

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2025.12.7

磷灰石裂变径迹和(U-Th)/He 约束下雪峰山隆起北缘中—新生代构造抬升过程

冯乾乾^{1,3}, 邱楠生^{2,*}, 腾格尔^{4,*}, 龙康杰², 李 萱²

1. 中国石油大学(北京) 未来能源学院, 北京 102249
2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249
3. 中国石油大学(北京) 深层地热富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102249
4. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083

FENG Qianqian^{1,3}, QIU Nansheng^{2,*}, TENGEER Borjigin^{4,*}, LONG Kangjie², LI Xuan²

1. College of Energy Innovation, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China
2. College of Geosciences, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China
3. State Key Laboratory of Deep Geothermal Resources, China University of Petroleum-Beijing, Beijing, 102249, China
4. Oil and Gas Survey Center of China Geological Survey, Beijing 100083, China

FENG Qianqian, QIU Nansheng, TENGEER Borjigin, et al. Apatite fission track and (U-Th)/He constraints on the Meso-Cenozoic tectonic uplift process of the northern Xuefengshan Uplift. *Earth Science Frontiers*, 2026, 33(3)

Abstract: As a critical transition zone between the Tethys-Himalayan and Circum-Pacific tectonic domains, the Meso-Cenozoic tectonic uplift history of the Xuefengshan Uplift serves as a key window for understanding the evolution of the Yangtze tectonic system and deciphering the far-field tectonic effects of Paleo-Pacific Plate subduction and the eastward growth of the Tibetan Plateau. This study employs integrated apatite (U-Th)/He and apatite fission track analyses to perform tectonothermal evolution modeling, aiming to reconstruct the Meso-Cenozoic tectonic uplift process of the northern Xuefengshan Uplift. The results indicate that the eastern segment underwent “Late Cretaceous subsidence, followed by slow uplift from the Late Cretaceous to the Paleogene, and accelerated uplift since the Late Paleogene.” In contrast, the western segment experienced a four-stage process: “Late Cretaceous subsidence, rapid uplift from the Late Cretaceous to the Eocene, slow uplift from the Late Eocene to the Miocene, and accelerated uplift since the middle Miocene.” During the Late Cretaceous, the northern margin of the Xuefengshan Uplift exhibited deformation features typical of a foreland basin. The slow uplift of the eastern segment since the Late Paleogene is correlated with the subduction and rollback of the Paleo-Pacific Plate, whereas the rapid uplift of the western segment from the latest Cretaceous to the Eocene and since the Miocene is primarily controlled by the eastward growth of the Tibetan Plateau.

Keywords: Xuefengshan Uplift; tectonothermal evolution; low temperature thermochronology; foreland basin; middle Yangtze

摘要: 雪峰山隆起位于特提斯-喜马拉雅构造域和滨太平洋构造域的过渡区域, 其中生代以来的构造抬升过程对理解中扬子构造演化和揭示太平洋板块俯冲作用与青藏高原隆升作用远程构造效应具有重要意义。本文联合磷灰石(U-Th)/He 和磷灰石裂变径迹开展构造-热演化模拟, 重建了雪峰山隆起北缘中—新生代构

收稿日期: 2025-06-17; 修回日期: 2025-10-22

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(42302138); 国家自然科学基金地质联合基金项目(U2244208)

作者简介: 冯乾乾(1994—), 男, 博士, 副教授, 主要从事沉积盆地构造-热演化与清洁地质资源成藏机理研究工作。

E-mail: fengqianqian607@cup.edu.cn

* 通信作者简介: 邱楠生(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事沉积盆地温压场重建研究工作。E-mail: qiunsh@cup.edu.cn
腾格尔(1967—), 男, 研究员, 主要从事油气地质综合研究工作。E-mail: tenger67@163.com

造抬升过程。结果表明:雪峰山隆起北缘东段表现为“晚白垩世沉降,晚白垩世末—古近纪缓慢抬升,古近纪末至今快速抬升”的抬升过程;西段则表现为“晚白垩世沉降,晚白垩世末—始新世快速抬升,始新世末—中新世缓慢抬升,中新世中至今快速抬升”的过程。晚白垩世雪峰山北缘表现为前陆盆地变形特征。雪峰山隆起北缘东段古近纪末至今持续缓慢抬升过程与古太平洋板块俯冲后撤有关,而西段晚白垩世末—始新世与中新世以来的快速抬升主要受控于青藏高原隆升的远程效应的影响。

关键词:雪峰山隆起;构造-热演化;低温热年代学;前陆盆地;中扬子

中图分类号:P542.1;P597;P548 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2026)03-0000-00

0 引言

中生代以来,华南地区经历了复杂的陆内变形,在中扬子地区形成了江南—雪峰造山带和川东逆冲推覆带,对区域矿产资源的富集与保存具有显著影响^[1-4]。雪峰山隆起地处特提斯—喜马拉雅构造域和滨太平洋构造域的过渡区域,其中—新生代构造演化过程是揭示太平洋板块俯冲作用与青藏高原隆升作用远程构造效应的窗口。前人通过地球动力学、构造物理模拟和年代学等手段对雪峰山隆起中—新生代构造抬升过程进行了大量的研究^[5-7],但仍在抬升过程、抬升期次、剥蚀量和动力学背景等问题上存在着争议。雪峰山隆起中生代以来初始抬升时间存在着“三叠纪—侏罗纪”^[5,8]和“晚白垩世”^[6-7]两种认识。中生代以来的构造抬升过程也具有“晚白垩世—始新世隆升,渐新世沉降,中新世至今快速隆升”^[6]和“三叠纪以来一直持续抬升”^[7]的争议。对于中扬子古隆起(雪峰山隆起、黄陵隆起等)发育的厚层白垩系沉积的成因机制存在争议。部分学者认为晚侏罗世到晚白垩世末太平洋板块俯冲后撤,扬子板块一直处于伸展环境,白垩系盆地一直为伸展断陷盆地^[9-11],而构造模拟与低温热年代学古温标分析表明川东逆冲推覆带中生代以来表现为持续的挤压隆升^[12-13]。本次研究联合磷灰石裂变径迹(AFT)和磷灰石(U-Th)/He(AHe)年代学,重建了雪峰山隆起北缘中—新生代的构造抬升过程,揭示出雪峰山隆起周缘的前陆盆地变形特征及其动力学启示。

