

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.611



# 湘鄂西褶皱带中—新生代剥蚀特征及其构造指示： 来自磷灰石裂变径迹的证据

邹耀遥, 张树林\*, 沈传波, 张先平, 李志强, 杨超群

中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

**摘要:**恢复湘鄂西褶皱带中—新生代以来的剥蚀历史, 探讨其变形的时空格架, 对于研究陆内褶皱造山以及指导该地区的油气勘探具有重要的意义. 利用该地区磷灰石样品进行裂变径迹年龄测定与热史模拟, 对中—新生代的剥蚀厚度和速率进行分析. 结果表明, 湘鄂西地区磷灰石裂变径迹的年龄为 71~100 Ma, 与川东阻挡式褶皱带中的磷灰石样品年龄进行对比, 具有由 SE 到 NW 向递进变新的趋势; 中—新生代以来的热史呈现出“三段式”的特征, 这 3 个阶段的转折时期为 115~90 Ma 和 35~20 Ma, 分别对应了从晚侏罗世—早白垩世挤压造山到晚白垩世伸展成盆再到新生代整体抬升的构造转换; 燕山期为湘鄂西褶皱带的主变形期, 变形时序呈现出由 SE 到 NW 向递进变新的趋势, 剥蚀程度呈现出由 SE 到 NW 向变弱的趋势. 这些认识为燕山期湘鄂西—川东褶皱带陆内递进变形的形成演化研究提供了有力的证据.

**关键词:**湘鄂西褶皱带; 中—新生代; 磷灰石裂变径迹; 热史模拟; 剥蚀特征; 石油地质.

中图分类号: P548

文章编号: 1000-2383(2018)06-2007-12

收稿日期: 2018-03-15

## Western Hunan-Hubei Fold Belt Exhumation Characteristics and Its Tectonic Implication in Mesozoic-Cenozoic: Evidence from Apatite Fission Track

Zou Yaoyao, Zhang Shulin\*, Shen Chuanbo, Zhang Xianping, Li Zhiqiang, Yang Chaoqun

Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** Reconstruction of the Mesozoic-Cenozoic exhumation history in western Hunan-Hubei fold belt and establishing its temporal and spatial evolution play important role in the research of intracontinental orogeny as well as the petroleum exploration in this area. Based on apatite fission track (AFT) analysis and time-temperature thermal history modeling results, this work quantitatively constrains the exhumation rate and thickness of the western Hunan-Hubei fold belt. The AFT ages here range from 71 to 100 Ma. Integrating with the AFT ages from fold belt in the East Sichuan basin, all the data present a younger trend from southeast to northwest. The time-temperature thermal history since Mesozoic shows a “three-stages” feature with the turning period occurred at 115–90 Ma and 35–20 Ma. The three stages correspond well with the geological evidence and respectively indicate different deformations. The deformations are respectively orogeny during Late Jurassic-Early Cretaceous, basin formation in Late Cretaceous and tectonic uplift since Cenozoic. Yanshannian event is the main cause of the deformation. The deformation occurred earlier in the southeast and later in the northwest and the exhumation also presented a pattern being stronger in the southeast and weaker in the northwest. All the recognition during this work provides strong evidences for the deformation and evolution process of the western Hunan-Hubei to East Sichuan fold belt.

**基金项目:**国家科技重大专项(No.2011ZX05005-003-007HZ); 湖北省自然科学基金(No.2016CFA055); 武汉市青年科技晨光计划项目(No.2016070204010145).

**作者简介:**邹耀遥(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事构造年代学与含油气盆地构造分析研究. ORCID: 0000-0002-0280-8172.

E-mail: yaoyaozou@cug.edu.cn

\* **通讯作者:**张树林, 教授, E-mail: 1364284766@qq.com

**引用格式:**邹耀遥, 张树林, 沈传波, 等, 2018. 湘鄂西褶皱带中—新生代剥蚀特征及其构造指示: 来自磷灰石裂变径迹的证据. 地球科学, 43(6): 2007–2018.

**Key words:** western Hunan-Hubei fold belt; Mesozoic-Cenozoic; apatite fission track; thermal history modeling; exhumation characteristics; petroleum geology.

### 0 引言

湘鄂西褶皱带位于中扬子地块的中部,是中上扬子巨型陆内褶皱变形带的一部分,因其典型的隔槽式褶皱而受到地质学界的广泛关注(Yan *et al.*, 2003,2009;丁道桂等,2007;颜丹平等,2008;胡召齐

等,2009;金宠等,2009;梅廉夫等,2010;袁玉松等,2010;胡召齐,2011).自燕山期以来,整个中上扬子地区经历了复杂的构造演化过程,导致了中上扬子巨型陆内褶皱变形带的形成,同时也导致了中扬子地区强烈的剥蚀,对油气的成藏及保存也产生了重要的影响.开展湘鄂西地区的剥蚀特征研究并探讨

