

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.517



鄂西中央背斜带中生代构造演化过程： 来自磷灰石裂变径迹的证据

李朋, 胡正祥, 何仁亮, 李雄伟, 吴龙, 宗维, 杜小锋, 周峰

湖北省地质调查院, 湖北武汉 430034

摘要: 鄂西中央背斜带位于扬子陆块扬子碳酸盐台地构造区和川中(鄂西)前陆盆地构造区, 构造形迹保存完整, 对于研究区域构造演化具有重要的区域优势。根据详细的野外地质调查, 结合磷灰石裂变径迹模拟将本区侏罗纪以来的构造活动分为5个主要期次: (1) 187.4~180.1 Ma之间的早侏罗世时期, 本区地层发生隆升, 导致了九里岗组与桐竹园组之间的平行不整合; (2) 180.1~115.6 Ma的侏罗纪中晚期至早白垩世, 发生区域沉降, 并接受陆相碎屑沉积; (3) 115.6~78.8 Ma的白垩纪晚期, 再次缓慢隆升并遭受剥蚀; (4) 78.8~63.6 Ma的白垩纪末至古近纪初, 再次发生构造沉降, 沉积了白垩系跑马岗组; (5) 之后, 本区总体处于大幅度构造隆升状态, 但2.6 Ma后的第四纪开始有小幅沉降。根据以上构造演化历史, 结合平衡剖面技术定量重建了本区区域挤压—伸展过程。

关键词: 构造演化; 裂变径迹; 平衡剖面; 中生代; 鄂西; 年代学。

中图分类号: P18

文章编号: 1000-2383(2018)07-2518-09

收稿日期: 2018-01-11

The Tectonic Evolution of the Central Anticline in Western Hubei of China during Mesozoic: Evidences from Apatite Fission Track

Li Peng, Hu Zhengxiang, He Renliang, Li Xiongwei, Wu Long, Zong Wei, Du Xiaofeng, Zhou Feng

Hubei Geological Survey, Wuhan 430034, China

Abstract: The central anticline of the western Hubei is located in the tectonic zone of the Yangtze block and the central Sichuan (western Hubei) foreland basin, which possesses important advantages for the study of regional tectonic evolution. In this paper, according to the detailed field geological survey and evidences from apatite fission track simulation, five stages of tectonic activities have been identified: (1) tectonic uplift at 187.4 Ma–180.1 Ma that resulted in the parallel unconformity between the Jiuligang Formation and the Tongzhuyuan Formation. (2) tectonic subsidence and deposition of terrestrial sediments at 180.1 Ma–115.6 Ma. (3) slow tectonic uplift once again associated with land erosion during 115.6 Ma–78.8 Ma. (4) subsidence again and the deposition of Cretaceous Paomagang Formation during the period of 78.8 Ma–63.6 Ma. (5) followed by great uplift until a small subsidence at 2.6 Ma of the Quaternary. Based on the tectonic evolution and the application of balanced profile technology, the regional tectonic pattern of extrusion-stretching process was established.

Key words: tectonic evolution; fission track; balanced cross-section; Mesozoic; western Hubei; geochronology.

鄂西中央背斜带位于扬子陆块扬子碳酸盐台地构造区和川中(鄂西)前陆盆地构造区。在地史演化过

程中主要经历了沉积盖层发展和陆缘活化两个阶段, 构造形迹以盖层褶皱为主, 同时伴随断裂构造发育。

基金项目: 中国地质调查局项目(Nos. 12120114066101, DD20160029)。

作者简介: 李朋(1984—), 男, 工程师, 主要从事沉积盆地构造及其地层分析方面的工作。ORCID: 0000-0002-0086-7259。

E-mail: pengli198666@163.com

* 通讯作者: 胡正祥, E-mail: huzx@hbdk.gov.cn

引用格式: 李朋, 胡正祥, 何仁亮, 等, 2018. 鄂西中央背斜带中生代构造演化过程: 来自磷灰石裂变径迹的证据. 地球科学, 43(7): 2518–2526.

中央背斜带一直以来被认为形成于燕山期,主体构造应力来源于南东向挤压(李本亮等,1998;颜丹平等,2000;张国伟等,2002;丁道桂等,2005;梅廉夫等,2010).对于背斜带的构造演化过程一直没有查明.

本次调查旨在通过路线调查查明各期构造之间的叠加改造关系,结合磷灰石裂变径迹模拟来反演沉积一剥蚀过程,从而详细划分中央背斜带的构造演化过程.

1 区域地质概况

研究区位于中央背斜带恩施—利川一带,横跨利川复向斜带、中央背斜带、花果坪复向斜带(图 1). 出露地层自寒武纪石龙洞组至白垩纪跑马岗组,局部零星出露第四系.背斜轴向北东 45°,核部地层为寒武系,最老地层为石龙洞组,沿轴向零星出露.两翼由奥陶系—三叠系组成.北西翼地层产状较陡,30°~75°,局部可达 80°,在北西翼接近转折位置形成一条北东向高陡带,产状普遍在 65°~80°之间.南东翼南段,因星斗山复向斜、小溪背斜、大集场复向斜、庆阳坝背斜等新华夏系复合构造的叠加改造,面貌复杂;北段因恩施盆地覆盖严重而出露不全,加之恩施—桅杆堡断裂的切割改造,背斜南东翼强烈破坏.核部及北西翼发育一系列倾向北西的断裂构造(图 2).

