

东构造结那木拉断裂带上新世以来强烈活动的年代学证据

涂继耀^{1,2}, 季建清¹, 钟大赉³, 孙东霞⁴, 周 晶¹

TU Jiyao^{1,2}, JI Jianqing¹, ZHONG Dalai³, SUN Dongxia⁴, ZHOU Jing¹

1. 北京大学地球与空间科学学院造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871;

2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;

3. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;

4. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

1. *Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;*

2. *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China;*

3. *State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*

4. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*

TU J Y, JI J Q, ZHONG D L, et al., 2021. The strong activities of the Namula fault zone in the eastern Himalayan syntaxis since Pliocene, constraints from thermochronological data [J]. Journal of Geomechanics, 27 (4): 679–690. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.04.056

Abstract: To reveal the strong activities of the Namula fault zone in the eastern Himalayan syntaxis since Pliocene, this paper reports biotite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and apatite fission track ages of 3 rock samples from the Namula fault zone, and quantitatively interpret these ages and the published ages from the adjacent areas, using a modeling code “Pecube”. Biotite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages range from 4.44 ± 0.71 Ma to 3.45 ± 0.24 Ma, and apatite fission track ages range from 3.7 ± 0.4 Ma to 1.8 ± 0.2 Ma. The ages and simulation results show that, prior to ~ 3 Ma the highest exhumation rate had been located in the south of the Namula fault zone and was about 2.5 km/Ma, and the Namula fault zone had a motion feature of normal fault; Since ~ 3 Ma the highest exhumation rate have been located in the north of the Namula fault zone and was about 1.3 km/Ma, and the Namula fault zone had a motion feature of thrust fault. The evolution of the Namula fault zone’s motion, probably have resulted from the south to north migration of the fast crust exhumation area in the eastern Himalayan syntaxis since ~ 8 Ma.

Key words: the Namula fault zone; the eastern Himalayan syntaxis; biotite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$; apatite fission track

摘 要: 为揭示东喜马拉雅构造结那木拉断裂带上新世以来强烈活动特征, 对采集自那木拉断裂带的三件基岩样品进行黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、磷灰石裂变径迹两种热年代学方法测年; 并利用“Pecube”软件对测得年龄数据及断裂带两侧已发表年龄数据进行定量模拟计算。测试结果显示黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄范围为

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41603055); 中国地震局地球物理研究所基本科研业务费专项 (DQJB20X10)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41603055) and the Special Fund of the Institute of Geophysics, China Earthquake Administration (Grant No. DQJB20X10)

第一作者简介: 涂继耀 (1988—), 男, 助理研究员, 从事构造地质学与同位素年代学研究。E-mail: 406962923@qq.com

收稿日期: 2021-05-11; **修回日期:** 2021-06-25; **责任编辑:** 范二平

引用格式: 涂继耀, 季建清, 钟大赉, 等, 2021. 东构造结那木拉断裂带上新世以来强烈活动的年代学证据 [J]. 地质力学学报, 27 (4): 679–690. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.04.056

4.44±0.71 Ma~3.45±0.24 Ma, 磷灰石裂变径迹年龄范围为 3.7±0.4 Ma~1.8±0.2 Ma。年龄数据及其模拟计算结果表明, 约 3 Ma 以前那木拉断裂带南侧地壳隆升最快, 隆升速率约 2.5 km/Ma, 断裂带以正断层运动特征为主; 约 3 Ma 以来那木拉断裂带北侧地壳隆升最快, 约为 1.3 km/Ma, 断裂带以逆断层运动特征为主。那木拉断裂带运动特征变化可能与约 8 Ma 以来东喜马拉雅构造结快速地壳隆升剥露区域由南向北逐渐迁移有关。

关键词: 那木拉断裂带; 东喜马拉雅构造结; 黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar; 磷灰石裂变径迹

中图分类号: P546 **文献标识码:** A

东喜马拉雅构造结位于喜马拉雅造山带东端点, 是印度板块向欧亚板块俯冲碰撞前缘, 也是青藏高原隆升最快的区域之一 (张佳佳等, 2018; 郑文俊等, 2019; 白永健等, 2019)。对于东喜马拉雅构造结内部板片俯冲过程的研究, 是理解整个喜马拉雅造山带的关键。已有研究表明, 东喜马拉雅构造结内的板片俯冲过程, 是通过一系列平行的、近东西走向、向北倾逆冲断裂带的逆冲运动来实现的 (Ding et al., 2001; Zeitler et al., 2014; Bracciali et al., 2016)。那木拉断裂带就是这一系列逆冲断裂带之一, 该断裂带位于东喜马拉雅构造结内部、南迦巴瓦峰南侧, 是东喜马拉雅构造结内部重要的岩性单元分界。对于那木拉断裂带的几何学、运动学特征, 相关学者做过一定研究 (Liu and Zhong, 1997; Ding et al., 2001; Craw et al., 2005; Zeitler et al., 2014; Bracciali et al., 2016); 但对于断裂带活动的年代学特征, 目前仍缺乏研究工作。文章对采集自那木拉断裂带的基岩样品进行两种热年代学方法测年, 并利用“Pecube”软件对测得的年龄数据及断裂带两侧已发表年龄数据进行定量模拟计算, 基于年龄数据和模拟计算结果, 揭示那木拉断裂带上新世以来活动特征, 并进一步对整个东喜马拉雅构造结地区构造演化过程进行讨论。

1 研究背景

1.1 大地构造单元及岩性组成

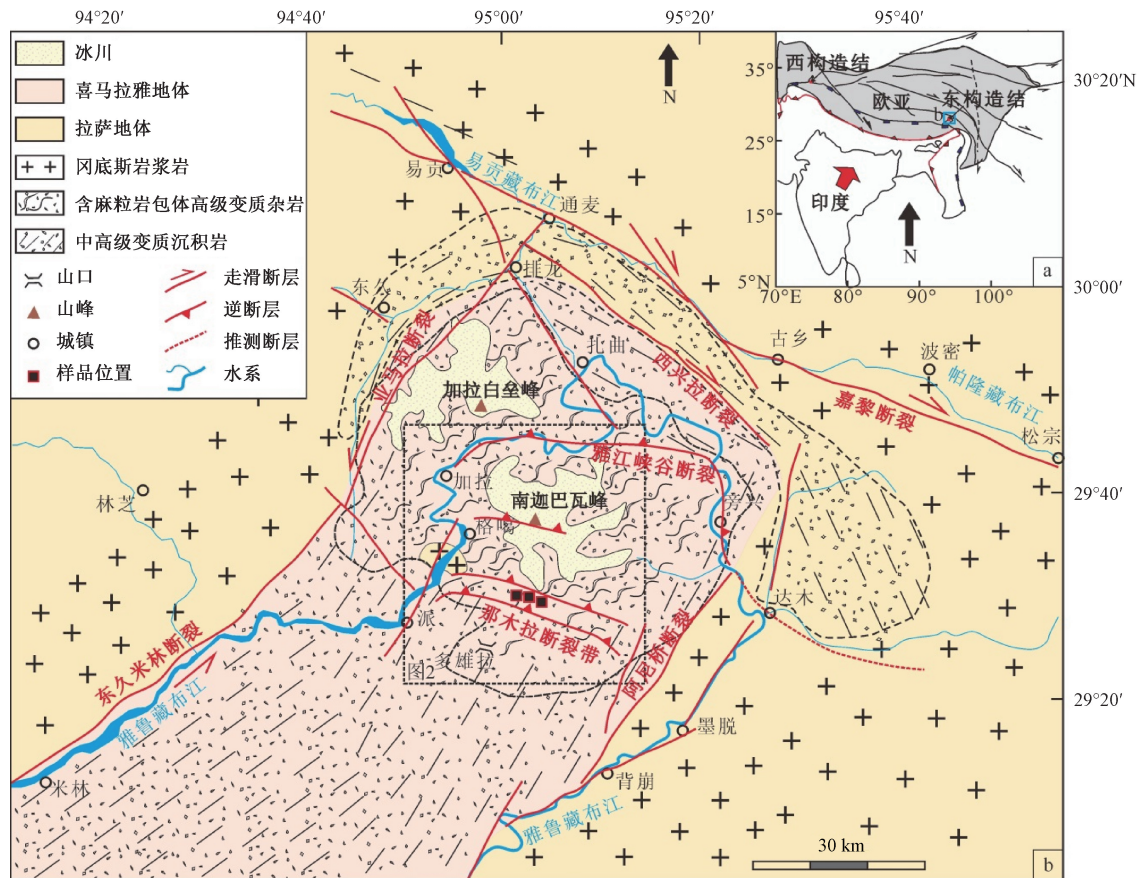
东喜马拉雅构造结位于青藏高原东南缘, 构造结及其周边区域主要由两个大地构造单元组成, 其周边为拉萨地体, 其内部为喜马拉雅地体 (图 1)。拉萨地体为欧亚板块的一部分, 主要包括元古代的变质基底、古生代到中生代的沉积盖层以及中生代到新生代侵位的冈底斯岩浆岩带 (Yin and Harrison, 2000; Yin, 2006)。在东喜马拉雅构