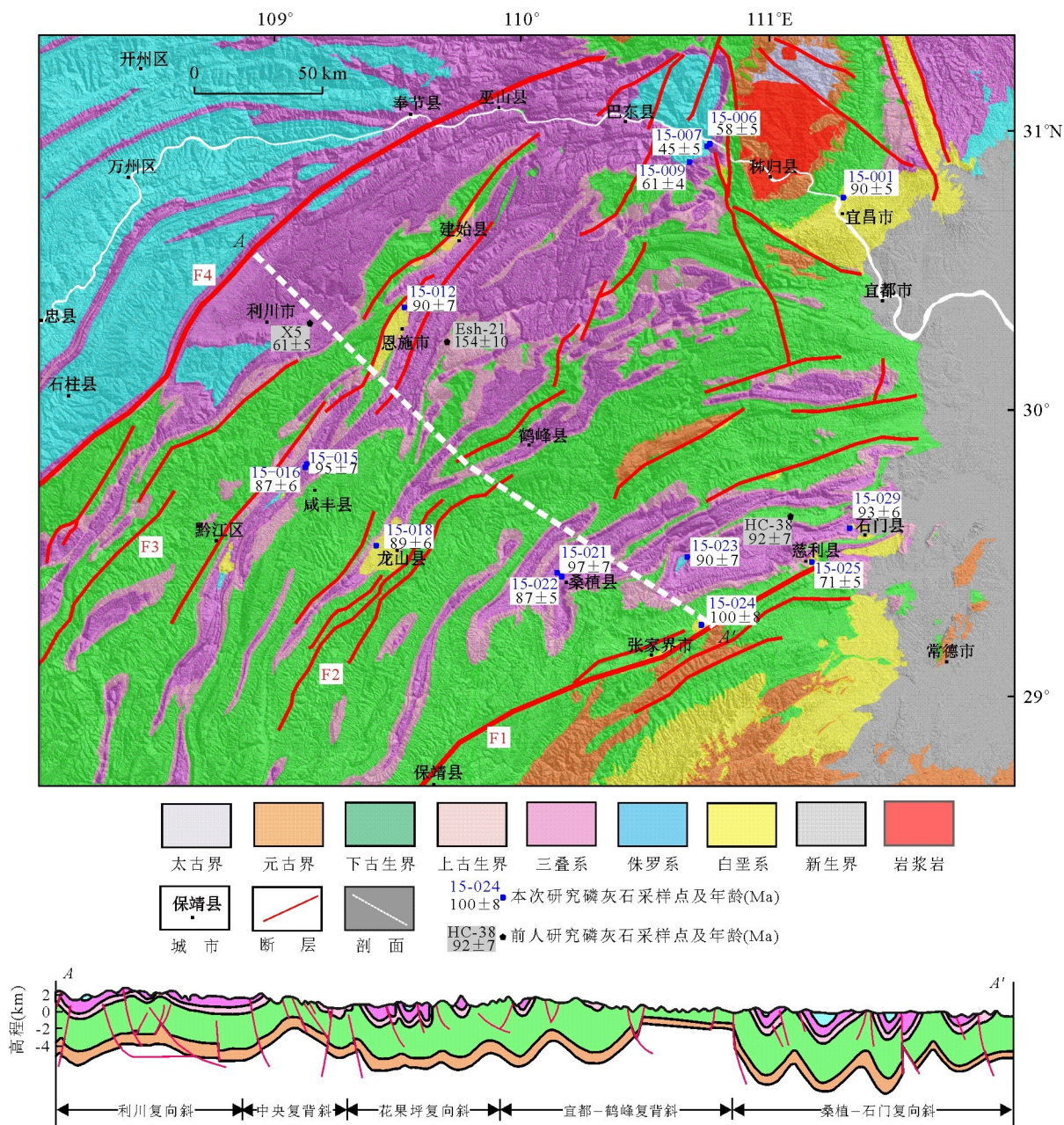


图 1 湘鄂西地区构造简图及采样位置

Fig.1 The western Hunan-Hubei tectonic diagram and sampling location

F1. 慈利-保靖断裂带; F2. 鹤峰-龙山断裂带; F3. 建始-彭水断裂带; F4. 齐岳山断裂带

其构造指示意义,对深入认识湘鄂西隔槽式褶皱带乃至中上扬子陆内褶皱变形带的形成演化及大陆动力学机制有着重要的价值,同时对该区油气,特别是页岩气保存条件的研究也有一定指导意义。

近年来,裂变径迹方法已经广泛应用于造山带隆升剥蚀的研究中,前人在湘鄂西周缘的川东地区(沈传波等,2007;Shen *et al.*,2009;Li and Shan,2011;石红才等,2011;王平等,2012)和江南雪峰造山带(王韶华等,2009;Shen *et al.*,2012)已经开展了大量的低温热年代学研究.这些研究表明,中生代以来,江南雪峰—湘鄂西—川东地区主要经历了燕山期和喜山期两期构造抬升作用,并且燕山期的变形期次具有从 SE 至 NW 向递进变新的趋势.但在湘鄂西地区仅有少量的低温热年代学数据发表(苏勇,2007;李双建等,2008;梅廉夫等,2010),学者们仍需开展进一步的研究工作来建立精确的构造变形时空框架。

本文以地表露头样品为主,开展新的磷灰石裂变径迹分析,并结合前人的低温热年代学数据和地质剖面特征,探讨了该地区中新生代以来的剥蚀过程,为湘鄂西陆内隔槽式褶皱带形成演化特征及该区页岩气保存条件的研究提供新的年代学证据。

## 1 地质背景

湘鄂西褶皱带是指齐岳山断裂带与慈利—保靖断裂带(又称为张家界—花垣断裂带)之间的隔槽式褶皱带.该隔槽式褶皱带整体呈弧形,在南部呈

NNE-NE 向展布,在北部与南大巴山褶皱带合并,逐渐转变为 NEE 至近 EW 走向.其间的次级构造单元由 SE 到 NW 依次为桑植—石门复向斜、宜都—鹤峰复背斜、花果坪复向斜、中央复背斜和利川复向斜(图 1).其中背斜多以宽缓的箱状褶皱为主,由于受到强烈的剥蚀作用,核部大量出露下古生界地层,褶皱带东部宜都—鹤峰复背斜处可见出露的上元古界震旦系地层;向斜多为狭长状,核部主要出露上古生界及三叠系地层,向斜部位的残留小型盆地可见少量侏罗系、白垩系及新生界地层.该褶皱带是我国典型的“侏罗山式”隔槽式褶皱带(胡召齐等,2009)。

中扬子地区在印支运动前为古特提斯洋的一部分,沉积了巨厚的海相碳酸盐岩地层.中新生代以来,约 250~200 Ma,印支运动导致扬子板块与华北板块拼合,古特提斯多岛洋关闭,整个中扬子地区进入陆相沉积阶段(李三忠等,2011;石红才和施小斌,2014).中晚侏罗世以来,在扬子北缘的褶皱逆冲带 SW 向推进和江南雪峰逆冲推覆带 NW 向推覆的共同作用下,湘鄂西地区发生褶皱变形抬升并遭受了强烈的剥蚀作用,形成了 NNE-NE 向、向 NW 凸出的弧形构造带.晚白垩世中扬子地区构造反转,江汉盆地以及湘鄂西地区的逆冲断层发生 SE-NW 向伸展,形成一系列断陷盆地.新近纪以来,受喜山运动影响,整个中扬子地区再次抬升,形成了现今的构造格局(刘恩山等,2010;梅廉夫等,2010;袁玉松等,2010;石红才和施小斌,2014)。

近年来,学者们通过对湘鄂西褶皱带的基底卷入程度、地层接触关系(表 1)以及年代学等方面的

表 1 湘鄂西地区已发表的地层接触关系

Table 1 Published strata contact relationship in western Hunan-Hubei

不整合面位置	所处构造单元	不整合面	不整合面性质	下伏地层及产状	上覆地层及产状	指示事件	资料来源
石门新关南	桑植石门复向斜	J <sub>1</sub> xn/T <sub>2</sub> b	微角度不整合	T <sub>2</sub> b:164°∠69°	J <sub>1</sub> xn:170°∠82°	印支运动	胡召齐(2011)
张家界北赵家岗	桑植石门复向斜	J <sub>2</sub> gz/T <sub>2</sub> b	微角度不整合	T <sub>2</sub> b:177°∠10°	J <sub>2</sub> gz:125°∠5°	印支运动	胡召齐(2011)
恩施七里坪	中央复背斜	T <sub>3</sub> s/T <sub>2</sub> b	微角度不整合	T <sub>2</sub> b:80°∠18°	T <sub>3</sub> s:112°∠21°	印支运动	胡召齐等(2009)
咸丰尖山	花果坪复向斜	T <sub>3</sub> s/T <sub>2</sub> b	微角度不整合	T <sub>2</sub> b:295°∠39°	T <sub>3</sub> s:274°∠36°	印支运动	胡召齐等(2009)
石门雷山洞	桑植石门复向斜	J <sub>1</sub> /T <sub>1</sub> j	微角度不整合	T <sub>1</sub> j:145°∠63°	J <sub>1</sub> :148°∠53°	印支运动	梅廉夫等(2010)
石门新关	桑植石门复向斜	K <sub>2</sub> /J <sub>2</sub>	高角度不整合	J <sub>2</sub> :153°∠61°	K <sub>2</sub> :132°∠31°	燕山运动	梅廉夫等(2010)
龙山北	宜都鹤峰复背斜	K <sub>2</sub> /P	高角度不整合	P:154°∠45°	K <sub>2</sub> :137°∠15°	燕山运动	梅廉夫等(2010)
恩施西	中央复背斜	K <sub>2</sub> /S <sub>1</sub>	高角度不整合	S <sub>1</sub> :290°∠27°	K <sub>2</sub> :300°∠10°	燕山运动	梅廉夫等(2010)
利川忠路溪	利川复向斜	K <sub>2</sub> /T <sub>3</sub> s	高角度不整合	T <sub>3</sub> s:291°∠44°	K <sub>2</sub> :120°∠6°	燕山运动	梅廉夫等(2010)
建始南郊	中央复背斜	K <sub>2</sub> z/S <sub>1</sub> ln	高角度不整合	S <sub>1</sub> ln:140°∠33°	K <sub>2</sub> z:290°∠10°	燕山运动	胡召齐等(2009)
恩施芭蕉	中央复背斜	K <sub>2</sub> z/P <sub>1</sub> q	高角度不整合	P <sub>1</sub> q:326°∠44°	K <sub>2</sub> z:336°∠14°	燕山运动	胡召齐等(2009)
黔江东舟白	中央复背斜	K <sub>2</sub> z/T <sub>1</sub> j	高角度不整合	T <sub>1</sub> j:130°∠67°	K <sub>2</sub> z:252°∠18°	燕山运动	胡召齐等(2009)