2 野外构造特征

为系统研究背斜的构造演化过程,本次调查在背斜核部做了系统的野外调查工作.在恩施笔架山一带,发育一系列轴面倾向北西的斜歪褶皱(图 3a).露头上见一系列小型平卧褶皱,呈“窗棂构造”,轴面均倾向北西(图 3b),褶皱伴随发育多条小型逆冲断裂(图 3c),断层倾向一般在 330°~345°之间,断裂带内具明显的片理化构造.以上特征皆反映由 NW 向 SE 的强烈挤压应力.

靠近核部位置,发育一陡倾带,地层倾角普遍在 70°~85°之间,局部近直立(图 3d),褶皱转折位置发育一系列“Z”型褶皱(图 3e),反映由北西向南东的挤压应力.茅坝槽断裂南东侧,见到轴面南东倾向的褶皱(图 3f),反映后期由南东向北西挤压应力的叠加.

因此,根据路线上构造形迹的不同,笔者认为该背斜早期为北西向南东挤压改造,后经南东向北西方向的挤压应力的叠加改造,最终定型为现今构造样式(图 4).

3 磷灰石裂变径迹模拟

裂变径迹测年是最重要的低温热年代学方法之一,该方法是建立在矿物²³⁸U 自发裂变辐射损伤效

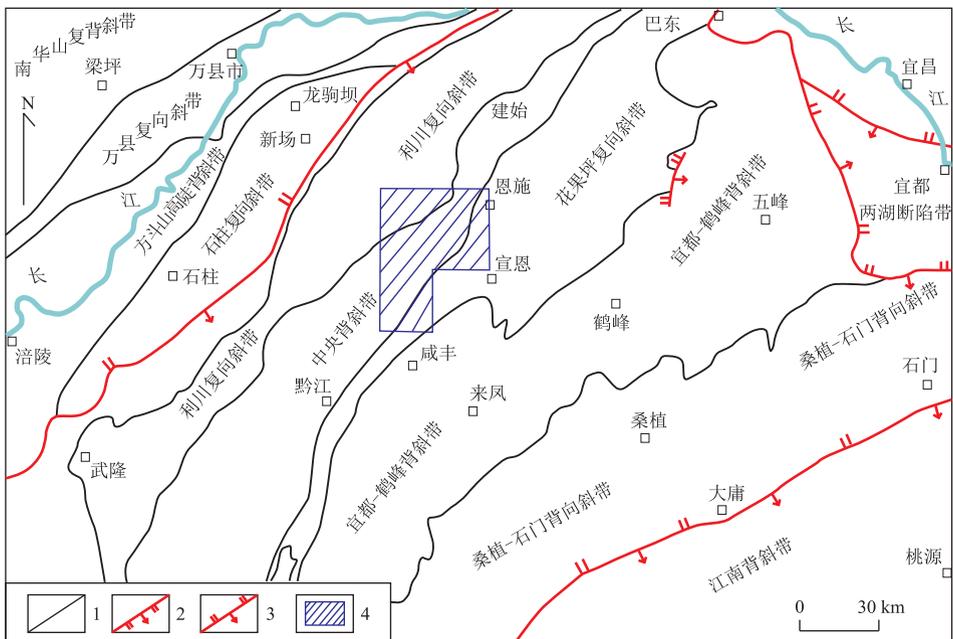


图 1 研究区大地构造位置

Fig.1 Tectonic location of the study area

1.构造单元界线;2.正断层;3.逆断层;4.研究区;图据颜丹平等(2000)修改

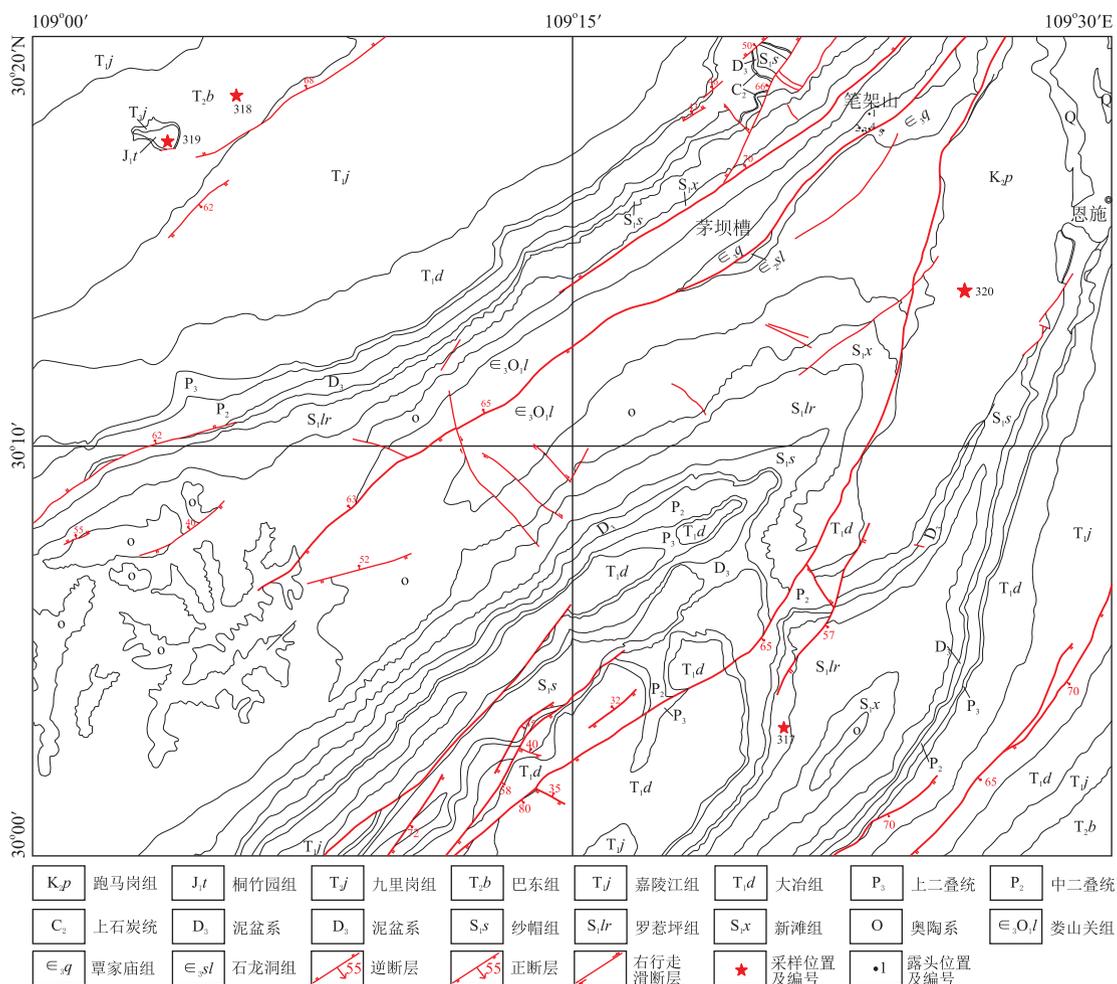


图 2 工作区构造简图及采样位置

Fig.2 Structural sketch and sample locations