1 地质概况

雪峰山隆起位于扬子板块与华南板块的过渡区,北西以慈利—保靖断裂毗邻隔槽式褶皱带湘鄂西褶皱带,南东大致以前泥盆纪地层和上古生界的界线与湘中盆地分界,东部为中新世大型陆相盆

地江汉盆地叠覆^[7]。造山带及边缘自北西往南东依次发育倾向SE的慈利—保靖、怀化—沅陵、溆浦—靖州和倾向NW的通道—安化、城步—新化5条主干逆断裂,组成区域背冲构造样式(图1^[14])。

雪峰山隆起经历了晋宁、加里东、印支、燕山和喜马拉雅运动改造,造成了板溪群与冷家溪群、上古生界与下古生界、上三叠统与下三叠统、白垩系与中侏罗统的不整合和白垩纪—古近纪盆地的褶皱回返^[15]。中、上扬子区自晋宁运动之后,震旦系变质基底之上的沉积物形成时期为相对平稳的地台发展阶段,中生代以来受到了印支—燕山运动和喜马拉雅运动的强烈改造作用,造成了中扬子差异性构造演化^[16-17]。早三叠世处于碳酸盐质陆棚阶段,中三叠世—白垩纪处于隆起—陆相山间盆地阶段^[18]。晚白垩世受燕山期晚期构造运动变形与东面太平洋板块俯冲形成的陆内远程效应影响,迅速抬升为隆起带,并遭受强烈剥蚀改造。新生代以来,由于西部印度板块与中国大陆开始全面碰撞和太平洋俯冲退缩作用^[19],中扬子板块转变为压性环境,雪峰山隆起再次快速抬升剥蚀。

雪峰山隆起主要出露地层为新元古界冷家溪群、板溪群、南华系以及下古生界和少量上古生界,陆相盆地残留区发育上三叠统—侏罗系及白垩系—古近系(图1^[14])。其中冷家溪群为活动陆缘碎屑沉积;板溪群—南华系为裂谷盆地火山碎屑沉积;震旦系—下奥陶统为被动大陆边缘盆地碳酸盐和陆源碎屑沉积夹少量硅质沉积;中奥陶统—志留系为前陆盆地砂、泥质沉积为主;泥盆系—下三叠统为陆表海碳酸盐、陆源碎屑夹硅质沉积;上三叠统—中侏罗统为陆相挤压前陆盆地碎屑沉积;白垩系为陆相断陷盆地碎屑沉积^[20]。

2 样品采集与测试

本次年代学样品主要在雪峰山隆起北缘西段(怀化)和东段(邵阳)采集,共采集2件砂岩露头样

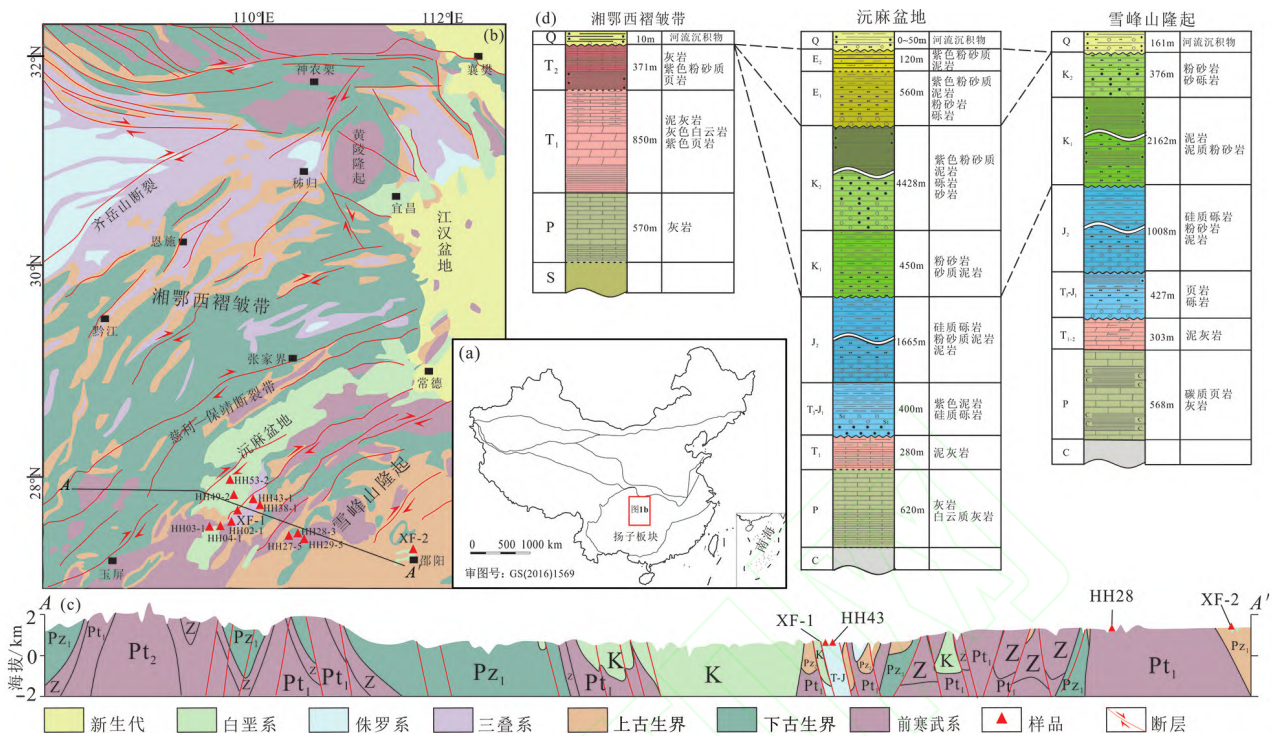


图1 雪峰山隆起周缘地质简图及样品分布
(地质剖面图和地层柱状图据文献[14]修改)

Fig. 1 Geologic map and sample distribution between the Xuefengshan Uplift and the surrounding areas.
Geological profile and stratigraphic column modified after [14].

