

王一伟, 梅刚, 谢启兴, 等. 青藏高原东缘甘孜地区新生代隆升过程之磷灰石裂变径迹证据[J]. 中国地质, 2015, 42(2): 469-479.
Wang Yiwei, Mei Gang, Xie Qixing, et al. Apatite fission track evidence for the Cenozoic uplift process in Garze area on the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Geology in China, 2015, 42(2): 469-479(in Chinese with English abstract).

青藏高原东缘甘孜地区新生代隆升过程之磷灰石 裂变径迹证据

王一伟^{1,2} 梅 刚² 谢启兴² 周晓珂² 王 刚²

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 四川省地质矿产勘查开发局川西北地质队, 四川 绵阳 621000)

摘要: 通过青藏高原东缘甘孜地区 7 件砂岩磷灰石样品裂变径迹分析, 取得了测试样品的表观年龄, 运用模拟退火法对所有样品进行了热史模拟, 获得了样品的热演化史; 分析出甘孜地区在新生代古近纪以来经历了相似的构造演化过程, 强构造隆升阶段分别发生在古近纪 46~30 Ma 间和新近纪 9 Ma 以来, 平均抬升速率和平均抬升量分别为 1261 m/Ma、2634 m 和 388 m/Ma、1043 m; 甘孜地区构造隆升具有不平衡性、阶段性、地区性差异, 冷却速率、抬升速率和抬升幅度也存在偏差。

关键词: 青藏高原东缘; 构造隆升; 砂岩磷灰石裂变径迹

中图分类号:P542⁺.1; P575.9 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)02-0469-11

Apatite fission track evidence for the Cenozoic uplift process in Garze area on the eastern margin of the Tibetan Plateau

WANG Yi-wei^{1,2}, MEI Gang², XIE Qi-xing², ZHOU Xiao-ke², WANG Gang²

(1. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Northwest Sichuan Geological Party, Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Exploration of Sichuan Province, Mianyang 621000, Sichuan, China)

Abstract: Based on fission track analysis of seven samples from Garze area on the eastern margin of the Tibetan Plateau, the authors obtained the apparent ages of the analyzed samples. Using the simulated annealing method, the authors made thermal history simulation for all samples, and obtained the thermal evolution history of these samples. According to the results obtained, the Garze area has experienced similar tectonic evolutions since Palaeogene, and the tectonic uplift occurred in 46-30 Ma and since 9 Ma of Neogene, with the uplift rate and average uplift amount being 1261 m/Ma, 2634 m and 388 m/Ma, 1043 m respectively. The tectonic uplifts in the Garze area are characterized by imbalance as well as stage and regional differences; in addition, there also exist deviations in cooling rate, uplift rate and uplift amplitude.

Key words: eastern margin of the Tibetan Plateau; tectonic uplift; apatite fission track of sandstone

收稿日期: 2014-03-17; 改回日期: 2014-05-15

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(1212010918037)资助。

作者简介: 王一伟, 男, 1985 年生, 助理工程师, 硕士生, 研究方向: 成矿规律和成矿预测; E-mail: 190636690@qq.com。

About the first author: WANG Yi-wei, male, born in 1985, assistant engineer, master candidate, majors in metallogenic regularity and metallogenic prediction; E-mail: 190636690@qq.com.

青藏高原隆升问题,是国内外专家研究的热门课题。国内外学者通过各种手段和方法证明了青藏高原隆升具有向南、北及东侧扩展特征:(1)向南通过喜马拉雅断裂系分布式扩展变形^[1-4];(2)向北通过古缝合系分步式俯冲扩展^[5];(3)向东通过不同阶段的走滑断裂的末端与相应的逆冲断裂相连,分步向外扩展^[6]。磷灰石裂变径迹(AFT)分析已成为研究地质体隆升与低温热历史的一种极为重要的工具,近年来逐渐成熟的碎屑颗粒热年代学对研究造山过程及山体隆升亦取得显著进展。笔者在从事四川1:5万然充乡等5幅区域地质调查(项目编号:212011120611)工作中,采用松潘—甘孜复合造山带中的三叠系西康群砂岩磷灰石裂变径迹数据,通过热史模拟,对青藏高原东缘甘孜地区的山体隆升过程作了进一步分析。

青藏高原东部隆升机制:袁学诚等^[7]认为青藏高原的整体隆升是由液压效应所造成,上部刚性地块沿深部(15~20 km)局部熔融形成的液压面滑动;Royden等^[8]根据下地壳流动挤出模式^[9-12],认为藏东地壳的加厚和地表的整体抬升是中下地壳物质从高原内部向东流动造成的;来庆洲等^[6]认为青藏高原的东部边界是分步向外扩展的,即上部地壳通过走滑断裂及与之相联的逆冲断裂联合作用,在中新世形成甘孜—理塘边界,在5 Ma迁移到龙门山边界。青藏高原东部隆升时间:众多研究表明,青藏高原东北缘在8 Ma时存在一次广泛的构造活动,如青藏高原东北缘的临夏盆地于8~5.4 Ma发生了快速的隆升剥露作用^[13],六盘山冲断带于8 Ma发生了快速的隆升剥露作用^[11],东部边界的龙门山在12~5 Ma发生了快速的剥蚀冷却^[14]。藏东义敦地块以东新生代以来经历了至少2期构造活动:分别为20~16 Ma以及约5 Ma以来^[6],王国灿等利用108个新生代岩体磷灰石裂变径迹年龄数据,将青藏高原东缘藏东及川滇西部地区划分出45~38、25~17、13~8和5 Ma以来4个强构造隆升期^[14],雷永良等将东喜马拉雅划分出11~5 Ma,5~3 Ma和3 Ma以来3个构造隆升期^[15],李勇等将青藏高原东缘新生代构造变形和隆升事件划分为5个构造层序,即TS1(65~55

Ma)、TS2(40~50 Ma)、TS3(23~16 Ma)、TS4(4.7~1.6 Ma)和TS5(0.74~0 Ma)^[16],四川1:25万阿坝县幅区调报告在邻区阿坝、壤塘依据岩体磷灰石裂变径迹划分出30~15 Ma、9~3 Ma 2次活动时期^[17]。