应基础上的一种同位素定年方法.它记录了古地温演化过程中温度和时间两方面的信息,可被用来有效地重塑地壳上部 3~5 km 范围内古地温的演化过程.国内外学者对该项技术进行了大量研究和不断改进,其研究方法被广泛应用于沉积盆地热史分析(O'Sullivan *et al.*, 1993; Gallagher *et al.*, 1998; Gleadow *et al.*, 2002; 贾承造等, 2003; Armstrong, 2005; 任战利等, 2005; 许长海等, 2006; 王国灿等, 2007).

3.1 采样信息

本次研究使用的磷灰石样品主要采集于岳武坝幅金子山向斜核部、恩施幅白垩纪盆地,共采集样品 4 件(样品号 317、318、319、320),分别取自纱帽组、巴东组二段、桐竹园组、跑马岗组二段,取样高程分别为 700 m、1 174 m、1 518 m、510 m.

3.2 样品测试结果

本次采集的样品均来自各地层的砂岩中,样品

经实验室分选后,分选出来的磷灰石矿物被均匀地粘在光薄片,然后再进行磨光.然后送中国地质大学(北京)地质资源与地质过程国家重点实验室进行处理测试.

外探测器法裂变径迹测试分析工作在中国地质大学(北京)地质资源与地质过程国家重点实验室完成(袁万明等, 2007).磷灰石采用环氧树脂滴固,将固定好的磷灰石薄片进行研磨和抛光,使得矿物内表面露出,之后,磷灰石颗粒在恒温 20 °C 的条件下,利用 5.5 mol/L 浓度的 HNO_3 溶液蚀刻 20 s.

研究区经历了较为长期、复杂的地质演变史,最老沉积地层为寒武纪石龙洞组,而 4 件样品通过裂变径迹获得的中值年龄最大为 77 ± 5 Ma,单颗磷灰石最大年龄介于 88.23~107.23 Ma,小于样品 317、318、319 采样地层发育年龄,说明以上 3 件样品经历了完全退火,其裂变径迹是后期重新累积的结果.样品 320,最大单颗磷灰石年龄为 133.83 Ma,而其