品(表1^[14])进行了 AHe 和 AFT 测试,样品位置见图 1b。AHe 和 AFT 测试均在中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室完成,其具体测试方法原理见参考文献[21-23]。本次测试磷灰石裂变径迹年龄方法为 LA-ICP-MS,所获得 Zeta 值为 $3\ 589 \pm 901$,测试结果见表 2、表 3^[14]。

表 1 雪峰山隆起样品信息

Table 1 Information of the samples of the Xuefengshan Uplift

样品号	层位	岩性	纬度/(°)	经度/(°)	海拔/m
XF-1	K ₂	砂岩	27.798 1	111.954 3	144
XF-2	T ₃	砂岩	27.752 3	110.113 7	169
BXCS20-1 *	K ₁	砂岩			375
HH53-2 *	K ₂	粉砂岩			181
HH49-2 *	K ₂	砂岩			219
HH04-1 *	K ₁	砂岩			223
HH03-1 *	K ₂	粉砂岩			238
HH02-1 *	J ₂	砂岩			263
HH14-1 *	K ₂	砂岩			309
HH38-1 *	J ₂	粉砂岩			198
HH43-1 *	K ₁	粉砂岩			177
HH27-5 *	T ₃	闪长岩			657
HH28-3 *	T ₃	闪长岩			723
HH29-5 *	T ₃	闪长岩			549

注: * 样品引自文献[14]。

3 结果

3.1 古温标参数特征

AHe 测试结果如表 2、图 2 所示。所有测试样品的 AHe 年龄均小于地层年龄,意味着样品沉积后的年龄被重置,样品颗粒年龄有效地记录了样品发生构造活动的时间,同时也是对喜马拉雅运动的构造响应。样品颗粒的辐射损伤程度能够通过有效铀浓度(eU)体现^[24],在 He 部分保留带中,He 热扩散和单颗粒 He 年龄的影响原因主要包括晶体半径、辐射损伤以及扩散域半径,一般而言,样品的封闭温度越高且 AHe 年龄值越大,该颗粒半径就越大且辐射损伤程度亦越高,也就越能阻挡 He 发生扩散^[25-27]。雪峰山隆起东段 XF-1 白垩系紫红色砂岩和西段 XF-2 三叠系灰白色砂岩样品单颗粒平均 AHe 年龄分别为 (15.31 ± 0.77) Ma 和 (8.89 ± 1.44) Ma,样品单颗粒 AHe 年龄分布较为分散。雪峰山隆起单颗粒 AHe 年龄与有效铀浓度和颗粒半径的关系(图 2a, b)表明:XF-1 单颗粒 AHe 年龄与有效铀浓度呈明显正相关性,与颗粒半径无明显相关性;XF-2 单颗粒 AHe 年龄与有效铀浓度呈非

表2 雪峰山隆起样品 AHe 测试结果

Table 2 The measured AHe data of the Xuefengshan Uplift

样品编号	半径/ μm	质量/ μg	^4He 含量/ $(\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1})$	U 浓度/ 10^{-6}	Th 浓度/ 10^{-6}	eU 浓度/ 10^{-6}	F_T	年龄及误差(1σ)/Ma
XF-1a	75.1	28.87	1.16	10.45	9.07	12.58	0.81	21.14 \pm 1.06
XF-1b	71.1	23.38	0.26	3.83	3.37	4.62	0.80	13.07 \pm 0.65
XF-1c	69.3	23.54	0.51	4.72	8.18	6.64	0.79	18.04 \pm 0.90
XF-1d	70.0	24.31	0.17	3.12	5.78	4.48	0.79	9.00 \pm 0.45
								15.31 \pm 0.77*
XF-2a	154.0	96.83	0.71	1.47	34.40	9.56	0.92	14.79 \pm 0.74
XF-2b	142.4	76.92	0.28	1.30	32.82	9.01	0.92	6.23 \pm 0.31
XF-2c	100.0	33.87	1.66	25.01	87.22	45.51	0.88	7.69 \pm 0.38
XF-2d	132.9	62.28	0.60	9.08	19.48	13.66	0.91	8.88 \pm 0.44
								8.89 \pm 1.44*