注:S<sub>1</sub>ln 为下志留统龙马溪组,P<sub>1</sub>q 为下二叠统栖霞组,T<sub>1</sub>j 为下三叠统嘉陵江组,T<sub>2</sub>b 为巴东组,T<sub>3</sub>s 为上三叠统香溪组,J<sub>1</sub> 为下侏罗统,J<sub>1</sub>xn 为下侏罗统香溪群,J<sub>2</sub> 为中侏罗统,J<sub>2</sub>gz 为中侏罗统归州群,K<sub>2</sub> 为上白垩统,K<sub>2</sub>z 为上白垩统正阳组。

研究,多认为印支期湘鄂西地区并未发生大规模的褶皱作用,而燕山期则是该区构造成型的主要阶段,并将湘鄂西褶皱带的主体变形时间限定为中、上侏罗统沉积之后,上白垩统沉积之前,即晚侏罗世至早白垩世(Yan *et al.*, 2003, 2009; 颜丹平等, 2008; 胡召齐等, 2009; 梅廉夫等, 2010; 袁玉松等, 2010; 胡召齐, 2011; Zhang *et al.*, 2017). 石红才和施小斌(2014)通过对磷灰石裂变径迹热史模拟的统计,将湘鄂西快速隆起的时间限定在 165~145 Ma. 而研究区一系列晚白垩世—新生代的断陷盆地和负反转正断层,指示了在晚燕山时期,湘鄂西地区由挤压环境反转为伸展环境(梅廉夫等, 2010). 喜山期,湘鄂西地区与整个中上扬子地区再次快速抬升. 燕山期以来的一系列构造运动,造就了研究区典型的隔槽式褶皱带,同时也导致了该区受到了强烈的剥蚀.

## 2 样品采集与测试

本次研究的样品采集于中扬子地区中三叠统至白垩系的新鲜露头的砂岩、砾岩中. 15-001 至 15-009 样品取至中扬子北缘宜昌—秭归一带, 15-012 至 15-029 样品取自湘鄂西隔槽式褶皱带石门—慈利—桑植—龙山—咸丰一线的向斜和山间盆地中(图 1). 对其中的 14 个样品进行了磷灰石裂变径迹

(apatite fission track, AFT)分析测试,样品测试在中科院北京高能物理研究所完成. 样品的裂变径迹测试采用外探测器法,使用的标准铀玻璃为 CN5; 年龄计算采用 Zeta 常数法,本次测试 Zeta 常数为  $410 \pm 17.6$ ; 具体的实验程序与方法见 Feng *et al.* (2017), 样品的信息及测试结果见表 2, 单颗粒年龄镭射图见图 2.

本次测试获得的所有样品的池年龄和中值年龄均小于或等于样品所在的地层年龄,表明样品均受到了构造热事件的影响,经历了退火作用. 其中 15-001、15-006、15-007、15-009、15-015、15-018、15-022、15-025 这 8 个样品的  $P(\chi^2)$  检验值大于 5%, 说明其经历了完全退火, 因此其年龄选用池年龄; 其余样品的  $P(\chi^2)$  检验值小于 5%, 说明其只经历了部分退火, 所经历的最大古地温应位于部分退火带(约 60~120 °C)内, 其年龄采用中值年龄(李天义等, 2012; 田云涛等, 2017).

宜昌—秭归一线的样品 AFT 年龄为 45~90 Ma, 其中取自秭归盆地东部的样品年龄集中介于 45~61 Ma; 湘鄂西褶皱带中的样品 AFT 年龄介于 71~100 Ma. 年龄的差异表明湘鄂西隔槽式褶皱带与其北缘的秭归盆地经历了不同的构造热事件. 在湘鄂西褶皱带的样品中,除了 15-025 样品的 AFT 年龄偏小(约 71 Ma), 其余样品的年龄均集中

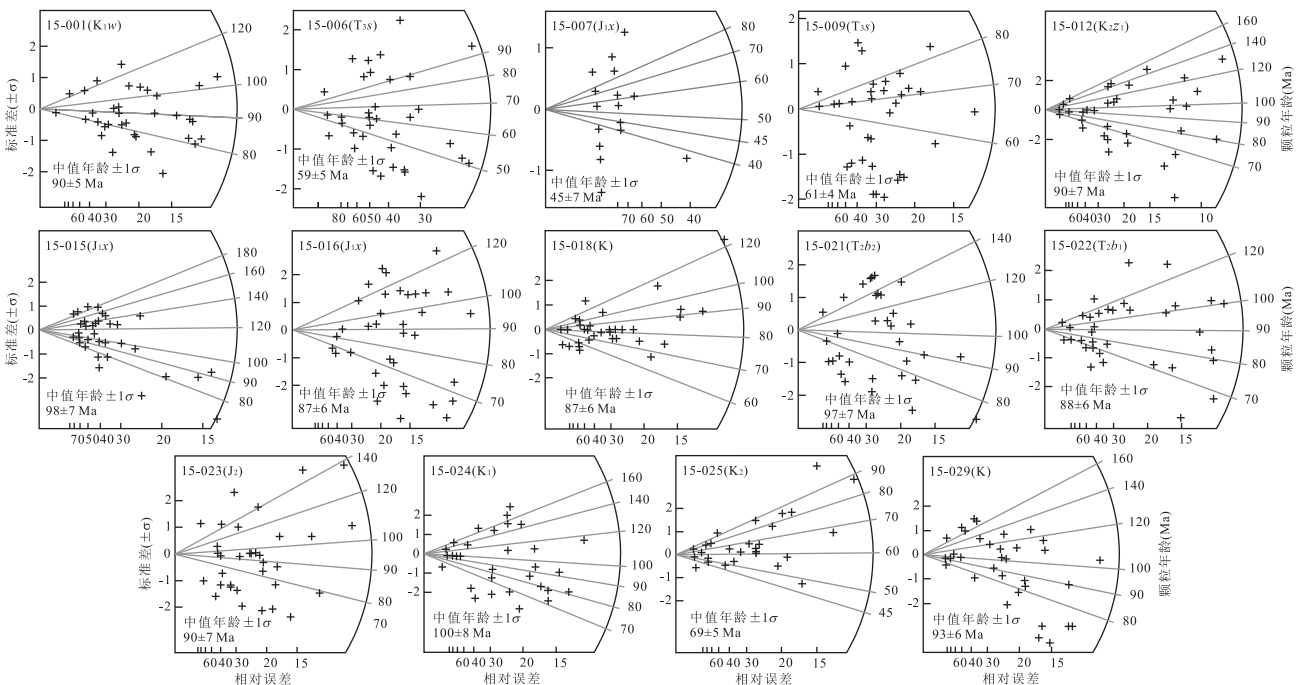


图 2 湘鄂西磷灰石样品单颗粒年龄镭射图

Fig.2 Single grain age radial plots for apatite samples in western Hunan-Hubei

表 2 磷灰石样品采集信息及裂变径迹 (AFT) 测试结果  
Table 2 Apatite sample collection information and apatite fission track (AFT) analysis results