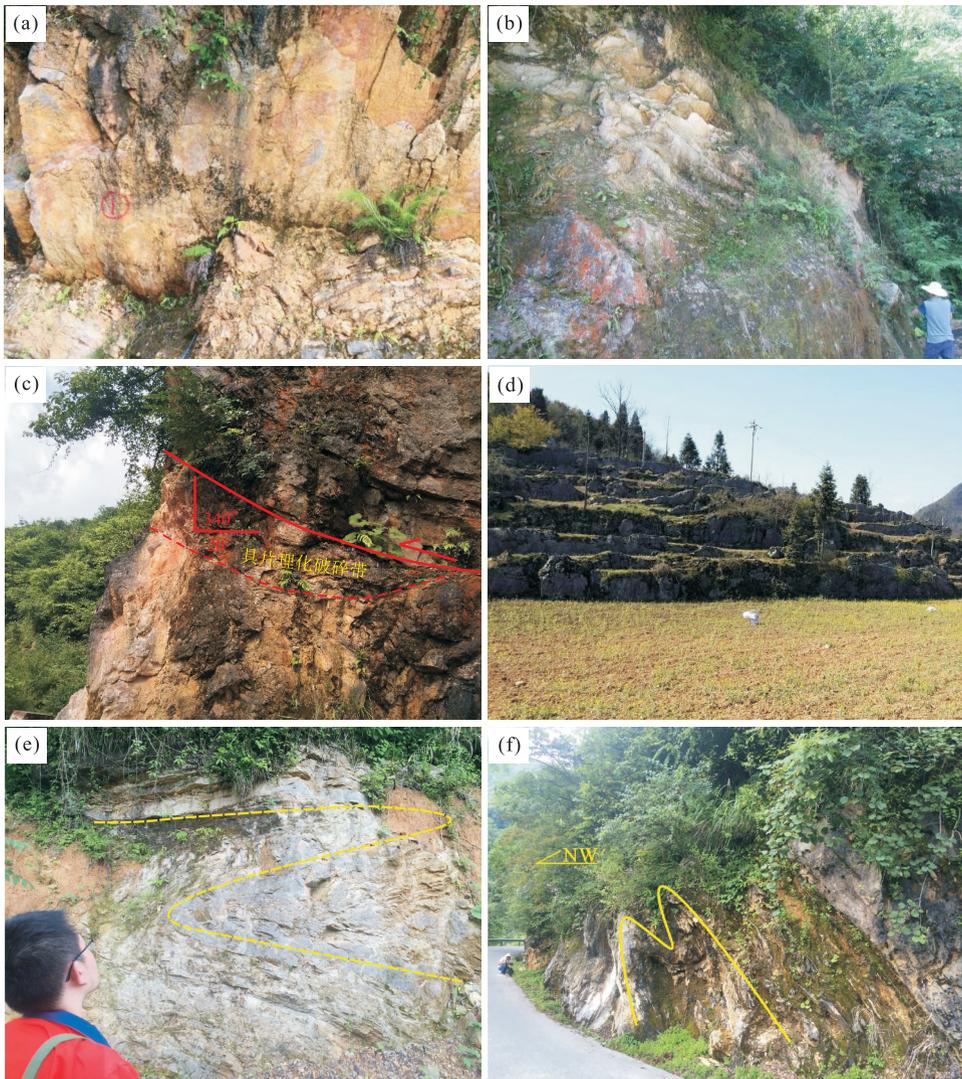


图 3 研究区野外照

Fig.3 Field photos of the study area

a.斜歪褶皱特征(点 1)(镜头方向 NW);b.小型平卧褶皱构造(点 2)(镜头方向 NW);c.背斜核部发育的小型北西倾向逆断层(点 3);d.近直立岩层(点 4);e.背斜核部“Z”型褶皱(点 5);f.背斜南东翼斜歪褶皱(点 6)

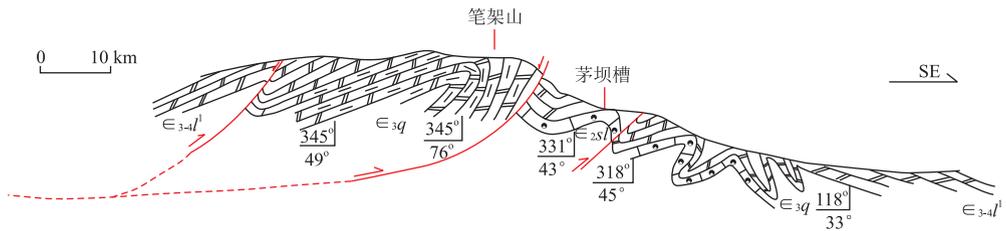


图 4 白果坝背斜变形样式

Fig.4 Deformation pattern of Baiguoba fold

取样地层跑马岗组沉积于晚白垩世,单颗磷灰石年龄明显大于地层沉积年代,说明该样品中有少数磷灰石可能为外源颗粒。

3.3 热史模拟

本次模拟采用的是 HeFTy 软件,1.9.1 版本。由

于研究区地层自三叠纪以来,发生过多次隆升剥蚀,地层缺失较严重,因此热史模拟的不确定性较大。模拟时根据研究区地层沉积发育史、重要的地层界面、地表温度(20℃),设置限定条件,采用 Monte Carlo 算法,每次拟合曲线 10 000 条,由此得到 4 件样品

表 1 磷灰石裂变径迹测定结果

Table 1 Results of Apatite fission track

样品编号	构造位置	层位	颗粒数 (个)	$\rho_s(10^5/cm^2)$ (N_s)	$\rho_i(10^5/cm^2)$ (N_i)	$\rho_d(10^5/cm^2)$ (N)	$P(\chi^2)$ (%)	中值年龄(Ma) ($\pm 1\sigma$)	Pooled 年龄 (Ma)($\pm 1\sigma$)	$L(\mu m)$ (N)
317	庆阳坝背斜	S_{1s}	35	3.905(499)	16.66(2 129)	10.197(6 313)	4.30	48 \pm 4.0	49 \pm 3	12.1 \pm 2.1(100)
318	金子山复向斜	T_2b^2	34	4.482(493)	15.428(1 697)	9.815(6 313)	88.40	58 \pm 4.0	58 \pm 3	13.1 \pm 1.6(107)
319	金子山复向斜	J_{1t}	33	7.366(685)	19.131(1 779)	9.243(6 313)	98.60	73 \pm 5.0	73 \pm 5	12.5 \pm 2.3(102)
320	恩施盆地	K_2p^2	35	4.155(892)	9.167(1 968)	8.481(6 313)	2.80	77 \pm 5.0	78 \pm 5	12.1 \pm 2.0(100)
HC-38	桑植石门复向斜	S	25	6.963(477)	13.124(899)		45.00	92 \pm 7.0		11.4 \pm 2.3(105)
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)
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)