造结周边主要出露的是冈底斯岩浆岩带 (图 1)。冈底斯岩浆岩带是一条由新特提斯洋向北俯冲形成的岛弧岩浆岩带 (Allégre et al., 1984; Yin and Harrison, 2000; Chung et al., 2005; Wen et al., 2008)。

东喜马拉雅构造结内部的喜马拉雅地体是印度板块的北部边缘, 主要由三个岩性单元组成。第一个岩性单元是一套经历绿片岩相到角闪岩相变质的沉积岩地层, 其中的岩石类型包括石榴黑云片岩、黑云绿帘片岩、矽线石石榴黑云片麻岩、黑云角闪斜长片麻岩以及黑云斜长角闪岩 (章振根等, 1992; 劳雄, 1995; Burg et al., 1998)。这一套变质沉积岩中的继承锆石年龄分布在太古代到早古生代的广泛区间内, 并且具有 2490 Ma、1640 Ma、990 Ma 和 480 Ma 四个年龄峰值, 代表了印度大陆基底的结晶年龄 (Zhang et al., 2012)。

第二个岩性单元是含麻粒岩的变质杂岩体。这一变质杂岩体由泥质片麻岩以及米级尺度的基性麻粒岩透镜体组成。基性麻粒岩的峰期变质矿物组合为石榴石+单斜辉石+金红石+石英±斜方辉石±斜长石 (Ding et al., 2001)。该杂岩体中的基性麻粒岩记录了至少两次 800 °C 左右的变质作用: 第一次的变质压力较高为 $1.4 \times 10^6 \sim 1.5 \times 10^6$ kPa, 第二次压力为 $0.8 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^6$ kPa (钟大赉和丁林, 1995; 丁林和钟大赉, 1999)。Burg et al. (1998) 提供了一个 ~16.5 Ma 的 Sm-Nb 年龄作为该麻粒岩相变质事件的年龄。Ding et al. (2001) 对这一套基性麻粒岩进行了锆石 U-Pb 定年, 认为麻粒岩相变质事件发生在 ~40 Ma 以及 ~11 Ma 两个时间点。Liu et al. (2006) 也报道了该麻粒岩的锆石 U-Pb 年龄认为麻粒岩相变质作用发生在 ~31 Ma 以及 ~23 Ma 两个时间点。综上, 在 40~11 Ma 的时间段内, 麻粒岩相变质作用在东喜马拉雅构造结地区可能是持续进行的。

第三个岩性单元是一套重熔花岗岩、部分重



a—青藏高原印度板块大地构造框架图; b—东喜马拉雅构造结地质简图

图1 东喜马拉雅构造结大地构造位置及构造地质简图

Fig. 1 Generalized tectonic and simplified geologic map of the eastern Himalayan syntaxis. (a) Tectonic diagram of the Tibet and India plates. (b) Geological sketch of the eastern Himalayan syntaxis

熔花岗岩侵入到变质岩层中并且切穿了变质岩中的片麻理; 其余重熔花岗岩则与周围的变质岩呈渐变关系而没有明显的侵入接触关系。这表明这一套重熔花岗岩应该是由变质岩原地部分熔融产生的。对于这一套重熔花岗岩, Burg et al. (1998) 提供了 3.9~2.9 Ma 范围内的磷钇矿和钼石 U-Pb 年龄作为它的结晶年龄; Booth et al. (2004) 报道了 14~2.9 Ma 范围内的锆石 U-Pb 年龄作为其侵位结晶年龄, 因此该重熔花岗岩所代表的部分熔融事件应该发生在 14~3 Ma。

1.2 构造形态及构造演化模式

东喜马拉雅构造结的整体形态呈现一个轴面为北东走向、枢纽向北倾斜的背形样式, 背形的枢纽大致为多雄拉至那木拉再到南迦巴瓦峰一线 (图1; 章振根等, 1992; Burg et al., 1998)。东喜马拉雅构造结主要以三条断裂为边界 (图1)。西部边界是北东走向的东久米林断裂, 该断裂近直立略向西倾, 为韧性剪切带, 剪切带中出露大量

糜棱岩, 糜棱岩中拖曳构造的构造形迹反映其具有水平方向左旋走滑的运动学特征 (Burg et al., 1998; Ding et al., 2001; Zhang et al., 2004)。东部边界为北东走向的阿尼桥断裂, 该断裂近直立略向东倾, 为右行走滑剪切带; 同时矿物拉伸线理等证据表明该断裂具有斜向正滑运动特征, 断层东盘相对下降, 西盘相对上升 (Burg et al., 1998; Ding et al., 2001; Zhang et al., 2004)。北部边界为北西—南东走向的嘉黎断裂, 该断裂也是近直立具有水平方向上右旋走滑的运动特征 (Burg et al., 1998; Ding et al., 2001; Zhang et al., 2004)。阿尼桥断裂的早期走滑活动发生在 23 Ma 前后, 后期正断作用发生在 7~6 Ma; 东久米林断裂的走滑活动主要分为 62~59 Ma、~23 Ma 和 ~13 Ma 三个时段 (Zhang et al., 2004); 锆石 U-Pb 年龄限定的嘉黎断裂的活动时限为 ~23 Ma (Ding et al., 2001), 以黑云母、角闪石和钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄限定的嘉黎断裂的活动时限为

18~12 Ma (Lee et al., 2003)。在构造结内部发育了一系列北西、北西西走向脆韧性断裂带, 这些断裂带都近直立略向南倾, 其运动性质以逆冲为主 (图 1; Ding et al., 2001)。

关于东喜马拉雅构造结地区的构造演化模式, 主要有两种观点。第一种是水平楔入模式 (Burg et al., 1998; Zhang et al., 2004; King et al., 2016), 认为喜马拉雅地体通过阿尼桥断裂和东久米林断裂的水平走滑运动, 挤入拉萨地体之中。第二种是俯冲后褶皱 (剥露回返) 模式 (Xu et al., 2012), 认为喜马拉雅地体先俯冲到拉萨地体之下, 后期因为褶皱作用或是地表剥蚀作用影响, 东喜马拉雅构造结内部地壳快速隆升剥露, 深部含高压麻粒岩的喜马拉雅地体出露于地表。Ding et al. (2001) 认为上述两种模型是东喜马拉雅构造结实际地质演化过程两个端元模型。