样品号	采样层位	采样位置		采样岩性	自发径迹			诱发径迹			$P(\chi^2)$ (%)	中值年龄 $t \pm 1\sigma$ (Ma)	池年龄 $t \pm 1\sigma$ (Ma)	围限径迹		$D_{par}$ ( $\mu m$ )	
		经度 $E(^{\circ})$	纬度 $N(^{\circ})$		颗粒数	$\rho_s(10^5/cm^2)$	$N_s$	$\rho_i(10^5/cm^2)$	$N_i$	$\rho_d(10^5/cm^2)$				$N_d$	条数		平均长度 $\pm 1\sigma(\mu m)$
宜昌斜坡—秭归盆地																	
15-001	K <sub>1w</sub>	111.296 8	30.759 1	中细砂岩	35	5.616	1 532	10.023	2 734	7.888	7 124	67.3	90±5	90±5	100	13.4±1.7	1.81
15-006	T <sub>3s</sub>	110.760 1	30.957 1	粉砂岩	37	6.746	309	26.982	1 236	11.447	7 124	26.3	58±5	58±5	18	12.1±1.8	1.54
15-007	J <sub>1x</sub>	110.759 6	30.956 5	石英砂岩	35	0.203	49	1.001	241	10.819	7 124	96	45±7	45±7	12	12.0±2.8	/
15-009	T <sub>3s</sub>	110.677 5	30.896 1	粉砂岩	35	3.187	619	11.11	2 158	10.4	7 124	48	61±4	61±4	53	12.9±2.3	2.29
湘鄂西褶皱带																	
15-012	K <sub>2z1</sub>	109.504 7	30.388 4	石英砂岩	35	6.733	1 816	15.296	4 126	9.981	7 124	0	90±7	89±5	105	12.5±1.7	1.89
15-015	J <sub>1x</sub>	109.072 6	29.757 2	粉砂岩	35	4.385	550	9.001	1 129	9.563	7 124	66.4	98±7	95±7	52	13.1±2.2	1.97
15-016	J <sub>1x</sub>	109.072 2	29.756 0	石英砂岩	35	6.729	2 061	14.375	4 403	8.935	7 124	0	87±6	85±4	104	11.7±2.3	1.77
15-018	K	109.401 8	29.529 9	钙质砂岩	34	4.932	847	9.183	1 577	8.098	7 124	89.6	87±6	89±6	101	11.7±2.0	1.76
15-021	T <sub>2b2</sub>	110.121 3	29.415 7	泥质粉砂岩	35	7.98	1 026	13.719	1 764	7.888	7 124	0.7	97±7	93±6	103	12.3±1.8	1.77
15-022	T <sub>2b1</sub>	110.161 0	29.409 6	泥质粉砂岩	35	7.206	1 083	19.355	2 909	11.447	7 124	13.8	88±6	87±5	112	12.5±1.8	1.69
15-023	J <sub>2</sub>	110.688 8	29.493 9	石英砂岩	35	9.107	1 196	21.214	2 786	10.61	7 124	0	90±7	93±5	104	11.6±1.9	1.43
15-024	K <sub>1</sub>	110.716 7	29.269 3	泥质粉砂岩	35	4.502	1 078	8.866	2 123	9.772	7 124	0	100±8	101±6	106	12.6±1.9	1.95
15-025	K <sub>2</sub>	111.202 7	29.461 0	砾岩	33	2.642	684	6.025	1 560	7.888	7 124	53.6	69±5	71±5	88	11.8±1.7	1.51
15-029	K	111.336 4	29.614 8	砂岩	35	5.454	1 172	11.392	2 448	9.144	7 124	1.2	93±6	89±5	102	12.8±1.7	2.07

注:  $\rho_s$  表示自发径迹密度,  $N_s$  表示自发径迹数,  $\rho_i$  表示诱发径迹密度,  $N_i$  表示诱发径迹数,  $\rho_d$  表示轴标准玻璃的诱发径迹密度,  $N_d$  表示轴标准玻璃的诱发径迹数,  $D_{par}$  为每个样品所统计的  $D_{par}$  值的平均值; K<sub>1w</sub> 为下白垩统五龙组, J<sub>1x</sub> 为下侏罗统香溪组。

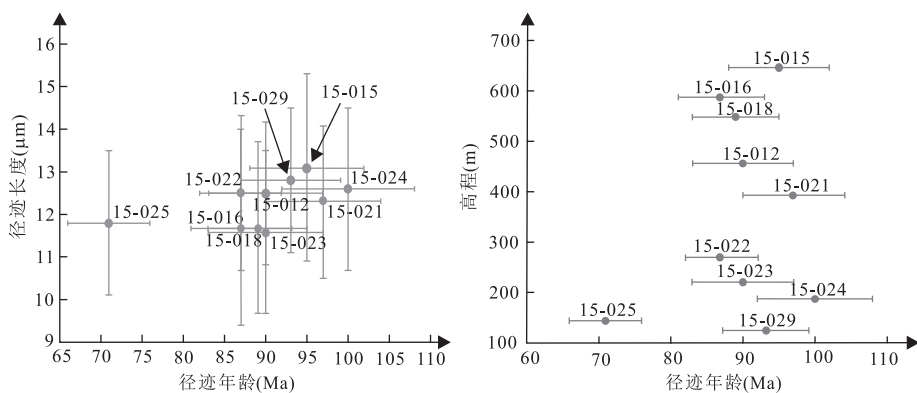


图 3 湘鄂西磷灰石裂变径迹年龄—长度与年龄—高程图

Fig.3 AFT age-length and age-elevation diagrams in western Hunan-Hubei

介于 87~100 Ma(图 3),表明这些样品通过部分退火带的时间较为一致,很可能是同一期构造热事件作用的结果;在年龄—高程图(图 3)中,样品的年龄与高程之间并未呈现出明显的相关性,这可能是由于各样品之间采样间距过大导致的.15-025 样品偏低的年龄值可能有两个原因:(1)样品所处地层为上白垩统,沉积的时间相对较晚;(2)样品位置靠近慈利—保靖断裂带,断层活动导致的异常高温对径迹年龄产生了影响.

### 3 热演化历史模拟

本次研究选取了文中部分样品进行热史模拟.采用的软件为 HeFTy v1.8.2,基于 Ketcham *et al.* (2007)退火模型,运用 Monte Carlo 逼近法进行模拟.根据磷灰石样品的采集层位、地质背景以及裂变径迹的参数确定反演的限定条件.模拟时间段为 150 Ma 至今,起始时间对应湘鄂西褶皱带变形的初始时间为晚侏罗世—早白垩世.模拟温度段为略高于磷灰石退火带底部温度的 140 °C 至现今地表温度