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，属于不同组年龄组；中值年龄为裂变径迹测定年龄，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。HC-38 样品数据引自李双建等(2008)；JL-1、WD-44 样品数据引自梅廉夫等(2010)。

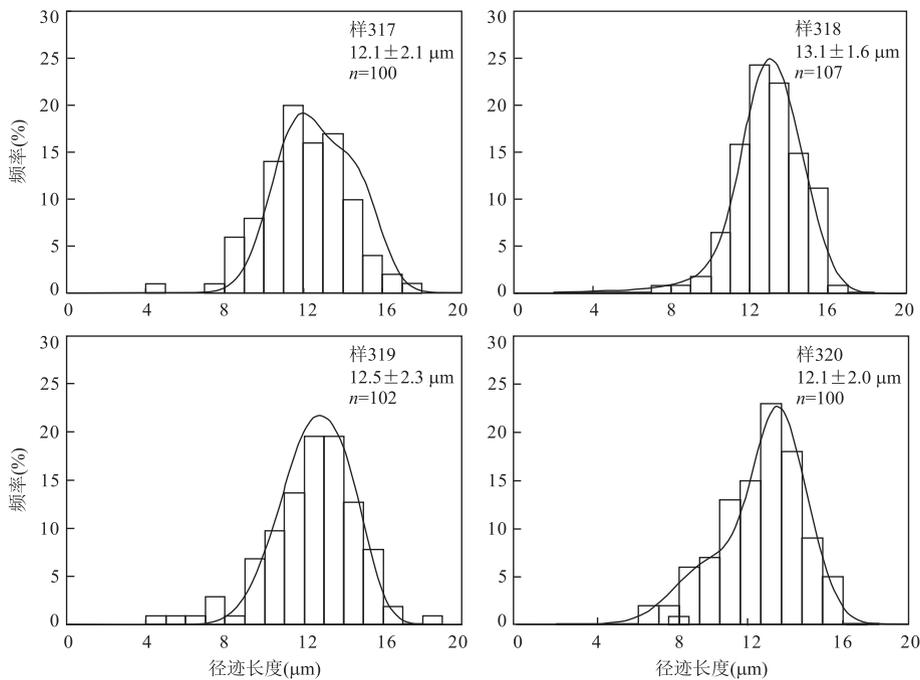


图 5 磷灰石裂变径迹长度分布直方图

Fig.5 Distribution histograms of apatite fission track length

的热史模拟结果(表 1, 图 5)。

样品 317 采集地层为志留系纱帽组, 由于该地层距今时代过于久远, 样品已发生过完全退火, 且由于样品经历了过长的热史演变, 热史恢复上有较大难度, 其模拟结果无法很好地反映地史过程, 同时, 检验概率 $P(\chi^2) < 5\%$, 说明样品表现年龄可能是由两组或两组以上单颗粒年龄组成(图 6), 故不做模拟。

样品 318 采集地层为巴东组二段, 模拟结果显示, 从 227.3 Ma 至 187.4 Ma, 巴东组二段处于明显沉降状态, 此时沉积了巴东组、九里岗组及上覆地层。187.4~180.1 Ma 期间, 热史曲线呈上升趋势, 表明该阶段为隆升剥蚀阶段, 形成了九里岗组与桐竹

园组之间的平行不整合接触界线。从 180.1 Ma 到 115.6 Ma, 巴东组二段发生了大幅度的沉降, 此时桐竹园组正开始沉积, 热史曲线反映的沉降幅度极大, 地温从 68.6 °C 升至 158.4 °C。115.6 Ma 到 78.8 Ma, 地层转而变为隆升, 隆升幅度也极大, 地温降至 63.6 °C。180.1 Ma 至 78.8 Ma 期间的热史演变, 说明桐竹园组沉积后还沉积了较厚的上覆地层, 后经隆升被剥蚀。从 78.8 Ma 至 63.6 Ma, 区内再次沉降接受沉积, 沉积了白垩系跑马岗组。其后, 地层总体处于大幅隆升状态, 直至 2.6 Ma 后的小幅沉降, 沉积厚度不大的第四系(图 7)。

