https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.106



雅 鲁 藏 布 江 墨 脱 段 隆 升 速 率:来 自 黑 云 母 Ar/Ar 年 代 学 证 据

涂继耀^{1,2},季建清¹,钟大赉³,周 晶¹

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

摘 要:为揭示东喜马拉雅构造结及其周边区域完整地质演化过程,对采集自雅鲁藏布江墨脱段10块基岩样品进行黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar测年,并利用"Pecube"软件对年龄代表隆升剥露速率进行定量计算.样品黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄范围为11.25~24.04 Ma,对应隆升剥露速率范围为0.25~0.51 km/Ma.雅鲁藏布江墨脱段地壳隆升剥露速率存在明显南北差异,北段隆升剥露速率高出约0.2 km/Ma.年代学数据及计算结果表明,与东喜马拉雅构造结内部相比,雅鲁藏布江下游墨脱段为地壳隆升剥露活动相对较弱区域.与喜马拉雅地体向拉萨地体俯冲过程相关北西、北西西走向逆断层活动,不仅在东喜马拉雅构造结内部区域发育,在其东侧雅鲁藏布江墨脱段也可能发育.

关键词:东喜马拉雅构造结;雅鲁藏布江;黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar;隆升剥露;逆断层;地质年代学.
中图分类号: P542
文章编号: 1000-2383(2021)12-4533-13
收稿日期:2021-05-10

Rock Exhumation Rates in Motuo Section of Yarlung Tsangpo River: Evidence from Biotite Ar/Ar Chronology

Tu Jiyao^{1,2}, Ji Jianqing¹, Zhong Dalai³, Zhou Jing¹

1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, 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

Abstract: To reveal the tectonic evolution of the eastern Himalayan syntaxis and its surrounding areas, in this paper it reports 10 40 Ar/ 39 Ar ages of biotite from Motuo Section of the Yarlung Tsangpo River. It quantitatively interprets the rock's uplift and exhumation rates represented by these ages, using a modeling code "Pecube". Biotite 40 Ar/ 39 Ar ages in this paper are in the range of 11.25-24.04 Ma. Corresponding exhumation rates are in the range of 0.25-0.51 km/Ma. The rock exhumation rates in Motuo Section of the Yarlung Tsangpo River have obvious differences between northern and southern, which is characterized by the northern exhumation rates about 0.2 km/Ma higher than the southern. The ages and simulation results show that relative to the inside of the eastern Himalayan syntaxis, the exhumation rates in Motuo Section of the Yarlung Tsangpo River are lower. And the NW/NWW-trending thrust fault zones which were resulted by the collision between Himalayan terrane and Lhasa terrane, not

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos. 41603055, 41490614);中国地震局地球物理研究所基本科研业务费专项(No. DQJB21X26).

作者简介:涂继耀(1988-),男,助理研究员,博士,从事构造地质学与同位素年代学研究.ORCID:0000-0002-8407-4239. E-mail: 406962923@qq.com

引用格式:涂继耀,季建清,钟大费,等,2021.雅鲁藏布江墨脱段隆升速率:来自黑云母Ar/Ar年代学证据.地球科学,46(12):4533-4545.

only located in the inside of the eastern Himalayan syntaxis, but also probably located in Motuo Section of the Yarlung Tsangpo River.

Key words: eastern Himalayan syntaxis; Yarlung Tsangpo River; biotite ⁴⁰Ar/³⁹Ar; exhumation; thrust fault; geochronology.

0 引言

近30年来,地球科学逐渐发展演变成为地球系 统科学,地球各圈层之间相互作用成为地球科学研 究中关键问题. 气候、剥蚀等来自地球外部圈层的 "外动力因素",对地壳构造演化过程可能存在的影 响受到越来越多关注(Molnar and England, 1990; Raymo and Ruddiman, 1992; Beaumont et al., 2001; Zeitler et al., 2001; Zhang et al., 2001; 莫宣学, 2019; Govin et al., 2020; Xu et al., 2020). 喜马拉雅造山带 东部端点东喜马拉雅构造结地区(图1),因为强烈 挤压造山作用、活跃地表作用,成为研究气候、剥蚀 与构造相互作用理想野外实验室.部分研究认为东 喜马拉雅构造结是河流剥蚀、冰川剥蚀等地表剥蚀 作用,诱发快速地壳构造隆升典型区域(Zeitler et al., 2001, 2014; Tu et al., 2015). 但也有研究认为构 造活动主导东喜马拉雅构造结地质演化,快速地表 剥蚀只是对构造隆升的被动响应(Wang et al., 2014; Bracciali et al., 2015; King et al., 2016; Yang et al., 2018). 目前,关于地表剥蚀在东喜马拉雅构造 结地质演化中所起作用的争论仍然比较激烈.