1.3 那木拉断裂带

那木拉断裂带位于东喜马拉雅构造结内部, 南迦巴瓦峰南侧约 20 km 处。Liu and Zhong (1997) 认为那木拉断裂带是北部麻粒岩相变质岩与南部角闪岩相变质岩的分界, Ding et al. (2001) 则认为那木拉断裂带是北侧硅线石片麻岩和南侧蓝晶石片麻岩的分界。那木拉断裂带为近东西走

向弧形断裂带, 断裂面为北或北东倾向 (Craw et al., 2005; Zeitler et al., 2014)。向东延伸断裂带可能向南弯曲, 并入到北东走向阿尼桥断裂; 向西延伸断裂带穿过雅鲁藏布江河谷, 并入到北东走向东久米林断裂。那木拉断裂带分为南北两支, 南支较窄, 位于那木拉错南侧, 以韧性变形为主, 含有闪长质混合岩; 北支较宽, 位于那木拉错北侧, 以脆性破裂为主 (Craw et al., 2005; Zeitler et al., 2014)。那木拉断裂带以逆冲运动为主, 北盘逆冲到南盘之上 (Ding et al., 2001; Zeitler et al., 2014; Bracciali et al., 2016)。那木拉逆冲断裂带与东喜马拉雅构造结内其他近东西向逆冲断层一起, 共同组成一个大型逆冲推覆叠瓦构造, 实现印度板块喜马拉雅地体对欧亚板块拉萨地体的俯冲 (Ding et al., 2001)。

2 低温热年代学测试

2.1 样品采集

在那木拉断裂带内, 那木拉错北侧共采集三块岩石样品 (图 2)。采集样品位置垂向海拔高度范围为 4458~4991 m。各样品采样位置、经纬度及岩性见表 1。三块样品都为高角闪岩相片麻岩, 属于喜

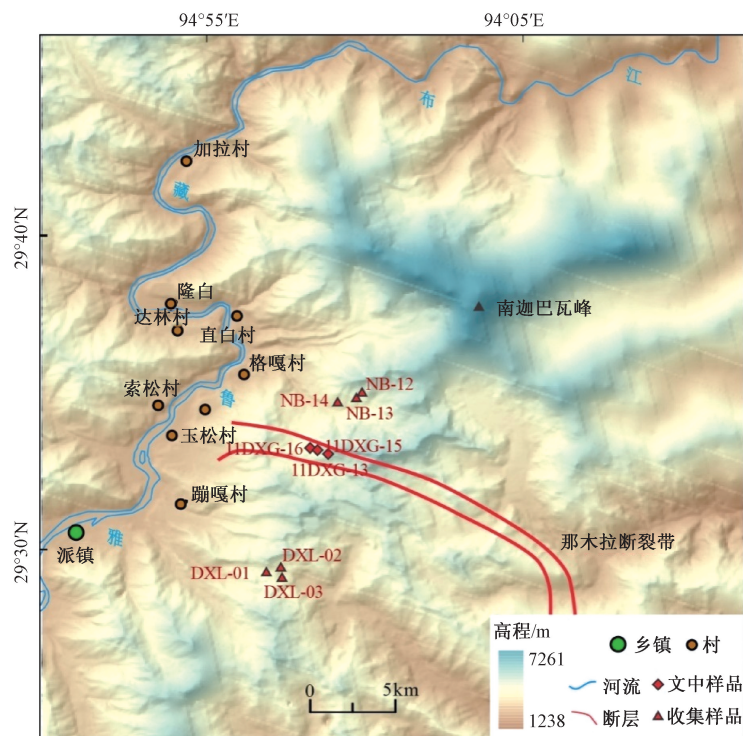


图 2 那木拉断裂带区域数字地貌及样品位置图

Fig. 2 Digital geomorphological map of the Namula fault zone and sample locations

表 1 样品信息及年龄结果

Table 1 Sample information and chronology data

样品编号	高程/ m	经度 E/ (°)	纬度 N/ (°)	岩性	黑云母 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar 测试结果			
					坪年龄/Ma	误差 (2σ)	MSWD	
11DXG-13	4991	94.981	29.551	片麻岩	3.45	0.24	0.65	
11DXG-15	4626	94.975	29.553	片麻岩	4.44	0.71	0.11	
11DXG-16	4458	94.971	29.554	片麻岩	4.19	0.44	0.3	

磷灰石裂变径迹测试结果								
样品编号	测试 颗粒	ρ_s (×10 ⁵ cm ⁻²)	ρ_i (×10 ⁵ cm ⁻²)	ρ_d (×10 ⁵ cm ⁻²)	PX^2 /	中值年龄/	误差	
		(<i>N_s</i>)	(<i>N_i</i>)	(<i>N_d</i>)	%	Ma	(1σ)	
11DXG-13	34	0.266 (93)	32.80 (11455)	14.18 (8264)	99.96	2.3	0.3	
11DXG-15	53	0.286 (149)	19.82 (10326)	14.00 (8264)	99.64	3.7	0.4	
11DXG-16	65	0.367 (314)	56.02 (47891)	13.83 (8264)	99.57	1.8	0.2	

ρ_s 为自发径迹密度, ρ_i 为诱发径迹密度, ρ_d 为标准径迹密度, N_s 为自发径迹数, N_i 为诱发径迹数, N_d 为标准径迹数, PX^2 为检验概率; Zeta = 393.5 ± 27.5

马拉雅地体高级变质沉积岩。样品采集位置处可观察到明显北西西走向、近直立韧性变形 (产状为 $13^\circ \angle 81^\circ$ 、 $10^\circ \angle 63^\circ$ 、 $190^\circ \angle 80^\circ$), 并伴随发育大量同产状密集劈理。韧性变形拖曳形态显示北盘相对上升, 南盘相对下降, 即具有逆冲运动特征。

2.2 测试方法

对采集的三件岩石样品进行黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 以及磷灰石裂变径迹测年, 测试分别在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室 K-Ar、Ar/Ar 年代学实验室和裂变径迹年代学实验室进行。

样品中黑云母矿物颗粒利用磁选法进行挑选。黑云母颗粒在双目显微镜下人工挑纯至纯度 99% 以上。待测矿物颗粒和标准样品 (Bern4-Ms) 以及纯物质 K₂SO₄、CaF₂、KCl (用于 K、Ca、Cl 同位素监测), 被包裹在铝箔中并集中放置在一个密封石英瓶中。每个样品包装重量大约为 70 mg。包装好的样品在中国原子能研究院 (北京) 的 49-2 核反应堆 H8 孔道进行 24 小时核辐照。核辐照参数 (J 值) 利用辐照国际标准样品 Bern4-Ms 的 Ar 同位素含量进行计算, 该标准样品⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄为 18.62 ± 0.06 Ma (Baksiet et al., 1996)。核辐照后的样品在一个双层坩埚可控温真空加热系统中进行加热。样品首先在 800℃ 加热 30 min, 以去除矿物表面吸附气体。然后, 对样品进行温度在 900~1500℃ 范围内由高到低多阶段加热。每一加热阶段对样品加热 15 min。加热产生气体利用 Zr-Al 吸气剂进行纯化。纯化后气体利用 RGA10 质谱仪进行 Ar 同位素测量。每一步气体都进行 9 个循环测量。每四步加热阶段测量一次系统本底。所有测试工作由电脑自动控制完成。计算中⁴⁰K 的衰变常数为 $5.543 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ (Steiger and Jäger, 1977)。