1 地质背景

本区大地构造背景:一级构造单元属泛华夏大陆晚古生代羌塘—三江构造区,二级构造单元属青藏高原东缘松潘—甘孜复合造山带Ⅱ2,跨越2个三级构造单元,分别为炉霍—道孚裂谷型冲断构造带Ⅱ2-2^[17]、雅江弧形滑脱—逆冲推覆构造带^[21](图1),炉霍—道孚裂谷型冲断构造带是从前人所称“雅江冒地槽褶皱带”^[19]或“雅江逆冲—滑脱叠置岩片”^[20]中解体出来的一个独立的三级构造单元,北东以色达断裂带(F1)被上覆马尔康逆冲—滑脱叠置岩片叠置于其上,南西以加里弄—木姑沟断裂带(F4)为界,逆冲于雅江弧形滑脱—逆冲推覆构造带^[12]之上。鲜水河走滑断层于新生代新近纪时期在甘孜于旦都附近将炉霍—道孚断裂带错断^[22-23],错距达40 km。地层区划属巴颜喀拉地层区之玛多—马尔康地层分区之雅江地层小区^[24],地层出露均为上三叠统西康群地层,为一套厚度巨大的浅变质碎屑复理石建造,细分为两河口组、格底村组、如年各组、新都桥组、侏倭组、杂谷脑组、扎尕山组,岩性组合为一套深灰色、灰色、灰黑色薄—厚层状粉砂岩、砂岩、变质砂岩和灰色、灰黑色绢云板岩、粉砂质板岩韵律互层夹灰岩、砂岩、砾岩等透镜体,属浊积岩相岩性特征,在断裂带(如F2、F3)附近产火山碎屑岩、基性火山熔岩等。岩浆岩出露较少,多呈岩株状侵位于三叠系地层中,岩石类型有石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、钾长花岗岩,花岗闪长岩锆石SHIMP年龄为(212±1.6) Ma,钾长花岗岩锆石SHIMP年龄为(213±2) Ma属印支期产物^[18]。

2 样品采集及测试分析

本次研究所需的样品采自于甘孜县夺多乡和大塘坝区,样品采集层位为三叠系西康群,岩性均为砂岩,其中DD001-1、DD002-1、DD009-1、DD007-1、

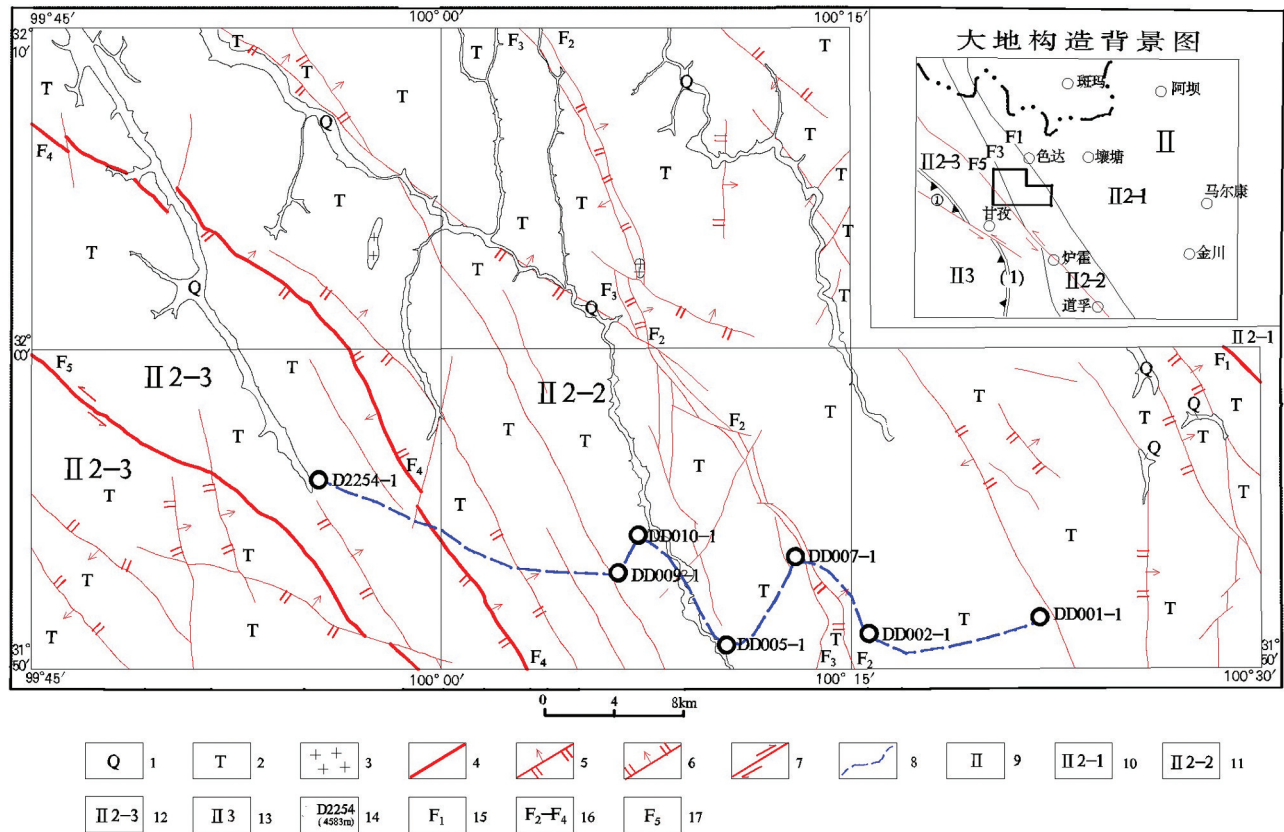


图1 区域地质构造背景图及采样平面图

1—第四系; 2—三叠系地层; 3—花岗岩; 4—区域断层; 5—逆断层; 6—正断层; 7—平移断层; 8—采样路线; 9—II—泛华夏大陆晚古生代羌塘—三江构造区; 10—马尔康弧形滑脱—逆冲推覆构造带; 11—炉霍—道孚裂谷型冲断构造带; 12—雅江弧形滑脱—逆冲推覆构造带; 13—德格—中甸陆块; 14—采样位置及高程; 15—色达断层带; 16—加里弄—木茹沟断裂带; 17—鲜水河走滑断裂; (1)—甘孜—壤塘结合带; ①—马尼干戈走滑断裂

Fig.1 Regional geological-tectonic map showing sampling sites

1—Quaternary; 2—Triassic; 3—Granite; 4—Regional fault; 5—Reverse fault; 6—Normal fault; 7—Strike-slip fault; 8—Sampling route; 9—II—Pan-Cathaysian continental late Paleozoic Qiangtang-rift type thrust zone; 10—Barkam arc slippage-thrust nappe tectonic belt; 11—Luhuo-Daofu rift type thrust tectonic belt; 12—Yajiang curved slip-thrust nappe tectonic belt; 13—Dege-Zhongdian land mass; 14—Sampling position and elevation; 15—Seda fault zone; 16—Jialinong-Murugou fault zone; 17—Xuanshuihe strike-slip fault; (1)—Garze-Rangtang junction; ①—Manigange strike-slip faults

DD010-1、DD005-1均采自于炉霍—道孚裂谷型冲断构造带南西侧加里弄—木茹沟断裂带内; D2254-1采自于石渠—雅江弧形滑脱—逆冲推覆构造带东侧加里弄—木茹沟断裂带和鲜水河断裂带之间。每个样品重约2 kg, 样品海拔高程使用便携式GPS逐样定位、标高, 并在1:2.5万地形图上进行高程校正。具体采样参数详见表1。