热年代学年龄反映岩石从地壳某特定温度面 运移至地表的时间,是研究地表作用与地壳构造活 动相互关系重要依据.东喜马拉雅构造结报道大量 年轻热年代学年龄数据,是该区域剥蚀与构造相互 关系研究的基础.目前对于东喜马拉雅构造结热年 代学研究,大部分集中在其核心南迦巴瓦峰区域及 其北侧、西侧318国道经过区域.对于东喜马拉雅构 造结东侧雅鲁藏布江下游墨脱段区域,由于道路、 地形等原因,热年代学研究相对较少(Zeitler et al.,2014).为完善整个东喜马拉雅构造结及其周边 区域热年代学研究,本文对采集自雅鲁藏布江下游 墨脱段10块基岩样品进行黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar定年,利 用"Pecube"软件对年龄结果进行定量模拟计算.基 于实测年龄和模拟计算结果,对该区域可能断裂活 动特征及整个东喜马拉雅构造结地质演化过程进 行讨论.

1 研究背景

雅鲁藏布江下游墨脱段位于东喜马拉雅构造 结东部边界(图1).东喜马拉雅构造结是喜马拉雅 造山带挤压造山作用最强的区域之一.又因受到雅 鲁藏布江大峡谷水汽通道作用影响,该区域同时具 有海拔高、地貌面高差大、地表剥蚀强烈、新构造活 动活跃以及地壳隆升快速等多种特征(Zeitler *et al.*, 2001).

1.1 岩石组成

东喜马拉雅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,内部为喜 马拉雅地体(图1).拉萨地体主要包括元古代变质 基底、古生代到中生代沉积盖层以及中生代到新生 代侵位冈底斯岩浆岩带(Yin and Harrison,2000).在 东构造结周边主要出露冈底斯岩浆岩带(图1).冈 底斯岩浆岩带是一条由于新特提斯洋向北俯冲而 形成的岛弧岩浆岩带(Yin and Harrison,2000;Wen *et al.*,2008).

喜马拉雅地体是印度板块北部边缘.东喜马拉 雅构造结内部喜马拉雅地体主要是一套经历绿片 岩相到角闪岩相变质的沉积岩地层,其中岩石类型 包括石榴黑云片岩、黑云绿帘片岩、砂线石石榴黑 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; 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).东喜马拉雅构 造结核心南迦巴瓦峰区域变质沉积岩中还出露含 基性麻粒岩透镜体的高级变质杂岩体(图1).该基 性麻粒岩记录至少两次800℃左右变质作用:第一 次变质压力较高为14~15 kbar,第二次压力为8~ 10 kbar(钟大赉和丁林,1995;丁林和钟大赉,1999). 对该麻粒岩年代学研究表明,在40~11 Ma的时间 段内,麻粒岩相变质作用在南迦巴瓦峰区域可能持 续进行;大约11 Ma以来,该区域地壳经历快速剥露 回返,使得麻粒岩相变质岩出露于地表(Burg et al., 1998; Ding et al., 2001; Xu et al., 2012; 张泽明等,



Fig.1 Simplified geologic map of eastern Himalayan syntaxis

2019).南迦巴瓦峰区域还出露一套由变质沉积岩原 地部分熔融产生的重熔花岗岩.部分熔融发生时间 范围为14~3 Ma,其中在8 Ma左右部分熔融规模 达到峰值(Burg et al., 1998; Booth et al., 2009; Tu et al., 2016). 这一部分熔融事件是该区域快速地壳 隆升剥露,而诱发的地壳减压部分熔融事件(Booth et al., 2009; Tu et al., 2016). 较年轻的高级变质岩 以及年轻重熔花岗岩的出露表明,南迦巴瓦峰区域 经历强烈挤压造山作用,并且11~8 Ma以来经历快 速地壳隆升剥露过程.

1.2 断裂构造

东喜马拉雅构造结主要以3条断裂为边界(图 1).西部边界是北东走向东久一米林断裂,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,糜棱岩中拖曳构造形迹反映其具有水平方 向左旋走滑运动学特征(Burg et al., 1998; Ding et al., 2001; Zhang et al., 2004). 东部边界为北东走向 阿尼桥断裂,该断裂近直立略向东倾,矿物拉伸线 理等证据表明该断裂以垂向运动为主,表现为正断 性质,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 边界为北西西一南东东走向嘉黎断裂,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 尼桥断裂带早期走滑活动发生在23 Ma前后,后期 正断活动发生在7~6 Ma;东久米林断裂走滑活动 主要分为62~59、~23和~13 Ma 三个时段(Zhang et al., 2004); 嘉黎断裂带走滑活动时限为18~12 Ma(Lee et al., 2003). 在东喜马拉雅构造结内部发 育一系列北西、北西西走向脆韧性逆冲断裂带,由 南至北依次为那木拉断裂带、南迦巴瓦峰断裂带、 雅江峡谷断裂带(图1)(Ding et al., 2001).大量北东 和北西走向脆性高角度正断层在南迦巴瓦峰区域 广泛发育.这些正断层从8~7 Ma开始活动,靠近南 迦巴瓦峰的一盘相对升高.东喜马拉雅构造结地区 断裂构造,早期以走滑断层活动为主,晚期(约8 Ma 以来)以正断层活动为主,并可能一直持续活动到 现在.