样品 319 所在桐竹园组, 自 211.2 Ma 开始沉降, 直至 190.4 Ma, 然后转为短暂隆升, 隆升时间至

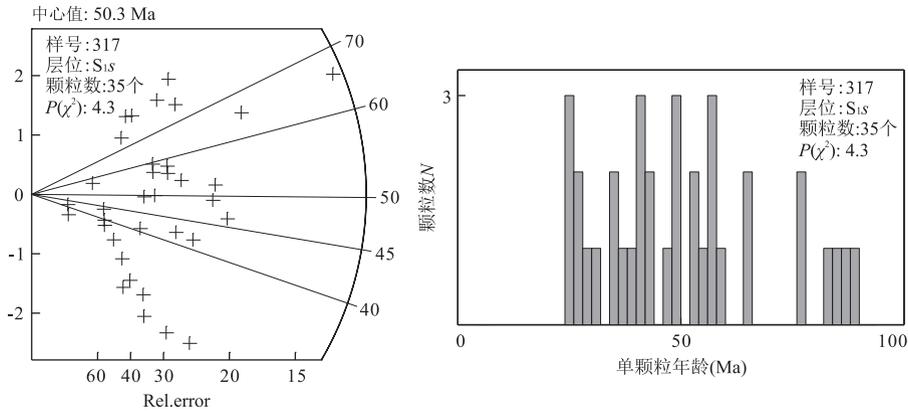


图 6 样品 317 裂变径迹单颗粒年龄分布图

Fig.6 The measured results of fission track dating the sample 317

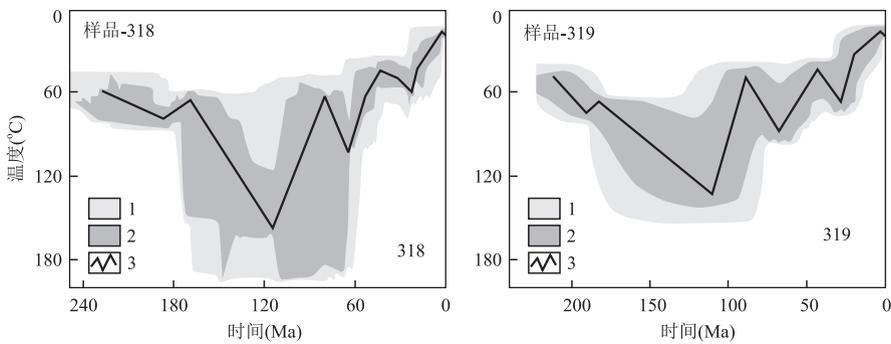


图 7 样品模拟结果

Fig.7 Time-temperature thermal history mode

1.好的热史范围;2.可以接受的热史范围;3.最佳热史路径

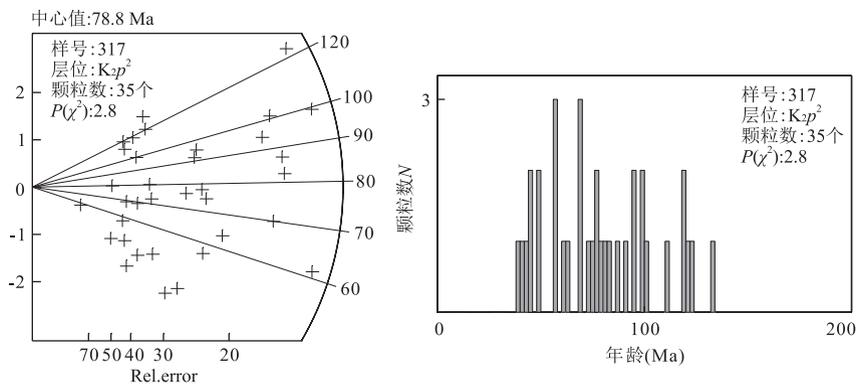


图 8 样品 320 裂变径迹单颗粒年龄分布

Fig.8 The measured results of fission track dating the sample 320

183.3 Ma 止.211.2~190.4 Ma 之间的沉降期应为九里岗组及之前地层的沉积表现.190.4~183.3 Ma 期间的短暂隆升为九里岗组与桐竹园组之间的平行不整合构造隆升响应.183.3~110.8 Ma, 研究区地层发生大幅度沉降, 110.8~88.7 Ma 地层反转为显著隆升.88.7~68.1 Ma 的热史曲线下落代表了白垩纪跑马岗组的沉积.跑马岗组沉积后, 与前述样品 318—

样, 地层同样发生了总体幅度极大的隆升, 仅在 43.5~28.1 Ma 有过短暂沉降(图 7).

样品 320 采自跑马岗组二段, 该地层为陆相沉积地层, 物源为周缘地层风化产物, 检验概率 $P(\chi^2) < 5\%$, 说明样品表现年龄可能是由两组或两组以上单颗粒年龄组成(图 8), 故不做模拟.