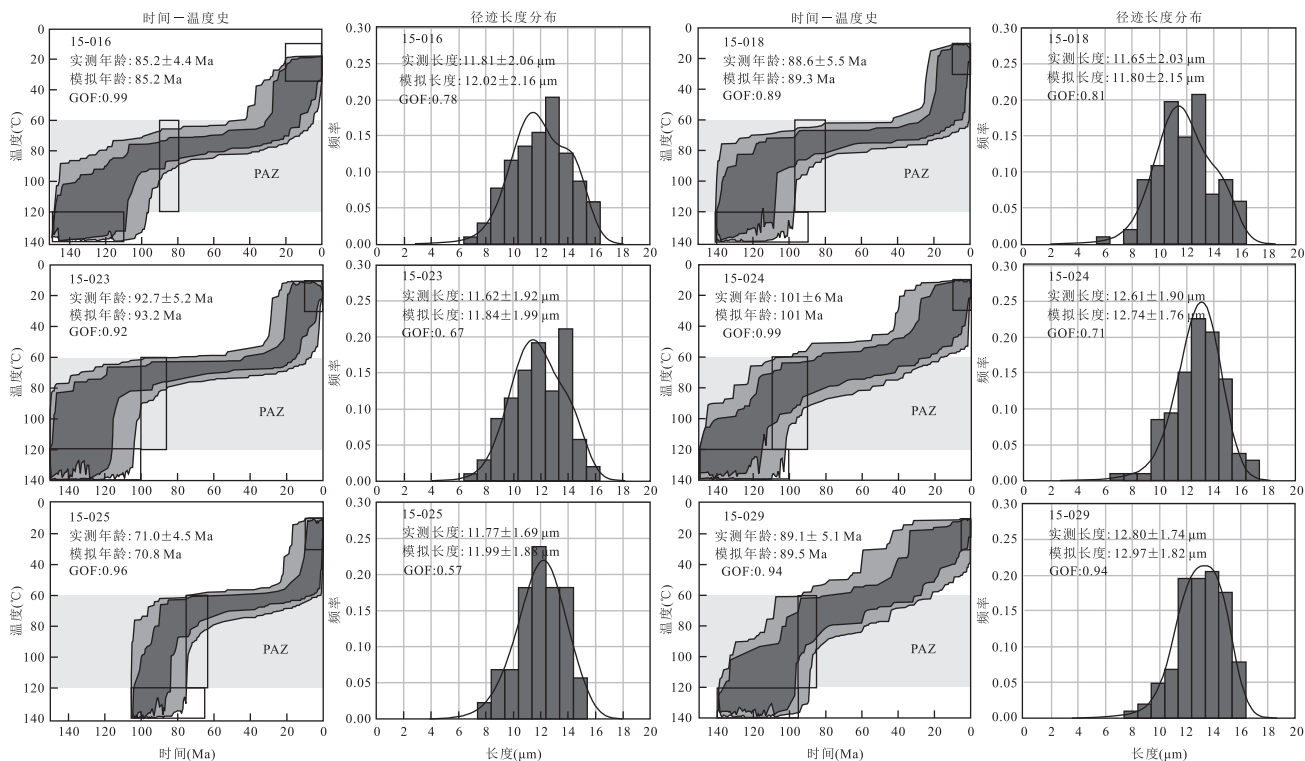


图 4 磷灰石裂变径迹长度分布与时间—温度史模拟结果

Fig.4 Apatite fission track length distribution and time-temperature history simulation results

20 °C. 模拟获得了高质量的 AFT 热史曲线(图 4). 图 4 中浅灰色部分为磷灰石裂变径迹的部分退火带(partial annealing zone, PAZ), 中灰色代表反演模拟可接受的路径区域, 深灰色代表高质量的拟合路线区域. 图 4 中标出了实测和模拟的年龄和长度以及 GOF 值. 当年龄和径迹长度的 GOF 值均大于 0.5 时可认为模拟效果较好. 本次模拟中的径迹年龄 GOF 检验值介于 0.89~0.99, 径迹长度 GOF 检验值介于 0.67~0.94.

选取的 6 个样品的模拟结果均表现出典型的“三段式”热演化模式. 晚侏罗世—晚白垩世早期表现为快速的冷却, 晚白垩世—古近纪末期表现为缓慢冷却, 古近纪末期至今表现为快速冷却. 两期快速冷却分别对应燕山运动晚期和喜山运动后期. 所模拟样品的第一阶段与第二阶段的转折点年龄, 即燕山期快速冷却的截止时间分布在 115~90 Ma, 且呈现出由 SE 到 NW 变年轻的趋势; 第二阶段与第三阶段转折点年龄, 即喜山期冷却的起始年龄则集中在 35~20 Ma. 所模拟样品的热史特征基本一致, 且两期转折时间均较为集中, 说明其白垩纪以来所经历的构造热事件是基本一致的.

## 4 剥露特征

岩体的剥露作用指埋藏在地下的岩石在构造活动与地表侵蚀等内外地质营力的作用下相对于地表运移, 并逐渐出露于地表的过程. 目前约束岩体剥露速率的低温热年代学方法主要有热史模拟法、年龄—封闭温度法、矿物对法及年龄—高程法(常远和周祖翼, 2010). 本文主要采用热史模拟法, 运用热年龄数据以及热史模拟约束和计算剥露的程度和速率. 古地温梯度则是连接热历史与剥露历史的重要桥梁, 通过冷却速率和这一时期的古地温梯度可以进行剥露厚

度与速率的计算, 计算公式为剥蚀速率=冷却速率/古地温梯度. 中扬子印支期以来的地温梯度为 22~27 °C/km(郑冰, 2008), 且湘鄂西地区可能并未受到喜山期江汉盆地高地温场的影响, 因此, 本文将湘鄂西地区印支期以来的地温梯度设定为 25 °C/km, 地表温度设定为 20 °C(刘安等, 2015). 由于 15-025 样品可能受到断层活动导致的热事件的影响, 在此不将其数据进行剥露计算. 基于热史模拟结果得到了 3 个阶段的剥蚀厚度及速率(表 3).

由于热史模拟在温度高于部分退火带的范围里(>120 °C)缺乏热年代学数据或最高古地温的限定, 因此计算所得的燕山期快速隆升剥蚀阶段的持续时间、剥蚀厚度与速率的可信度较为有限, 但其趋势仍可作为参考. 计算表明, 本文样品所处岩体在这一时期的剥蚀速率介于 60~120 m/Ma, 剥蚀厚度不低于 2 200 m.

燕山晚期—喜山早期, 样品所处岩体剥蚀速率急剧下降, 剥蚀速率介于 6.66~13.86 m/Ma, 剥蚀厚度介于 560~1 040 m. 位于研究区东部的桑植—石门复向斜的 15-024、15-029 样品剥蚀速率范围(13.86~10.18 m/Ma)相对于研究区中西部(6.66~8.6 m/Ma)的样品剥蚀速率更大.

喜山晚期, 样品所处岩体的剥露再次加速. 这一时期的剥蚀速率介于 45.33~90.00 m/Ma, 剥蚀厚度介于 1 360~2 000 m. 这一时期, 研究区东部的剥蚀速率偏低(43.43~45.33 m/Ma), 剥蚀厚度较小(1 360~1 520 m), 剥蚀强度相对较低; 中西部的剥蚀速率较高(66.67~90 m/Ma), 剥蚀厚度较大(1 600~2 000 m), 剥蚀强度相对较大.

## 5 讨论

### 5.1 湘鄂西褶皱带的形成与改造

磷灰石裂变径迹的热史模拟所显示出的“三段

表 3 基于热史模拟的剥蚀厚度及速率分析

Table 3 Analysis of denudation thickness and velocity based on thermal history model

样品号	采样层位	燕山期快速隆升剥蚀			晚燕山—早喜山缓慢隆升剥蚀			喜山晚期快速隆升剥蚀		
		持续时间 (Ma)	剥蚀厚度 (m)	剥蚀速率 (m/Ma)	持续时间 (Ma)	剥蚀厚度 (m)	剥蚀速率 (m/Ma)	持续时间 (Ma)	剥蚀厚度 (m)	剥蚀速率 (m/Ma)
15-016	J <sub>1x</sub>	135~102	2 200	66.67	102~30	600	8.33	30~0	2 000	66.67
15-018	K	130~110	2 400	120.00	110~20	600	6.66	20~0	1 800	90.00
15-023	J <sub>2</sub>	140~115	2 400	96.00	115~22	800	8.60	22~0	1 600	72.72
15-024	K <sub>1</sub>	140~105	2 400	68.57	105~30	1 040	13.86	30~0	1 360	45.33
15-029	K	120~90	2 720	90.60	90~35	560	10.18	35~0	1 520	43.43

式”热史路径,表明了自晚侏罗—早白垩世以来,经历了 3 期构造热演化阶段.这与中扬子板块以及中国南方的构造体制转换有关.印支—早燕山时期,中国东部开始卷入滨太平洋构造域体系,在古太平洋板块俯冲的影响下,雪峰造山带快速隆升并在晚侏罗—早白垩世向西推覆形成湘鄂西褶皱带(刘恩山等,2010).早白垩世,华南大陆的构造应力体制发生了深刻的转换,由挤压构造体制向伸展构造体制转变(张岳桥等,2012),这一应力体制的转变随后也波及到了湘鄂西褶皱带,115~90 Ma 是这一重要转变发生的时期.这一时期剥蚀速率急剧降低,并形成了一系列晚白垩世的山间盆地.喜山晚期,印度板块与欧亚板块碰撞,青藏高原快速隆升并在周缘产生了显著的响应,中上扬子地区快速隆升剥蚀(石红才和施小斌,2014),35~20 Ma 的转折期是这一事件的记录.这一时期气候环境发生了巨大的变化,亚洲季风气候的出现进一步加剧了喜山晚期的剥蚀程度(Sun and Wang, 2005).115~90 Ma 和 35~20 Ma 这两个重要的构造转折期,分别对应了从晚侏罗世—早白垩世挤压逆冲造山到晚白垩世伸展成盆再到新生代整体抬升的构造转换.