1.3 地貌形态与地表作用

东喜马拉雅构造结最显著地貌特征就是雅鲁 藏布江的强烈下切以及马蹄型大拐弯.在东喜马拉 雅构造结西侧,雅鲁藏布江为正东流向,并目具有 宽阔"U"型河谷和低河流梯度的特征;在东侧,雅鲁 藏布江开始强烈下切,并且流向急剧向南偏转,河 流呈现狭窄"V"型河谷形态并具有较大的河流梯 度,形成著名的雅鲁藏布江大峡谷.东喜马拉雅构 造结还是藏东南地区地貌海拔高差最大的区域,最 大海拔高差出现在南迦巴瓦峰区域,约12 km 水平 距离内地貌海拔高差达到约5km.由于印度洋季风 影响及雅江峡谷"水汽通道"作用,东喜马拉雅构造 结是世界上降雨量最大的区域之一,最大年降水量 可达4000mm以上,降雨季节性强,降雨强度达 0.02 mm/hr(Anders et al., 2006). 受印度洋季风影 响,东喜马拉雅构造结发育独特海洋性冰川.海洋 性冰川是海洋性气候条件影响下发育的冰川,由于 气候湿润、降雪量大且雪线较低,海洋性冰川的收 入多支出也多,活动性强.东喜马拉雅构造结内海 洋性冰川主要在南迦巴瓦峰区域发育(施雅风等, 2006).

1.4 热年代学研究

东喜马拉雅构造结已报道热年代学研究方法 主要包括⁴⁰Ar/³⁹Ar法、裂变径迹法以及(U-Th)/He 方法.空间上,东喜马拉雅构造结内部热年代学年 龄范围为0.5~8.0 Ma,这一年龄范围明显年轻于其 周边地区以及喜马拉雅造山带其他区域.根据这一 年轻热年代学年龄范围计算出东喜马拉雅构造结 内部, 地壳隆升剥露速率为4~5 km/Ma(Burg et al., 1998; Ding et al., 2001; Seward and Burg, 2008; Stewart et al., 2008; Zeitler et al., 2014; Gong et al., 2015; Tu et al., 2015). 东喜马拉雅构造结内 部热年代学年龄呈现一个越靠近南迦巴瓦峰地区 年龄越年轻大致趋势(Gong et al., 2015).这些热年 代学年龄表明东构造结的地表剥蚀速率要明显高 于其周边区域,并且南迦巴瓦峰区域剥蚀速率最快. 时间上,东喜马拉雅构造结内部0.5~8.0 Ma的热年 代学年龄范围表明东喜马拉雅构造结内部可能 从约8Ma开始快速冷却.

2 样品采集

笔者在雅鲁藏布江下游墨脱县背崩乡至达木



图 2 雅鲁藏布江墨脱段流域数字地貌及采样位置 Fig.2 Digital geomorphological map of the Yarlung Tsangpo River Motuo Section and sample locations

表1 样品信息及年龄值

Table 1Sample information and chronology data									
样品名	经度	经度 纬度		岩性	黑云母 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar 坪年龄(Ma)	2σ误差 (Ma)	MSWD值		
MT-01	E95.186°	N29.254°	681	黑云角闪花岗岩	20.84	0.61	0.36		
MT-02	E95.251°	N29.278°	727	黑云角闪花岗 闪长岩	17.94	0.57	0.17		
MT-03	E95.286°	N29.302°	764	黑云角闪花岗 闪长岩	20.00	1.10	0.11		
MT-05	E95.343°	N29.351°	750	黑云母闪长岩	20.16	0.33	0.64		
MT-06	E95.355°	N29.369°	790	花岗闪长岩	24.04	0.62	0.34		
MT-09	E95.448°	N29.502°	957	片麻岩	11.25	0.31	0.32		
MT-10	E95.458°	N29.545°	1 177	片麻岩	15.62	0.20	0.10		
MT-11	E95.473°	N29.594°	1 440	闪长岩	14.35	0.47	0.13		
MT-12-1	E95.483°	N29.645°	1 859	片麻岩	14.52	0.67	0.13		
MT-12-2	E95.483°	N29.645°	1 859	片麻岩	13.46	0.45	0.12		



图 3 野外露头照片 Fig.3 Photographs of field outcrops

a.南段雅鲁藏布江主河段河谷样品 MT-01采集处弱变形花岗岩;b.南段雅鲁藏布江主河段河谷花岗岩中发育北北东走向近直立脆性破裂 面;c.北段雅鲁藏布江支流河谷样品 MT-12采集处片麻岩,片麻理产状为北西西走向近直立;d.北段雅鲁藏布江支流河谷片麻岩中发育北 西西走向近直立脆性破裂面;图中白色宽箭头及其内数字代表照片拍摄方向;红色线段及白色长方形内数字代表破裂面位置及产状

乡段河谷,以及达木乡以北支流河谷采集10块岩石 样品(图2).采集样品位置垂向海拔高度范围为 681~1859m,水平距离约为60km.各样品采样位 置、经纬度及岩性见表1.10块样品中MT12-1和 MT-12-2是重复验证样品,来自同一处岩石露头. 采集自南段雅鲁藏布江主河段河谷的5块样品都为 花岗岩或花岗闪长岩,属于中生代晚期至新生代早期侵入的冈底斯岩浆岩.岩浆岩变形较弱,部分发育北北东(约20°)走向近直立脆性破裂(图3a和3b).采集自北段雅鲁藏布江支流河谷的5块样品中1块为闪长岩,4块为片麻岩,属于拉萨地体元古代变质结晶基底.片麻理产状近直立,主要为北西西

(约290°)走向(图3c),部分发育北西西(约295°)走向近直立脆性破裂(图3d).