样品 HC-38 位于桑植石门复向斜.模拟结果显

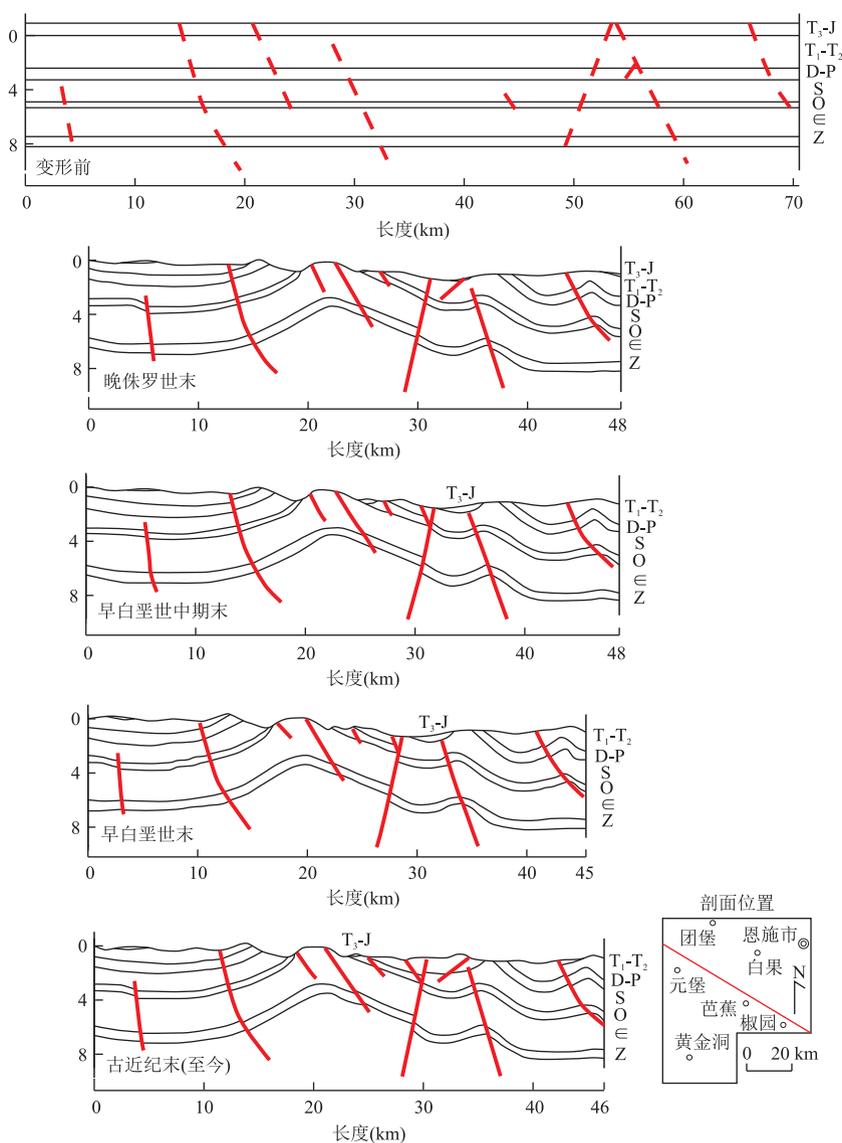


图 9 研究区平衡剖面构造演化

Fig.9 Balanced cross-section of the study area showing the process of tectonic evolution

示在印支末期约 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; 127 Ma 左右进入缓慢隆升期, 地层抬升到磷灰石退火带之上. 之后经历了 3 个阶段, 127~48 Ma 之间为快速抬升阶段; 48~37 Ma 为加速抬升阶段; 37 Ma 以来地层抬升幅度较小, 一直处于近地表附近.

样品 JL-1 位于石柱复向斜, 模拟结果显示在白垩世早期 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.

华蓥山背斜样品 WD-44 显示在早、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(梅廉夫等, 2010).

4 平衡剖面模拟和计算

本次选取与区域构造方向近于一致, 垂直于 NE 向构造的一条 NW-SE 向构造剖面(图 9). 根据裂变径迹模拟结果, 笔者建立了 5 期较大的构造活动期, 其中在燕山晚期经历了 NW-SE 向的伸展作用, 使原 NE 向逆断层反转为正断层. 由于本次构造反转在应力亦为垂直构造走向, 因此可用面积守恒原理进行剖面平衡恢复(张明山和陈发景, 1998). 现今剖面总长度为 46 km.

本次平衡剖面以志留系顶界面为标志线计算,

总剖面原始长度 70.15 km,晚侏罗世强烈挤压,缩短变形,缩短量 22.15 km,白果坝背斜形成;之后呈弱挤压状态持续至早白垩世末,在早白垩世末至晚白垩世开始,受到中国东部整体伸展环境的影响发生伸展变形,恩施断裂反转为正断层,上盘下降形成湖盆,发育了恩施盆地,伸展量达 1.1 km.之后受喜山运动影响,再次进入挤压隆升阶段。

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,缩短量为 22.15 km,缩短速率为 1.11 mm/a;早白垩世缩短量为 3.1 km,缩短速率为 0.14 mm/a;晚白垩世伸展量为 1.1 km,伸展速率为 0.07 mm/a。

根据梅廉夫等(2010)相关资料显示,川东断褶带缩短速率为 0.52 mm/a,湘鄂西断褶带缩短速率为 1.76 mm/a,工作区不同时间段的缩短速率不同与不同位置缩短速率的不同反映从侏罗纪至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。

5 结论及讨论

通过演化过程,笔者认为在 187.4~180.1 Ma 之间的隆升为印支期近南北向挤压应力,形成了研究区近东西向早期构造;180.1~115.6 Ma 之间区域总体处于伸展期,以整体沉降接受陆源碎屑沉积为主;115.6~78.8 Ma 之间的强烈挤压,为燕山期构造活动期,该期内发生多期的应力挤压过程,早期以北西向南东挤压为主,形成了白果坝背斜—星斗山向斜褶皱带,中央背斜带形成,后期以南东向北西挤压为主,形成了北西南东翼的紧闭褶皱带,北西翼应力改造程度较小;78.8~63.6 Ma 之间形成了白垩纪盆地;之后持续隆升,喜山期活动开始,直到 2.6 Ma,接受沉积,形成了第四系沉积。