样品的磷灰石矿物颗粒利用磁选法获得。利用树脂把磷灰石颗粒固定在载玻片上, 然后对磷灰石颗粒进行打磨、抛光。20℃ 环境下在 5% 稀硝酸中对磷灰石颗粒进行 20 s 的蚀刻, 使得自发径迹可以被观察到。在磷灰石颗粒表面紧贴一片白云母外探测器, 并把载玻片和白云母外探测器固定包装。包装好的样品在中国原子能研究院 49-2 核反应堆进行核辐照。核辐照强度利用 CN-5 标准玻璃进行检测。在 20℃ 环境下在 40% 的氢氟酸中对辐照后的白云母外探测器进行 20 min 的蚀刻, 使得诱发径迹可以被观察到。径迹数目是利用具有自动定位功能的 Zeiss 显微镜进行人工测量的, 磷灰石裂变径迹年龄利用 zeta 值法进行测量 (Hurford and Green, 1983; Hurford, 1990)。

2.3 数据结果

样品黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 和磷灰石裂变径迹年龄结果如表 1 所示, 黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 阶步升温坪年龄图见图 3, 所有样品都得出形态较好阶步升温年龄坪。黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄范围为 4.44 ± 0.71 Ma ~ 3.45 ± 0.24 Ma, 磷灰石裂变径迹年龄范围为 3.7 ± 0.4 Ma ~ 1.8 ± 0.2 Ma。

3 低温热年代学数据分析

3.1 与周边年龄结果对比

在那木拉断裂带中部采集的三件基岩样品, 获得非常年轻的黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 和磷灰石裂变径迹年龄 (<5 Ma)。数据结果说明那木拉断裂带地区至少从上新世以来, 经历快速地壳隆升剥露过程。为揭示整个那木拉断裂带上新世以来活动过程, 通过收集整理已发表的位于那木拉断裂带附近的年代学数据, 与文中数据进行对比, 年代学

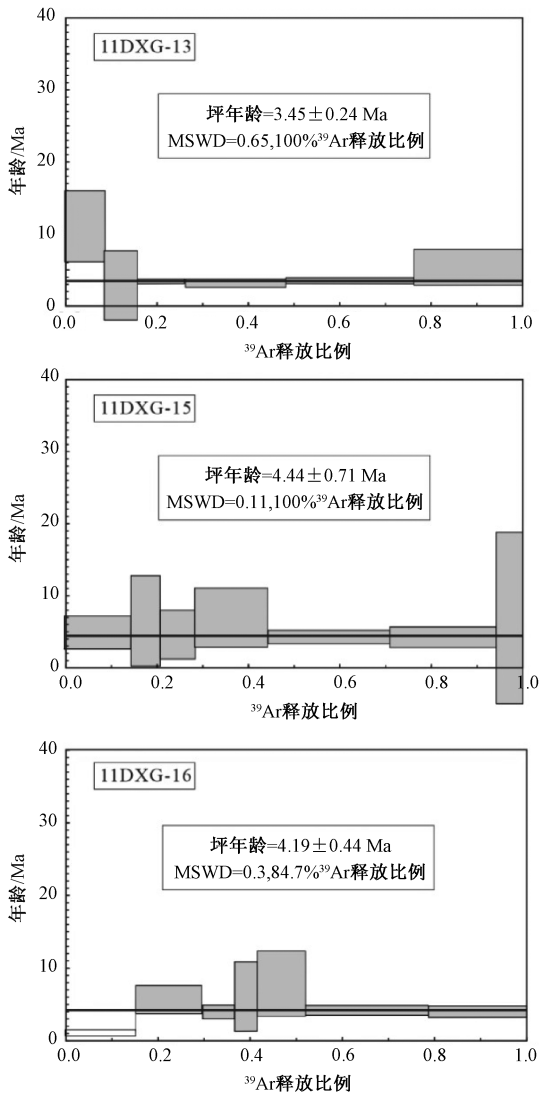


图3 黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar坪年龄图
Fig. 3 ⁴⁰Ar/³⁹Ar plateau ages of the biotite concentrates

表2 那木拉断裂带区域热年代学年龄统计结果

Table 2 Thermochronology data from the Namula fault zone area

样品编号	经度 (E)	纬度 (N)	高程/ m	黑云母 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar 年龄/Ma		磷灰石裂变径迹年龄/Ma		数据来源
				坪年龄	2σ 误差	中值年龄	1σ 误差	
DXL-01	94.948°	29.488°	4233	4.5	0.9	3.6	0.4	Gong et al., 2015; Yu et al., 2011
DXL-02	94.956°	29.490°	4073	3.5	0.2	3.9	0.6	Gong et al., 2015; Yu et al., 2011
DXL-03	94.956°	29.486°	4038	3.1	0.2	4.6	0.6	Gong et al., 2015; Yu et al., 2011
11DXG-16	94.971°	29.554°	4458	4.19	0.44	1.8	0.2	文中
11DXG-15	94.985°	29.553°	4626	4.44	0.71	3.7	0.4	文中
11DXG-13	94.981°	29.551°	4991	3.45	0.24	2.3	0.3	文中
NB-14	94.986°	29.578°	4100	4.75	0.71	1.2	0.2	Tu et al., 2015
NB-13	94.996°	29.580°	4400	3.96	0.32	1.5	0.1	Tu et al., 2015
NB-12	94.999°	29.583°	4610	3.77	0.55	1.8	0.2	Tu et al., 2015

数据统计结果见表2。收集的数据包括位于那木拉断裂带南侧多雄拉区域三个基岩样品的黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar (Gong et al., 2015) 和磷灰石裂变径迹年龄 (Yu et al., 2011); 位于那木拉断裂带北侧南迦巴瓦峰南麓三个基岩样品的黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 和磷灰石裂变径迹年龄 (Tu et al., 2015), 所有样品位于 4000~5000 m 的同一海拔范围内。

那木拉断裂带南侧、中部、北侧热年代学年龄对比表明, 三个区域黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄基本一致, 在 4.8~3.1 Ma 范围内。磷灰石裂变径迹年龄具有一定差异, 南侧范围为 4.6~3.6 Ma, 中部范围为 3.7~1.8 Ma, 北侧范围为 1.8~1.2 Ma, 具有由南至北逐渐变小的趋势。利用这些热年代学数据及两种热年代学方法对应的封闭温度值可以得到那木拉断裂带不同区域简单热史演化曲线 (图4)。由热史演化曲线可知, 在约 3 Ma 以前, 那木拉断裂带南侧区域地壳冷却速率非常快, 而 3 Ma 以后该区域地壳冷却速率快速降低; 3 Ma 以后那木拉断裂带北侧区域成为冷却最快区域。