## 5.2 湘鄂西陆内造山与递进变形

尽管前人对于湘鄂西褶皱带形成的动力学尚有争论,但近年来随着大陆动力学理论研究的不断深入,众多学者认为湘鄂西—川东褶皱带的形成与西侧的雪峰造山带有着密切的联系,亦有学者将其归于雪峰陆内复合构造系统的一部分(Yan *et al.*, 2003, 2009; 丁道桂等, 2007; 颜丹平等, 2008; 金宪等, 2009; 刘恩山等, 2010; 梅廉夫等, 2010, 2012).为了更深入地研究这一地区的陆内变形特征与机制,建立精细的区域构造时空框架是非常有必要的,然而现阶段湘鄂西地区仍缺乏大量有效的年代学数据.本文的磷灰石裂变径迹数据及热史模拟则为雪峰—湘鄂西—川东的区域构造时空框架的建立提供了新的数据.

从磷灰石裂变径迹的年龄来看,本次在湘鄂西褶皱带获得的磷灰石样品的年龄为 87~100 Ma(不考虑 15-025 样品),与川东已发表的磷灰石样品的峰值年龄 70~80 Ma(余武等, 2017)相比,呈现出较好的由 SE 到 NW 向逐渐年轻趋势.从 AFT 反演所得的热史路径来看,湘鄂西褶皱带燕山期晚期快速冷却抬升的时间约介于 140~90 Ma(李双建等, 2008; 梅廉夫等, 2010 以及本文数据),而前人的低温热年代学研究表明,川东隔档式褶皱带燕山晚期的变形时间介于

135~65 Ma(沈传波等, 2007; Shen *et al.*, 2009; 石红才等, 2011; 王平等, 2012).因此在燕山晚期的抬升时间上,由湘鄂西到川东呈现出自 SE 向 NW 的递进变晚的趋势.喜山期的快速冷却抬升时间为 35 Ma 至今,这一期抬升的时间在整个中上扬子地区都较为统一,反映了喜山期的快速抬升应为整体抬升.结合该地区的地震剖面解释(汤济广等, 2012)以及平衡剖面分析(梅廉夫等, 2010),湘鄂西—川东燕山期的构造演化具有如下期次:140 Ma 左右湘鄂西地区逆冲推覆褶皱变形,隔槽式褶皱带开始形成;130 Ma 左右挤压应力到达川东地区,开始形成隔档式褶皱带;90 Ma 左右,湘鄂西地区发生反转拉张,形成一系列山间盆地;65 Ma 左右,川东地区抬升停止,湘鄂西—川东地区进入构造稳定阶段;35 Ma 左右,湘鄂西—川东地区整体抬升直至现今.

从剥蚀程度来看,湘鄂西地区的出露地层多以下古生界为主,其次是上古生界与三叠系,剥蚀程度明显高于川东的侏罗系.依据李双建等(2008)、梅廉夫等(2010)以及本文热史模拟数据得出燕山—喜山期湘鄂西向斜部位的剥蚀量应在 6 400~4 800 m,背斜部位的剥蚀程度应该更高.袁玉松等(2014)运用钻井计算晚燕山—喜山期剥蚀量得出利川复向斜剥蚀量介于 2 000~4 000 m,石柱复向斜剥蚀量介于 1 500~2 500 m.燕山—喜山期湘鄂西—川东各向斜的剥蚀程度呈现出南东强北西弱的趋势.因此,相应的变形强度亦为由 SE 向 NW 递减.这正是挤压应力在传递过程中能量衰减的有力证据.

## 5.3 油气勘探意义

中国南方在震旦—加里东和海西—早印支两大成盆旋回中沉积了巨厚的海相地层,成烃物质基础雄厚.但燕山期以来经历了多期构造事件,大规模的抬升剥蚀导致了常规油气藏难以保存.富有机质页岩由于发育多样的微型孔—裂隙系统,具有较强的吸附特性,在一定程度上能够抵抗构造运动的影响(聂海宽等, 2012),因此湘鄂西地区依然具有较好的页岩气勘探潜力.湘鄂西地区最具潜力的两套烃源岩为震旦系—下寒武统、上奥陶统一志留统烃源岩.焦石坝上奥陶统一志留统页岩气与宜昌震旦系—寒武系页岩气勘探的突破,均证实了这两套烃源岩的页岩气勘探潜力,同时也突出了保存条件的重要性(郭旭升, 2014; 解习农等, 2017; 翟刚毅等, 2017).一方面强烈的构造作用造成大规模的剥蚀会导致纵向封堵条件变差,含气页岩层压力降低,从而导致页岩气富集程度降低;另一方面构造作用会产



生张性断裂、开启断裂,同时剥蚀作用导致页岩气层与盖层脆性破裂,这些都会造成页岩气的散失(郭旭升,2014;李海等,2014),同时地下水的自由交替也会对页岩气的保存产生不利影响(刘安等,2015;徐政语等,2015)。

湘鄂西地区复背斜部位剥蚀严重,且张性断裂、通天断裂发育,不利于页岩气的保存;而复向斜区域地层抬升和剥蚀程度较低,地表出露地层多为三叠系,局部出露侏罗系,断裂较少,长期的沉降埋深也有利于微裂缝发育形成良好储层(李海等,2014)。因此,勘探的重点应放在复向斜的核部。湘鄂西—川东褶皱带由 SE 至 NW 向剥蚀强度递进减弱,保存条件递进变好,因此东部强变形剥蚀区域的勘探应以震旦系—下寒武统烃源岩为主,西部弱变形区域则应综合考虑震旦系—下寒武统和上奥陶统一志留统烃源岩的实际情况。综上所述,桑植—石门复向斜核部为勘探震旦系—下寒武统页岩气的有利区域,西北部的花果坪复向斜北部以及利川复向斜为勘探上奥陶统一志留统以及震旦系—下寒武统页岩气的有利区域。

## 6 结论

(1)通过磷灰石裂变径迹反演得到的热演化历史恢复了湘鄂西地区的构造演化历程。自燕山期晚侏罗世—早白垩世隔槽式褶皱带形成以来,湘鄂西地区的热史显现出“三段式”的特征,分别指示了燕山期快速隆升剥蚀、晚燕山—早喜山期缓慢隆升剥蚀、喜山晚期快速隆升剥蚀。这3个阶段的转折时期为115~90 Ma和35~20 Ma,分别对应了从晚侏罗世—早白垩世挤压逆冲造山到晚白垩世伸展成盆再到新生代整体抬升的构造转换,是白垩纪华南大陆挤压—伸展背景构造体制转换和喜山期青藏高原快速隆升远程响应作用的结果。

(2)前人研究及本文磷灰石裂变径迹热史模拟结果表明,燕山期为湘鄂西褶皱带的主变形期;燕山晚期湘鄂西—川东的抬升时间呈现自 SE 至 NW 递进变晚的趋势(湘鄂西:140~90 Ma;川东:135~65 Ma),剥蚀强度呈现南东强北西弱的特点,从抬升时间以及变形剥蚀强度的角度支持了湘鄂西—川东燕山期递进变形的构造演化模式。

(3)研究区燕山期以来的两期快速抬升,导致了研究区内大规模、高速率的剥蚀,这对区内的常规油气保存产生了极大的破坏,但区内的烃源岩条件优

越,剥蚀程度较低、埋藏较深的复向斜地区是勘探下古生界以及震旦系页岩气的有利区域。

致谢:感谢匿名审稿专家和编辑部提出的宝贵修改意见和建议!感谢葛翔和余武在论文成文及修改过程中给予的建议与帮助!感谢夏齐祥在样品采集过程中提供的支持与帮助!