砂岩样品经粉碎后, 用标准重液和磁选技术分离出磷灰石单矿物, 将磷灰石单矿物制成聚四氟乙烯塑料样片, 再抛光为光薄片; 磷灰石在恒温20℃的5.5N HNO₃中蚀刻20 s; 分析方法采用外探测器法^[25]; 将低铀白云母紧贴于光薄片上, 与美国国家标

准局SRM962标准铀玻璃一起构成定年组件; 样品均置于反应堆内辐照, 之后将云母外探测器置于室温的40%HF中蚀刻40 min, 揭示诱发裂变径迹; 样品送中国原子能科学研究院492反应堆进行辐照; 裂变径迹统计用OLYMPUS偏光显微镜, 在放大1000倍浸油条件下完成; 裂变径迹年龄计算采用Zeta常数法。所有砂岩样品由中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室测试完成。

3 测试结果分析

根据测试结果(表2)和磷灰石裂变径迹长度直方图和放射图(图2)分析:

表1 磷灰岩裂变径迹样品采样位置一览

Table 1 Sampling sites for phosphorite fission track

样品编号		采样地点			岩石名称	海拔高程/m	构造单元
野外号	实验号	经度	纬度	地点			
2254-1	AP-2	99°55' 49"	31°56' 20"	大塘坝	砂岩	4583	雅江构造带
DD001-1	AP-3	100°16' 12"	31°52' 25"	夺多乡	砂岩	3589	
DD002-1	AP-4	100°16' 8"	31°50' 41"	夺多乡	砂岩	4106	
DD009-1	AP-5	100°6' 24"	31°53' 35"	夺多乡	砂岩	3812	
DD007-1	AP-6	100°12' 37"	31°53' 21"	夺多乡	砂岩	4654	
DD010-1	AP-7	100°7' 37"	31°54' 18"	夺多乡	砂岩	3654	
DD005-1	AP-8	100°10' 37"	31°52' 16"	夺多乡	砂岩	3922	

表2 磷灰岩裂变径迹测试数据

Table 2 Analytical data of phosphorite fission track samples

样品实验编号	N_c	$\rho d(N_d)/10^6 \text{cm}^{-2}$	$\rho s(N_s)/10^5 \text{cm}^{-2}$	$\rho i(N_i)/10^6 \text{cm}^{-2}$	$U/10^{-6}$	$P(\chi^2)/\%$	γ	$T/\text{Ma} \pm 1 \sigma$	$\Sigma(N_j)/\mu \text{m} \pm 1 \sigma$	$Ls \cdot d/\mu \text{m}$
AP-2	20	0.805(2149)	1.988(339)	0.852(1453)	13.2	42.6	0.919	33.4±2.3	14.03±0.12(81)	1.08
AP-3	26	0.810(2156)	1.977(351)	0.837(1456)	12.7	13.5	0.815	34.7±2.4	13.83±0.11(90)	1.17
AP-4	22	0.815(2162)	2.202(272)	0.726(896)	11.1	13.0	0.751	44.0±3.4	14.06±0.12(90)	1.14
AP-5	23	0.820(2169)	1.822(225)	0.701(866)	10.7	93.6	0.929	37.9±3.1	14.01±0.13(75)	1.11
AP-6	23	0.824(2175)	1.825(281)	0.782(1204)	11.9	35.6	0.653	34.2±2.6	13.79±0.12(84)	1.07
AP-7	22	0.829(2182)	1.324(233)	0.649(1143)	9.8	47.4	0.667	30.1±2.4	14.16±0.12(90)	1.12
AP-8	20	0.834(2188)	1.769(306)	0.669(1157)	10.0	10.3	0.757	39.2±2.9	13.82±0.13(90)	1.22

注: 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 万景林、谷元珠测试(2004); N_c —测试颗粒总数; ρd —铀标准玻璃的诱发径迹密度; N_d —铀标准玻璃的诱发径迹总数; ρs —磷灰石的自发径迹密度; N_s —磷灰石全部测试颗粒的自发径迹总数; ρi —低铀含量白云母外探测器的上诱发径迹密度; N_i —低铀含量白云母全部测试颗粒的诱发径迹总数; U —磷灰石平均铀含量; $P(\chi^2)$ — $(n-1)$ 自由度 χ^2 值的机率, n —测试颗粒数; γ — N_s 与 N_i 间相关系数; T —裂变径迹年龄; Σ —平均径迹长度; N_j —被测径迹长度标准高差; $Ls \cdot d$ —标准偏差。

从磷灰石裂变径迹长度直方图可以看出: 所测7个砂岩样品的磷灰石裂变径迹平均长度为13.96 μm , 标准偏差是0.12 μm , 各个样品所测磷灰石裂变径迹长度均小于原始磷灰石径迹长度(16.3±0.9 μm)。磷灰石裂变径迹退火特征研究结果表明, 快速冷却的岩石, 其磷灰石裂变径迹一般保持较长的径迹长度, 且具有窄而对称的正态分布, 而缓慢冷却的岩石样品, 其磷灰石裂变径迹长度缩短, 分布型式呈宽缓而不对称的正态分布, 经过再次热干扰的岩石, 其磷灰石裂变径迹长度为双峰式分布型式^[26]。7件样品磷灰石裂变径迹长度在直方图上呈单峰式分布, 总体上表现为无扰动基岩型, 说明该区的三叠系砂岩样品没有经历复杂的热历史, 且并未受到后期热事件(断裂带等)干扰, 推测长期处于单一冷却过程。

所测7件砂岩样品的磷灰石裂变径迹年龄为距今30.1~44.0 Ma, 标准偏差是2.3~3.4 Ma, 邓宾等(2008)综合整理出甘孜—松潘造山带碎屑岩磷灰石裂变径迹年龄为(31.8±4.2) Ma^[27], 与本次结果相符合。所得砂岩磷灰石裂变径迹年龄均小于或远小

于样品所在地层皆形成于距今220~200 Ma的晚三叠世中—晚期, 裂变径迹年龄均不受样品地层时代控制。7件砂岩样品磷灰石裂变径迹年龄总体变化范围不大, 表明区内具有相似的构造抬升格局; 所测裂变径迹年龄相差最小为2 Ma, 最大为14 Ma, 表明甘孜地区不同地方的隆升时间仍存在差异, 构造隆升具有不平衡性。裂变径迹年龄与样品高程不具有正相关性(图3)。

砂岩磷灰石裂变径迹分析中单颗粒磷灰石年龄的 $P(\chi^2)$ 检验值均大于5%, 相同样品不同颗粒年龄数据点落在标准化年龄±2范围内(图2), 说明样品颗粒径迹年龄属同期年龄、单一成因并经历了相似的最后热事件^[28-30]。作者结合区域地质背景综合分析, 推测喜马拉雅高原抬升运动启动了本区砂岩裂变径迹变化系统。

4 热史模拟

通过对砂岩磷灰石裂变径迹分析, 作者采用 Ketcham 等人的退火模型^[31]和蒙特卡罗(Monte Carlo)逼近法, 并借助于 HeFTy 软件(HeFTy_