3.2 年龄模拟解译

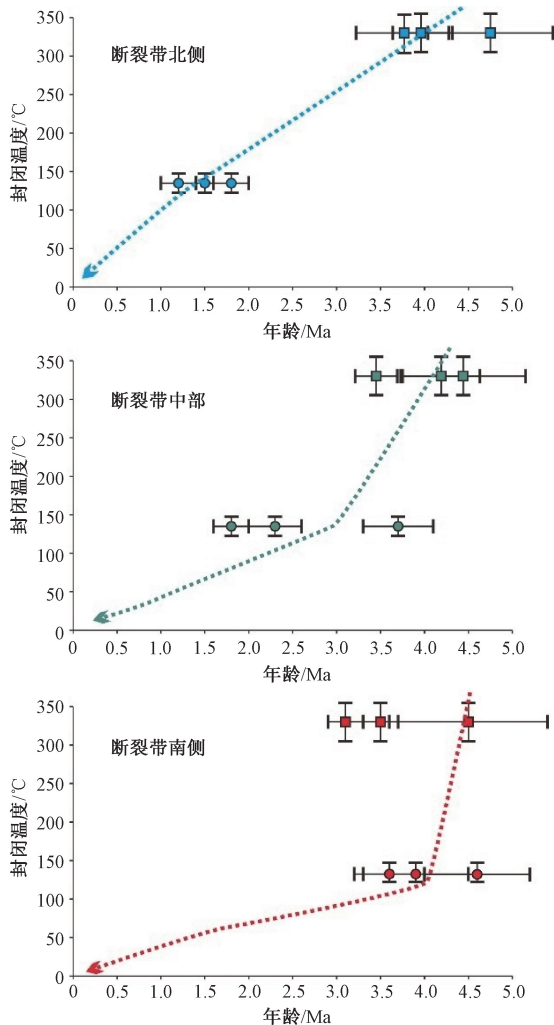
热年代学年龄受到岩石隆升速率、地温梯度、地表面形态等多种因素影响。为准确解译上文所述热年代学年龄代表的地质信息, 厘清那木拉断裂带活动特征。文章利用“Pecube”软件对所获得黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄和磷灰石裂变径迹年龄进行定量解译。“Pecube”是一个对热年代学年龄进行定量解译的热动力学模拟计算软件 (Braun, 2003; Braun et al., 2012)。地壳中三维热运移方程表达式为 (Carslaw and Jaeger, 1959):

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho A \quad (1)$$

其中 x 、 y 、 z 代表三维空间坐标, t 代表时间, $T(x, y, z, t)$ 代表三维地壳空间中任意位置任意时间点岩石温度, ρ 代表岩石密度, c 代表岩石热容值, $V(x, y, z)$ 代表岩石运动速率, k 代表岩石热导率, A 代表岩石产热率。“Pecube”软件需要用户输入该公式中的岩石热容值、导热率、运动速率等参数并设定温度场边界值, 然后根据公

式(1)求解出相应地壳空间温度场分布及其随时间变化。该软件对公式(1)的求解是在一个三维空间有限元网格中利用有限元方法进行的。计算出地壳温度场后, 根据岩石经历温度历史, 利用热扩散方程计算出热年代学年龄值。用户可以把模拟计算年龄与实测年龄进行对比, 然后相应修改模拟参数, 直到最终能够获得最佳模拟参数使得模拟年龄与实测年龄匹配度最高。这些最佳模拟参数就是热年代学年龄所代表真实地质信息。“Pecube”软件提出后被广泛用于对热年代学年龄进行定量解释 (Herman et al., 2007, 2010; Tu et al., 2015)。

文中利用“Pecube”软件对测得热年代学数据进行多次模拟解释, 模型中所采用模拟参数参考 Tu et al. (2015)。地温场特征方面, Craw et al. (2005) 利用流体包裹体中 $\text{CO}_2\text{—H}_2\text{O}$ 相平衡计算方法, 计算出东喜马拉雅构造结及周边区域现今 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 地温等温面的位置大致位于海平面附近。为获得与这一计算结果相匹配的近地表地温梯度, 模型底部 (海平面以下 25 km) 温度都被固定为 $1150\text{ }^\circ\text{C}$, 模型顶面的温度固定为 $0\text{ }^\circ\text{C}$, 岩石产热率被固定为 $6.5\text{ }^\circ\text{C/Ma}$, 岩石热扩散系数被设定为 $25\text{ km}^2/\text{Ma}$ 。模型模拟了 20 Ma 以来整个地壳隆升剥露过程。模拟过程中使用的地表面形态特征来自于 90 m 精度数字高程数据 (DEM), 地表面范围为 $94.85^\circ \sim 95.05^\circ\text{E}$; $29.45^\circ \sim 29.65^\circ\text{N}$ 。Tu et al. (2015) 模拟结果证明南迦巴瓦峰及其附近区域, 低温热年代学年龄受岩石隆升剥露速率影响较大, 受地貌面形态变化影响较小。然而 Yang et al. (2018) 研究表明南迦巴瓦峰及其附近区域, 侵蚀速率与地形特征无明显相关性。同时那木拉地区地表面海拔都位于 4000 m 以上, 地表海拔变化不强烈。因此文中忽略地表面形态及其可能变化对热年代学年龄的影响, 模拟过程中地表面不发生变化。模拟过程都是在一个 $61 \times 61 \times 50$ 的三维有限元网格中进行的 (图 5)。其中水平方向上, 有限元网格分辨率是 360 m , 即单个有限元单元宽度代表实际水平方向上 360 m 距离; 垂直方向上分辨率为 500 m 。为了模拟那木拉断裂带活动对热年代学年龄数据的影响, 笔者在模型中设置两条 110° 走向近直立略向北倾的断裂, 这两条断裂分别位于那木拉山口的南侧和北侧 (图 5)。通过设置这两条断裂来模拟那木拉断裂带。

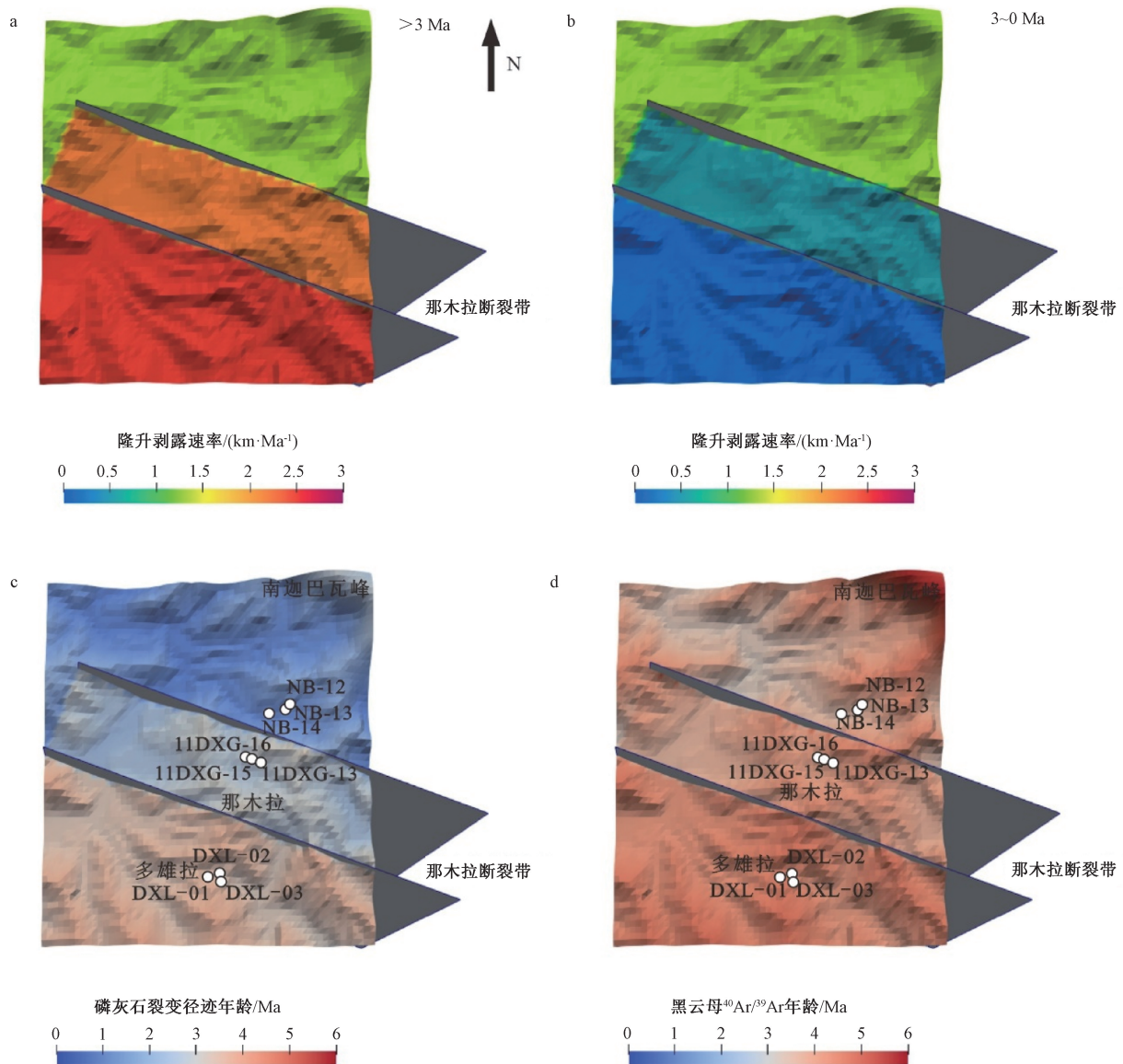


正方形—黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄; 圆形—磷灰石裂变径迹年龄; 带箭头虚线—热史演化曲线