3 测试方法

本文对采集的10件岩石样品进行黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar测年,所有样品年龄测试都是笔者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年代学实验室进行.样品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.140~250 µm的矿物颗粒在去离子水中利用超声波进行清洗,并在干燥箱中进行干燥.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.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24h核辐照.核辐照参数(J值)利用辐照国际标准样品Bern4-Ms 氩同位素含量进行计算,该标准样品⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄为18.62±0.06 Ma(Baksi *et al.*,1996).

核辐照后样品在一双层坩埚可控温真空加热 系统中进行加热.每个样品包装重量大约为70 mg. 样品首先在800°C加热30 min,以去除矿物表面吸 附气体,这一加热步骤释放气体不进行测量.然后, 对样品进行温度在900~1500°C范围内由低到高 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 衰变常数为 5.543×10⁻¹⁰ a⁻¹ (Steiger and Jäger,1977).

4 年龄结果

10件样品测试黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄结果如图4 所示.所有样品都得出形态较好阶步升温年龄坪. 绝大多数样品主要释气温阶放射性成因氩比例,达 到80%甚至90%以上,阶步升温坪年龄能较准确 代表矿物冷却年龄.两个重复验证样品年龄结果在 误差范围内相一致,证明年龄测试的可重复性.样 品年龄范围为11.25±0.31~24.04±0.62 Ma(表1, 图4).年龄结果呈现南北两段分布特征.南段雅鲁 藏布江主河道5块样品年龄相对较老,为17.94~ 24.04 Ma;北段雅鲁藏布江支流5块样品年龄相对 较年轻,为11.25~15.62 Ma.

5 年龄模拟计算解译

黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar法是热年代学研究方法的一 种,其得出的年龄值,代表样品从黑云母40Ar/39Ar 封闭温度(约330°C)(Harrison et al., 1985)冷却至 地表温度所经历时间.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 确地解译热年代学年龄蕴含地质信息,笔者利用 "Pecube"软件对所获得黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar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 et al., 2012). 该软件需要用户输入岩石热容值、导热率、运动速 率等参数并设定温度场边界值,然后根据三维热传 导公式求解出相应地壳空间温度场分布及其随时 间变化.该软件求解在一个三维空间有限元网格中 进行.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各种热年代学年龄值. 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 龄进行定量解译.

笔者利用"Pecube"软件对热年代学数据进行 了8次模拟.8次模拟中大部分模拟参数完全一致. 地温场特征方面, Craw et al. (2005)利用流体包裹 体中CO₂-H₂O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°C地温等温面大致位 于海平面附近.根据这一计算结果,模型底部(海平 面以下 25 km)温度被固定为1 150°C,模型顶面温 度固定为0°C,岩石产热率被固定为6.5°C/Ma,岩 石热扩散系数被设定为25 km²/Ma.模拟过程模拟 40 Ma以前到现在整个过程.模拟过程中使用的地 表面形态特征来自90m精度数字高程数据,地表面 范围为东经95.1°~95.6°,北纬29.2°~29.7°.整个模 拟过程地表面形态固定不变.模拟过程都在61× 61×50三维有限元网格中进行(图5).水平方向上, 有限单元网格分辨率是900 m,即单个有限元单元 宽度代表实际水平方向上900m距离;垂直方向上 分辨率为500m.模拟过程中唯一变化模拟参数是 地壳岩石隆升剥露速率(V_E),这一参数代表岩石垂







图 5 模拟计算有限元模型 Fig.5 The finite element model of simulation

表2 样品实测年龄与模拟计算年龄	
------------------	--

样品名	实测年龄 (Ma)	模拟年龄(Ma)							最佳隆升	
		$V_{\rm E} = 0.2$	$V_{\rm E} = 0.25$	$V_{\rm E} = 0.3$	$V_{\rm E} \!\!=\! 0.35$	$V_{\rm E} \!\!=\! 0.4$	$V_{\rm E}\!\!=\!\!0.45$	$V_{\rm E}\!\!=\!\!0.5$	$V_{\rm E} = 0.55$	剥露速率
		km/Ma	km/Ma	km/Ma	km/Ma	km/Ma	km/Ma	km/Ma	km/Ma	(km/Ma)
MT-01	20.84	31.57	25.05	20.66	17.51	15.14	13.28	11.80	10.58	0.30
MT-02	17.94	30.29	24.02	19.81	16.78	14.49	12.71	11.28	10.10	0.33
MT-03	20	30.24	23.98	19.77	16.75	14.47	12.69	11.26	10.08	0.30
MT-05	20.16	30.27	24.01	19.79	16.76	14.48	12.70	11.27	10.09	0.30
MT-06	24.04	30.90	24.51	20.21	17.12	14.80	12.98	11.52	10.32	0.25
MT-09	11.25	30.92	24.52	20.22	17.13	14.80	12.98	11.52	10.32	0.51
MT-10	15.62	31.16	24.70	20.37	17.25	14.90	13.06	11.59	10.38	0.40
MT-11	14.35	31.64	25.08	20.67	17.50	15.11	13.24	11.75	10.52	0.42
MT-12-1	14.52	33.61	26.65	21.97	18.60	16.07	14.09	12.50	11.20	0.45
MT-12-2	13.46	33.61	26.65	21.97	18.60	16.07	14.09	12.50	11.20	0.45