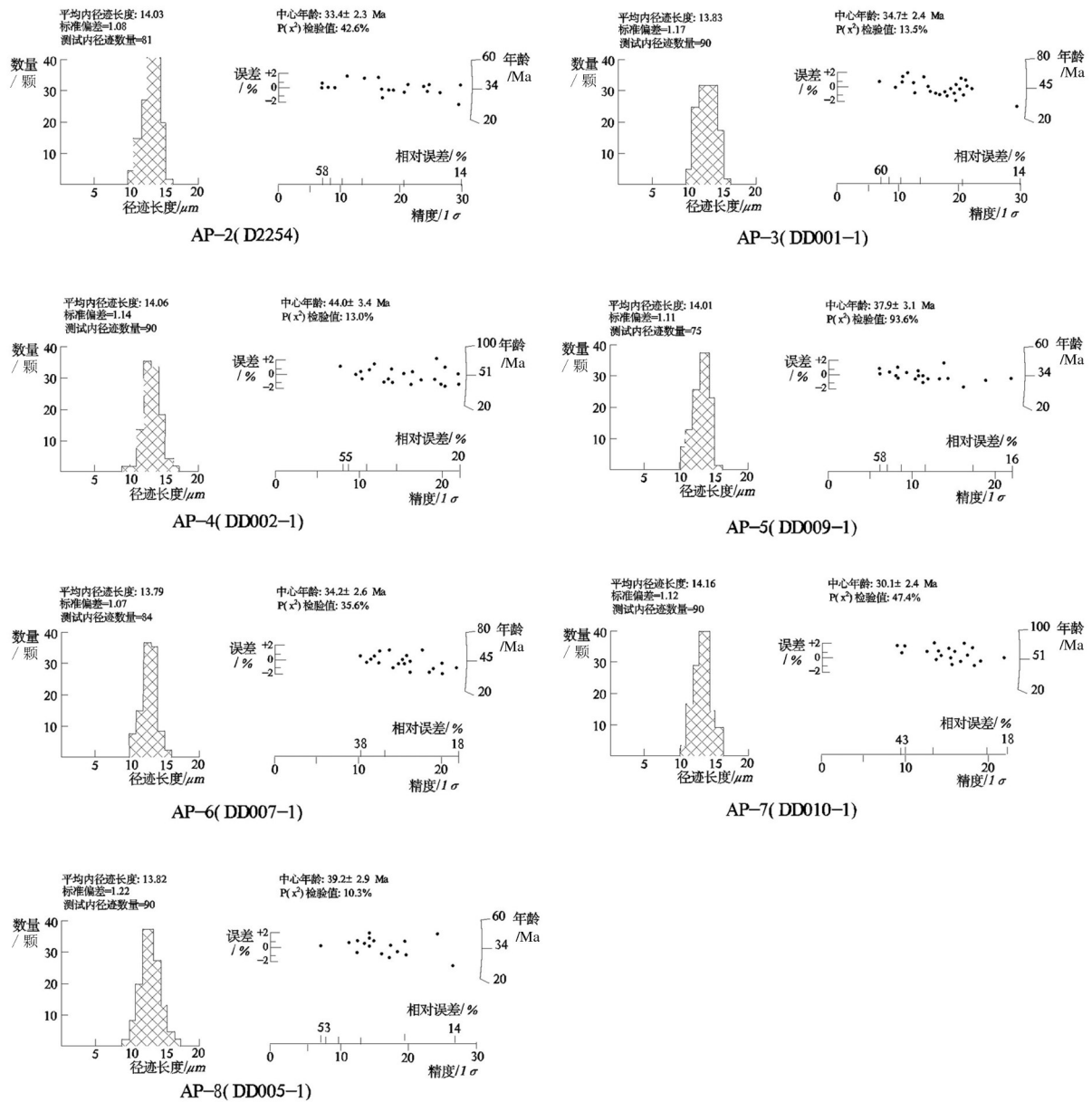


图2 裂变径迹长度直方图和放射图
 左侧为裂变径迹长度直方图; 右侧为放射图
 Fig.2 Histogram and radiation of fission track length
 Left: Length Histogram; Right: Radial Plot

1.7.4), 根据获得的砂岩磷灰石裂变径迹数据和样品所处的大地构造背景确定反演模拟条件, 对7件样品分别进行了热历史定量模拟, 得到7件样品的时间-温度图, 模拟方法见沈传波(2006)^[32]。同时, 得到了K-S与GOF检验值, K-S检验值表示裂变径迹长度模拟值与观测值的吻合程度, GOF检验值表示裂变径迹年龄模拟值与观测值的吻合程度。若

K-S与GOF检验值均大于5%时, 表明该次热史模拟“可以接受”; 二者均超过50%, 则表示该次模拟结果是“高质量的、可靠的”。

由于磷灰石裂变径迹热史模拟具有多种可能性, 为了提高热史模拟的可靠性, 即使K-S和GOF检验值较高, 作者以自身对青藏高原东部构造隆升问题的认识为基础, 在模拟过程中选定了模拟边界

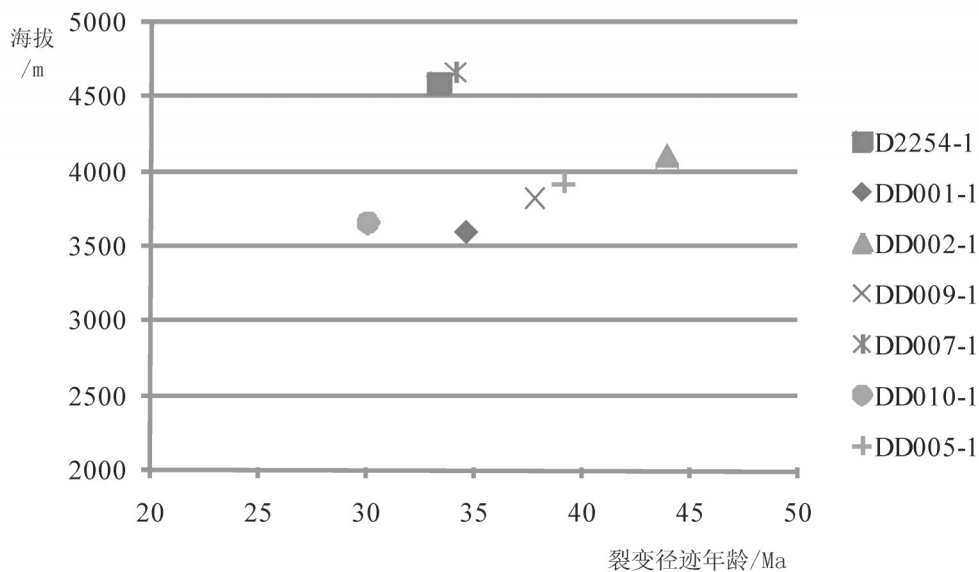


图3 裂变径迹年龄与高程的关系
Fig.3 Relation of fission track age and height

条件。本次热史模拟K-S和GOF检验值均大于50%(K-S和GOF检验值均在90%左右),表明本次裂变径迹的热史模拟是高质量的、可靠的。

通过7件砂岩样品热史模拟(图4),获得了以下3点新认识:

(1)青藏高原东缘甘孜地区在新生代古近纪以来经历了相似的构造演化过程,构造抬升活动均可划分为4个阶段:平静或缓慢隆升→急速隆升→平静或缓慢隆升→急速隆升。

(2)样品热史模拟图和采样平面图显示,样品虽然相距不远(相距最近的约3.9 km,最远的相距约73 km),然而各个样品4个阶段的冷却速率、抬升速率和抬升量存在差异(表3),所测磷灰石裂变径迹表观年龄也存在一定的偏差(表2),表明甘孜地区在新生代以来,构造隆升具有不平衡性、阶段性、地区性差异,冷却速率、抬升速率和抬升幅度也存在偏差;这一结果与柏道远对青藏高原北缘昆仑山中段提出的“差异隆升”概念相似^[33]。据王国灿等^[14]收集青藏高原周缘山系的572个新生代磷灰石裂变径迹年龄数据分析,并结合西昆仑、阿尔金、青藏高原东北缘、喜马拉雅地区、冈底斯和藏东—川滇西部6个区域对比研究表明,青藏高原强隆升剥露阶段或强构

造变形准同时性的框架下,不同部位不同隆升阶段的构造响应表现形式不尽相同。

(3)甘孜地区在喜马拉雅期经历了2次非常明显的强构造隆升阶段,第1次强构造隆升发生在古近纪46~30 Ma,响应了青藏高原新特提斯洋的闭合,印度板块与欧亚板块发生“硬碰撞”^[34],与潘桂棠划分的“俯冲碰撞隆升”阶段吻合^[35],与丁林和钟大赉总结出的喜马拉雅大拐弯时间一致^[37];第2次强构造隆升发生在新近纪9 Ma以来,响应了青藏高原整体隆升,鲜水河断裂的形成及其第四纪强烈左旋走滑活动^[21],该期东缘地区断裂活动普遍增强,如龙门山断裂向东强烈逆冲以及九龙花岗岩和贡嘎山花岗岩快速冷却^[6]等。两次强构造隆升平均抬升速率和平均抬升量分别为1261 m/Ma(最高可达2433 m/Ma)、2634 m和388 m/Ma(最高可达1067 m/Ma)、1043 m。由于隆升具有不平衡性、阶段性、地区性差异,我们将第2次隆升又细分为9~6 Ma和6 Ma以来,其中在9~6 Ma间存在差异不均匀局部隆升;在6 Ma以来普遍发生急速隆升;平均抬升速率为449 m/Ma,最大可达1067 m/Ma。根据隆升速率对比图分析(图5),甘孜地区在新近纪9 Ma以来隆升速度明显加快,与整个青藏高原东缘地区新生代喜

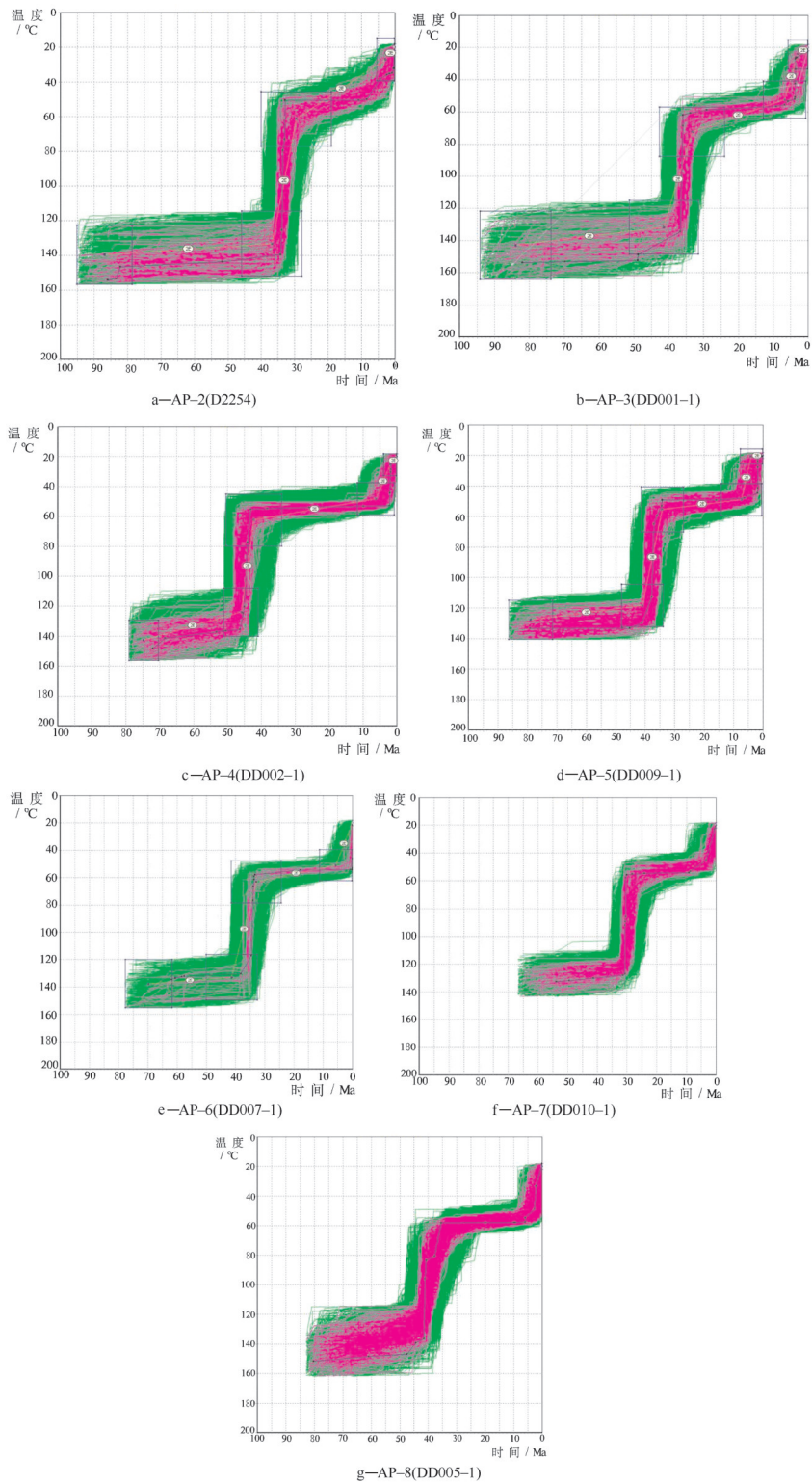


图4 热史模拟图

绿色区域: 模拟结果可以接受; 红色区域: 模拟结果较好; 黑色线条: 最佳模拟结果

Fig.4 Thermal history simulation diagram

Green areas: acceptable simulation results; Red areas: Good simulation results; Black lines: The best results