图4 那木拉断裂带不同区域热史演化曲线图

Fig. 4 Thermal history evolution curves in different positions of the Namula fault zone

Squares—Biotite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages; Rounds—Apatite fission track ages; Dotted lines with arrows—Thermal history evolution curves



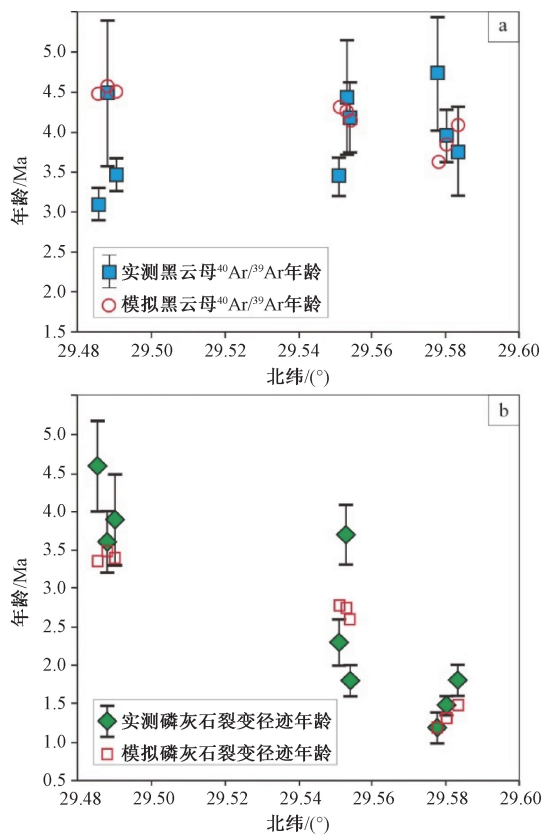
a—大于 3 Ma 时地壳隆升剥露速率分布；b—小于 3 Ma 时地壳隆升剥露速率分布；c—模拟磷灰石裂变径迹年龄；d—模拟黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄

图 5 那木拉断裂带热年代学年龄模拟解释结果

Fig. 5 Thermochronology simulation results of the Namula fault zone. (a) Crust exhumation rate distribution prior to 3 Ma. (b) Crust exhumation rate distribution after 3 Ma. (c) Predicted apatite fission track ages. (d) Predicted biotite ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages.

经过多次模拟计算过程后，发现两条模拟断裂最佳运动速率参数，利用这些参数可以计算出与实测年龄匹配最好的模拟年龄。最佳模拟参数分为两阶段：3 Ma 以前断裂带南侧区域的地壳隆升速率为 2.5 km/Ma，断裂带中部区域地壳隆升速率为 2.2 km/Ma，断裂带北侧区域地壳隆升速率为 1.3 km/Ma；3 Ma 以后断裂带南侧区域地壳隆升速率急剧降低变为 0.1 km/Ma，断裂带中部区域地壳隆升速率也降低为 0.5 km/Ma，断裂带北侧区域地壳隆升速率保持不变仍为 1.3 km/Ma（图 5a、

5b）。根据这套模拟地壳隆升参数设定的模拟过程计算出来模拟年龄如图 5c、5d 所示，可以观察到由那木拉断裂带南侧区域到北侧区域黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄缓慢降低，而磷灰石裂变径迹年龄快速降低。模拟计算年龄与实测年龄的对比如图 6 所示。由该图可知这一套模拟地壳隆升参数，可以很好解释那木拉断裂带区域热年代学年龄，即该模拟地壳隆升参数极有可能代表那木拉断裂带区域实际地壳隆升过程。



a—黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 实测结果与模拟结果对比; b—磷灰石裂变径迹年龄实测结果与模拟结果对比

图6 那木拉断裂带实测年龄与模拟年龄对比图
Fig. 6 Contrast between observed ages and predicted ages in the Namula fault zone. (a) Predicted and observed biotite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages. (b) Predicted and observed apatite fission track ages

4 讨论

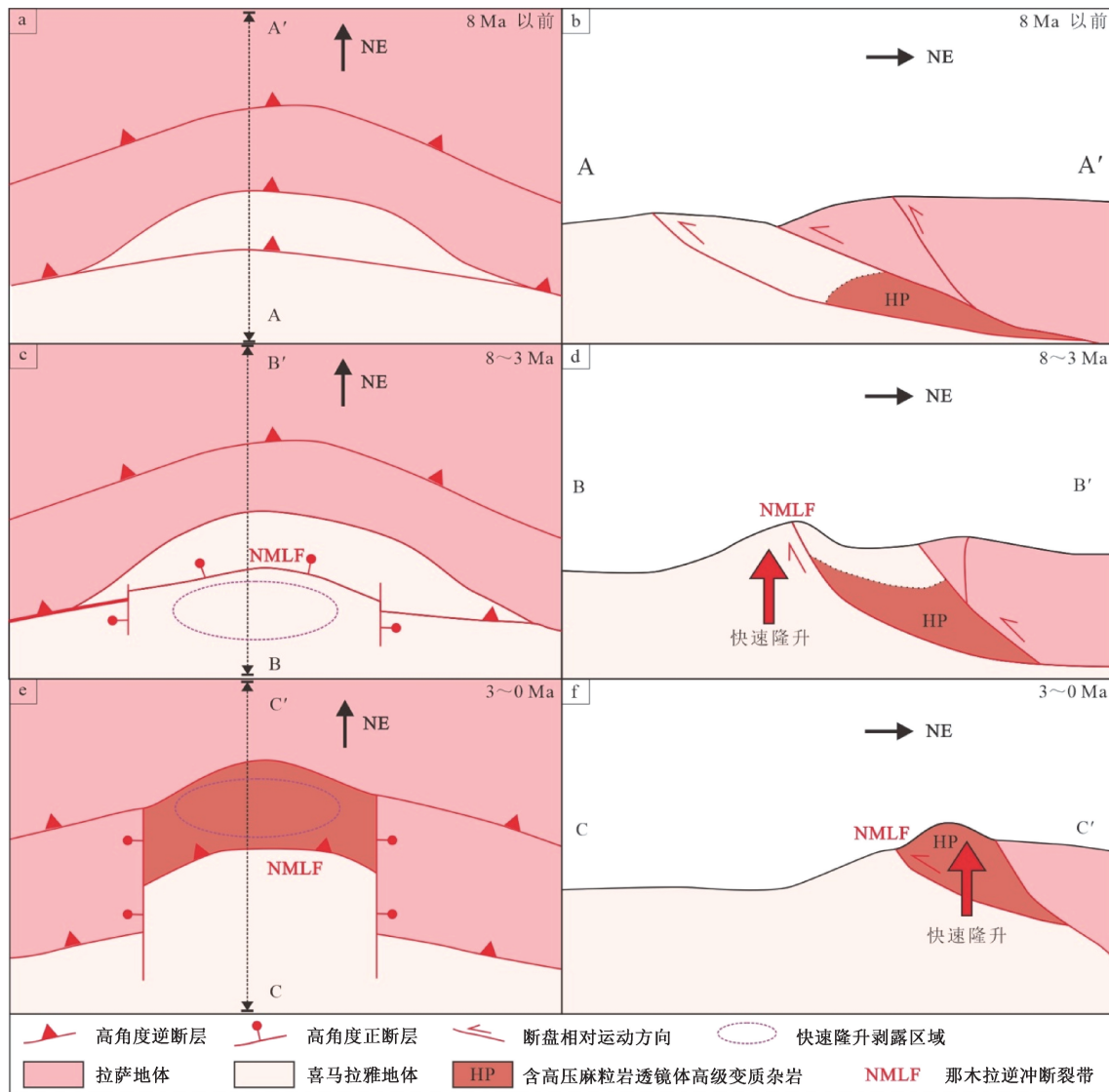
那木拉断裂带热年代学数据及其模拟解译结果表明, 那木拉断裂带区域至少从上新世以来经历了快速地壳隆升过程; 并且快速地壳隆升区域由南向北逐渐迁移。大约 3 Ma 以前那木拉断裂带以南多雄拉地区地壳隆升最快, 隆升速率达到约 2.5 km/Ma; 大约 3 Ma 以后多雄拉地区地壳隆升速率急剧降低到只有 0.1 km/Ma 左右 (图 5)。根据断裂带两侧地壳隆升速率差异可以判断, 大约 3 Ma 以前那木拉断裂带南盘相对上升北盘相对下降, 具有正断层运动特征; 约 3 Ma 以后那木拉断裂带北盘相对上升南盘相对下降, 具有逆断层运动特征。

