tectonic evolution and its controlling effect to hydrocarbon accumulation in western area of Hunan-Hubei (Dissertation). Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Guangzhou (in Chinese).
- Tong, C. G., 2000. Relationship between neotectonic movement and structural evolution and gas pools formation of Sichuan basin. *Journal of Chengdu University of Technology*, 27(2): 123—130 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Zhang, P. Z., Niu, Z. J., et al., 2001. Present day crustal movement and tectonic deformation in China continent. *Science in China (Series D)*, 31(7): 529—536 (in Chinese).
- Wang, X. L., Zhou, J. C., Qiu, J. S., et al., 2004. Geochemistry of the Meso-to Neoproterozoic basic-acid rocks from Hunan Province, South China; implications for the evolution of the western Jiangnan orogen. *Precambrian Research*, 135(1—2): 79—103. doi: 10. 1016/j. precamres. 2004. 07. 006
- Wang, X. Y., Zhu, W. Y., Fu, Y., et al., 2002. Present-time crustal deformation in China and its surrounding regions by GPS. *Chinese Journal of Geophysics*, 45(2): 198—209 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G. Y., 2002. The Yanshanian orogeny and Late Mesozoic activation in China continent. *Chinese Journal of Geology*, 37(4): 453—461 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. H., 1989. Geotectonics of South China and the relationship with Japan. *Advance in Earth Sciences*, 1: 22—27 (in Chinese).
- Xu, J. H., 1987. It is South China orogen, but not South China platform. *Science in China (Series B)*, 17(10): 1107—1115 (in Chinese).
- Xu, Y. G., He, Z. A., Wang, J. Y., 2003. A recognition of hydrocarbon potential in western Hunan and Hubei area. *Oil & Gas Geology*, 24(4): 356—361 (in Chinese

- with English abstract).
- Xu, Z. H., Shi, Y. L., 2003. Lithospheric structure and continental geodynamics. *Acta Seismologica Sinica*, 25(5): 512—527 (in Chinese with English abstract).
- Yan, D. P., Wang, X. W., Liu, Y. Y., 2000. Analysis of fold style and its formation mechanism in the area of boundary among Sichuan, Hubei and Hunan. *Geoscience*, 14(1): 37—43 (in Chinese with English abstract).
- Yan, D. P., Zhou, M. F., Song, H. L., et al., 2003. Origin and tectonic significance of a Mesozoic multi-layer overthrust system within the Yangtze block (South China). *Tectonophysics*, 361(3—4): 239—254. doi: 10.1016/S0040—1951(02)00646—7
- Yang, K. F., Yang, K. G., Ma, C. Q., 2004. Deformation characteristics and ESR dating of Anhua-Xupu fault belt in the Xuefeng Mountains, Hunan. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(3): 263—269 (in Chinese with English abstract).
- Yokoyama, M., Liu, Y. Y., Halim, N., et al., 2001. Paleomagnetic study of Upper Jurassic rocks from the Sichuan basin; tectonic aspects for the collision between the Yangtze block and the North China block. *Earth and Planetary Science Letters*, 193(3—4): 273—285. doi: 10.1016/S0012—821x(01)00498—8
- Yue, G. Y., 1998. Tectonic characteristics and tectonic evolution of Dabashan orogenic belt and its foreland basin. *Journal of Mineral. Petrol.*, 18(Suppl.) 8—15 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. W., Dong, Y. P., Yao, A. P., 2002. Some thoughts on the study of continental dynamics and orogenic belts. *Geology in China*, 29(1): 7—13 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. W., Guo, A. L., 2007. Suggestions on enhancing rheological study in structural geology. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 42(1): 10—15 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M. S., Chen, F. J., 1998. Application condition of balanced-section technique and the case analysis. *Oil Geophysical Prospecting*, 33(4): 532—540, 552 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. J., Feng, J. L., Chen, X. S., et al., 2001. Discovery of Dengying Formation fossil pool in Cili, Hunan and its significance. *Oil & Gas Geology*, 22(2): 114—118 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X., Chen, H. J., Sun, Z. C., et al., 1983. The Mesozoic-Cenozoic tectonics and petroliferous basins of China. *Acta Geologica Sinica*, 3: 235—242 (in Chinese with English abstract).