表3 样品隆升参数
Table 3 Sample uplift parameters

样号	各项参数平均值	平静或缓慢阶段	急速隆升	平静或缓慢阶段	急速隆升	备注
AP-2(DD2254)	冷却速率/(°C/Ma)	0.2	45	0.04	3.2	(A)
	抬升速率/(m/Ma)	7.8	1500	1.2	108	
	抬升量/m	467	300	33	967	
AP-3(DD001-1)	冷却速率/(°C/Ma)	0.42	72	0.31	8	
	抬升速率/(m/Ma)	14.1	2400	10.4	267	
	抬升量/m	633	2400	333	1067	
AP-4(DD002-1)	冷却速率/(°C/Ma)	0.5	40.5	0.05	16.5	
	抬升速率/(m/Ma)	17	1350	1.6	550	
	抬升量/m	433	2700	67	1100	
AP-5(DD009-1)	冷却速率/(°C/Ma)	0	8.5	0.15	12	
	抬升速率/(m/Ma)	0	283	5	400	
	抬升量/m	0	2833	167	800	
AP-6(DD007-1)	冷却速率/(°C/Ma)	0.2	14.4	0.09	32	
	抬升速率/(m/Ma)	6.68	480	3.1	1067	
	抬升量/m	167	2400	100	1067	
AP-7(DD010-1)	冷却速率/(°C/Ma)	0.35	73	0.19	3.4	(B)
	抬升速率/(m/Ma)	11.6	2433	6.3	115	
	抬升量/m	267	2433	133	1033	
AP-8(DD005-1)	冷却速率/(°C/Ma)	0.32	11.4	0	6.3	
	抬升速率/(m/Ma)	10.5	381	0	211	
	抬升量/m	400	2667	0	1267	

注: (A)—1 Ma 以来, 可达 400; (B)—3 Ma 以来, 可达 250(古地温梯度按平均地温梯度 30°C/km 计算, 地表温度取 20°C)。

马拉雅期高原隆升明显加快特征一致^[21, 36-41]。

5 结 语

新生代以来, 由于特提斯洋沿雅鲁藏布江一线的开启与闭合, 印度板块与欧亚板块在 60~50 Ma 发生相互碰撞-挤压^[42], 使亚洲大陆增生了喜马拉雅地体, 而且使亚洲大陆发生向东与南东的挤出, 同时形成内部高原地貌和周缘新生代造山带。邓宾等(2008)依据磷灰石裂变径迹年龄由西向东逐渐增大、径迹长度逐渐减小, 认为自羌塘-冈底斯构造带-松潘-甘孜褶皱构造带-龙门山构造带-川西前陆盆地从西向东构筑成一个有机联系的挤压-抬升体系^[27], 这一结果和来庆洲等^[6]青藏高原东部边界扩展隆升机制不尽相同。由于新生代的这一抬升-剥露过程是不均匀的、阶段性的和地区性差

异, 地处松潘-甘孜复合造山带的甘孜地区, 在喜马拉雅期经历了 2 次显著的构造隆升事件, 第 1 次强构造隆升发生在古近纪 46~30 Ma, 平均抬升速率为 1261 m/Ma, 最高可达 2433 m/Ma, 平均抬升量为 2634 m, 最高可达 2833 m。之后又经历了 (25±5) Ma 的相对平稳期, 整个甘孜地区处于缓慢-平静的隆升阶段。第 2 次强构造隆升发生在新近纪 9 Ma 以来, 平均抬升速率为 388 m/Ma, 且在上新世以来隆升速率随着年龄逐渐加快, 抬升速率最高可达 1067 m/Ma; 平均抬升量为 1043 m、最高可达 1267 m, 这一事件与青藏高原东部向东扩展相呼应。2 个强构造隆升期均表现为不均匀性、阶段性、地区性隆升特点, 冷却速率、抬升速率和抬升幅度也存在偏差。

致谢: 感谢川西北地质队 1:5 万然冲区调项目

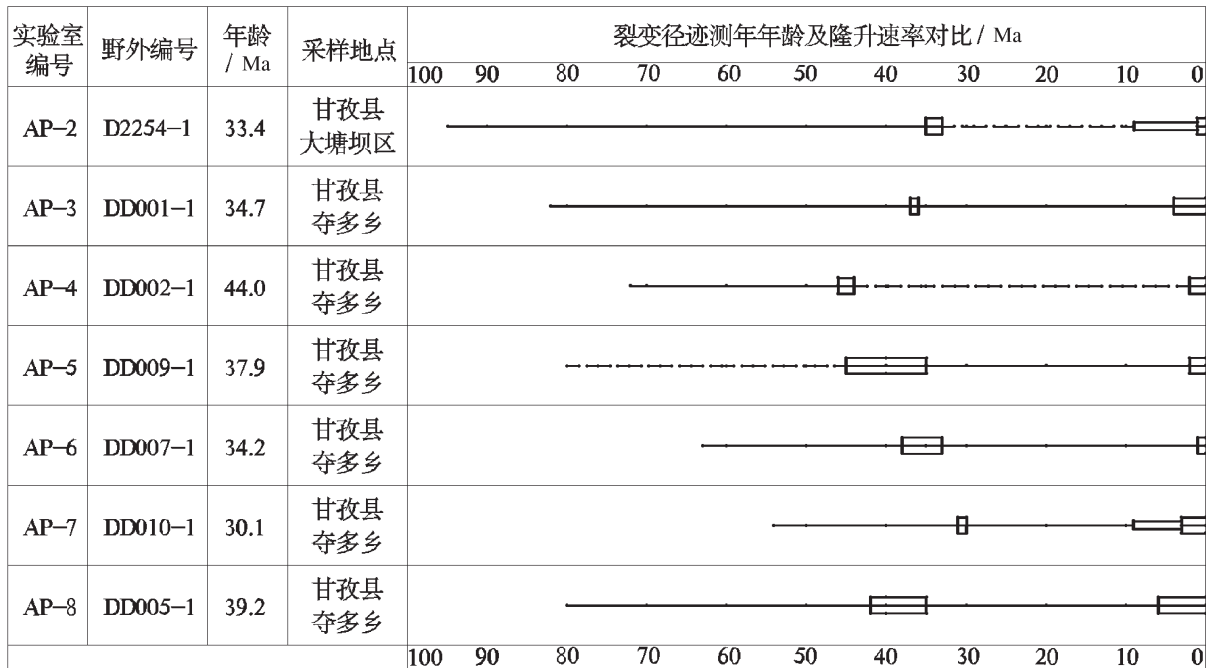


图5 磷灰石裂变径迹热模拟隆升速率对比图

说明: 图中虚线代表相对平静阶段, 单实线代表缓慢隆升阶段, 双实线代表快速隆升阶段; 叁实线代表急速隆升阶段

Fig.5 Comparative diagram of simulated apatite fission track uplift rates

Dotted line represents the relatively calm period, single solid line represents the slowly uplifting stage, double solid line represents the phase of rapid uplift; three solid lines represent the phase of rapid uplift

陈明、秦宇龙等提供了丰富的野外资料, 感谢中石化北京石油勘探开发研究院李双剑博士帮助进行了热演化模拟, 感谢武汉沈传波博士热史模拟指导, 感谢评审专家及编辑部杨艳老师对本文提出的宝贵意见。

参考文献(References):

[1] Ding L, Kapp P, Wan X Q. Paleocene–Eocene record of ophiolite obduction and initial Indian–Asia collision, south central Tibet[J]. *Tectonics*, 2005, 24(3): 1–18.