注: F_T 为 α 射出效应的校正参数;eU=U+0.23Th,为有效铀浓度。* 数据为平均年龄 \pm 标准偏差。

表3 雪峰山隆起样品 AFT 测试结果

Table 3 The measured AFT data of the Xuefengshan Uplift

样品	颗粒数	$\rho_s/$ (10^5 cm^{-2})	N_s	U 浓度/ 10^{-6}	$\zeta_{\text{ICP}}/$ ($\text{a}\cdot\text{cm}^2$)	$P(\chi^2)/\%$	年龄及误差 (1σ)/Ma	封闭径迹长度/ μm	$D_{\text{par}}/\mu\text{m}$
XF-1	16	48.04	1 228	51.3	0.36	0	72 \pm 7	12.48 \pm 1.32(258)	1.70
XF-2	25	68.09	624	25.9	0.36	0	60 \pm 6	12.45 \pm 1.43(91)	1.75
BXCS20-1*	29	4.55	362			98.4	67 \pm 5	13.2 \pm 2.3(57)	
HH53-2*	20	3.34	175			96.3	62 \pm 6	12.1 \pm 2.2(14)	
HH49-2*	30	4.64	426			65.7	52 \pm 4	12.5 \pm 1.9(45)	
HH04-1*	27	8.14	1 869			40.7	59 \pm 3	11.7 \pm 2(114)	
HH03-1*	24	2.75	278			91.5	37 \pm 3	12.3 \pm 1.9(44)	
HH02-1*	12	3.44	169			85.2	46 \pm 5	11.8 \pm 2.4(10)	
HH14-1*	28	5.21	920			42.8	35 \pm 2	12.4 \pm 2.1(105)	
HH38-1*	29	5.82	788			99.9	71 \pm 5	12.2 \pm 1.8(99)	
HH43-1*	28	6.95	1 370			92.6	60 \pm 4	12.1 \pm 1.9(109)	
HH27-5*	26	7.33	1 870			27.4	49 \pm 3	12.3 \pm 2(117)	
HH28-3*	28	8.22	1 277			7.2	44 \pm 3	12.5 \pm 1.7(106)	
HH29-5*	25	6.20	1 399			0.5	43 \pm 3	12.0 \pm 2.1(101)	

注: ρ_s 表示磷灰石自发径迹密度; N_s 表示磷灰石自发径迹数; $P(\chi^2)$ 表示卡方检验, $P(\chi^2)>5\%$,年龄为中值年龄, $P(\chi^2)<5\%$,年龄为池年龄;括号内数值为封闭径迹条数(N); D_{par} 表示自发径迹蚀刻的长轴长度;* 样品引自文献[14]。

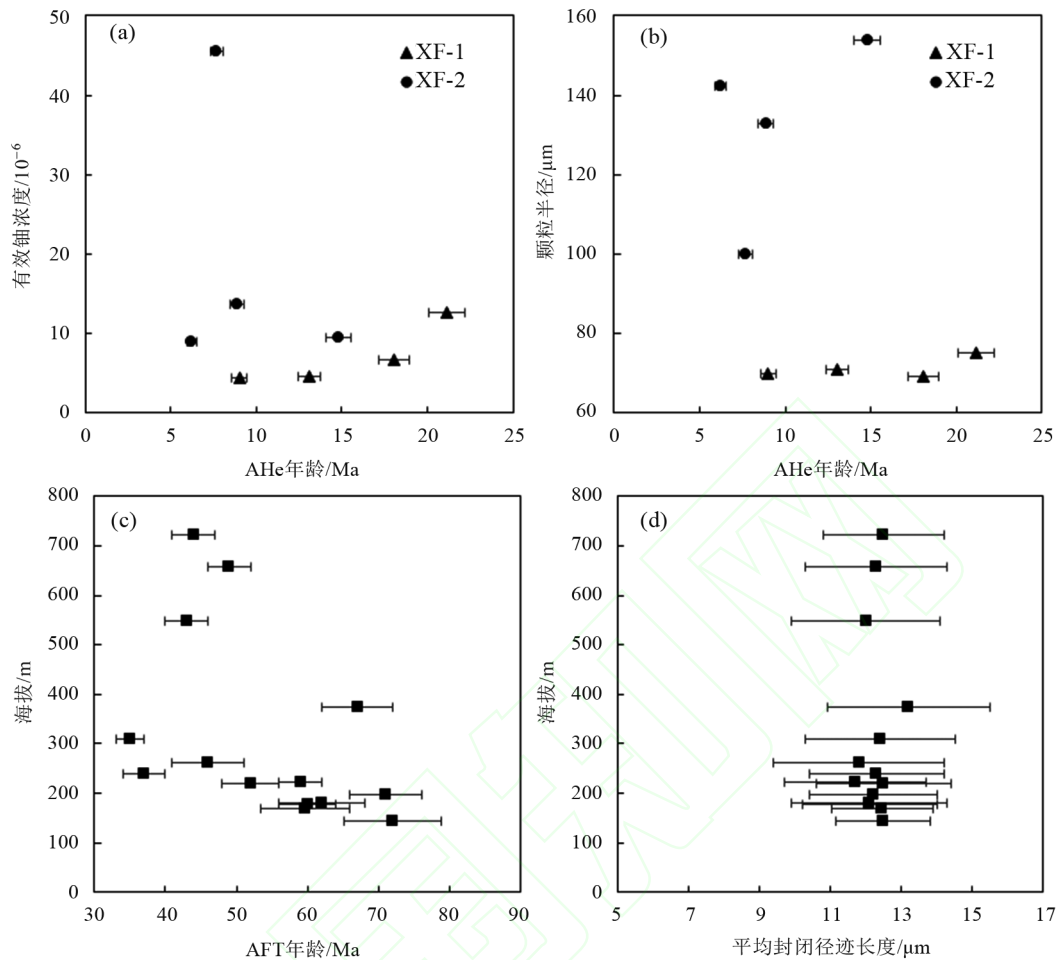
线性关系,与颗粒半径均呈明显正相关性。

AFT 测试结果如表 3 所示,利用 RadialPlotter 软件对所有样品的单颗粒 AFT 年龄以及 AFT 长度分布进行了绘制,其结果如图 3 所示。样品 XF-1 的 AFT 年龄值部分小于地层年龄,表明样品发生了部分退火,样品在地质历史演化进程中所经历的最高古地温在 AFT 封闭温度区间内。样品 XF-2 的 AFT 年龄值皆小于地层年龄,这表明样品发生了完全退火,样品在地质历史演化进程中所经历的最高古地温超出了 AFT 封闭温度区间^[28]。 D_{par} 值代表颗粒在 AFT 部分退火带区间内阻挡退火的能力^[29]。雪峰山隆起北缘东段 XF-1 白垩系紫红色砂岩样品和西段 XF-2 三叠系灰白色砂岩样品的 AFT 年龄分别为(72 \pm 7) Ma 和(60 \pm 6) Ma,均小于地