向运移速率. 模拟过程中 $V_{\rm E}$ 变化范围为 0.2~ 0.55 km/Ma.

模拟结果见表2和图6.根据模拟年龄与实测年 龄吻合程度,之后再进行多次模拟计算过程,选取 出每个样品所对应最佳隆升剥露速率(表2),即该 隆升剥露速率计算出模拟年龄与样品实测年龄吻 合最好.南段雅鲁藏布江主河道5个样品对应最佳 隆升剥露速率较低,为0.25~0.33 km/Ma,北段雅 鲁藏布江支流5块样品对应最佳隆升剥露速率相对 较高,为0.40~0.51 km/Ma(图6). 年龄(Ma)





6 讨论

6.1 热年代学年龄代表意义

本文样品采集剖面,南段为花岗岩、花岗闪长 岩,属于冈底斯岩浆岩.冈底斯岩浆岩岩浆侵入活 动主要发生在中生代晚期至新生代早期(Yin and Harrison, 2000; Wen *et al.*, 2008).北段主要为片麻 岩,属于拉萨地体元古代变质结晶基底,其高级变 质作用主要发生在元古代(Yin and Harrison, 2000; Zeitler *et al.*, 2014).样品采集剖面南北段晚期构造 变形情况基本一致.在花岗岩或片麻岩中主要发育 北北东或北西西走向近直立脆性破裂面(图 3b, 3d). 本文测试获得黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄为新生代晚期, 小于岩浆岩侵入年龄以及变质岩变质年龄.这些黑 云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄应该属于拉萨地体隆升剥露年 龄.代表被冈底斯岩浆岩侵入后的拉萨地体古老变 质基底,新生代晚期持续隆升剥露过程.

6.2 东喜马拉雅构造结内外年代学差异

本文研究区域,雅鲁藏布江下游墨脱段,以阿 尼桥断裂为界,与西侧的东喜马拉雅构造结核心南 迦巴瓦峰区域相分隔.雅鲁藏布江下游墨脱段样品 黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄范围为11~24 Ma,大于研究 背景中介绍东喜马拉雅构造结内部0.5~8.0 Ma年 龄范围;雅鲁藏布江下游墨脱段平均地壳隆升剥露 速率为0.25~0.51 km/Ma,小于东喜马拉雅构造结 内部4~5 km/Ma平均隆升剥露速率.这一特征与 前人观点基本一致,即快速地壳隆升剥露集中发生 在阿尼桥断裂以西东喜马拉雅构造结核心区域;雅 鲁藏布江下游墨脱段地壳隆升活动相对较弱,相对 较稳定.

6.3 逆冲断层活动

雅鲁藏布江下游墨脱段黑云母40Ar/39Ar年龄

及其模拟计算隆升剥露速率存在明显南北分段特征.大致以达木乡为界,南段主河道区域,年龄为 18~24 Ma,隆升剥露速率为0.25~0.33 km/Ma;北 段支流河道区域,年龄为11~15 Ma,隆升剥露速率 为0.40~0.51 km/Ma.北段平均地壳隆升速率比南 段高出约0.2 km/Ma(图6).这一由南向北地壳隆升 速率的突变具有什么地质意义?

如上文研究背景所述,东喜马拉雅构造结内部 存在一系列北西、北西西走向高角度逆冲断层,包 括那木拉逆冲断层、雅江峡谷逆冲断层等(图1).这 一系列逆冲断层运动特征都是断层北盘逆冲到南 盘之上(Burg et al., 1998; Ding et al., 2001; Zhang et al., 2004; Zeitler et al., 2014). 这些逆冲断层共同 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). 之前所有研究都认为这些北西、北西 西走向逆冲断层只在东喜马拉雅构结内部发育,在 东喜马拉雅构结东侧,雅鲁藏布江下游墨脱地区这 一系列逆冲断层不发育.而本文揭示的雅鲁藏布江 下游墨脱段南北地壳隆升速率差异,与该系列逆冲 断层运动特征相吻合.断层北盘仰冲到南盘之上, 北盘相对向上运移,北盘地壳垂向剥露隆升速率更 大.隆升剥露速率突变的边界达木乡,正好位于雅 江峡谷逆冲断层向东延长线区域.因此,笔者推测 在达木乡区域,可能存在一条北西西走向略向北倾 逆冲断层.该断层是雅江峡谷逆冲断层向东延伸 (图1).正因为这一逆冲断层的活动,断层南北两侧 地壳隆升剥露速率和热年代学年龄存在差异.