结合以往对那木拉断裂带活动研究可知, 那木拉断裂带在不同地质历史时期具有不同活动特征。在早期 (>8 Ma) 那木拉逆冲断裂带是东喜马拉雅构造结大型逆冲推覆叠瓦构造的组成部分; 那木拉断裂带以韧性变形为主, 具有逆断层运动性质, 代表喜马拉雅地体对拉萨地体的俯冲 (Ding et al., 2001; 图 7a、7b)。东喜马拉雅构造结基岩热年代学数据 (Gong et al., 2015) 和河砂碎屑热年代学数据 (Govin et al., 2020) 都表明: 约 8 Ma 开始, 东喜马拉雅构造结进入快速地壳隆升剥露过程, 那木拉断裂带以脆性变形为主。最初地壳隆升剥露中心可能位于那木拉断裂带南侧, 断裂带南盘隆升速率大于北盘, 断裂带具有正断层运动特征 (图 7c、7d)。约 3 Ma 以来, 地壳隆升剥露中心可能迁移到那木拉断裂带北侧, 断裂带北盘隆升速率大于南盘, 那木拉断裂带具有逆断层运动特征 (图 7e、7f)。

最近几年部分学者利用较低封闭温度热年代学方法揭示, 位于东喜马拉雅构造结北侧的帕隆藏布江下游区域, 约 2~1 Ma 以来发生地壳隆升剥露速率快速增加 (King et al., 2016; Yang et al., 2018)。结合文中研究结果可知, 约 8 Ma 以来东喜马拉雅构造结进入快速地壳隆升剥露阶段后, 快速隆升剥露区域由南向北逐渐迁移。早期 (>3 Ma) 隆升剥露中心可能位于那木拉断裂带南侧多雄拉区域; 现今隆升剥露中心位于那木拉断裂带北侧, 南迦巴瓦峰、加拉白垒峰及更北侧帕隆藏布江下游区域。

5 结论

东喜马拉雅构造结那木拉断裂带内部基岩黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄范围为 $4.44 \pm 0.71 \text{ Ma} \sim 3.45 \pm 0.24 \text{ Ma}$, 磷灰石裂变径迹年龄范围为 $3.7 \pm 0.4 \text{ Ma} \sim 1.8 \pm 0.2 \text{ Ma}$ 。那木拉断裂带区域热年代学年龄模拟计算结果表明: 约 3 Ma 以前那木拉断裂带南侧地壳隆升最快, 约为 2.5 km/Ma, 断裂带以正断层运动特征为主; 约 3 Ma 以来那木拉断裂带北侧地壳隆升最快, 约为 1.3 km/Ma, 断裂带以逆断层运动特征为主。那木拉断裂带上新世以来运动特征的变化, 可能与约 8 Ma 以来东喜马拉雅构造结快速地壳隆升剥露区域由南向北逐渐迁移有关。



a—8 Ma 以前水平面大地构造框架示意图; b—8 Ma 以前垂向剖面大地构造框架示意图; c—8~3 Ma 水平面大地构造框架示意图; d—8~3 Ma 垂向剖面大地构造框架示意图; e—3~0 Ma 水平面大地构造框架示意图; f—3~0 Ma 垂向剖面大地构造框架示意图

图 7 那木拉断裂带演化模式图

Fig. 7 Cartoon figures of the Namula fault zone evolution. (a) Horizontal tectonic framework prior to 8 Ma. (b) Vertical profile tectonic framework prior to 8 Ma. (c) Horizontal tectonic framework between 8 Ma and 3 Ma. (d) Vertical profile tectonic framework between 8 Ma and 3 Ma. (e) Horizontal tectonic framework between 3 Ma and 0 Ma. (f) Vertical profile tectonic framework between 3 Ma and 0 Ma.

HP—High-grade metamorphic complex containing high-pressure granulite; NMLF—the Namula thrust fault zone; Purple dotted ellipses—Rapid exhumation areas; Red triangles—High-angle thrust faults; Red rounds—High-angle normal faults

References

- ALLÉGRE C J, COURTILLOT V, TAPPONNIER P, et al., 1984. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt [J]. *Nature*, 307 (5946): 17-22.
- BAI Y J, NI H Y, GE H, 2019. Advances in research on the geohazard effect of active faults on the southeastern margin of the tibetan plateau [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (6): 1116-1128. (in Chinese with English abstract)
- BAKSI A K, ARCHIBALD D A, FARRAR E, 1996. Intercalibration of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating standards [J]. *Chemical Geology*, 129 (3-4): 307-324.
- BOOTH A L, ZEITLER P K, KIDD W S F, et al., 2004. U-Pb zircon constraints on the tectonic evolution of southeastern Tibet, Namche Barwa area [J]. *American Journal of Science*, 304 (10): 889-929.
- BRACCIALI L, PARRISH R R, NAJMAN Y, et al., 2016. Plio-