[2] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan–Tibetan orogen[J]. *Ann. Rev. Earth Planet Sci.*, 2000, 28: 211–280.

[3] Bouchez J L, Pecher A. The Himalayan main central thrust pile and its quartz–rich tectonites in central Nepal[J]. *Tectonophysics*, 1981, 78: 23–50.

[4] Artil K. Origin of the inverted metamorphism of the lower Himalayas, central Nepal[J]. *Tectonophysics*, 1983, 95: 43–60.

[5] Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. Geology– oblique stepwise and growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*, 2001, 294: 1671–1677.

[6] 来庆洲, 丁林, 王宏伟, 等. 青藏高原东部边界扩展过程的磷灰石裂变径迹热历史制约[J]. *中国科学(D辑)*, 2006, 36 (9): 785–796. Lai Qingzhou, Ding Lin, Wang Hongwei, et al. Eastern Qinghai–Tibet plateau boundary extension process of apatite fission track thermal history [J]. *Science in China (Series D)*, 2006, 36 (9): 785–796(in Chinese).

[7] 袁学诚, 李廷栋, 肖序常, 等. 青藏高原岩石圈三维结构及高原隆升的液压机模型[J]. *中国地质*, 2006, 33(4): 711–729. Yuan Xuecheng, Li Tingdong, Xiao Xuchang, et al. 3D lithospheric structure of the Qinghai–Tibet Plateau and hydraulic pressure machine model of the plateau uplift[J]. *Geology in China*, 2006, 33 (4): 711–729(in Chinese with English abstract).

[8] Royden L H, Burchfiel B C, King R W, et al. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet[J]. *Science*, 1997, 276: 788–790.

[9] Kirby E, Reinecs P W, Krol M A, et al. Late Cenozoic evolution of the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from ⁴⁰Ar/³⁹Ar and (U–Th)/He thermochronology[J]. *Tectonics*, 2002, 21: 1: 20

[10] Clark M K, House M A, Royden L H, et al. Late Cenozoic uplift of southeastern Tibet[J]. *Geology*, 2005, 33: 525–528.

[11] Zheng DW, Zhang PZ, Wan JL, et al. Rapid exhumation at ~8Ma on the Liupan Shan thrust fault from apatite fission– track

- thermochronology; Implications for growth of the northeastern Tibetan Plateau margin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 48: 198–208.
- [12] Enkelmann E, Ratschbacher L, Jonckheere R, et al. Cenozoic exhumation and deformation of northeastern Tibet and the Qinling; Is Tibetan lower crustal flow diverging around the Sichuan Basin? [J]. *GSA Bulletin*, 2006, 118(5/6): 651–671.
- [13] 王伟涛. 宁夏南部新生代盆地沉积演化及其对青藏高原东北角构造变形的响应[D]. 中国地震局地质研究所, 2008.
- Wang Weitao. Sedimentary Responses to the Cenozoic Tectonic Evolution of the Northeastern Corner of the Tibetan Plateau[D]. China Seismological Bureau of Geological Research Institute, 2008(in Chinese with English abstract).
- [14] 王国灿, 曹凯, 等. 青藏高原新生代构造隆升阶段的时空格局[J]. *中国科学*, 2011, 41(3): 332–349.
- Wang Guochan, Cao Kai, et al. The Cenozoic tectonic uplift of the Qinghai–Tibet plateau phase pattern of space and time [J]. *Science in China*, 2011, 41(3): 332–349(in Chinese).
- [15] 雷永良, 钟大赉, 季建清, 等. 东喜马拉雅构造结更新世两期抬升—剥露事件的裂变径迹证据[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(4): 584–590.
- Lei Yongliang, Zhong Dala, Ji Jianqing, et al. Fission track evidence for two pleistocene uplift–exhumation events in the eastern Himalayan syntaxis[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 584–590(in Chinese with English abstract).
- [16] 李勇, 侯中健, 司光影, 等. 青藏高原东缘新生代构造层序与构造事件[J]. *中国地质*, 2002, 29(1): 30–36.
- Li Yong, Hou Zhongjian, Si Guangying, et al. Cenozoic tectonic sequence and tectonic events at the eastern margin of the Qinghai Tibet plateau[J]. *Geology in China*, 2002, 29(1): 30–36(in Chinese with English abstract).
- [17] 四川省地质调查院, 四川省地矿局川西北地质队. 四川1:25万阿坝县幅区域地质调查报告[R]. 2004.
- Geology Investigation Institute of Sichuan Province, Mine Bureau of Sichuan Province Northwest Sichuan Geological Team. 1: 250000 in Sichuan Province Aba County of Regional Geological Survey Report[R]. 2004(in Chinese with English abstract).
- [18] 四川省地质调查院. 四川省1:5万然充乡、仁达乡、蒙哥查理、夺多乡、前进乡区域地质调查报告[R]. 2012.
- Geology investigation Institute of Sichuan Province. 1: 50000 in Sichuan Province Ranchong, Renda, Menggechali, Duoduo, Qianjin of Township Regional Geological Survey Report[R]. 2012 (in Chinese with English abstract).
- [19] 四川省地质矿产局. 四川省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 1–730.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province. Regional Geology of Sichuan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 1–730 (in Chinese with English abstract).
- [20] 许志琴, 等. 中国松潘—甘孜造山带的造山过程[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 1–190.
- Xu Zhiqing, et al. Orogenic Belt of Orogenic Process in Songpan–Ganzi, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1–190(in Chinese with English abstract).
- [21] 中国地质调查局, 成都地质矿产研究所. 1:150万青藏高原及邻区地质图说明书[M]. 成都地图出版社, 2004.
- China Geological Survey, Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources. 1:1.50000 Million on the Tibetan Plateau and its Adjacent Area Geological Map Specification[M]. Chengdu Map Publishing House, 2004(in Chinese with English abstract).
- [22] 张岳桥, 陈文, 杨农. 川西鲜水河断裂带晚新生代剪切变形⁴⁰Ar/³⁹Ar测年及其构造意义[J]. *中国科学(D辑)*, 2004, 34: 613–621.
- Zhang Yueqiao, Chen Wen, Yang Nong, et al. Western Sichuan Xuanshuihe river fault zone late Cenozoic shear deformation age test of ⁴⁰Ar/³⁹Ar and its tectonic significance[J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 34: 613–621(in Chinese).
- [23] 王宗秀, 许志琴, 杨天南, 等. 川西鲜水河断裂带变形机制研究: 一个浅层次高温韧性移剪切带[J]. *中国区域地质*, 1996, 3: 244–251.
- Wang Zongxiu, Xu Zhiqing, Yang Tiannan, et al. Study of deformation mechanism of the xianshui river fault zone—a shallow–level, high–temperature ductile shear zone[J]. *Regional Geology of China*, 1996, 3: 244–251(in Chinese with English abstract).
- [24] 四川省地质矿产局. 四川省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 1–371.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province. Rock Strata in Sichuan Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997: 1–371(in Chinese with English abstract).
- [25] Gleadow A J W, Duddy I R. A natural long–term annealing experiment for apatite[J]. *Nuclear Tracks and Radiation*, 1981, 4 (1/2): 169–174.
- [26] 拜永山, 任二峰, 范桂兰, 等. 青藏高原西北缘祁漫塔格山中新生代快速抬升的磷灰石裂变径迹证据[J]. *地质通报*, 2008, 27: 1044–1048.
- Bai Yongshan, Ren Erfeng, Fan Guilan, et al. Apatite fission track evidence for the Miocene rapid uplift of the Qimantag Mountains on the northwestern margin of the Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(7): 1044–1048(in Chinese with English abstract).
- [27] 邓宾, 刘树根, 李智武, 等. 青藏高原东缘及四川盆地晚中生代以来隆升作用对比研究[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2008, 35(4): 477–486.
- Deng Bin, Liu Shugen, Li Zhiwu, et al. A comparative study of the late Mesozoic uplifting in the eastern margin of Qinghai–Tibet Plateau and Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2008,