通过收集桑植石门复向斜、石柱复向斜、华蓥山背斜的的裂变径迹模拟结果并与区内进行对比,可清晰地反映由南东的桑植石门复向斜向北西至华蓥山背斜,隆升变形的时间具有递进变新的特征,亦即反映湘鄂西至川东构造带的主期构造应力由南东向北西传递变形。

晚白垩世至古近纪,受中国东部整体伸展环境的影响区内发生伸展变形,逆断层普遍反转成为正

断层,发育了由恩施断裂控制的白垩纪恩施盆地.但在华蓥山背斜样品的模拟中未反映该期活动,因此判断该伸展构造未影响到川东一带。

致谢:磷灰石和锆石裂变径迹样品的主要分析工作在中国地质大学(北京)地质过程与地质资源国家重点实验室完成并得到了袁万明教授的大力支持,两位评审专家对本文提出了宝贵的修改意见,在此一并表示感谢!

References

- Armstrong, P.A., 2005. Thermochronometers in Sedimentary Basins. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58 (1): 499—525. <https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.19>
- 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).
- Gallagher, K., Brown, R., Christopher, J., 1998. Fission Track Analysis and Its Application to Geological Problems. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26(1): 519—572. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.26.1.519>
- Gleadow, A.J.W., Belton, D.X., Kohn, B.P., et al., 2002. Fission Track Dating of Phosphate Minerals and the Thermochronology of Apatite. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48 (1): 579—630. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.48.16>
- Jia, C.Z., Chen, H.L., Yang, S.F., et al., 2003. Late Cretaceous Uplifting Process and Its Geological Response in Kuqa Depression. *Acta Petrolei Sinica*, 24 (3): 1—5, 15 (in Chinese with English abstract).
- 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, S.J., Xiao, K.H., Wang, X.W., et al., 2008. Thermo-Chronology 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).
- Mei, L.F., Liu, Z.Q., Tang, J.G., et al., 2010. Mesozoic Intra-Continental Progressive Deformation in Western Hunan-Hubei-Eastern Sichuan Provinces of China: Evidence from Apatite Fission Track and Balanced Cross-Section. *Earth Science*, 35(2): 161—174 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2010.017>
- O'Sullivan, P. B., Green, P. F., Bergman, S. C., et al., 1993. Multiple Phases of Tertiary Uplift and Erosion in the Arctic National Wildlife Refuge, Alaska, Revealed by

Apatite Fission Track Analysis. *AAPG Bulletin*, 77: 359—385. <https://doi.org/10.1306/bdff8c0e-1718-11d7-8645000102c1865d>

Ren, Z. L., Xiao, H., Liu, L., et al., 2005. Determination of Cenozoic Uplift-Cooling Event in Qinshui Basin. *Oil & Gas Geology*, 26(1): 109—113 (in Chinese with English abstract).

Wang, G. C., Xiang, S. Y., Wang, A., et al., 2007. Thermochronological Constraint to the Process of the East Kunlun and Adjacent Areas in Mesozoic-Early Cenozoic. *Earth Science*, 32(5): 605—614, 680 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-2383.2007.05.003>

Xu, C. H., Zhou, Z. Y., Van, D. H. P., et al., 2006. Apatite Fission Track Thermochronology of Tectonic Evolution in Hefei Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 5—13 (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).

Yuan, W. M., Du, Y. S., Yang, L. Q., et al., 2007. Apatite Fission Track Studies on the Tectonics in Nanmulin Area of Gangdese Terrane, Tibet Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2911—2917 (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. *Chinese Geology*, 29(1): 7—13 (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 Chi-

nese with English abstract).

附中文参考文献

丁道桂, 郭彤楼, 翟常博, 等, 2005. 鄂西—渝东区膝折构造. 石油试验地质, 27(3): 205—210.

贾承造, 陈汉林, 杨树峰, 等, 2003. 库车坳陷晚白垩世隆升过程及其地质响应. 石油学报, 24(3): 1—5, 15.

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.

梅廉夫, 刘昭茜, 汤济广, 等, 2010. 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. 地球科学, 35(2): 161—174.

任战利, 肖晖, 刘丽, 等, 2005. 沁水盆地新生代抬升冷却事件的确定. 石油与天然气地质, 26(1): 109—113.

王国灿, 向树元, 王岸, 等, 2007. 东昆仑及相邻地区中生代—新生代早期构造过程的热年代学记录. 地球科学, 32(5): 605—614, 680.

许长海, 周祖翼, Van, D. H. P., 等, 2006. 合肥盆地构造演化的磷灰石裂变径迹分析. 石油学报, 27(6): 5—13.

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.

袁万明, 杜杨松, 杨立强, 等, 2007. 西藏冈底斯带南木林地区构造活动的磷灰石裂变径迹分析. 岩石学报, 23(11): 2911—2917.

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.