6.4 东喜马拉雅构造结演化

目前,关于东喜马拉雅构结地区构造演化模 式,主要有两种观点:第一种是水平挤入模式(Burg et al., 1998; Zhang et al., 2004; Seward and Burg, 2008; King et al., 2016),认为喜马拉雅地体通过阿 尼桥断裂和东久米林两条边界断裂水平走滑运动, 挤入拉萨地体,在挤压碰撞前缘形成一系列北西、 北西西走向逆冲断裂;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,发育一系列北西、北西西走 向逆冲断裂.由于压力增加,深部形成高压麻粒岩. 后期因为褶皱作用或是地表剥蚀作用影响,东喜马 拉雅构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,并且压力快速降低 导致形成年轻重熔花岗岩.Ding et al.(2001)认为上述两种模型是东喜马拉雅构结实际地质演化过程两个端元模型.

本文通过热年代学数据计算地壳隆升速率特 征表明,雅鲁藏布江下游墨脱段可能也存在与东喜 马拉雅构结内部相同的北西、北西西走向逆冲断裂 活动.但是雅鲁藏布江下游墨脱段平均地壳隆升剥 露速率又明显小于东喜马拉雅构结内部.这一特征 与上述第二种演化模式更加吻合.早期(约8 Ma以 前)喜马拉雅地体持续俯冲到拉萨地体之下,北西、 北西西走向逆冲断裂活动在东喜马拉雅构造结内 部及其东侧区域都在持续进行(图 7a 和 7b).晚期 (约8 Ma以来)东喜马拉雅构结内部发生地壳快速 隆升剥露,隆升剥露速率远大于其东侧雅鲁藏布江 下游区域,二者之间通过阿尼桥断裂正断层活动进 行调节(图 7c~7f).

关于东喜马拉雅构造结约8 Ma以来快速隆升 剥露原因,已有研究大致可以分为两类观点.一类 观点认为河流下切侵蚀、冰川剥蚀等地表作用,诱 发东喜马拉雅构造结快速隆升剥露.Zeitler et al. (2001)基于对东、西构造结研究提出"构造瘤"模 式.该模式认为在东、西喜马拉雅构造结地区,大型 河流强烈下切导致快速地表剥蚀作用,使得地壳内 应力快速降低,引起地壳深部热的、偏塑性物质向 上运移,最终导致高级变质岩、深熔花岗岩的出露 及年轻热年代学年龄.Zeitler et al.(2014)根据喜马 拉雅构造结热年代学年龄综合研究进一步认为,东 喜马拉雅构造结地区雅鲁藏布江10 Ma左右发生的 河流袭夺事件是雅鲁藏布江快速下切、地壳快速隆 升剥露"构造瘤"模式的触发因素.Tu et al.(2015) 根据东喜马拉雅构造结核心南迦巴瓦峰地区剖面 热年代学研究结果认为,强烈冰川剥蚀作用可能改 变地壳浅部应力状态,最终诱发南迦巴瓦峰地区快 速隆升剥露.另一类观点认为喜马拉雅地体挤入, 产生一系列逆冲断层等构造活动,使得地壳隆升; 即构造活动主导东喜马拉雅构造结演化过程(Burg et al., 1998; Zhang et al., 2004; Wang et al., 2014; King et al., 2016; Yang et al., 2018).

本文研究表明,与喜马拉雅地体向拉萨地体俯 冲过程相关的逆冲断层活动,不仅在阿尼桥断层西 侧,东喜马拉雅构造结内部区域发育;在阿尼桥断 裂东侧雅鲁藏布江下游墨脱段也可能发育.而阿尼 >8 Ma

(b)

NE

A

(a)

拉萨地体





图7 东喜马拉雅构造结演化模式

Fig.7 Cartoon figures of the eastern Himalayan syntaxis tectonic evolution

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 Ma以来水平面大地构造框架示意图; d~f.8 Ma以 来垂向剖面大地构造框架示意图;HP.含高压麻粒岩透镜体高级变质杂岩;YCF.雅江峡谷逆冲断裂带;NMLF.那木拉逆冲断裂带;AN-QF.阿尼桥正断层

桥断裂西部地壳隆升剥露速率,要远高于东侧.因 此,东喜马拉雅构造结快速地壳隆升剥露过程,应 该不是完全由逆冲断层活动所主导.河流袭夺、冰 川剥蚀等地表作用应该也是诱发因素之一.在局部 区域(如南迦巴瓦峰区域),地表剥蚀作用还可能是 诱发快速地壳隆升主要因素.

结论 7

(1)东喜马拉雅构造结东侧雅鲁藏布江墨脱 段,黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄范围为11.25~24.04 Ma, 模拟计算获得该区域地壳隆升剥露速率范围为 0.25~0.51 km/Ma.(2)这一隆升剥露速率明显小于

东喜马拉雅构造结内部区域.与东喜马拉雅构造结 内部相比,雅鲁藏布江下游墨脱段为一地壳降升剥 露活动相对较弱区域.(3)雅鲁藏布江墨脱段地壳隆 升剥露速率存在明显南北差异,北段隆升剥露速率 高出约0.2 km/Ma.可能是一北西走向逆冲断层活 动导致上述隆升剥露速率差异.该逆冲断层可能是 东喜马拉雅构造结内部,雅江峡谷逆冲断层向东延 伸部分.与喜马拉雅地体向拉萨地体俯冲过程相关 的逆冲断层活动,不仅在东喜马拉雅构造结内部区 域发育;在其东侧雅鲁藏布江下游墨脱段也可能 发育.