- Pleistocene exhumation of the eastern Himalayan syntaxis and its domal 'pop-up' [J]. *Earth-Science Reviews*, 160: 350-385.
- BRAUN J, 2003. Pecube: a new finite-element code to solve the 3D heat transport equation including the effects of a time-varying, finite amplitude surface topography [J]. *Computers & Geosciences*, 29 (6): 787-794.
- BRAUN J, VAN DER BEEK P, VALLA P, et al., 2012. Quantifying rates of landscape evolution and tectonic processes by thermochronology and numerical modeling of crustal heat transport using PECUBE [J]. *Tectonophysics*, 524-525: 1-28.
- BURG J P, NIEVERGELT P, OBERLI F, et al., 1998. The Namche Barwa syntaxis: evidence for exhumation related to compressional crustal folding [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 16 (2-3): 239-252.
- CARSLAW H S, JAEGER J C, 1959. *Conduction of heat in solids* [M]. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press.
- CHUNG S L, CHU M F, ZHANG Y Q, et al., 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism [J]. *Earth-Science Reviews*, 68 (3-4): 173-196.
- CRAW D, KOONS P O, ZEITLER P K, et al., 2005. Fluid evolution and thermal structure in the rapidly exhuming gneiss complex of Namche Barwa-Gyala Peri, eastern Himalayan syntaxis [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 23 (9): 829-845.
- DING L, ZHONG D L, 1999. High pressure granulite facies metamorphism characteristics and tectonic geological significance in the Namche Barwa Region Tibet [J]. *Science in China (Series D)*, 29 (5): 385-397. (in Chinese)
- DING L, ZHONG D L, YIN A, et al., 2001. Cenozoic structural and metamorphic evolution of the eastern Himalayan syntaxis (Namche Barwa) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 192 (3): 423-438.
- GONG J F, JI J Q, ZHOU J, et al., 2015. Late Miocene thermal evolution of the eastern Himalayan syntaxis as constrained by biotite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology [J]. *The Journal of Geology*, 123 (4): 369-384.
- GOVIN G, VAN DER BEEK P, NAJMAN Y, et al., 2020. Early onset and late acceleration of rapid exhumation in the Namche Barwa syntaxis, eastern Himalaya [J]. *Geology*, 48 (12): 1139-1143.
- HERMAN F, BRAUN J, DUNLAP W J, 2007. Tectonomorphic scenarios in the Southern alps of New Zealand [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112 (B4): B04201.
- HERMAN F, COPELAND P, AVOUAC J P, et al., 2010. Exhumation, crustal deformation, and thermal structure of the Nepal Himalaya derived from the inversion of thermochronological and thermobarometric data and modeling of the topography [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115 (B6): B06407.
- HURFORD A J, GREEN P F, 1983. The zeta age calibration of fission-track dating [J]. *Chemical Geology*, 41: 285-317.
- HURFORD A J, 1990. Standardization of fission track dating calibration: Recommendation by the Fission Track Working Group of the I. U. G. S. Subcommittee on Geochronology [J]. *Chemical Geology*, 80 (2): 171-178.
- KING G E, HERMAN F, GURALNIK B, 2016. Northward migration of the eastern Himalayan syntaxis revealed by OSL thermochronometry [J]. *Science*, 353 (6301): 800-804.
- LAO X, 1995. On the formation of Yarlung Zangbo river fault zone [J]. *Journal of Geomechanics*, 1 (1): 53-59. (in Chinese with English abstract)
- LEE H Y, CHUNG S L, WANG J R, et al., 2003. Miocene Jiali faulting and its implications for Tibetan tectonic evolution [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 205 (3-4): 185-194.
- LIU Y, ZHONG D, 1997. Petrology of high-pressure granulites from the eastern Himalayan syntaxis [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 15 (4): 451-466.
- LIU Y, MASSONNE H J, SIEBEL W, et al., 2006. Geological aspects of the eastern Himalayan syntaxis: New constraints from structural, petrologic and zircon SHRIMP data [M] //SAKLANI P S. *Himalaya: geological aspects*, Vol. 4. New Delhi: Satish Serial Publishing House: 325-388.
- STEIGER R H, JÄGER E, 1977. Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 36 (3): 359-362.
- TU J Y, JI J Q, SUN D X, et al., 2015. Thermal structure, rock exhumation, and glacial erosion of the Namche Barwa Peak, constraints from thermochronological data [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 105: 223-233.
- WEN D R, LIU D Y, CHUNG S L, et al., 2008. Zircon SHRIMP U-Pb ages of the Gangdese Batholith and implications for Neotethyan subduction in southern Tibet [J]. *Chemical Geology*, 252 (3-4): 191-201.
- XU Z Q, JI S C, CAI Z H, et al., 2012. Kinematics and dynamics of the Namche Barwa Syntaxis, eastern Himalaya: Constraints from deformation, fabrics and geochronology [J]. *Gondwana Research*, 21 (1): 19-36.
- YANG R, HERMAN F, FELLIN M G, et al., 2018. Exhumation and topographic evolution of the Namche Barwa Syntaxis, eastern Himalaya [J]. *Tectonophysics*, 722: 43-52.
- YIN A, HARRISON T M, 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28 (1): 211-280.
- YIN A, 2006. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation [J]. *Earth-Science Reviews*, 76 (1-2): 1-131.
- YU X J, JI J Q, GONG J F, et al., 2011. Evidences of rapid erosion driven by climate in the Yarlung Zangbo (Tsangpo) Great Canyon, the eastern Himalayan syntaxis [J]. *Chinese Science Bulletin*, 56 (11): 1123-1130.
- ZEITLER P K, MELTZER A S, BROWN L, et al., 2014. Tectonics and topographic evolution of Namche Barwa and the easternmost Lhasa block, Tibet [M] //NIE J S, HORTON B K, HOKE G D. *Toward an improved understanding of uplift mechanisms and the elevation history of the Tibetan Plateau*. Boulder, Colorado: The Geological

Society of America, 507: 23-58.

ZHANG J J, JI J Q, ZHONG D L, et al., 2004. Structural pattern of eastern Himalayan syntaxis in Namjagbarwa and its formation process [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 47 (2): 138-150.

ZHANG J J, CHEN L, WANG J C, et al., 2018. Study of disaster-inducing geological conditions of collapse and landslide along Lulang-Tongmai in SE Tibet [J]. Journal of Geomechanics, 24 (4): 474-481. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Z M, DONG X, SANTOSH M, et al., 2012. Petrology and geochronology of the Namche Barwa Complex in the eastern Himalayan syntaxis, Tibet: constraints on the origin and evolution of the north-eastern margin of the Indian Craton [J]. Gondwana Research, 21 (1): 123-137.

ZHANG Z G, LIU Y H, WANG T W, et al., 1992. Geology of the Namche Barwa region [M]. Beijing: Chinese Science Press. (in Chinese)

ZHENG W J, ZHANG P Z, YUAN D Y, et al., 2019. Basic characteristics of active tectonics and associated geodynamic processes in continental China [J]. Journal of Geomechanics, 25 (5): 699-721. (in Chinese with English abstract)

ZHONG D L, DING L, 1995. High pressure granulite found in the Namche Barwa region Tibet [J]. Chinese Science Bulletin, 40 (14): 1343. (in Chinese)

附中文参考文献

白永健, 倪化勇, 葛华, 2019. 青藏高原东南缘活动断裂地质灾害效应研究现状 [J]. 地质力学学报, 25 (6): 1116-1128.

丁林, 钟大赟, 1999. 西藏南迦巴瓦峰地区高压麻粒岩相变质作用特征及其构造地质意义 [J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 29 (5): 385-397.

劳雄, 1995. 雅鲁藏布江断裂带的形成 [J]. 地质力学学报, 1 (1): 53-59.

张佳佳, 陈龙, 王军朝, 等, 2018. 藏东南鲁朗-通麦崩塌滑坡孕灾地质背景特征研究 [J]. 地质力学学报, 24 (4): 474-481.

章振根, 刘玉海, 王天武, 等, 1992. 南迦巴瓦峰地区地质 [M]. 北京: 科学出版社.

郑文俊, 张培震, 袁道阳, 等, 2019. 中国大陆活动构造基本特征及其对区域动力过程的控制 [J]. 地质力学学报, 25 (5): 699-721.

钟大赟, 丁林, 1995. 西藏南迦巴瓦峰地区发现高压麻粒岩 [J]. 科学通报, 40 (14): 1343.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