- Zoetemeijer, R., Sassi, W., Roure, F., et al., 1992. Strati-graphic and kinematic modeling of thrust evolution, northern Apennines, Italy. *Geology*, 20: 1035—1038. doi: 10.1130/0091—7613(1992)020<1035;SAKMOT>2.3.CO;2

附中文参考文献

- 蔡立国, 刘和甫, 1997. 四川前陆褶皱—冲断带构造样式与特征. *石油实验地质*, 19(2): 115—120.
- 蔡学林, 邓明森, 魏显贵, 1993. 四川盆地褶皱构造接触应变分析. *成都地质学院学报*, 20(4): 1—10.
- 陈海泓, 孙枢, 李继亮, 等, 1993. 雪峰山大地构造的基本特征初探. *地质科学*, 28(3): 201—210.
- 陈明是, 张树淮, 1998. 长江三峡地区弧形对突构造特征及其形成机制. *华南地质与矿产*, 1: 47—55.
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等, 1995. 扬子大陆的陆内俯冲与大陆的缩小——由白云母(二云母)花岗岩推导. *高校地质学报*, 1(1): 50—57.
- 丁道桂, 郭彤楼, 翟常博, 等, 2005. 鄂西—渝东区膝折构造. *石油实验地质*, 27(3): 205—210.
- 丁道桂, 刘光祥, 吕俊祥, 等, 2007. 扬子板块海相中生界盆地的递进变形改造. *地质通报*, 26(9): 1178—1188.
- 丁道桂, 朱樱, 陈凤良, 等, 1991. 中、下扬子区古生代盆地基底拆离式改造与油气领域. *石油与天然气地质*, 12(4): 376—386.
- 樊光明, 1993. 江南隆起中段盖层中的推覆和滑覆构造及其地质构造模型. *地球科学——中国地质大学学报*, 18(4): 393—402.
- 范小林, 1996. 雪峰山系—沅麻盆地地质结构及找油意义. *石油实验地质*, 18(1): 64—70.
- 冯向阳, 孟宪刚, 邵兆刚, 等, 2001. 雪峰山陆内造山带变形特征及挤压推覆—伸展滑脱构造的物理模拟. *地球学报*, 22(5): 419—424.
- 冯向阳, 孟宪刚, 邵兆刚, 等, 2003. 华南及邻区有序变形及其动力学初探. *地球学报*, 24(2): 115—120.
- 郭安林, 张国伟, 程顺有, 2004. 超越板块构造——大陆地质研究新机遇评述. *自然科学进展*, 14(7): 729—733.
- 郭令智, 施央申, 马瑞士, 等, 1984. 中国东南部地体构造的研究. *南京大学学报(自然科学版)*, 20(4): 732—739.
- 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等, 1996. 四川盆地形成与演化. 北京: 地质出版社.
- 胡光灿, 谢姚祥, 1997. 中国四川东部高陡构造石炭系气田. 北京: 石油工业出版社.
- 胡晓凤, 2002. 湘鄂西地区油气藏类型及勘探方向. *石油与天然气地质*, 23(3): 300—306.
- 胡召齐, 朱光, 刘国生, 等, 2009. 川东“侏罗山式”褶皱带形成时代: 不整合面的证据. *地质论评*, 55(1): 32—42.
- 黄继钧, 2000. 纵弯叠加褶皱地区应力场研究——以川东北

- 地区为例. 地质科学, 35(2): 140—150.
- 黄汲清, 1954. 中国主要地质构造单位. 北京: 地质出版社.
- 金振民, 姚玉鹏, 2004. 超越板块构造——我国构造地质学要做什么? 地球科学——中国地质大学学报, 29(6): 644—650.
- 李本亮, 孙岩, 陈伟, 1998. 川东层滑系统及其油气地质意义. 石油与天然气地质, 19(3): 244—261.
- 李德威, 庄育勋, 2006. 青藏高原大陆动力学的科学问题. 地质科技情报, 25(2): 1—10, 18.