致谢:感谢审稿人对本文提出的宝贵意见和 建议.

References

- Anders, A.M., Roe, G.H., Hallet, B., et al., 2006. Spatial Patterns of Precipitation and Topography in the Himalaya. *Special Papers-Geological Society of America*, 398:39– 54. https://doi.org/10.1130/2006.2398(03)
- Baksi, A.K., Archibald, D.A., Farrar, E., 1996.Intercalibration of ⁴⁰Ar/³⁹Ar Dating Standards. *Chemical Geology*, 129 (3-4): 307-324. https://doi. org/10.1016/0009 - 2541 (95)00154-9
- Beaumont, C., Jamieson, R.A., Nguyen, M.H., et al., 2001.Himalayan Tectonics Explained by Extrusion of a Low -Viscosity Crustal Channel Coupled to Focused Surface Denudation. *Nature*, 414: 738-742. https://doi.org/ 10.1038/414738a
- Booth, A.L., Chamberlain, C.P., Kidd, W.S.F., et al., 2009. Constraints on the Metamorphic Evolution of the Eastern Himalayan Syntaxis from Geochronologic and Petrologic Studies of Namche Barwa. *Geological Society of America Bulletin*, 121(3-4):385-407.https://doi.org/ 10.1130/b26041.1
- Bracciali, L., Najman, Y., Parrish, R.R., et al., 2015. The Brahmaputra Tale of Tectonics and Erosion: Early Miocene River Capture in the Eastern Himalaya. *Earth and Planetary Science Letters*, 415: 25-37. https://doi. org/ 10.1016/j.epsl.2015.01.022
- 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. *Tectonophysics*, 524-525: 1-28. https://doi. org/10.1016/j. tecto.2011.12.035
- Burg, J. P., Nievergelt, P., Oberli, F., et al., 1998. The Namche Barwa Syntaxis: Evidence for Exhumation Related to Compressional Crustal Folding. *Journal of Asian Earth Sciences*, 16(2-3): 239-252. https://doi.org/ 10.1016/s0743-9547(98)00002-6
- 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. *Journal of Metamorphic Geology*, 23(9): 829-845. https://doi. org/10.1111/j. 1525 -1314.2005.00612.x
- Ding, L., Zhong, D.L., 1999. High Pressure Granulite Facies Metamorphism Characteristics and Tectonic Geological Significance in the Namche Barwa Region Tibet. 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). Earth and Planetary Science Letters, 192(3):423-438.https://doi.org/10.1016/ s0012-821x(01)00463-0

- Gong, J.F., Ji, J.Q., Zhou, J., et al., 2015. Late Miocene Thermal Evolution of the Eastern Himalayan Syntaxis as Constrained by Biotite ⁴⁰Ar/³⁹Ar Thermochronology. *The Journal of Geology*, 123(4): 369-384. https://doi.org/ 10.1086/682951
- 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. *Geology*, 48 (12):1139-1143.https://doi.org/10.1130/g47720.1
- Harrison, T.M., Duncan, I., McDougall, I., 1985. Diffusion of ⁴⁰Ar in Biotite: Temperature, Pressure and Compositional Effects. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(11): 2461-2468. https://doi. org/10.1016/0016-7037(85) 90246-7
- King, G.E., Herman, F., Guralnik, B., 2016. Northward Migration of the Eastern Himalayan Syntaxis Revealed by OSL Thermochronometry. *Science*, 353(6301):800-804. https://doi.org/10.1126/science.aaf2637
- Lee, H.Y., Chung, S.L., Wang, J.R., et al., 2003. Miocene Jiali Faulting and Its Implications for Tibetan Tectonic Evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 205(3-4): 185-194. https://doi. org/10.1016/s0012-821x(02) 01040-3
- Molnar, P., England, P., 1990. Late Cenozoic Uplift of Mountain Ranges and Global Climate Change: Chicken or Egg? *Nature*, 346: 29-34. https://doi. org/10.1038/ 346029a0
- Mo, X. X., 2019. Magmatism and Deep Geological Process. *Earth Science*, 44(5): 1487-1493(in Chinese with English abatract).https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.972
- Raymo, M. E., Ruddiman, W. F., 1992. Tectonic Forcing of Late Cenozoic Climate. *Nature*, 359: 117-122. https:// doi.org/10.1038/359117a0
- Seward, D., Burg, J.P., 2008. Growth of the Namche Barwa Syntaxis and Associated Evolution of the Tsangpo Gorge: Constraints from Structural and Thermochronological Data. *Tectonophysics*, 451(1-4): 282-289. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.11.057
- Shi, Y.F., Zheng, B.X., Su, Z., 2006.Glaciations, Glacial and Interglacial Cycles and Environment Changes in Quaternary.In:Shi, Y.F., Cui, Z.J., Su, Z., eds., The Quaternary Glaciations and Environmental Variations in China. Hebei Science and Technology Publishing House, Shijiazhuang(in Chinese).