层年龄,表明它们都经历了一定程度的退火。样品单颗粒 D_{par} 值为 1.35~2.04 μm ,标准偏差为 1.32~1.43 μm ,裂变径迹长度为 12.45~12.48 μm ,且都呈单峰分布。雪峰山隆起样品的封闭径迹均超过 90 条,可以作为有效古温标进行热史模拟。雪峰山隆起样品的海拔、AFT 年龄和 AFT 长度没有明显的相关关系(图 2c,d)。

3.2 热史模拟

在对研究区磷灰石 AHe 和 AFT 数据分析的基础上,本文利用 HeFTy 软件,联合 AHe 和 AFT 进行热演化历史模拟。本文 AHe 年龄选取的是 Flowers 等^[26]提出的辐射损伤积累和退火模型,AFT 选取 Ketcham 等^[30]建立的多组分动力学模型。模拟过程采用蒙特卡洛法随机模拟 3 000~



a—单颗粒 AHe 年龄与有效铀浓度关系; b—单颗粒 AHe 年龄与颗粒半径关系; c—AFT 年龄与海拔关系; d—平均封闭径迹长度与海拔关系。

图 2 古温标与有效铀浓度、颗粒半径和海拔的关系

Fig. 2 The correlation of paleothermometers with eU, radius and altitude.

(a) The correlation of eU with AHe single-grain ages; (b) The correlation of radius with AHe single-grain ages; (c) The correlation of altitude with AFT ages; (d) The correlation of altitude with mean closed apatite fission track length.

100 000 条热史路径, 拟合度 (GOF) 代表模拟年龄值与测试年龄值的吻合程度, 其中绿色代表“可接受的”热史路径 ($GOF > 0.05$, 深绿色为可信度较低, 亮绿色为可信度较高), 粉色代表“拟合良好的”热史路径 ($GOF > 0.5$), 黑色线为最佳热史路径, 黄色线为加权平均热史路径。结合雪峰山隆起周缘区域构造演化、地层发育情况和不整合面等地质背景, 对样品热史模拟设置了多个约束条件 (图 4)。

雪峰山隆起东段 XF-1 白垩系样品和西段 XF-2 三叠系样品热史路径表明: (1) XF-1 样品在 90~77 Ma 快速升温, 升温速率约为 $3.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$, 在 77 Ma 达到最高古地温, 约为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$; 在 77~21 Ma 发生缓慢冷却, 冷却速率约为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$; 21 Ma 至今快速冷却, 冷却速率为 $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ 。(2) XF-2 样品在 237~168 Ma

快速升温, 升温速率约为 $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$, 在 168 Ma 达到最高古地温, 约为 $128\text{ }^{\circ}\text{C}$; 在 168~93 Ma 发生快速冷却, 冷却速率约为 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$; 在 93~72 Ma 快速升温, 升温速率为 $2.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$; 在 72~50 Ma 发生快速冷却, 冷却速率约为 $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$; 在 50~10 Ma 发生缓慢冷却, 冷却速率约为 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$; 10 Ma 至今快速冷却, 冷却速率为 $4.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ (图 4)。

4 讨论

4.1 雪峰山隆起北缘中—新生代构造抬升过程

雪峰山隆起是中扬子地区盆地原型、构造演化以及地壳稳定性研究的关键地区, 前人在雪峰山隆起周缘进行了大量的年代学研究, 但中生代以来初

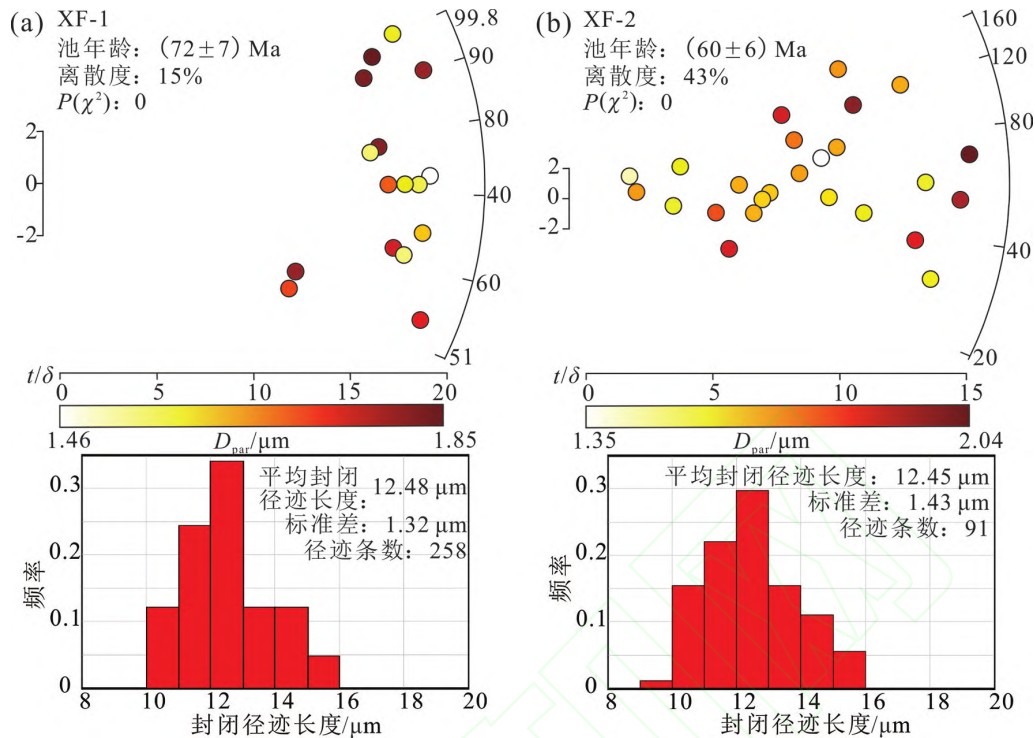


图3 样品单颗粒磷灰石裂变径迹年龄和长度分布图

Fig. 3 The radial plots of AFT grain ages and detrital apatite fission track lengths