## References

- Chang, Y., Zhou, Z. Y., 2010. Basic Methods to Inverse Exhumation Rates Using Low-Temperature Thermochronological Data. *Science & Technology Review*, 28 (21): 86—94 (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).
- Feng, Y. L., Yuan, W. M., Tian, Y. T., et al., 2017. Preservation and Exhumation History of the Harizha-Halongxiuma Mining Area in the East Kunlun Range, Northeastern Tibetan Plateau, China. *Ore Geology Reviews*, 90: 1018—1031. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.12.029>
- Guo, X. S., 2014. Rules of Two-Factor Enrichment for Marine Shale Gas in Southern China—Understanding from the Longmaxi Formation Shale Gas in Sichuan Basin and Its Surrounding Area. *Acta Geologica Sinica*, 88 (7): 1209—1218 (in Chinese with English abstract).
- Hu, Z. Q., 2011. Studies of Tectonic Evolution and Thermochronology in the Northern Upper Yangtze Region (Dissertation). Hefei University of Technology, Hefei (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).
- Jin, C., Li, S. Z., Wang, Y. J., et al., 2009. Diachronous and Progressive Deformation during the Indosinian-Yanshanian Movements of the Xuefeng Mountain Intracontinental Composite Tectonic System. *Oil & Gas Geology*, 30 (5): 598—607 (in Chinese with English abstract).
- Ketcham, R. A., Carter, A., Donelick, R. A., et al., 2007. Improved Modeling of Fission-Track Annealing in Apatite. *American Mineralogist*, 92 (5—6): 799—810. <https://doi.org/10.2138/am.2007.2281>
- Li, H., Bai, Y. S., Wang, B. Z., et al., 2014. Preservation Conditions Research on Shale Gas in the Lower Paleozoic of Western Hunan and Hubei Area. *Petroleum Geology*

- and Recovery Efficiency*, 21 (6): 22—25 (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, S. Z., Zhang, G. W., Zhou, L. H., et al., 2011. The Opposite Meso-Cenozoic Intracontinental Deformations under the Super-Convergence: Rifting and Extension in the North China Craton and Shortening and Thrusting in the South China Craton. *Earth Science Frontiers*, 18(3): 79—107 (in Chinese with English abstract).
- Li, T. Y., He, S., He, Z. L., et al., 2012. Reconstruction of Tectonic Uplift and Thermal History since Mesozoic in the Dangyang Synclinorium of the Central Yangtze Area. *Acta Petrolei Sinica*, 33(2): 213—224 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. M., Shan, Y. H., 2011. Diverse Exhumation of the Mesozoic Tectonic Belt within the Yangtze Plate, China, Determined by Apatite Fission-Track Thermochronology. *Geosciences Journal*, 15(4): 349—357. <https://doi.org/10.1007/s12303-011-0037-5>
- Liu, A., Wei, K., Li, X. B., et al., 2015. Paleo-Fluid Characteristics and Preservation of Hydrocarbons in the Sangzhi-Shimen Synclinorium and Adjacent Areas. *Petroleum Geology & Experiment*, 37(6): 742—750 (in Chinese with English abstract).
- Liu, E. S., Li, S. Z., Jin, C., et al., 2010. Yanshanian Structural Deformation and Dynamics of the Xuefengshan Intracontinental Tectonic System. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 30(5): 63—74 (in Chinese with English abstract).
- Mei, L. F., Deng, D. F., Shen, C. B., et al., 2012. Tectonic Dynamics and Marine Hydrocarbon Accumulation of Jiangnan-Xuefeng Uplift. *Geological Science and Technology Information*, 31(5): 85—93 (in Chinese with English abstract).
- Mei, L. F., Liu, Z. Q., Tang, J. G., et al., 2010. Mesozoic Intracontinental 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>
- Nie, H. K., Bao, S. J., Gao, B., et al., 2012. A Study of Shale Gas Preservation Conditions for the Lower Paleozoic in Sichuan Basin and Its Periphery. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 280—294 (in Chinese with English abstract).
- Shen, C. B., Mei, L. F., Guo, T. L., 2007. Fission Track Analysis of Mesozoic-Cenozoic Thermal History in Northeast Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 27(7): 24—26 (in Chinese with English abstract).
- Shen, C. B., Mei, L. F., Min, K., et al., 2012. Multi-Chronometric Dating of the Huarong Granitoids from the Middle Yangtze Craton: Implications for the Tectonic Evolution of Eastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 52: 73—87. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.02.013>
- Shen, C. B., Mei, L. F., Xu, S. H., 2009. Fission Track Dating of Mesozoic Sandstones and Its Tectonic Significance in the Eastern Sichuan Basin, China. *Radiation Measurements*, 44(9—10): 945—949. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2009.10.001>
- Shi, H. C., Shi, X. B., 2014. Exhumation Process of Middle-Upper Yangtze since Cretaceous and Its Tectonic Significance: Low-Temperature Thermochronology Constraints. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(8): 2608—2619 (in Chinese with English abstract).
- Shi, H. C., Shi, X. B., Yang, X. Q., et al., 2011. Exhumation Process of the Fangdoushan-Shizhu Fold Belt in Mesozoic and Its Tectonic Significance in Western Hubei-Eastern Chongqing. *Progress in Geophysics*, 26(6): 1993—2002 (in Chinese with English abstract).
- 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 with English abstract).
- Sun, X. J., Wang, P. X., 2005. How Old is the Asian Monsoon System? — Palaeobotanical Records from China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 222(3—4): 181—222. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.03.005>
- Tang, J. G., Mei, L. F., Shen, C. B., et al., 2012. Response of Hydrocarbon Fluid Source to Tectonic Deformation in Multicycle Superimposed Basin: Example from Palaeozoic and Mesozoic Marine Strata in Yangtze Block. *Earth Science*, 37(3): 526—534 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2012.059>
- Tian, Y. T., Yuan, Y. S., Hu, S. B., et al., 2017. Application of Low-Temperature Thermochronology to Sedimentary Basins: Case Studies in the Northern Sichuan Basin. *Earth Science Frontiers*, 24(3): 105—115 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P., Liu, S. F., Gao, T. J., et al., 2012. Cretaceous Transportation of Eastern Sichuan Arcuate Fold Belt in Three Dimensions: Insights from AFT Analysis. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(5): 1662—1673 (in Chinese with English abstract).

English abstract).

Wang, S. H., Luo, K. P., Liu, G. X., 2009. Fission Track Records of Tectonic Uplift during the Cenozoic and Mesozoic in the Periphery of the Jiangnan Basin. *Oil & Gas Geology*, 30 (3): 255—259 (in Chinese with English abstract).

Xie, X. N., Hao, F., Lu, Y. C., et al., 2017. Differential Enrichment Mechanism and Key Technology of Shale Gas in Complex Areas of South China. *Earth Science*, 42 (7): 1045—1056 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.084>

Xu, Z. Y., Yao, G. S., Liang, X., et al., 2015. Shale Gas Preservation Condition in the Lower Paleozoic, Yangtze Block. *Petroleum Geology & Experiment*, 37 (4): 407—417 (in Chinese with English abstract).