Steiger, R.H., Jäger, E., 1977. Subcommission on Geochronol-

ogy:Convention on the Use of Decay Constants in Geoand Cosmochronology.*Earth and Planetary Science Letters*, 36(3):359-362.https://doi.org/10.1016/0012-821s (77)90060-7

- Stewart, R.J., Hallet, B., Zeitler, P.K., et al., 2008.Brahmaputra Sediment Flux Dominated by Highly Localized Rapid Erosion from the Easternmost Himalaya.*Geology*, 36(9): 711.https://doi.org/10.1130/g24890a.1
- Tu, J.Y., Ji, J.Q., Gong, J.F., et al., 2016.Zircon U-Pb Dating Constraints on the Crustal Melting Event around 8 Ma in the Eastern Himalayan Syntaxis. *International Geology Review*, 58(1): 58-70. https://doi. org/10.1080/ 00206814.2015.1056255
- 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. Journal of Asian Earth Sciences, 105: 223-233. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.03.035
- Wang, P., Scherler, D., Liu, Z.J., et al., 2014. Tectonic Control of Yarlung Tsangpo Gorge Revealed by a Buried Canyon in Southern Tibet. Science, 346(6212):978-981. https://doi.org/10.1126/science.1259041
- 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. *Chemical Geology*, 252(3-4): 191-201. https://doi. org/10.1016/j.chemgeo.2008.03.003
- Xu, Q.Q., Ji, J.Q., Zhong, D.L., et al., 2020.Post-Glacial Entrenchment and Knickpoint Migration of the Yarlung Tsangpo Gorge, Southeastern Tibetan Plateau. *Journal* of Asian Earth Sciences, 195: 104337. https://doi.org/ 10.1016/j.jseaes.2020.104337
- 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. *Gondwana Research*, 21(1): 19-36. https://doi. org/10.1016/j.gr.2011.06.010
- Yang, R., Herman, F., Fellin, M.G., et al., 2018. Exhumation and Topographic Evolution of the Namche Barwa Syntaxis, Eastern Himalaya. *Tectonophysics*, 722: 43-52. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.026
- Yin, A., Harrison, T.M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28(1): 211-280. https://doi.org/ 10.1146/annurev.earth.28.1.211
- Zeitler, P.K., Meltzer, A.S., Brown, L., et al., 2014. Tectonics and Topographic Evolution of Namche Barwa and the Easternmost Lhasa Block, Tibet. *Geological Society of*

America Special Papers, 507(23). https://doi. org/ 10.1130/2014.2507(02)

- Zeitler, P.K., Meltzer, A.S., Koons, P.O., et al., 2001. Erosion, Himalayan Geodynamics, and the Geomorphology of Metamorphism.*GSA Today*, 11(1):4-9.
- Zhang, J.J., Ji, J.Q., Zhong, D.L., et al., 2004. Structural Pattern of Eastern Himalayan Syntaxis in Namjagbarwa and Its Formation Process. Science in China: Earth Sciences, 47(2):138-150.https://doi.org/10.1360/02yd0042
- Zhang, P.Z., Molnar, P., Downs, W.R., 2001. Increased Sedimentation Rates and Grain Sizes 2–4 Myr ago Due to the Influence of Climate Change on Erosion Rates. Nature, 410:891–897. https://doi.org/10.1038/35073504
- 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. *Gondwana Research*, 21(1):123-137. https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.02.002
- Zhang, Z.G., Liu, Y.H., Wang, T.W., et al., 1992. Geology of the Namche Barwa Region. Science Press, Beijing(in Chinese).
- Zhang, Z. M., Ding, H. X., Dong, X., et al., 2019. Two Contrasting Eclogite Types in the Himalayan Orogen and Differential Subduction of Indian Continent. *Earth Science*, 44(5): 1602-1619(in Chinese with English abatract).
- Zhong, D.L., Ding, L., 1995. High Pressure Granulite Found in the Namche Barwa Region Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 40(14):1343(in Chinese).

附中文参考文献

- 丁林,钟大赉,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.中国科学(D辑),29(5): 385-397.
- 莫宣学,2019. 岩浆作用与地球深部过程. 地球科学,44(5): 1487-1493.
- 施雅风,郑本兴,苏珍,2006.第四纪冰川、冰期间冰期旋回与 环境变化.见:施雅风,崔之久,苏珍,编.中国第四纪冰 川与环境变化.石家庄:河北科学技术出版社.
- 章振根,刘玉海,王天武,等,1992.南迦巴瓦峰地区地质.北 京:科学出版社.
- 张泽明,丁慧霞,董昕,等,2019.喜马拉雅造山带两种不同类型榴辉岩与印度大陆差异性俯冲.地球科学,44(5): 1602-1619.
- 钟大赉,丁林,1995.西藏南迦巴瓦峰地区发现高压麻粒岩. 科学通报,40(14):1343.