始抬升时间、抬升期次及过程一直观点不统一^[5-8]。本文基于低温热年代学揭示了雪峰山隆起中生代以来构造抬升过程(图4)。雪峰山隆起北缘东段XF-1样品构造抬升过程为“晚白垩世沉降,晚白垩世末—古近纪缓慢抬升,古近纪末至今快速抬升”。雪峰山隆起北缘西段XF-2样品表现为“中侏罗世—早白垩世快速抬升,晚白垩世沉降,晚白垩世末—始新世快速抬升,始新世末—中新世缓慢抬升,中新世中至今快速抬升”,这与前人所揭示的雪峰山隆起的构造抬升过程一致(HH43-1, HH28-3, HH27-5)^[14]。雪峰山隆起北缘样品热史揭示出了中生代以来燕山期(80 Ma)和喜马拉雅期(21~10 Ma)两期冷却事件。但雪峰山隆起不同地区隆升过程存在着一定差异性,主要表现在雪峰山隆起开始冷却时间,冷却速率和冷却期次的不同。东段晚白垩世末—古近纪(77~21 Ma)表现为持续的缓慢抬升,西段则表现为晚白垩世末—始新世(72~50 Ma)快速抬升,始新世末—中新世(50~10 Ma)缓慢抬升。

4.2 构造动力学启示

大量的热年代学、岩石学、地球化学、构造和地层研究表明:在晚侏罗世—早白垩世,太平洋板块向欧亚大陆俯冲,使得华南板块发生南东—北西向的

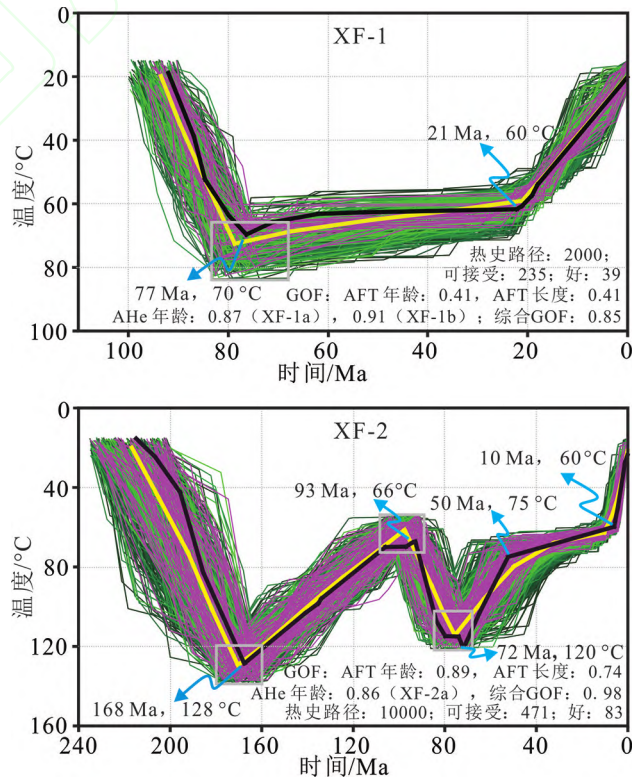


图4 雪峰山隆起露头样品热史反演结果

Fig. 4 Thermal inversion results of outcrop samples in the Xuefengshan Uplift

挤压作用,形成陆内褶皱-冲断带,例如江南-雪峰山造山带、川东褶皱带等;在早白垩世-晚白垩世,太平洋板块幕式俯冲、后撤,使得华南板块形成伸展环境,在下扬子地区形成大规模的火成岩出露和区域性的伸展构造^[31-34]。因此,雪峰山隆起北缘西段 XF-2 样品的中侏罗世-早白垩世快速抬升应是太平洋板块俯冲产生的华南地区地壳缩短作用的构造响应。然而,对于中扬子地区发育的白垩系盆地和露头(如秭归盆地、宜昌斜坡和花果坪复向斜、雪峰山隆起北缘等)的成因机制存在争议:部分学者认为晚侏罗世到晚白垩世末太平洋板块俯冲后撤,扬子板块一直处于伸展环境,白垩系盆地一直为伸展断陷盆地^[9-11,14];而另一部分学者从沉积学与地震解释的证据认为白垩系一直为挤压盆地^[35],构造模拟与低温热年代学古温标分析表明受雪峰山陆内变形的控制,川东逆冲推覆带在中侏罗世-早白垩世表现为持续的挤压变形^[12-13]。地层沉积上,中侏罗统在川东-重庆保存相对完整,但早白垩世在雪峰山、沅麻盆地、湘鄂西褶皱带表现出局部残留特征(图 1d^[14]),这表明在中侏罗世-早白垩世,雪峰山周缘和川东逆冲构造带同时存在沉积与隆升。构造模拟实验也表明,在持续挤压作用下,古隆起周缘会发生上覆地层增厚堆积^[36]。结合构造模拟实验与地层学证明,推测是受控于秦岭-大别造山带和雪峰山陆内变形系统双向挤压的前陆盆地变形。雪峰山隆起北缘东段和西段 XF-1 和 XF-2 样品热史模拟结果表明(图 4),在晚白垩世均为沉降速率基本相同的沉积过程,也指示了雪峰山北缘陆内挤压变形系统控制下前陆盆地变形特征。