Yan, D. P., Jin, Z. L., Zhang, W. C., et al., 2008. Rock Mechanical Characteristics of the Multi-Layer Detachment Fault System and Their Controls on the Structural Deformation Style of the Sichuan-Chongqing-Hunan-Hubei Thin-Skinned Belt, South China. *Geological Bulletin of China*, 27 (10): 1687—1697 (in Chinese with English abstract).

Yan, D. P., Zhang, B., Zhou, M. F., et al., 2009. Constraints on the Depth, Geometry and Kinematics of Blind Detachment Faults Provided by Fault-Propagation Folds: An Example from the Mesozoic Fold Belt of South China. *Journal of Structural Geology*, 31 (2): 150—162. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2008.11.005>

Yan, D. P., Zhou, M. F., Song, H. L., et al., 2003. Origin and Tectonic Significance of a Mesozoic Multi-Layer Over-Thrust System within the Yangtze Block (South China). *Tectonophysics*, 361 (3—4): 239—254. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(02\)00646-7](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(02)00646-7)

Yu, W., Shen, C. B., Yang, C. Q., 2017. Constraints of Fission Track Dating on the Mesozoic-Cenozoic Tectonic-Thermal Evolution of the Zigui Basin. *Earth Science Frontiers*, 24 (3): 116—126 (in Chinese with English abstract).

Yuan, Y. S., Lin, J. H., Cheng, X. Y., et al., 2014. Yanshan-Himalayan Denudation in Western Hubei Eastern Chongqing Area. *Chinese Journal of Geophysics*, 57 (9): 2878—2884. (in Chinese with English abstract).

Yuan, Y. S., Sun, D. S., Zhou, Y., et al., 2010. Determination of Onset of Uplifting for the Mid-Upper Yangtze Area after Indosinian Event. *Chinese Journal of Geophysics*, 53 (2): 362—369 (in Chinese with English abstract).

Zhang, P., Mei, L. F., Xiong, P., et al., 2017. Structural Features and Proto-Type Basin Reconstructions of the Bay of Bengal Basin: A Remnant Ocean Basin Model. *Journal of Earth Science*, 28 (4): 666—682. <https://doi.org/10.1007/s12583-017-0750-8>

Zhang, Y. Q., Dong, S. W., Li, J. H., et al., 2012. The New Progress in the Study of Mesozoic Tectonics of South China. *Acta Geoscientica Sinica*, 33 (3): 257—279 (in Chinese with English abstract).

Zhai, G. Y., Wang, Y. F., Bao, S. J., et al., 2017. Major Factors Controlling the Accumulation and High Productivity of Marine Shale Gas and Prospect Forecast in Southern China. *Earth Science*, 42 (7): 1057—1068 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.085>

Zheng, B., 2008. Geochemical Study of Hydrocarbon Accumulations with Multiple Source and Multiple Generation Stages in the Middle Yangzi Area (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

常远, 周祖翼, 2010. 利用低温热年代学数据计算剥露速率的基本方法. *科技导报*, 28 (21): 86—94.

丁道桂, 刘光祥, 吕俊祥, 等, 2007. 扬子板块海相中—古生界盆地的递进变形改造. *地质通报*, 26 (9): 1178—1188.

郭旭升, 2014. 南方海相页岩气“二元富集”规律——四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识. *地质学报*, 88 (7): 1209—1218.

胡召齐, 2011. 上扬子地区北部构造演化与热年代学研究 (博士学位论文). 合肥: 合肥工业大学.

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. *地质评论*, 55 (1): 32—42.

金宠, 李三忠, 王岳军, 等, 2009. 雪峰山陆内复合构造系统印支—燕山期构造穿时递进特征. *石油与天然气地质*, 30 (5): 598—607.

李海, 白云山, 王保忠, 等, 2014. 湘鄂西地区下古生界页岩气保存条件. *油气地质与采收率*, 21 (6): 22—25.

李三忠, 张国伟, 周立宏, 等, 2011. 中、新生代超级汇聚背景下的陆内差异变形: 华北伸展裂解和华南挤压逆冲. *地质前缘*, 18 (3): 79—107.

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.

李天义, 何生, 何治亮, 等, 2012. 中扬子地区当阳复向斜中生代以来的构造抬升和热史重建. *石油学报*, 33 (2): 213—224.

刘安, 危凯, 李旭兵, 等, 2015. 桑植—石门复向斜及邻区古流体特征与油气保存意义. *石油实验地质*, 37 (6): 742—750.

刘恩山, 李三忠, 金宠, 等, 2010. 雪峰山陆内构造系统燕山期构造变形特征和动力学. *海洋地质与第四纪地质*, 30 (5): 63—74.

梅廉夫, 邓大飞, 沈传波, 等, 2012. 江南—雪峰隆起构造动力

- 学与海相油气成藏演化.地质科技情报,31(5):85-93.
- 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.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2010.017>
- 聂海宽,包书景,高波,等,2012.四川盆地及其周缘下古生界页岩气保存条件研究.地学前缘,19(3):280-294.
- 沈传波,梅廉夫,郭彤楼,2007.川东北地区中、新生代热历史的裂变径迹分析.天然气工业,27(7):24-26.
- 石红才,施小斌,2014.中、上扬子白垩纪以来的剥蚀过程及构造意义——低温年代学数据约束.地球物理学报,57(8):2608-2619.
- 石红才,施小斌,杨小秋,等,2011.鄂西渝东斗山-石柱褶皱带中新生代隆升剥蚀过程及构造意义.地球物理学进展,26(6):1993-2002.
- 苏勇,2007.湘鄂西区块构造演化及其对油气聚集的控制作用(博士学位论文).广州:中国科学院研究生院.
- 汤济广,梅廉夫,沈传波,等,2012.多旋回叠合盆地烃流体源与构造变形响应:以扬子地块中古生界海相为例.地球科学,37(3):526-534.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2012.059>
- 田云涛,袁玉松,胡圣标,等,2017.低温热年代学在沉积盆地研究中的应用:以四川盆地北部为例.地学前缘,24(3):105-115.
- 王平,刘少峰,郜瑭琚,等,2012.川东弧形带三维构造扩展的 AFT 记录.地球物理学报,55(5):1662-1673.
- 王韶华,罗开平,刘光祥,2009.江汉盆地周缘中、新生代构造隆升裂变径迹记录.石油与天然气地质,30(3):255-259.
- 解习农,郝芳,陆永潮,等,2017.南方复杂地区页岩气差异富集机理及其关键技术.地球科学,42(7):1045-1056.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.084>
- 徐政语,姚根顺,梁兴,等,2015.扬子陆块下古生界页岩气保存条件分析.石油实验地质,37(4):407-417.
- 颜丹平,金哲龙,张维宸,等,2008.川渝湘鄂薄皮构造带多层拆离滑脱系的岩石力学性质及其对构造变形样式的控制.地质通报,27(10):1687-1697.
- 余武,沈传波,杨超群,2017.秭归盆地中新生代构造-热演化的裂变径迹约束.地学前缘,24(3):116-126.
- 袁玉松,林娟华,程心阳,等,2014.鄂西渝东地区晚燕山-喜马拉雅期剥蚀量.地球物理学报,57(9):2878-2884.
- 袁玉松,孙冬胜,周雁,等,2010.中上扬子地区印支期以来抬升剥蚀时限的确定.地球物理学报,53(2):362-369.
- 张岳桥,董树文,李建华,等,2012.华南中生代大地构造研究新进展.地球学报,33(3):257-279.
- 翟刚毅,王玉芳,包书景,等,2017.我国南方海相页岩气富集高产主控因素及前景预测.地球科学,42(7):1057-1068.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.085>
- 郑冰,2008.中扬子区多源、多期油气成藏地球化学研究(博士学位论文).成都:成都理工大学.