- 李继亮, 孙枢, 许靖华, 等, 1989. 南华夏造山带构造演化的新证据. 地质科学, 3: 217—225.
- 李双建, 肖开华, 汪新伟, 等, 2008. 南方志留系碎屑矿物热年代学分析及其地质意义. 地质学报, 82(8): 1068—1076.
- 李忠权, 冉隆辉, 陈更生, 等, 2002. 川东高陡构造成因地质模式与含气性分析. 成都理工学院学报, 29(6): 605—609.
- 刘和甫, 梁慧社, 蔡立国, 等, 1994. 川西龙门山冲断系构造样式与前陆盆地演化. 地质学报, 68(2): 101—118.
- 刘和甫, 梁慧社, 李晓清, 等, 2000. 中国东部中生代裂陷盆地与伸展山岭耦合机制. 地质前缘, 7(4): 477—486.
- 刘丽华, 范明祥, 徐强, 1999. 川东高陡构造带构造模式分类. 天然气工业, 19(5): 88—90.
- 刘树根, 王允诚, 张高信, 等, 1993. 川东大池干井高陡构造的形成机制及其对石炭系储层的影响. 成都理工学院学报, 21(3): 102—111.
- 马润勇, 彭建兵, 席先武, 等, 2004. 青藏高原的递进式隆升机制. 地球科学进展, 19(增刊): 41—45.
- 丘元禧, 张渝昌, 马文璞, 1998. 雪峰山陆内造山带的构造特征与演化. 高校地质学报, 4(4): 432—443.
- 苏勇, 2007. 湘鄂西区块构造演化及其对油气聚集的控制作用(博士论文). 广州: 中国科学院研究生院.
- 童崇光, 2000. 新构造运动与四川盆地构造演化及气藏形成. 成都理工学院学报, 27(2): 123—130.
- 王琪, 张培震, 牛之俊, 等, 2001. 中国大陆现今地壳运动和构造变形. 中国科学(D辑), 31(7): 529—536.
- 王小亚, 朱文耀, 符养, 等, 2002. GPS 监测的中国及其周边现时地壳形变. 地球物理学报, 45(2): 198—209.
- 吴根耀, 2002. 燕山运动和中国大陆晚中生代的活化. 地质科学, 37(4): 453—461.
- 许靖华, 1987. 是华南造山带而不是华南地台. 中国科学(B辑), 17(10): 1107—1115.
- 许靖华, 1989. 华南大地构造及其与日本的联系. 地球科学进展, 1: 22—27.
- 徐言岗, 贺自爱, 王津义, 2003. 湘鄂西地区油气前景探析. 石油与天然气地质, 24(4): 356—361.
- 许忠淮, 石耀霖, 2003. 岩石圈结构与大陆动力学. 地震学报, 25(5): 512—527.
- 颜丹平, 汪新文, 刘友元, 2000. 川鄂湘边区褶皱构造样式及其成因机制分析. 现代地质, 14(1): 37—43.
- 杨奎锋, 杨坤光, 马昌前, 2004. 雪峰山安化—溆浦断裂带变形特征及 ESR 定年. 大地构造与成矿学, 28(3): 263—269.
- 乐光禹, 1998. 大巴山造山带及其前陆盆地的构造特征和构造演化. 矿物岩石, 18(增刊): 8—15.
- 张国伟, 董云鹏, 姚安平, 2002. 关于中国大陆动力学与造山带研究的几点思考. 中国地质, 29(1): 7—13.
- 张国伟, 郭安林, 2007. 关于加强流变构造学研究的建议. 地质科学, 42(1): 10—15.
- 张明山, 陈发景, 1998. 平衡剖面技术应用的条件及实例分析. 石油地球物理勘探, 33(4): 532—540, 552.
- 赵宗举, 冯加良, 陈学氏, 等, 2001. 湖南慈利灯影组古油藏的发现及意义. 石油与天然气地质, 22(2): 114—118.
- 朱夏, 陈焕疆, 孙肇才, 等, 1983. 中国中、新生代构造与含油气盆地. 地质学报, 3: 235—242.