新生代以来青藏高原隆升是否影响中扬子地区构造演化至今仍有争议。前人研究结果表明,青藏高原东缘在始新世-中新世早期(35~15 Ma)和晚中新世(12~5 Ma)经历了两期快速隆升^[37-41]。热年代学分析表明四川盆地新生代经历了两期区域抬升/剥蚀;第一期剥蚀始于约 40 Ma 前,于中新世之前结束^[42-43],与青藏高原隆升扩展的早期阶段同步^[44];第二期剥蚀始于约 10 Ma 之后,在川中、川南、龙门山、米仓山等地具有表现^[40,45],与青藏高原隆升扩展的晚期阶段同步。联合裂变径迹、(U-Th)/He 揭示出湘鄂西地区表现为“早白垩世-晚白垩世快速隆升、白垩纪末期以来缓慢持续隆升”的两段式隆升过程,晚白垩世以来缓慢持续隆升可能是太平洋板块持续俯冲后撤的结果^[12]。本文研究

结果表明:雪峰山隆起北缘东段 XF-1 样品在晚白垩世末-古近纪处于“抬升速率缓慢”阶段,而西段 XF-2 样品处于“抬升速率快速-缓慢”阶段(图 4),推测雪峰山隆起北缘东段继承性地缓慢隆升可能是太平洋板块俯冲后撤的结果,而西段先受到了青藏高原隆升的远程效应,之后处于与西段一样的构造背景;东段 XF-1 样品古近纪末至今处于“抬升速率快速”阶段,而西段 XF-2 样品中新世中至今处于“抬升速率更快速”阶段,表明雪峰山隆起北缘东段古太平洋板块俯冲后撤挤压加剧,西段在喜马拉雅运动第二幕时期以来受到了青藏高原隆升远程效应的影响。

5 结论

(1)低温热年代学证据揭示出雪峰山隆起北缘 80 Ma 左右和 21~10 Ma 的快速冷却事件。中生代以来的构造抬升过程东段表现为“晚白垩世沉降,晚白垩世末-古近纪缓慢抬升,古近纪末至今快速抬升”;西段则表现为“晚白垩世沉降,晚白垩世末-始新世快速抬升,始新世末-中新世缓慢抬升,中新世中至今快速抬升”。

(2)雪峰山隆起北缘在晚白垩世为沉降速率基本相同的沉积阶段,表现出陆内挤压变形系统控制下前陆盆地变形特征。古太平洋板块俯冲后撤导致了雪峰山隆起北缘东段古近纪末至今持续缓慢抬升过程,而西段晚白垩世末-始新世与中新世以来的快速抬升主要受控于青藏高原隆升的远程效应的影响。

参考文献

- [1] 丁道桂,刘光祥,吕俊祥,等. 扬子板块海相中生界盆地的递进变形改造[J]. 地质通报, 2007, 9: 1178-1188.
- [2] 颜丹平,金哲龙,张维宸,等. 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[J]. 地质通报, 2008, (10): 1687-1697.
- [3] 胡召齐. 上扬子地区北部构造演化与热年代学研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011.
- [4] 梅廉夫,刘昭茜,汤济广,等. 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[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2010, 35(2): 161-174.
- [5] WANG Y J, FAN W M, SUN M, et al. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China