- 35(4): 477–486(in Chinese with English abstract).
- [28] Yuan W M, Carter A, Dong J Q, et al. Mesozoic– Tertiary exhumation history of the Altai Mountains, northern Xinjiang, China: New constraints from apatite fission track data[J]. *Tectonophysics*, 2006, 412: 183–193.
- [29] Galbraith R F. On statistical models for fission track counts[J]. *Math. Geol.*, 1981, 13: 471–488.
- [30] 沈传波, 梅廉夫, 徐振平, 等. 大巴山中—新生代隆升的裂变径迹证据[J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 2901–2910.
Shen Chuanbo, Mei Lianfu, Xu Zhenping, et al. Cenozoic and Mesozoic uplift of the fission track evidence in Dabashan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(11): 2901– 2910(in Chinese with English abstract).
- [31] Ketcham R A, Donelick R A, Donelick M B. AFT Solve: A program for multi- kinetic modeling of apatite fission- track data[J]. *Geological Materials Research*, 2000, 2(1): 1–32 .
- [32] 沈传波, 梅廉夫, 刘麟, 等. 新疆博格达山中新生代隆升—热历史的裂变径迹证据[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(3): 87–92.
Shen Chuanbo, Mei Lianfu, Liu lin, et al. Evidence from apatite and zircon fission track analysis for Mesozoic– Cenozoic uplift thermal history of Bogeda Mountain of Xinjiang, Northwest China[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2006, 26(3): 87–92 (in Chinese with English abstract).
- [33] 柏道远, 孟德保, 刘耀荣, 等. 青藏高原北缘昆仑山中段构造隆升的磷灰石裂变径迹记录[J]. *中国地质*, 2003, 30(3): 240–246.
Bai Daoyuan, Meng Debao, Liu Yaorong, et al. Apatite fission– track records of the tectonic uplift of the central segment of the Kunlun Mountains on the northern margin of the Qinghai– Tibet Plateau[J]. *Geology in China*, 2003, 30(3): 240– 246(in Chinese with English abstract).
- [34] 莫宣学, 赵志丹, 周肃, 等. 印度—亚洲大陆碰撞的时限[J]. *地质通报*, 2007, 26(10): 1240–1244.
Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Zhou Su, et al. On the timing of India–Asia continental collision[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(10): 1240–1244 (in Chinese with English abstract).
- [35] 潘桂棠, 王培生, 等. 青藏高原新生代构造演化[M]. 北京: 地质出版社, 1990, 1–165.
Pan Guitang, Wang Peisheng, et al. *The Cenozoic Tectonic Evolution of the Qinghai– Tibet Plateau*[M]. BeiJing: Geological Publishing House, 1990, 1–165(in Chinese with English abstract)
- [36] 丁林, 来庆洲. 冈底斯地壳碰撞前增厚及隆升的地质证据: 岛弧拼贴对青藏高原隆升及扩展历史的制约[J]. *科学通报*, 2003, 48(8): 836–842.
Ding Lin, Lai Qinzhou. The earth's of Gangdisi crust thickening and uplift of the geological evidence before collision: The restriction of island and arc collage to Qinghai– Tibet plateau uplift and extension of history[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(8): 836–842(in Chinese).
- [37] 丁林, 钟大赉, 潘裕生, 等. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹证据[J]. *科学通报*, 1995, 40(16): 1497–1500.
Ding Lin, Zhong Dalai, Pan Yusheng, et al. The eastern Himalayan tectonic since Pliocene rapid uplift of the fission track evidence [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40(16): 1497– 1500 (in Chinese).
- [38] Galbraith R F. On statistical models for fission track counts[J]. *Math. Geol.* 1981, 13: 471–478.
- [39] 张毅, 李勇, 周荣军, 等. 晚新生代以来青藏高原东缘的剥蚀过程: 来自裂变径迹的证据[J]. *沉积与特提斯地质*, 2006, 26(1): 97–102.
Zhang Yi, Li Yong, Zhou Rongjun, et al. The denudation of the eastern margin of the Qinghai– Xizang Plateau since the Late Cenozoic: Evidence from the fission– track ages[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2006, 26(1): 97– 102(in Chinese with English abstract).
- [40] 柏道远, 贾宝华, 王先辉, 等. 青藏高原隆升过程的磷灰石裂变径迹分析方法[J]. *沉积与特提斯地质*, 2004, 24(1): 35–40.
Bai Daoyuan, Jia Baohua, Wang Xianhui, et al. The apatite fission track analysis applied to the exploration of the uplifting of the Qinghai– Xizang Plateau [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2004, 24(1): 35–40(in Chinese with English abstract).
- [41] 江万, 莫宣学, 赵崇贺, 等. 矿物裂变径迹年龄与青藏高原隆升速率研究[J]. *地质力学学报*, 1998, 4(1): 12–18.
Jiang Wan, Mo Xuanxue, Zhao Chonghe, et al. Mineral fission– track dates and research on uplifting velocity of qinghai– xizang plateau [J]. *Journal of Geomechanics*, 1998, 4(1): 12– 18(in Chinese with English abstract).
- [42] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 青藏高原与大陆动力学——地体拼合、碰撞造山及高原隆升的深部驱动力[J]. *中国地质*, 2006, 33(2): 221–238.
Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, et al. The Qinghai– Tibet plateau and continental dynamics: A review on terrain tectonics, collisional orogenesis, and processes and mechanisms for the rise of the plateau[J]. *Geology in China*, 2006, 33(2): 221– 238(in Chinese with English abstract).