- Block: a case study in the Hunan Province [J]. *Lithos*, 2007, 96(3/4): 475-502.
- [6] 汤双立. 雪峰山及邻区自晚白垩世以来隆升过程[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- [7] 刘雯, 张凯逊, 马寅生, 等. 雪峰山隆起北缘热历史及其对牛蹄塘组生烃作用的影响[J]. *地质学报*, 2022, 96(6): 2143-2154.
- [8] 白云山, 熊成云, 王传尚, 等. 雪峰隆起北部地区构造基本特征及与海相油气关系[J]. *华南地质与矿产*, 2010(1): 68-75.
- [9] 何治亮, 汪新伟, 李双建, 等. 中上扬子地区燕山运动及其对油气保存的影响[J]. *石油实验地质*, 2011, 33(1): 1-11.
- [10] 程龙, 李志宏, 阎春波, 等. 江汉盆地西缘宜昌地区下白垩统五龙组辫状河沉积特征[J]. *地层学杂志*, 2018, 42(1): 90-99.
- [11] 邓铭哲, 何登发. 当阳地区地质结构及其对宜昌地区志留系页岩气勘探的意义[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(4): 487-500.
- [12] FENG Q Q, QIU N S, WU H, et al. Thermo-kinematic constraints on restoration of the eastern Sichuan fold-and-thrust belt, South China[J]. *Tectonics*, 2023, 42(9): 33.
- [13] 吴航, 邱楠生, 冯乾乾, 等. 利用热运动学方法恢复构造隆升过程的探索[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(6): 2329-2344.
- [14] TANG S L, YAN D P, QIU L, et al. Partitioning of the Cretaceous Pan-Yangtze Basin in the central South China Block by exhumation of the Xuefeng Mountains during a transition from extensional to compressional tectonics[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25: 1644-1659.
- [15] 柏道远, 钟响, 贾朋远, 等. 雪峰造山带南段构造变形研究[J]. *大地构造与成矿学*, 2014, 38(3): 512-529.
- [16] 袁玉松, 林娟华, 程心阳, 等. 鄂西渝东地区晚燕山-喜马拉雅期剥蚀量[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(9): 2878-2884.
- [17] 邹玉涛, 段金宝, 赵艳军, 等. 川东高陡断褶带构造特征及其演化[J]. *地质学报*, 2015, 89(11): 2046-2052.
- [18] 梅廉夫, 邓大飞, 沈传波, 等. 江南-雪峰隆起构造动力学与海相油气成藏演化[J]. *地质科技情报*, 2012, 31(5): 85-93.
- [19] 梁光河. 贝加尔裂谷和汾渭地堑成因与印度欧亚碰撞的远程效应[J]. *地学前缘*, 2023, 30(3): 121-125.
- [20] 柏道远, 钟响, 贾朋远, 等. 雪峰造山带及邻区构造变形和构造演化研究新进展[J]. *华南地质与矿产*, 2015, 31(4): 321-343.
- [21] PATON C, HELLSTROM J, PAUL B, et al. Iolite: free-ware for the visualisation and processing of mass spectrometric data[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2011, 26: 2508-2518.
- [22] VERMEESCH P. IsoplotR: a free and open toolbox for geochronology [J]. *Geoscience Frontiers*, 2018, 9(5): 1479-1493.
- [23] COGNÉ N, CHEW D M, DONELICK R A et al. LA-ICP-MS apatite fission track dating: a practical zeta-based approach[J]. *Chemical Geology*, 2020, 531: 119302.
- [24] SHUSTER D L, FLOWERS R M, FARLEY K A. The influence of natural radiation damage on helium diffusion kinetics in apatite[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 249(3/4): 148-161.
- [25] FARLEY K A. (U-Th)/He dating: techniques, calibrations, and applications[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2002, 47(1): 819-844.
- [26] FLOWERS R M, KETCHAM R A, SHUSTER D L et al. Apatite (U-Th)/He thermochronometry using a radiation damage accumulation and annealing model[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(8): 2347-2365.
- [27] WILLETT C D, FOX M, SHUSTER D L. A helium-based model for the effects of radiation damage annealing on helium diffusion kinetics in apatite[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 477: 195-204.
- [28] DEFELIPE I, PEDREIRA D, PULGAR J A, et al. Unraveling the Mesozoic and Cenozoic tectonothermal evolution of the eastern basque-cantabrian zone-western pyrenees by low-temperature thermochronology [J]. *Tectonics*, 2019, 38(9): 3436-3461.
- [29] SCHMIDT J S, MENEZES T R, SOUZA I V A F, et al. Comments on empirical conversion of solid bitumen reflectance for thermal maturity evaluation [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2019, 201: 44-50.
- [30] KETCHAM, R A, CARTER, A, DONELICK, R A, et al. Improved modeling of fission-track annealing in apatite[J]. *American Mineralogist*, 2007, 92(5/6): 799-810.
- [31] LI S Z, SUO Y H, LI X Y, et al. Mesozoic tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone to subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 192: 91-137.
- [32] LI J H, SHI W, ZHANG Y Q, et al. Thermal evolution of the Hengshan extensional dome in central South China and its tectonic implications: new insights into low-angle detachment formation [J]. *Gondwana Research*, 2016, 35: 425-441.
- [33] CHU Y, LIN W, FAURE M, et al. Cretaceous episodic extension in the South China block, East Asia: evidence from the Yuechengling massif of central South China[J]. *Tectonics*, 2019, 38(10): 3675-3702.
- [34] JI W B, FAURE M, LIN W, et al. Multiple emplacement and exhumation history of the late Mesozoic Dayunshan-Mufushan batholith in Southeast China and its tectonic significance: 1. Structural analysis and geochronological constraints[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(1): 689-710.
- [35] 刘晓峰, 沈传波, 王家豪. 中扬子地块宜昌斜坡白垩系陆内挤压盆地的断-拗结构[J]. *地球科学*, 2021, 46(5): 1677-1691.
- [36] LONG K J, FENG Q Q, TENGGER B, et al. Differences in

- the Meso-Cenozoic tectonic evolution between the Huangling Paleo-uplift and the surrounding areas in the Middle Yangtze Block, South China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2025, 99(2): 394-408.
- [37] LEASE R O, BURBANK D W, CLARK M K, et al. Middle Miocene reorganization of deformation along the north-eastern Tibetan Plateau[J]. *Geology*, 2011, 39: 359-362.
- [38] WANG E, KIRBY E, FURLONG K P, et al. Two-phase growth of high topography in eastern Tibet during the Cenozoic[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5: 640-645.
- [39] YAND Z, SHEN C B, RATSCHBACHER L, et al. Sichuan Basin and beyond: eastward foreland growth of the Tibetan Plateau from an integration of Late Cretaceous-Cenozoic fission track and (U-Th)/He ages of the eastern Tibetan Plateau, Qinling, and Daba Shan[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122: 4712-4740.
- [40] LIU-ZENG J, ZHANG J, MCPHILLIPS D, et al. Multiple episodes of fast exhumation since Cretaceous in southeast Tibet, revealed by low-temperature thermochronology [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 490: 62-76.
- [41] 刘德民, 王杰, 姜淮, 等. 青藏高原形成演化动力机制及其远程效应[J]. *地学前缘*, 2024, 31(1): 154-169.
- [42] DENG B, LIU S G, Li Z, et al. Differential exhumation at eastern margin of the Tibetan Plateau, from apatite fission-track thermochronology [J]. *Tectonophysics*, 2013, 591: 98-115.
- [43] TIAN Y T, KOHN B P, QIU N S, et al. Eocene to Miocene out-of-sequence deformation in the eastern Tibetan Plateau: insights from shortening structures in the Sichuan Basin[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123: 1840-1855.
- [44] 毕文军, 张佳伟, 李亚林, 等. 西藏中部羌塘地体白垩纪以来隆升剥露过程[J]. *地学前缘*, 2023, 30(2): 18-34.
- [45] TIAN Y T, KOHN B P, ZHU C Q, et al. Post-orogenic evolution of the Mesozoic Micang Shan foreland basin system, central China[J]. *Basin Research*, 2012, 24: 70-90.